



HAL
open science

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)

Jérôme Lejot

► To cite this version:

Jérôme Lejot. 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). Géographie. Université lumière Lyon 2, 2008. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-04279020⟩

HAL Id: tel-04279020

<https://hal.science/tel-04279020v1>

Submitted on 16 Jul 2024

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.



HAL Authorization

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 présentée par

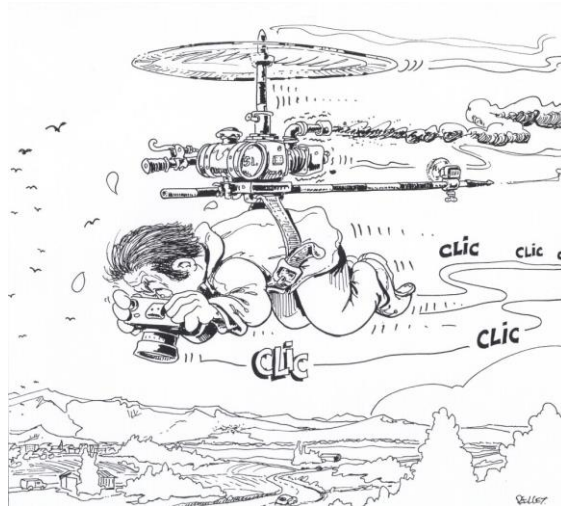
Jérôme Lejot

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Lumière Lyon 2
Discipline : Géographie, Aménagement et Urbanisme

Jury :

Yann Callot	Professeur des Universités, Université Lyon 2	Examineur
Christophe Delacourt	Professeur des Universités, Université de Brest	Directeur
David Gilvear	Professeur des Universités, Université de Stirling	Examineur
Laurence Hubert-Moy	Professeure des Universités, Université Rennes 2	Rapporteur
Catherine Méring	Professeure des Universités, Université Paris 7	Rapporteur
Hervé Piégay	Directeur de Recherche, CNRS UMR 5600	Directeur

Soutenue le 06 juin 2008



Après...
62 km parcourus
1374 balises posées
416 relevés bathymétriques
807 relevés topographiques
... plus tard

Remerciements

La thèse est un travail de recherche résumant la position d'un auteur sur un sujet donné. Elle aura surtout été pour moi une expérience humaine riche en rencontres et un travail d'équipe au quotidien.

Il m'est agréable de commencer par remercier **Hervé Piégay**, directeur de recherche au CNRS, qui a bien voulu encadrer cette thèse. Il m'a appris la méthode et la rigueur scientifique d'une recherche. Au terme de ce travail, j'espère les avoir au moins touché du bout des doigts. Merci pour ses précieux conseils, son enthousiasme communicatif à chaque nouvelle idée débouchant sur de nouvelles pistes de recherche (difficiles à suivre parfois car les idées sont nombreuses).

Je tiens également à remercier **Christophe Delacourt**, professeur des universités, qui a co-dirigé ce travail de recherche (il en fallait bien au moins deux !). Merci de m'avoir transmis le sens de la rigueur, de m'avoir initié aux obscurs rouages de la programmation IDL et de m'avoir encouragé (même depuis Brest).

Je souhaite remercier **Yann Callot**, professeur des universités, d'avoir été durant la première année de cette thèse mon encadrant officiel et plus largement de m'avoir suivi et conseillé depuis ma maîtrise. Merci Yann de ton amitié.

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans le soutien financier de plusieurs organismes : la **Compagnie Nationale du Rhône**, l'**Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse** et le **Syndicat Intercommunal de la Basse Vallée de l'Ain**. Que leurs représentants soient chaleureusement remerciés de la confiance qu'ils nous ont accordée concernant le suivi de deux programmes de restauration par imagerie drone : Programme de recharge sédimentaire de la rivière Ain et suivi scientifique du programme décennal de restauration écologique et hydraulique du Rhône.

Merci également à **Jacques Comby** pour m'avoir permis l'accès aux données météo-France.

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le concours précieux d'une équipe de choc : la *drone team*. Un grand merci à **Thierry Fournier**, le pilote du drone, le MacGiver du Cemagref, l'homme de toutes les situations désespérées, **Marie-Laure Trémélo**, la reine des co-pilotes et maintenant du DGPS, sans oublier les nouveaux membres de l'équipe, **Kristell Michel** et **Vincent Geartner** : courage, vous saurez bientôt piloter le drone les yeux fermés !

C'est avec un grand plaisir que je tiens à remercier quelques unes des forces vives de l'UMR 5600 : **Marie-Christine Michel** (notre grande tata à tous) une gestionnaire hors pair, **André Buisson** le relecteur officieux de l'UMR 5600 (merci pour les relectures

attentives), **Marie-Laure** la relectrice officielle des cartes et supports en tout genre et les deux petits nouveaux, **Jacques Imbernon** et **Patrick Gilbert**.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance vis à vis des personnes qui m'ont aidé, soutenu, supporté durant ce long chemin.

Tu m'avais réservé un paragraphe pour ta thèse, c'est à mon tour d'en faire autant. **Anne-Julia**, merci pour tous les bons moments passés ensemble, même lorsqu'il fallait creuser, déplacer, compter puis remettre tes maudits galets (compter des galets, quelle drôle d'idée...). Mais je retiendrai surtout nos fous rires partagés, tes surprenantes transitions verbales dont toi seule à le secret, nos conversations hautement scientifiques dont certains passages sont devenus cultes « lesgaletslesgaletslesgalets..... ». Enfin, si jamais on ne perce pas dans le métier, je pense que la richesse de notre registre musical (pop., sixties, campagnard etc.) et notre façon de les interpréter (en canon, à capella etc.) fera pâlir d'envie n'importe quel producteur digne de ce nom.

L'un ne va pas sans l'autre, un grand merci à toi **Simon** pour tes conseils avisés que ce soit professionnellement ou personnellement, de m'avoir écouté durant les moments difficiles. C'est quand tu veux pour aller courir !

Je n'oublie évidemment pas tous mes autres compagnons dont voici la liste : **Marylise** (courage également pour la suite, tu ne peux plus faire marche arrière !), **Loïc** (idem, et j'essaierai de ne pas mettre de fromage lors de mon pot), **Elise** (pour toi, il est encore temps de renoncer...), **Adrien** (courage pour tes futures campagnes de terrain), **Monika** (je pense que tu es devenue maintenant la plus française des slovaques), **Bruce** (à quand le prochain repas canadien ? et c'est maintenant quand tu veux pour une petite soirée au Palais de la Bière), **Kristell** (nos conversations ont sûrement dû faire avancer le domaine de la télédétection et nos échanges de mails sont toujours pour moi, une source d'étonnement...), **Anne** (là haut dans tes montagnes...), **Julien**, **Magalie**, **Rube**, **Jules**, **Boubou**, **Doudou** et tous les membres de l'équipe BioGéo (**Paul Arnould**, **Hervé Parmentier**, **Sylviane Tabarly**, **Clément Dodane**, **Corina Calugaru** etc.). D'avance, mille pardons pour ceux que j'aurais oubliés.

Enfin mes dernières pensées sont pour ma famille, mes parents, ma sœur, mes deux filles **Marie** et **Emmy**. Je tiens particulièrement à remercier **Emmy** de m'avoir tenu éveillé durant ces douze derniers mois afin, sans doute, de m'encourager à travailler la nuit. Et comme toujours, le meilleur est pour la fin. **Joséphine**, tu as maudit mille fois cette thèse et tu m'as supporté même dans les pires moments. Il est évident que je ne pourrai te rendre tout ce que tu m'as donné mais j'essaierai...

SOMMAIRE

Résumé / Abstract p. 7

Partie 1. Contexte scientifique p. 9

A. Le suivi des formes fluviales p. 11

B. Les contraintes de suivi des lits fluviaux et des habitats associés p. 23

Partie 2. Méthodes de restitution des formes fluviales p. 31

A. Apports de la télédétection p. 33

B. Les techniques de télédétection active p. 44

C. Les techniques de télédétection passive p. 46

D. Paramètres clefs des restitutions des processus fluviaux par télédétection p. 69

Partie 3. Acquisition et restitution des formes fluviales par imagerie à très haute résolution p. 77

A. Mise en œuvre du drone Pixy p. 79

B. Restitution des états de surfaces en 2D : la granulométrie des bancs de galets p. 104

C. Restitution des états de surfaces en 3D p. 115

D. Synthèse et discussion p. 140

Partie 4. Application de l'imagerie à très haute résolution pour le suivi des formes fluviales dans le cadre de programmes de restauration : basse vallée de l'Ain et Chautagne p. 151

A. Cadre géographique p. 153

B. Evolution de l'impact de la recharge sédimentaire sur les faciès alluviaux à partir d'images THR : exemple de la basse vallée de l'Ain p. 165

C. Evaluation des actions d'entretien et de restauration à partir d'images THR : exemple du RCC de Chautagne p. 192

Conclusion générale p. 220

Références bibliographiques p. 228

Liste des figures p. 235

Liste des tableaux p. 245

Annexes p. 247

Table des matières p. 251

RESUME

Au cours des vingt dernières années, de nombreuses actions de restauration physique ou écologique des cours d'eau ont été entreprises. Elles visent à atténuer les dégradations occasionnés par les aménagements réalisés principalement durant le 20^e siècle qui ont profondément modifié le mode d'occupation des bassins versants et le transfert des flux (chapitre 1). Le suivi des formes fluviales a été étudié dans le cadre de ces programmes de restauration principalement à partir de mesures de terrain. Avec le développement de l'imagerie à haute résolution acquise à partir de plates-formes maîtrisées par les opérateurs, de nouveaux enjeux méthodologiques émergent pour le suivi morphologique des rivières restaurées. L'imagerie de télédétection a ainsi été mise en œuvre dans le cadre de cette thèse car elle présente de grandes potentialités compte-tenu des avancées technologiques récentes en termes de résolution et de fréquence d'acquisitions (chapitre 2).

Ainsi, afin d'approfondir la connaissance des milieux fluviaux et de leur dynamique, l'enjeu actuel est d'accroître la résolution des images pour reconstruire la géométrie de rivières de plus petites tailles et de détecter les changements temporels avec un pas de temps plus court. Pour répondre à ces exigences, nous avons utilisé un drone, vecteur léger produisant des images à très haute résolution (chapitre 3). Nous avons développé des protocoles pour acquérir et exploiter les images et nous avons analysé les potentialités et les limites de ce nouvel outil. Ses capacités ont été également comparées à celles d'autres plates-formes existantes.

A partir des acquisitions produites, des tests de restitution en 2D et en 3D ont été menés pour caractériser l'occupation du sol, la granulométrie, la topographie et la bathymétrie du corridor ou du chenal (chapitre 3). Parmi les traitements appliqués, nous avons restitué la végétation terrestre et aquatique à partir de classifications pixel à pixel et orientées objet en fonction de la complexité et de l'imbrication des faciès abordés. La restitution des sédiments de bancs de galets a été effectuée par auto-corrélation spatiale (semi variance 2D). Les tests que nous avons menés à partir de missions réalisées à deux altitudes différentes ont révélé une meilleure corrélation (R^2 à 0,98) pour le vol à basse altitude mais sans pouvoir faire apparaître de structures spatiales cohérentes. Les restitutions en 3D de la topographie des surfaces émergées et immergées ont été menées par photogrammétrie et par modèle bathymétrique empirique. Malgré la précision altimétrique des MNT produits (de 5 à 20 cm), l'approche par photogrammétrie s'est révélée complexe à mettre en œuvre à grande échelle car peu de couples stéréoscopiques ont pu être obtenus. A partir des restitutions bathymétriques de chenaux et de bras morts, nous avons pu constater que les modèles ont produit des résultats très variables (R^2 de 0,59 à 0,98) car ils se sont révélés sensibles aux contextes d'acquisition des images et aux conditions physiques des milieux étudiés.

La mise en œuvre de ces traitements nous a permis d'établir un premier diagnostic des opérations réalisées sur l'Ain (lutte contre le déficit sédimentaire à partir de recharges artificielles), et sur le Haut-Rhône (facilitation des écoulements et reprise des sédiments, lutte contre les espèces invasives et amélioration du fonctionnement général des annexes fluviales) (chapitre 4).

Le suivi de la recharge sur l'Ain a révélé qu'une partie des sédiments réintroduits (22500 m³) dans le chenal a été remobilisée pendant les crues ($Q_{1,5}$) et sur des distances comprises entre 230 et 380 m. Nous avons pu observer que seuls les secteurs à l'aval immédiat des sites de réintroduction ont été affectés par celle-ci.

Le suivi des masses sédimentaires par DGPS d'un banc de galets entretenu annuellement par essartage a révélé une très faible modification de sa topographie. Les cartes de recouvrement végétal produites à partir des images drone ont principalement mis en évidence la forte prolifération de la renouée du Japon aux dépens des espèces locales. Ce constat démontre que les modalités d'essartage appliquées sur le banc de galets ne permettent pas, en l'état, de limiter la végétalisation des surfaces. Afin d'évaluer la durée de vie d'une île restaurée sur le Haut-Rhône, les restitutions bathymétriques ont mis en évidence l'existence d'un processus d'atterrissement et les cartes de végétation aquatique ont montré une colonisation saisonnière du plan d'eau.

Les investigations que nous avons menées sur l'Ain et la Chautagne nous ont permis d'identifier un certain nombre d'indicateurs pouvant être extraits des images et faire l'objet d'un suivi permettant d'évaluer l'effet de futures restaurations.

ABSTRACT

Over the last twenty years, numerous restoration measures have been implemented to address the physical and ecological degradation of rivers. Their overall goal has been to attenuate the adverse impacts of human modifications, primarily realized during the 20th century, that have profoundly altered the land use and the flow of water and sediment through the river networks (Chapter 1). Typically, the development of fluvial forms was studied as part these restoration programs based on field measurements. With the availability of high resolution imagery obtained from remote sensing platforms, however, new methodologies are emerging for the morphological survey of restored rivers. This thesis utilizes imagery obtained via remote sensing because of the utility offered by recent technological advances in terms of the resolution of the images and the frequency with which the images can be obtained (Chapter 2).

To advance the understanding of fluvial environments and their dynamics, current research is focused on increasing the resolution of images in order to reconstruct the geometry of smaller rivers and to detect topographical changes over shorter time intervals. To respond to these criteria, we used a light drone aircraft to obtain very high resolution images (Chapter 3). We developed the methodology to obtain and utilize the images, and we analysed the advantages and limitations of this new tool. Our configuration was also compared with other existing remote sensing platforms.

From the obtained imagery, 2D and 3D tests were carried out to characterise land surface cover, grain size distribution, topography, and the bathymetry of the flow corridor and the main channel (Chapter 3). We characterized the terrestrial and aquatic vegetation by alternately using a pixel-by-pixel or an oriented object classification scheme depending on the complexity and the imbrication of the surface in question. The identification of gravel sediment bars was done using a 2D semi-variance spatial autocorrelation. Tests were carried out at two different flight levels and a higher correlation ($R^2 = 0.98$) was obtained for the lower altitude flight, although spatial structure could not be established. A 3D digital terrain model for surfaces above and below the water surface was constructed using a photogrammetric technique and an empirical bathymetric model. In spite of the precision of the resulting DTM (between 5 and 20 cm), the photogrammetric technique proved to be difficult to implement on a large scale because few images suitable for stereoscopic analysis were obtained. The accuracy of the bathymetric models of channels and back channels were variable (R^2 from 0.59 to 0.98) and it was found that they were highly sensitive to the image acquisition context and the physical condition of the environment under study.

The application of these analysis techniques allowed us to assess implemented restoration strategies on the Ain River, where sediments were added in an effort to correct a net deficit, and on the Upper Rhone River, where flow improvements, sediment remobilisation efforts, measures to combat invasive species and other measures to improve the function of secondary channels were carried out (Chapter 4).

The analysis of sediment recharge on the Ain River showed that a proportion of the introduced sediments (22500 m³) were mobilised during floods (Q1.5) and were moved distances of 230 to 380 m. We observed that the sections immediately downstream of the recharge sites were affected by this sediment.

The analysis of sediment volume by DGPS on a sediment bar that was annually maintained by clearing the vegetation showed little net topographical change over the study period. The primary observation from maps of vegetation cover produced from images taken using the drone platform was the proliferation of the invasive Japanese knotweed at the expense of native species. This observation shows that the clearing techniques used on the gravel bar did not decrease its vegetative cover in any meaningful way. The lifetime of a restored back-channel on the Upper Rhone River was assessed from a bathymetric model, which documented the existence of sedimentation processes, and maps of aquatic vegetation, which showed a seasonal colonisation of the water surface.

The investigations on the Ain and Chautagne Rivers permitted the identification of a number of indicators that can be extracted from images and used to evaluate the effects of future restoration efforts.

Contexte scientifique

A. Le suivi des formes fluviales

1. Un enjeu actuel
2. Un hydrosystème profondément bouleversé
3. Des cours d'eau à restaurer
4. Du suivi à l'évaluation

B. Les contraintes de suivi des lits fluviaux et des habitats associés

1. Les paramètres de suivi : entre échelle spatiale et fréquence d'échantillonnage
2. L'évaluation : à la recherche d'indicateurs opérationnels
3. L'imagerie : une réponse aux contraintes de suivi des formes fluviales
4. Exemples de restauration à évaluer

Cette première partie pose les bases des réflexions que nous avons menées à la suite de l'analyse de la littérature scientifique relative au suivi des formes fluviales dans le cadre de projets de restauration.

Dans le premier chapitre, des retours d'expérience concernant le suivi des programmes de restaurations fluviales ont été recensés. Pour répondre aux dégradations occasionnées par les aménagements hydrauliques réalisés principalement au cours du 20^e siècle, de plus en plus de restaurations ont été engagées. Les nouvelles législations nationales et européennes favorisent ces actions dans la perspective d'un retour à un bon état écologique des cours d'eau. Cependant, ces restaurations ont été faites, le plus souvent, sans que leur efficacité, leur impact sur le milieu ainsi que leur pérennité à moyen ou long terme, soient véritablement évalués. De fait, une véritable réflexion est aujourd'hui nécessaire pour définir les modalités de suivi et notamment pour identifier de nouveaux outils permettant de conduire efficacement ces actions.

C'est pour répondre à ces enjeux que, dans un second chapitre, nous avons exposé le dispositif et les modalités d'application pour établir un suivi opérationnel des programmes de restauration reposant sur de l'imagerie à **Très Haute Résolution** (THR). Un protocole de suivi est présenté en fonction des questionnements scientifiques soulevés et des objectifs de restauration à atteindre. Il doit intégrer les échelles spatiales et les fréquences d'échantillonnages liées aux processus régissant les formes fluviales. Ces différentes caractéristiques imposent l'utilisation de techniques de restitution adaptées, qui feront l'objet d'une analyse dans la seconde partie.

Plus largement, l'approche méthodologique que nous proposerons doit apporter des réponses sur la façon d'évaluer les projets de restauration afin de lever certaines des interrogations que se posent gestionnaires, élus et riverains sur les choix à opérer pour réhabiliter les cours d'eau dégradés et leurs annexes fluviales.

A. Le suivi des formes fluviales

Les démarches de restauration de systèmes fluviaux dégradés sont réalisées pour répondre à des objectifs conduisant au retour à un bon état écologique et fonctionnel, tel que le recommande la DCE (Directive Cadre Européenne). Ceci implique des investissements scientifiques, techniques et financiers importants. Leur analyse, à travers la mise en place de programmes de suivi, est essentielle pour connaître les contextes et les facteurs conduisant au succès ou à l'échec.

1. Un enjeu actuel

Le **suivi** (*monitoring*), quelle que soit la thématique (géomorphologique, écologique, risques naturels), a depuis longtemps été éprouvé par les scientifiques, car c'est un domaine qui fait intervenir la notion d'expérimentation qui est au centre de l'activité de recherche.

Le suivi est une collecte systématique de données permettant de suivre la progression d'un système, naturel ou non, vers des critères cibles ou les normes de performance, qui une fois mesurées, indiquent que les objectifs (géomorphologiques, écologiques) ont été atteints (IWW, 2001). Le suivi permet d'estimer l'impact de l'action engagée sur le milieu. Dans ce contexte, ce dispositif, permettant d'aboutir à une évaluation du succès d'une opération de restauration, devrait être pris en compte dès la conception de tout projet, et intégré aux différentes étapes de son déroulement (Bazin et Barnaud, 2002)

Ce dispositif a été en réalité encore très peu appliqué. En effet, les opérations de préservation et de restauration physique des milieux aquatiques réalisées durant les 20 dernières années ont rarement fait l'objet d'audits sur leur efficacité et leur pérennité. Les travaux scientifiques menés sur ce sujet apparaissent seulement aux milieux des années 1990 (National Research Council, 1992 ; Schiemer 1994 ; Henry et Amoros, 1995, 1996) et concernent principalement la restauration écologique et, très peu, la restauration physique (hydro-géomorphologique) des cours d'eau.

Un rapport a été réalisé sur les retours d'expérience d'opérations de restauration engagées depuis une dizaine d'années sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse (Malavoi, 2006). Il révèle le besoin d'établir un bilan des actions déjà effectuées, afin d'évaluer et d'analyser certaines opérations réalisées. Il met surtout en évidence le manque de retour d'expérience des actions menées sur la restauration des hydrosystèmes fluviaux. C'est pour répondre à ce manque d'expérience et élargir la palette d'outils techniques actuellement disponible pour aborder cette question, que des réflexions ont été engagées dans le cadre de ce travail sur le suivi des formes fluviales par imagerie THR.

2. Un hydrosystème profondément bouleversé

Durant la deuxième moitié du 19^e siècle et tout au long du 20^e siècle, les cours d'eau français et, plus largement, l'ensemble des cours d'eau des pays développés ont vu leurs écoulements fortement modifiés. Les causes de ces bouleversements portent principalement sur le mode d'occupation des bassins versants (source des flux), le transfert des flux eux-mêmes (liquide et solides) associé au contrôle du réseau hydrographique.

A cela, il faut ajouter les effets des modifications climatiques postérieures au Petit Age Glaciaire, qui peuvent être partiellement à l'origine d'une raréfaction des extrêmes pluviométriques et hydrologiques (Bravard, 1991a) mais dont les conséquences ne seront pas abordées dans ce travail.

2.1. La modification anthropique des bassins versants

Dans les années 1840, l'analyse de certaines catastrophes telles que les glissements de terrain, les crues et les inondations a convaincu les forestiers et les responsables politiques de lutter contre ces phénomènes destructeurs par le contrôle de l'érosion et du reboisement de montagne, en tête de bassin du réseau hydrographique. Un important dispositif législatif et technique a été mis en place, qui a abouti à la création des services de "Restauration des terrains en montagne" (RTM) pris en charge par l'administration des Eaux et Forêts (Chandroyannis, 1992). De nombreux ouvrages hydrauliques, de tailles diverses, ont été réalisés entre les années 1880 et la première Guerre mondiale. Des barrages retenant les alluvions, des tunnels de dérivation, des travaux de terrassement et de plantation, ont été entrepris. Parmi les rivières concernées par le périmètre RTM, on peut citer la Drôme et ses affluents (Landon, 1999 ; Liébault, 2003), le Fier et l'Isère (Bravard, 1991b) et, plus globalement, l'ensemble des rivières alpines, comme par exemple l'Arno, en Toscane (Rinaldi et Simon, 1998). Il faut ajouter à ces opérations volontaristes, la colonisation végétale naturelle des versants, du fait de la déprise rurale accentuée par l'abandon de l'activité agro-pastorale dans les fonds de vallées. Ce fort déclin de l'activité agricole dans les vallées, associé aux corrections torrentielles et à la reconquête forestière de la plaine moderne (lit majeur), a eu un impact significatif sur les capacités du cours d'eau à éroder ses berges. Ainsi, la rétraction des bandes actives (diminution de l'espace de mobilité du cours d'eau) et la végétalisation des bancs sur un grand nombre de rivières de montagne et de piémont ont été soulignées par les travaux de nombreux chercheurs (Peiry, 1988 ; Liébault et Piégay, 2002 ; Dufour, 2005 ; Rollet, 2007).

Toutes ces opérations ont eu un impact important sur la réduction de l'activité torrentielle et sur le transfert des sédiments, modifiant à la source les entrées du système.

2.2. L'installation de digues et de barrages

Dans ce contexte de tarissement des flux de matière transportés par les systèmes fluviaux, le déficit amont est aggravé par les infrastructures hydrauliques (digues et barrages) réalisées durant tout le 20^e siècle.

Historiquement, l'endiguement d'un grand nombre de rivières a débuté sur des secteurs qui présentaient un style fluvial en tresses au sein d'un lit majeur pouvant dépasser plusieurs kilomètres de largeur comme pour le Haut-Rhône, le Haut-Rhin ou bien la Durance. L'objectif était de rendre ces espaces non inondables, principalement pour les besoins de l'activité agricole, industrielle et urbaine. Ces ouvrages ont également eu pour but de protéger des sites nouvellement exposés aux crues en raison d'une pression urbaine de plus en plus forte le long des rivières.

Les digues, en ceinturant le chenal, empêchent toute recharge sédimentaire latérale. Les écoulements, ne pouvant plus dissiper leur énergie, engendrent une érosion verticale du lit et une rétraction de la bande active. La Chautagne, sur le Haut-Rhône (Klingeman *et al.*, 1994), la basse vallée de la Drôme (Landon, 1999) ou bien la basse vallée de la Durance (Delahaye, 2000), en sont quelques exemples.

Les ruptures de charge lors du transit sédimentaire sont étroitement liées à la construction d'ouvrages hydrauliques transversaux, qu'il s'agisse de barrages ou de seuils. Souvent associés aux ouvrages hydro-électriques, les barrages ont été réalisés pour répondre aux besoins d'énergie, principalement au cours du 20^e siècle. Ils jouent également un rôle régulateur lors des fortes précipitations afin d'écarter les pointes de crues et de limiter les inondations. Parfois les barrages ont été conçus pour maintenir, sur le tronçon aval, un niveau d'eau élevé et constant qui assure un tirant d'eau suffisant pour la navigation fluviale. Un grand nombre d'études a porté sur les effets des barrages et leurs conséquences sur la dynamique hydro-géomorphologique des cours d'eau (Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1995 ; Brandt, 2000).

Ces infrastructures, en modifiant les débits liquides (Ql) et solides (Qs), déstabilisent le système et forcent la géométrie du chenal à s'adapter à ces nouvelles conditions. Selon Petts (1980), les barrages ont un impact sur les débits (liquides et solides), sur la géométrie du chenal et sur le fonctionnement écologique du tronçon. Le décrochage, créé par ces derniers dans la pente du cours d'eau, va forcer le profil en long à s'ajuster au nouveau niveau de base jusqu'à retrouver un nouvel état d'équilibre (les entrées de matières et d'énergies Ql et Qs sont égales aux sorties). Ce phénomène d'ajustement, qui se traduit la plupart du temps par un processus d'érosion, est maintenant bien connu et décrit par de nombreux auteurs (Galay, 1983 ; Williams et Wolman, 1984 ; Collier *et al.*, 1996). Par manque de charge solide, bloquée derrière le barrage, la dissipation de l'énergie du cours d'eau à l'aval s'exprime verticalement et latéralement. Ce processus d'érosion se traduit en premier lieu par l'incision du lit. Sur la rivière Colorado, à l'aval de Glen Canyon et de Hoover Dam, une incision de 7m en 10 ans a été enregistrée (Williams et Wolman, 1984). La dissipation de l'énergie du cours d'eau peut également jouer sur les ajustements latéraux en

érodant localement les berges. Peiry et Marnesy (2000) expliquent que l'Arc (affluent de l'Isère) connaît un lent exhaussement de son lit engendré par la combinaison d'un déficit d'écoulement lié à la présence d'un barrage et par de volumineux apports solides latéraux. Cependant la réduction du débit à l'aval d'un barrage peut, à l'inverse, engendrer une réduction de la largeur du chenal pouvant aboutir dans certains cas à un changement de style fluvial (Bravard, 1987).

2.3. L'extraction de matériaux

Depuis les années 1950, suite à la promulgation d'une nouvelle législation portant sur la gestion des sédiments dans le lit mineur des cours d'eau, l'extraction de granulats, déjà pratiquée à la fin du 19^e siècle dans les rivières alpines (Peiry *et al.*, 1994), s'est intensifiée pour répondre aux besoins croissants en matériaux de construction (habitations et voies de communication). La plupart des cours d'eau français ont été touchés : la Seine (Carré et Chartier, 2002), la Drôme (Landon, 1999), le Doubs (Rollet *et al.*, 2006), le Rhône (Poinsart, 1992). Cette action directe dans le lit mineur des rivières est responsable de prélèvements excessifs ayant un impact sur la variété des faciès fluviaux et conduisant à un appauvrissement des écosystèmes.

Ces extractions en lit mineur engendrent des modifications du profil en long, en agissant comme des pièges à sédiments (Kondolf, 1997), le transfert des sédiments vers l'aval est alors interrompu. Localement, la modification de la pente produit une érosion progressive en partant de la fosse d'extraction vers l'aval et régressive vers l'amont, forçant le cours d'eau à s'ajuster à son nouveau profil d'équilibre. Les études, engagées dans le bassin du Rhône au début des années 1980, révèlent que le Rhône n'est affecté que sur des tronçons relativement limités (Bravard, 1987 ; Poinsart, 1992), mais que les affluents montagnards et de piémont sont sévèrement touchés par le phénomène (Peiry et Bravard, 1989 ; Blanc *et al.*, 1989 ; Gautier, 1994 ; Landon et Piégay, 1994). La propagation amont / aval de l'érosion peut s'interrompre lorsque l'ajustement se cale sur des affleurements rocheux ou bien sur des seuils artificiels (Piégay et Peiry, 1997). Petit *et al.* (1996) ont observé, en comparant les profils en long de 1985 et 1990 du secteur de Miribel-Jonage, à l'amont de Lyon, la présence d'un tronçon stable correspondant à des dépôts fluvio-glaciaires (Würm tardif) alors que le contexte topographique général du secteur se caractérise par une forte incision due à la présence de fosses d'extraction. Ces ajustements morphologiques par érosion régressive et progressive engendrent également des surcreusements au droit des aménagements (Kondolf, 1997).

Tous ces aménagements, sans minorer les services qu'ils ont rendu aux populations, ont déséquilibré l'hydrosystème fluvial au point, dans certains cas, de mettre en péril certains ouvrages.

2.4. Les conséquences écologiques et économiques

Les aménagements précédemment décrits pèsent sur la capacité d'ajustement des chenaux et sont à l'origine du phénomène d'incision généralisée que connaissent les cours d'eau du bassin du Rhône comme la Drôme et l'Ardèche (Landon et Piégay, 1994 ; Landon, 1999), l'Ain (Piégay, 1995), le Rhône (Poinsart, 1992 ; Bravard et Peiry, 1993 ; Klingeman *et al.*, 1994) ou le Doubs (Rollet *et al.*, 2006). Ces ajustements ont de fortes incidences économiques. Ils portent directement sur l'état des ouvrages, en fragilisant les ponts par sapement des fondations (Kondolf, 1995, 1997) ou par affouillement des digues (dépassement de la hauteur critique) ce qui peut, dans certains cas, entraîner l'effondrement de ces ouvrages dans le chenal (Shields, 1995 ; Erskine, 1997 ; Bravard *et al.*, 1999). Ces processus d'incision ont également un impact sur les communautés floristiques et faunistiques dans le chenal même et dans ses annexes fluviales. De plus, la perte de mobilité du cours d'eau interagit sur les différents secteurs fonctionnels du corridor fluvial. Cela se traduit par :

- un abaissement de la nappe phréatique d'accompagnement, qui suit l'ajustement vertical du cours d'eau,
- une déconnexion des unités riveraines, avec pour conséquence la disparition d'espèces hélophiles et hygrophiles au profit d'espèces mésophiles, voire xérophiles (Bornette et Heiler, 1994 ; Bornette *et al.*, 1998),
- une déconnexion des zones humides et, plus particulièrement, des bras morts en favorisant leur comblement par sédimentation et eutrophisation (Citterio et Piégay, 2000).

Plus largement, l'incision du lit provoque une déconnexion des puits de captage pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation des cultures qui s'alimentent dans la nappe phréatique.

Toutes ces interventions directes sur les hydrosystèmes fluviaux ont lourdement modifié leur fonctionnement. Les bouleversements qui en ont résulté ont rendu peu probable le retour à un état avant intervention. La réponse du système à ces changements s'avère complexe à identifier et à appréhender.

3. Des cours d'eau à restaurer

Pour faire face à ces changements, et répondre aux attentes des élus et riverains, nous assistons depuis quelques années à une multiplication des opérations de restauration physique des milieux aquatiques.

3.1. Définition d'une restauration

Dans le dictionnaire, le mot **restauration** (*restoration*) est associé à différents termes comme rétablissement, réhabilitation, remise en activité / en état. Le *Petit Robert* (1993) cite

la restauration comme étant « la remise d'un système dans des conditions de fonctionnement antérieures à une interruption ». Cette définition, consacrée par le dictionnaire au domaine de l'informatique, s'apparente bien au mode de fonctionnement du système fluvial.

Cairns (2000) décrit la restauration comme le retour structurel et fonctionnel complet à un état avant perturbation. Cet auteur précise que ce niveau de restauration est difficile à atteindre, car il est impossible d'évaluer l'état originel avant les premières perturbations humaines.

Le groupe de travail américain sur la restauration des cours d'eau (*the Federal Interagency Stream Restoration Working Group*) parle de la restauration comme étant un travail complexe qui commence par la connaissance des perturbations naturelles ou anthropiques qui endommagent les structures et les fonctions de l'écosystème ou qui empêchent le retour du système à des conditions acceptables. Cela exige de comprendre les structures et les fonctions du corridor fluvial ainsi que les processus physiques, chimiques et biologiques qui les forment (FISRWG, 2001). Cette approche précise l'intérêt écologique de la démarche.

Lewis (1990) définit la restauration comme le retour d'un état perturbé ou fortement modifié à un état naturel ou anthropique, mais il complète en précisant que, pour qu'il y ait restauration, le retour à un état initial n'est pas nécessaire. Encore faut-il connaître l'état de référence sur lequel on souhaite appuyer la restauration.

La loi du 2 février 1995, relative au renforcement de la protection de l'environnement, et complétant la loi sur l'eau de 1992, définit le terme de restauration, pour les cours d'eau, comme « l'ensemble des interventions sur le lit, les berges, la ripisylve et les annexes fluviales, nécessaires au bon fonctionnement physique et écologique du cours d'eau ».

D'autres terminologies sont associées au terme restauration : **réhabilitation, revitalisation, revalorisation et entretien.**

La réhabilitation est défini comme une action de restauration d'un milieu fondé sur un état considéré comme écologiquement acceptable, indépendamment d'un état historique de référence (Boyer et Piégay, 2003).

En Suisse francophone, les termes de revitalisation et de revalorisation sont employés, respectivement pour la restauration des régimes hydrologiques et de transport solide et pour l'amélioration des habitats (Roulier *et al.*, 1999 dans Dufour, 2004).

Boyer et Piégay (2003) décrivent la notion d'entretien des ripisylves comme étant une intervention douce, effectuée à intervalles réguliers et programmée sur une période pluri-annuelle. Il s'agit donc d'une opération qui complète une phase de restauration afin de maintenir les actions engagées précédemment pour prolonger leurs bénéfices dans le temps. L'entretien annuel des bancs de galets et des îlons restaurés en 2003 par la CNR en Chautagne (Haut-Rhône) illustre cette approche. Ces opérations sont réalisées sur les tronçons « court-circuités » (cf. partie 4) pour restaurer les écosystèmes dégradés par la chenalisation et les ouvrages hydro-électriques et pour maintenir les capacités d'écoulement et lutter contre le déficit sédimentaire (Levrat, 2005 ; Lejot et Piégay, 2006b ; Michalkova et Piégay, 2006).

3.2. Une réglementation récente

Devant l'urgence de certaines situations décrites précédemment, les pouvoirs publics ont mené des programmes visant à limiter l'impact des déficits sédimentaires et à restaurer les sites dégradés lorsque les conditions le permettent. Ainsi, de nombreux programmes de restauration ont été mis en place pour répondre aux conséquences des aménagements hydrauliques réalisés en France (Malavoi, 2006). L'évaluation de l'impact de ces restaurations est une demande récente. Cette évaluation est fortement liée à la prise de conscience des institutions nationales et européennes, de la nécessité de mettre en place des outils juridiques et programmatiques favorisant l'amélioration de l'état écologique des milieux fluviaux.

Entre 1964 et 2006 plusieurs lois sur l'eau sont intervenues dans le domaine de la protection de l'environnement et, plus particulièrement, dans la préservation des milieux aquatiques et du patrimoine piscicole. Mais c'est principalement à partir de **la loi sur l'eau de 1992** qu'une réglementation modifie profondément les principes de gestion de l'eau. Cette loi énonce dans son article 1^{er} que « l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, est d'intérêt général ». Elle définit la notion de gestion équilibrée de la ressource en eau et notamment la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides.

Suite à cette loi, un document de gestion, d'aménagement et de planification a été constitué par les services de l'Etat (Agences de l'eau, DIREN) afin d'engager une politique à long terme à la fois réglementaire, financière et incitative pour mieux gérer les milieux alluviaux à l'échelle des grands bassins versants. Il s'agit du **Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux** (SDAGE). Chaque grand bassin français en est pourvu. Parmi les 10 orientations fondamentales du SDAGE RMC (Rhône Méditerranée Corse) promulguées en décembre 1996 pour les 15 années qui suivent, les gestionnaires s'engagent à :

- respecter le fonctionnement naturel des milieux,
- restaurer et préserver les milieux aquatiques remarquables,
- restaurer d'urgence les milieux particulièrement dégradés.

Il s'agit alors d'assouplir, voire de renoncer à, des pratiques extrêmes, réductrices car pensées localement, et de répondre strictement à un usage donné.

A l'échelle locale (sous-bassin versant, rivière), il existe deux principaux outils de planification de la gestion des corridors fluviaux : le **Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux** (SAGE) et le **contrat de rivière**.

A travers ces différentes réglementations, les pouvoirs publics doivent ainsi s'efforcer d'optimiser la gestion des grands aménagements en améliorant la répartition de la ressource

au profit des milieux aquatiques et des usages, de limiter l'impact de l'artificialisation des débits sur les rivières concernées, de redéfinir les principes de gestion des inondations à l'échelle du bassin, de favoriser les approches intégrant les principes de la dynamique fluviale et préservant l'espace de mobilité, ou encore de lutter contre le déficit d'apports solides constaté largement sur le bassin fluvial (Piégay et Stroffek, 2000).

Depuis 2000, cette évolution s'accélère suite à la promulgation de la **Directive Cadre sur l'Eau** (DCE). Celle-ci oblige les Etats membres à réaliser un état des lieux de la qualité écologique de leurs cours d'eau et à s'engager, d'ici à 2015, à atteindre le « bon état écologique » de l'eau et des milieux aquatiques. Dans ce but, les Etats doivent mettre en place des plans de gestion par grand bassin versant.

3.3. Comment restaurer ?

La question de la restauration mérite donc une réflexion approfondie sur son intérêt et ses modalités d'application. En effet, les écosystèmes ont une capacité intrinsèque à récupérer et à reconstituer leur structure physique en fonction de l'ampleur de la perturbation. Mais les processus de rétablissement peuvent prendre des décennies et les objectifs de la restauration peuvent être basés sur une période plus courte (Souchon, 2005).

Une opération de restauration peut être menée passivement, c'est-à-dire qu'elle met à profit la dynamique naturelle une fois les causes de dégradation supprimées. Plus le cours d'eau sera puissant, avec des berges facilement érodables et des apports solides importants, plus sa restauration sera facile, peu coûteuse, avec des effets rapides (Adam *et al.*, 2008).

Dans les systèmes peu dynamiques, les processus physiques sont insuffisants pour recréer des conditions d'habitat optimales, ou bien seulement à l'échelle des temps géologiques. Dans ce contexte, une restauration active, par intervention lourde sur le milieu, peut être considérée comme la seule solution. Elle nécessitera bien souvent des travaux plus coûteux et donnera, *a priori*, des résultats moins « spectaculaires » (Adam *et al.*, 2008).

Quelle que soit l'intervention retenue, le recours à des travaux de diversification du lit mineur est souvent nécessaire pour augmenter la qualité physique du milieu. Souchon (2005) traduit cette qualité physique sous quatre thèmes :

- l'hétérogénéité du chenal : alternance de courants lents et rapides, turbulences, variation des profondeurs,
- l'attractivité du chenal : sous berges, frayères, herbiers, blocs avec caches, ripisylve en contact,
- la connectivité du chenal : longitudinale (passes à poissons, suppressions de barrages) et latérales (annexes fluviales),
- la stabilité du chenal : équilibre des formes de dépôts et de sédimentation.

Il existe divers types d'aménagements permettant de restaurer les sites dégradés, afin de retrouver cette diversification morphologique tels que les épis, les déflecteurs, les seuils etc. Leur efficacité doit être évaluée dans le cadre de programmes de suivi, sur la base de concepts scientifiques déjà établis (Schumm, 1977 ; Amoros et Petts, 1993).

4. Du suivi à l'évaluation

Le suivi et l'évaluation jouent donc un rôle essentiel dans une démarche de restauration, car cette dernière nécessite, pour sa pérennité et sa reproductibilité, un retour d'expérience concluant (Bazin et Barnaud, 2002). Ce sont deux notions complémentaires : le suivi permet d'estimer l'impact de l'action par rapport à un état initial, tandis que l'évaluation débouche sur un jugement de l'efficacité du projet.

4.1. Le dispositif

Piégay et Stroffek (2000) expliquent que la dégradation de certains milieux, l'émergence de nouveaux usages liés à l'eau, la prise de conscience des limites de la politique de lutte contre la pollution, conduisent à substituer à la logique en boucle courte « problème – aménagement » une logique plus élaborée « problème – analyse – définition d'objectifs – gestion ». Ainsi, la réalisation d'une restauration nécessite la mise en place d'un projet qui est le fruit de la collaboration entre plusieurs acteurs : les gestionnaires, les organismes institutionnels, les maîtres d'œuvre et les riverains. Mais, avant tout, la restauration doit être construite sur des bases théoriques solides plus qu'empiriques (Henry et Amoros, 1995). D'ailleurs, la restauration est perçue comme une opportunité extraordinaire d'expérimenter en grandeur réelle et de traiter de la complexité des systèmes écologiques (Diamond, 1987 ; Jordan et Packard, 1989 ; Bazin et Barnaud, 2002). Le suivi scientifique répondra ainsi à des objectifs de connaissance qui ne correspondent pas forcément aux objectifs opérationnels de la restauration. Idéalement, il doit permettre, grâce à des indicateurs environnementaux pertinents, de comprendre et d'expliquer les dynamiques et mécanismes, mais également d'estimer si le système s'autorégule (pas ou très peu d'entretien nécessaire) et si le but de la restauration est atteint (Zedler et Weller, 1990 ; Henry *et al.*, 2002).

Tous les travaux de restauration doivent être précédés d'une étude préalable permettant de connaître le contexte hydromorphologique et écologique du site étudié. Il s'agit d'établir un état des lieux de référence, à partir de paramètres permettant de disposer d'indicateurs d'évaluation de la restauration. Nous employons, dans ce contexte, le terme de **projet de restauration** (cf. chapitre A-4.2).

Une étude préalable peut aussi conclure qu'il n'est pas nécessaire ou pas urgent de restaurer : « un dysfonctionnement pouvant s'atténuer ou s'autocicatriser naturellement avec le temps » (Adam *et al.*, 2008).

Le projet de restauration, une fois validé, se décompose en plusieurs étapes. Il comprend la définition de **paramètres de suivi**, **d'un planning de réalisation** et la définition **d'indicateurs** (fig. 1-1). La mise en place de ce schéma est souvent difficile, voire impossible, car ces étapes se heurtent fréquemment à des obstacles récurrents que sont le manque de financement, de temps et de personnels (National Research Council, 1992 ; Barnaud, 1995 ; Henry et Amoros, 1996 ; Bazin et Barnaud, 2002 ; Souchon, 2005).

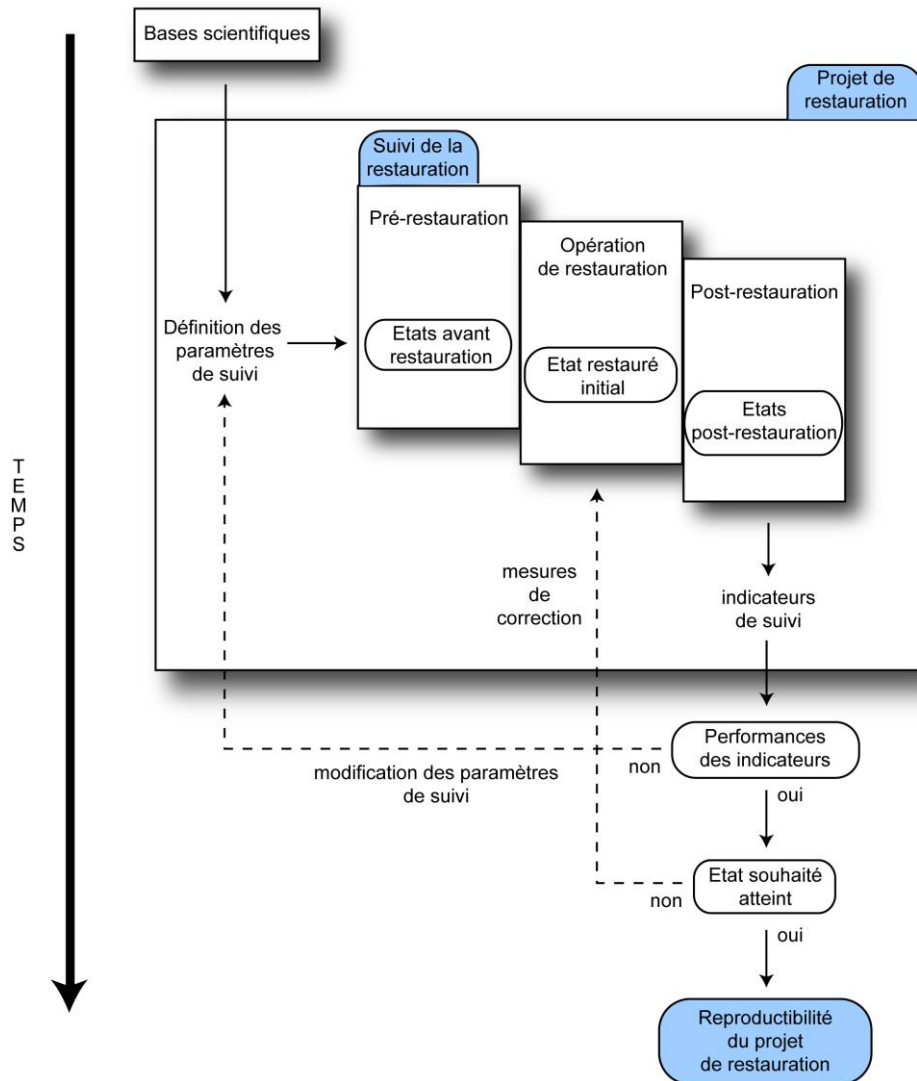


Figure 1-1. Schéma conceptuel du déroulement d'un projet de restauration

4.2. Le projet de restauration

La conception d'un projet de restauration nécessite la définition d'un système de référence correspondant aux objectifs de la restauration, c'est-à-dire à l'état que l'on souhaite atteindre. Le Floc'h et Aronson (1995) parlent de l'état souhaité comme d'une norme choisie parmi plusieurs états alternatifs, possibles et accessibles. Bazin et Barnaud (2002) définissent trois types d'objectifs majeurs dans une opération de restauration écologique :

- le retour à un bon état de biodiversité représenté par la qualité écologique du milieu,
- le rétablissement de la fonctionnalité des écosystèmes. Ils doivent remplir à nouveau leurs fonctions écologiques,
- la préoccupation d'une certaine efficacité économique. Les opérations expérimentales de restauration doivent répondre à des critères de faisabilité et de reproductibilité à plus grande échelle.

Le choix d'un système de référence est donc fonction de l'état des ressources de l'écosystème et des usages qui y seront pratiqués. L'étape de conception aboutit au choix de l'intervention qui s'accompagne d'une définition explicite de la restauration (Souchon, 2005). A titre d'exemple, l'avant-projet global de réhabilitation des lînes du Haut-Rhône de l'aménagement de Chautagne (CNR, 2000b) intègre dans ses fiches de renseignement plusieurs critères d'information :

- une description du milieu initial,
- un diagnostic fonctionnel,
- une prospective concernant le fonctionnement hydraulique après augmentation des débits réservés,
- une description du milieu après travaux,
- l'évolution majeure après restauration,
- les contraintes des travaux et la gestion future du site en terme d'entretien,
- le type de travaux réalisés.

La définition d'un objectif clair et précis est donc primordiale, car des formulations trop vagues rendent l'évaluation des résultats impossible (National Research Council, 1992). Dans le cas où le projet de restauration n'a pas atteint les objectifs fixés, celui-ci doit être réexaminé : soit les objectifs étaient irréalistes et sont à revoir, soit ils restent d'actualité et des actions correctrices sont à mettre en œuvre (fig. 1-1).

Palmer *et al.* (2005) proposent quatre critères pour mesurer le succès d'une restauration de cours d'eau, en mettant l'accent sur l'aspect écologique :

- la conception d'un projet de restauration écologique doit avoir une référence visuelle (photographies aériennes, photographies de terrain) correspondant à l'état originel du site,
- les conditions d'un bon état écologique doivent être mesurables,
- le fonctionnement du système après restauration doit être viable durablement et ne nécessiter qu'un faible niveau d'entretien,
- durant la phase d'opération, aucun dommage majeur ne doit être infligé à l'écosystème.

Un projet de restauration est donc établi pour identifier les dysfonctionnements du système, ses causes, les solutions les plus adaptées et ainsi définir les modalités de réalisation.

4.3. Le planning de réalisation

Pour évaluer la pertinence et l'efficacité de la restauration, un protocole de suivi doit être défini afin d'établir un planning des différentes étapes à réaliser. Sear *et al.* (2006) parlent d'une approche Avant – Après – Contrôle – Impact (*Before – After – Control – Impact : BACI framework*). Le planning peut être, plus simplement, décomposé en trois périodes, comme illustré sur la figure 1-1 :

- **Un état avant intervention** : il a pour objectif d'établir l'empreinte des conditions physiques et biologiques du milieu avant l'opération de restauration. Il est le témoin des actions naturelles et humaines passées. Il sert de référence dans l'évaluation de la restauration. La réalisation d'un état initial favorise la connaissance du milieu avant toute intervention. Son niveau de précision doit être adapté aux caractéristiques et à la sensibilité du milieu aquatique, à la nature de l'opération, au risque d'impact et à l'objectif de suivi de l'impact (Baril, 2000). Si l'écosystème perturbé est ancien, l'état de référence devra être défini à partir de documents tels que d'anciennes cartes et photographies aériennes, ou bien à partir de données collectées remontant avant la perturbation, si elles existent. Dans le cas inverse, les données de références peuvent être basées sur un écosystème similaire en prenant soin de choisir un système fluvial présentant la même structuration et le même fonctionnement.
- **Un état initial restauré** : Il consiste à enregistrer les actions engagées qui ont pour but de restructurer, corriger le fonctionnement du système. Cela se traduit par l'évaluation de l'état initial du système restauré. Cette phase permet d'avoir un état de référence des travaux réalisés. Elle constitue une étape nécessaire pour déterminer quand et à quel degré le système commence à refonctionner, et si la restauration est efficace (National Research Council, 1992).
- **Un ou des états post-restauration** : C'est une phase de suivi qui permet d'évaluer à plus ou moins long terme le succès de la restauration. En fonction du questionnement scientifique, la durée du suivi devra être suffisante pour y répondre. Sur la rivière Drau, en Autriche, le suivi d'un programme de restauration a été mis en place depuis 15 ans (années 1990) afin d'évaluer les opérations engagées pour lutter contre le phénomène de chenalisation (Muhar *et al.*, 2008). Dans leur manuel de restauration hydrologique des cours d'eau, Adam *et al.* (2008), préconisent, pour un suivi géomorphologique, un pas de temps d'au minimum trois ans. Ils précisent que si une crue supérieure à une fréquence de retour de 5 ans survient pendant la période de suivi, une campagne de mesure complémentaire devra être réalisée. Souchon (2005), quant à lui, définit la période moyenne d'un suivi de cinq à dix ans avec un allègement des mesures si les normes de réussite sont atteintes, mais en complément d'un suivi prolongé de 10 à 20 ans. Cependant, pour des cas particuliers, comme par exemple, le

rétablissement d'un habitat piscicole, le suivi peut être court après une opération de restauration (quelques mois), alors que le rétablissement de la végétation riveraine liée à cet habitat piscicole peut prendre plus d'une année (Henry et Amoros, 1995).

Le planning de réalisation d'un suivi de restauration a pour ambition d'être transposable à d'autres projets de restauration de même type.

B. Les contraintes de suivi des lits fluviaux et des habitats associés

L'évaluation d'une restauration est une opération qui nécessite l'utilisation d'outils adaptés aux suivis des formes fluviales étudiées. De la qualité des résultats obtenus dépendront les éventuelles mesures de correction à prendre. Ainsi, l'évaluation impose une grande rigueur dans les modalités d'acquisition des données recueillies afin d'aboutir à une analyse approfondie des causes de la réussite ou de l'insuccès de l'opération de restauration. De nombreux auteurs mentionnent la difficulté d'établir des critères mesurables, surtout s'ils doivent inclure les dimensions spatiales et temporelles (Caims, 2000 ; Bazin et Barnaud, 2002).

1. Les paramètres de suivi : entre échelle spatiale et fréquence d'échantillonnage

Le succès d'un projet de restauration dépend des investigations effectuées avant la restauration (Palmer *et al.*, 2005). La première étape, avant d'établir un état de référence, est de définir des descripteurs du milieu. Leur désignation revêt différentes terminologies : en effet, selon les auteurs, les données recueillies sont assimilées à des caractéristiques, des variables, des critères, des attributs, des valeurs... Dans le cadre de notre travail, nous employons le terme de **paramètre** pour définir les mesures réalisées *in situ*. Ces paramètres de suivi (fig. 1-1) retranscrivent les changements qui permettent de distinguer les effets des manipulations des évolutions naturelles, ou sous influence de facteurs anthropiques externes au site. Leur interprétation conduira à la mise en place d'indicateurs (cf. chapitre suivant).

Lors d'un suivi de restauration, les principaux processus physiques doivent être connus et quantifiables. Il s'agit de déterminer l'état de dégradation des caractéristiques hydromorphologiques et écologiques du site devant faire l'objet des travaux de restauration. Plusieurs paramètres sont mesurables *in situ* avec plus ou moins de facilité en fonction des débits. Henry et Amoros (2001) citent des exemples de divers paramètres mésologiques mesurés dans le cadre de suivi de restauration d'une zone humide : hauteur d'eau et vitesse du courant au centre du chenal, granulométrie du substrat, ombrage et hauteur de la ripisylve.

Dans le cadre des investigations que nous menons sur l'étude des formes fluviales, les paramètres de suivi mesurés concernent principalement les ajustements topographiques et l'analyse des faciès alluviaux :

- le profil en long (relation entre longueur et altitude du chenal),
- le profil en travers (relation entre largeur et profondeur du chenal),
- la mobilité en plan du chenal,
- la topographie intra-chenal (seuils et mouilles),
- la géométrie des bancs de galets et leur mobilité,
- la granulométrie des bancs,
- la dynamique végétale (alluviale et aquatique).

Cette liste non exhaustive représente un panel de paramètres susceptibles d'être utilisés dans le cadre d'un suivi de restauration.

Ces paramètres de suivi retranscrivent les ajustements planimétriques et altimétriques des formes fluviales à un instant « t ». Leur suivi, c'est-à-dire l'évaluation de leur dynamique morphologique au cours du temps, nécessite la prise en compte d'une 3^e variable correspondant à la dimension temporelle des ajustements.

Ainsi, l'étude des formes fluviales est dépendante de l'échelle de temps à adopter pour observer les différents mécanismes régissant la géométrie de l'hydrosystème. Knighton (1984) définit 4 périodes adaptées aux ajustements des différentes composantes morphologiques du chenal (fig. 1-2) : le **temps instantané** (inférieur à 10 ans), le **court terme** (de 10 à 100 ans), le **moyen terme** (de 100 à 1000 ans) et le **long terme** (supérieur à 10000 ans). Ces « fenêtres » d'observation sont calées sur la taille des secteurs géographiques concernés.

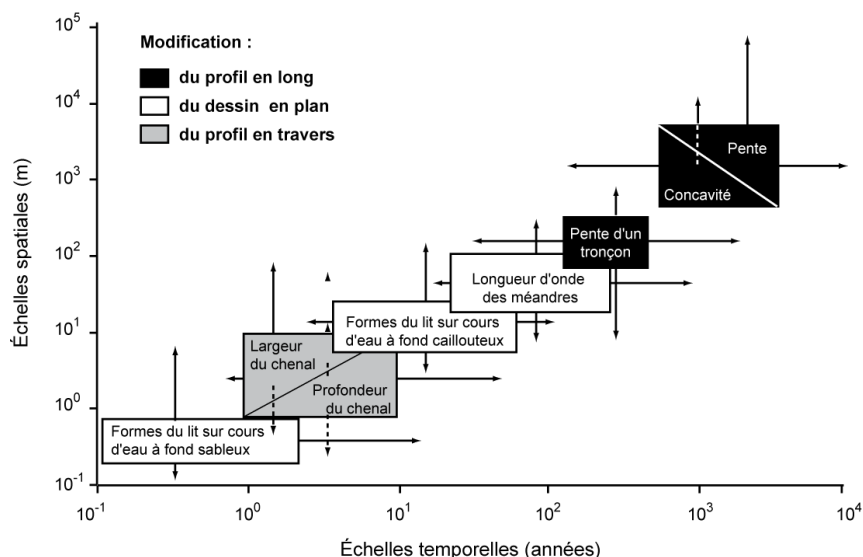


Figure 1-2. Echelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales (d'après Knighton, 1984)

Les ajustements du profil en long sont plus sensibles à l'échelle des décennies ou du siècle et ont une portée spatiale allant du tronçon au bassin versant (fig. 1-2). Wolman (1967), à partir d'une étude réalisée à l'aval du barrage de Fort Peck, sur la rivière Missouri, a estimé à 10 ans de suivi l'enregistrement d'une incision de 8 cm/an et à 30 ans celui d'une incision de 1 cm/an. Les mobilités en plan et les ajustements du profil en travers, quant à eux, peuvent s'observer à une échelle de temps plus fine (fig. 1-2). La rétraction de la bande active, suite aux modifications des entrées sédimentaires et à l'occupation du sol, enregistre, pour certaines rivières telles que l'Allier, la Drôme, l'Eygue et la Loire, des moyennes annuelles supérieures au mètre (Liébaud et Piégay, 2002).

L'ajustement des formes fluviales est également souvent associé à une fréquence de retour de référence d'un an et demi ($Q_{1,5}$). Cette fréquence correspond au débit de plein bord, ou débit morphogène (Petit et Daxhelet, 1989). On admet que les formes de la rivière vont s'ajuster afin de contenir des crues de taille modeste. Ce débit est considéré comme étant le débit le plus efficace pour le transport des sédiments (Léopold *et al.*, 1964).

Les paramètres de suivi sont donc liés à la nature des ajustements à définir, à l'échelle spatiale à considérer, et aux débits enregistrés.

2. L'évaluation : à la recherche d'indicateurs opérationnels

Les paramètres de suivi définis précédemment permettent de produire des indicateurs. Ces derniers ont pour objectif de fournir une aide à la décision. Cairns (2000) explique que les indicateurs peuvent être employés pour évaluer les conditions environnementales, comme signal d'alerte de modifications de l'environnement, ou pour faire un diagnostic de la cause d'un problème environnemental. Lévêque et Mounolou (2001) recommandent, au sujet d'indicateurs biotiques, qu'ils doivent véhiculer une information la plus pertinente possible sous une forme condensée, notamment en essayant de représenter de manière simplifiée des phénomènes complexes, et servir de moyen de communication, en particulier entre ceux qui recueillent les informations et ceux qui les utilisent.

A travers l'utilisation des paramètres de suivi, la performance des indicateurs doit être définie avec précision et de manière fiable pour mesurer les changements et, de cette façon, estimer l'avancement du projet de restauration à partir des objectifs qui ont été fixés au préalable (National Research Council, 1992).

Etablis sur un site de référence et en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques, les indicateurs de suivi sont donc susceptibles d'évoluer d'un site à l'autre (fig. 1-1, page 20). Ainsi, les nouveaux indicateurs produits permettront de réajuster ou d'adapter le protocole de suivi, dans l'optique de futurs projets de restauration.

Les indicateurs de suivi, liés au fonctionnement dynamique d'un cours d'eau, sont essentiellement regroupés en deux catégories : biologique et géomorphologique. Dans le cadre du suivi scientifique du programme décennal écologique et hydraulique engagé sur le

Haut-Rhône (Olivier *et al.*, 2007), des études ont été réalisées afin d'évaluer l'impact de la restauration de îles anciennement atterries et de la modification des débits (débits réservés) sur le peuplement piscicole et sur les macro-invertébrés. Les questions soulevées ont abouti à la définition d'indicateurs obtenus à partir de paramètres mesurables (tab 1-1).

Tableau 1-1. Indicateurs et paramètres utilisés pour le suivi scientifique du programme décennal écologique et hydraulique du Haut-Rhône (modifié d'après Olivier *et al.*, 2007)

Peuplement piscicole des îles

Question posée	Indicateurs	Paramètres
Quel est l'impact de la modification des débits réservés sur le peuplement piscicole ?	Richesse spécifique piscicole	Abondance des espèces
	Eaux stagnantes	Abondance des espèces phytophiles et lithophiles
	Espèces cibles	Abondance des espèces cibles

Macro-invertébrés du chenal

Question posée	Indicateurs	Paramètres
Quel est l'impact de la modification des débits réservés sur l'habitat physique ?	Proportion d'espèces des habitats lotiques	Abondance des espèces rhéophiles
	Proportion d'espèces des habitats lenticques	Abondance des espèces limnohiles

Géomorphologie des îles

Questions posées	Indicateurs	Paramètres
Quelle est l'espérance de vie des îles restaurées ?	Nombre d'années restant avant l'atterrissement du bras	Épaisseur des sédiments déposés Bathymétrie
Les conditions d'habitat intra-île ont-elles changé ?	Granulométrie du substrat	Taille des sédiments Indice de variabilité granulométrique

Dans l'idéal, les indicateurs doivent être faciles à calculer, sensibles aux ajustements analysés, et leur répondre d'une manière prévisible, présenter une capacité d'anticipation, servir à prédire des changements modifiables par une intervention, être intégrateurs de gradients clés, avoir une réponse connue et différenciée aux perturbations naturelles ou anthropiques et se caractériser par une faible variabilité de la réponse (Bazin et Barnaud, 2002). Du résultat des indicateurs dépendra la réussite ou non du projet de restauration.

3. L'imagerie : une réponse aux contraintes de suivi des formes fluviales

A chaque paramètre correspond une mesure ou un pas d'échantillonnage adapté à son échelle spatiale. Les restitutions topographiques d'un chenal, par des profils en travers, imposent des précisions centimétriques pour pouvoir caractériser les modifications altitudinales de fond du lit (Malavoi et Souchon, 1989). L'évaluation de la mobilité d'un cours d'eau nécessite une technique de restitution adaptée à l'échelle de la plaine moderne (échelle décamétrique à hectométrique) (Gilvear et Bryant, 2003). La caractérisation des faciès granulométriques de bancs de galets est réalisée par échantillonnage *in situ* en fonction de faciès à granulométries homogènes (échelle métrique) ou par la mise en place de quadrats d'échantillonnage (échelle sub ou sup-métrique, en fonction de la taille des galets *in situ* (Wolman, 1954). Kohler *et al.* (2000) expliquent que la définition de surfaces de référence pour le suivi de la végétation alluviale nécessite des supports adaptés, comme les photographies aériennes (échelle décamétrique). Pour couvrir l'ensemble de ces thématiques, il s'agit d'être en mesure de caractériser des unités de tailles diverses, à l'intérieur d'un tronçon variant de quelques centimètres à une centaine de mètres.

Parallèlement à l'échelle spatiale, intervient la dimension temporelle. Elle définit la fréquence d'échantillonnage à adopter pour pouvoir suivre correctement les évolutions des formes fluviales. En fonction des conditions hydrologiques et climatiques, les paramètres de suivi (cf. chapitre B-1) s'exprimeront différemment au sein du système. Il faut donc pouvoir adapter les mesures en fonction de ces dernières :

- les ajustements topographiques altitudinaux et latéraux sont sensibles aux événements ponctuels (un événement hydrologique significatif imposera au chenal une nouvelle géométrie),
- la végétation terrestre ou aquatique répond, quant à elle, à une activité saisonnière. Ainsi, le pas de suivi privilégié des mesures à réaliser devra être adapté à l'activité végétale.

Du choix des indicateurs, du pas d'échantillonnage et de la fréquence des mesures dépendra la qualité du suivi de la restauration. Des réflexions sont en cours sur l'utilisation d'images aériennes pour extraire des indicateurs morphologiques à l'échelle d'un réseau hydrographique (Wiederkehr *et al.*, 2008). En effet, à partir d'images, il est ainsi possible de caractériser des objets (éléments liquides, éléments biologiques, éléments minéraux, éléments du paysage) permettant d'identifier une liste de paramètres (quantitatifs et qualitatifs) correspondant à différentes thématiques, morphologique ou biologique, afin d'aboutir aux indicateurs de suivi. La figure 1-3 montre les différentes étapes de l'extraction d'indicateurs à partir d'images.

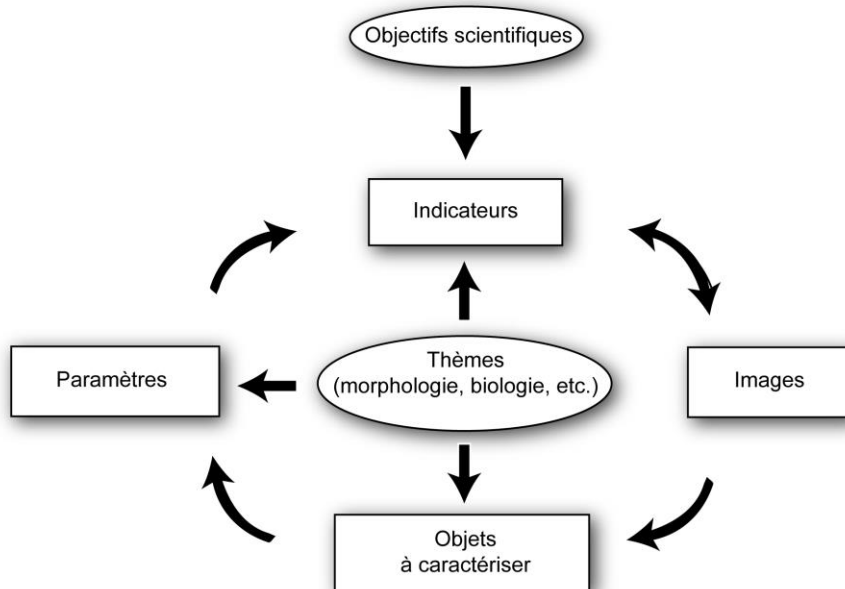


Figure 1-3. Schématisation conceptuel de l'extraction d'indicateurs à partir d'images (modifié d'après Wiederkehr *et al.*, 2008)

Ce cheminement conceptuel permet d'aboutir à la réalisation de supports cartographiques à partir des données observées et traitées. Ces supports correspondent à des cartes d'occupation du sol pour la végétation (cartes de végétation) et à des représentations du relief en plan et en trois dimensions pour les surfaces exondées ou en eau (cartes topographiques, cartes bathymétriques). Ils sont une aide à l'interprétation des résultats, pour les scientifiques qui ont en charge l'évaluation de la restauration, et un support essentiel pour établir un diagnostic à grande échelle de l'état physique des cours d'eau et planifier les actions de restauration. Les questions du suivi *in situ* des opérations, de la définition des différentes stratégies et des développements de nouveaux outils, tels que les images aériennes, se posent alors avec acuité.

4. Exemples de restauration à évaluer

Dans le cadre de ce travail, nous avons eu l'opportunité d'appliquer et de tester notre démarche à deux types de restauration : la recharge sédimentaire artificielle d'un lit mineur et le recreusement d'annexes fluviales.

4.1. La recharge artificielle

Les techniques de recharge artificielle (réintroduction de galets) ont été mises en place dans le but de limiter l'incision des chenaux, de stabiliser le fond du lit et de recréer des conditions d'habitat favorables à l'activité piscicole. Elles ont été appliquées sur plusieurs cours d'eau danois (Brookes, 1990), sur le Haut-Rhône (Klingeman *et al.*, 1994), sur la Sacramento River (Etats-Unis) (Kondolf, 1995), sur l'Ain (Lejot et Piégay, 2006a) et sur

la Mokelumne River (Etats-Unis) (Merz *et al.*, 2006). Plusieurs procédés ont été expérimentés :

- par déversement le long de la berge (*dumping*) (Bunte, 2004 ; Kondolf *et al.*, 2005), soit dans le lit mineur, soit dans le lit majeur, pour que la reprise des sédiments se fasse lors d'une crue (fig. 1-4a), technique appliquée dans le présent projet,
- par la mise en place d'un épi de galets (*wing dam*) recouvrant les $\frac{3}{4}$ de la largeur du chenal (Bunte, 2004). Ce procédé a été éprouvé dans un contexte bien particulier associant irrigation et recharge sédimentaire,
- Par largage à partir de péniches (barges à clapets), sur le Rhin (Kuhl, 1992 ; Gölz, 1994) ou sur le Danube (Reckendorfer *et al.*, 2005 ; Habersack *et al.*, 2007) (fig. 1-4b),
- par largage aéroporté à partir d'un hélicoptère, technique conçue pour les sites de recharge inaccessibles par route (Kimball, 2003 ; Barlaup *et al.*, 2006).

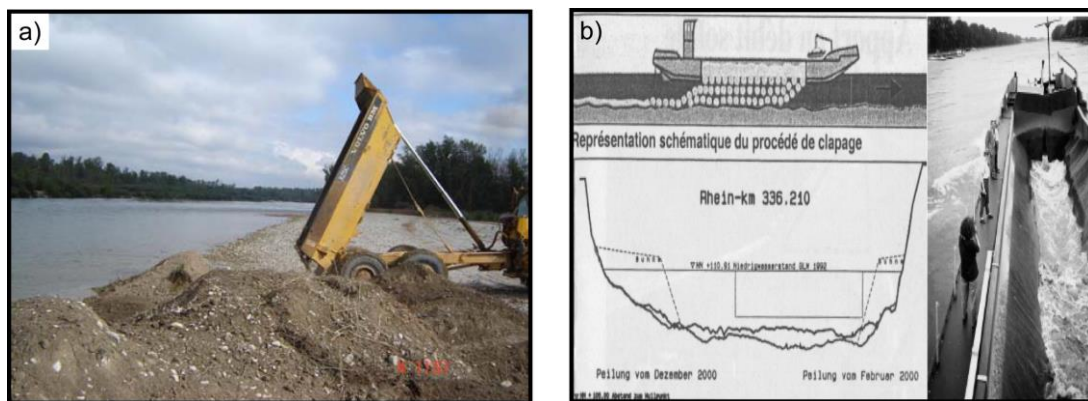


Figure 1-4. Techniques de restauration par recharge sédimentaire, a) recharge sédimentaire par génie civil sur l'Ain (cliché : CREN), b) recharge à partir de barges à clapet sur le Rhin (cliché de Kondolf)

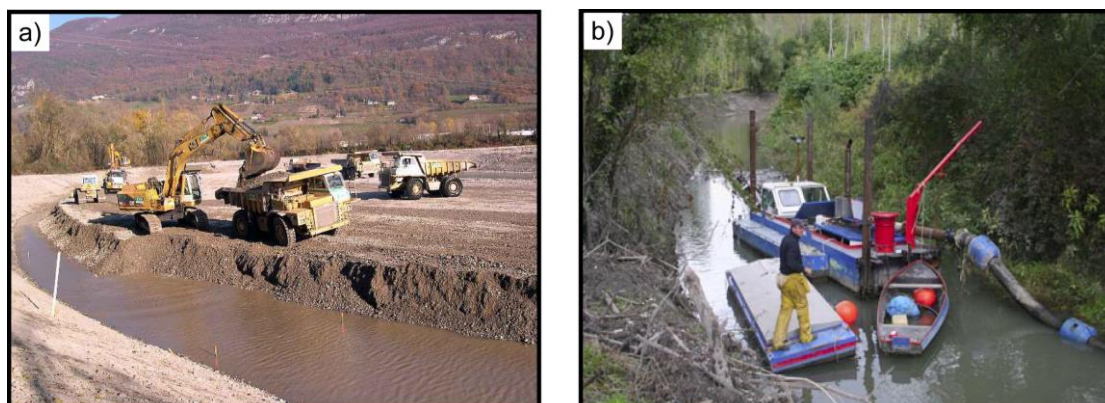


Figure 1-5. Techniques de restauration par remise en eau de bras atterris, a) curage d'un bras atterri par génie civil sur le Rhône en Chautagne (clichés : CNR), d) curage d'une lône par dragage sur le Rhône en Chautagne (cliché : CNR)

4.2. La remise en eau des annexes fluviales

La remise en eau des annexes fluviales est réalisée par curage. Elle a pour objectif de rétablir une diversification physique de ces milieux et, par conséquent, une diversification écologique. Cette diversification permet de favoriser des milieux variés, en privilégiant des modes d'alimentation et des qualités d'eau différentes (permanente, temporaire, eau de surface, eau souterraine) et de faciliter les écoulements dans le but d'écrêter les crues. L'opération consiste également à agir sur la variété des faciès morphologiques (profil en long et en travers) qui lui confère un caractère courant ou plus stagnant selon la pente locale. Les techniques sont classiques et font appel au terrassement et à l'extraction des sédiments. Différents procédés sont utilisés :

- extraction à la pelle mécanique, technique utilisée sur les îles du Rhône (Henri *et al.*, 1995 ; Amoros *et al.*, 2005) et de l'Ain (CREN, 2007) (fig. 1-5a),
- drague, chantier par voie aquatique pour préserver les berges, mode opératoire employé sur la île de Moiroud (secteur de Belley) sur le Haut-Rhône (Moiroud et Zylberblat, 2006) (fig. 1-5b).

Ces techniques de restauration mobilisent des moyens humains et matériels importants. Ces opérations représentent donc des coûts élevés. La réinjection de matériaux sur l'Ain, pour faire face à la fragilisation d'ouvrages et à la dégradation des habitats piscicoles et riverains dues au déficit sédimentaire du cours d'eau, a atteint la somme de 100000 euros (TTC) (source : CREN). Le coût de la restauration des îles du Haut-Rhône a atteint, quant à lui, 6 millions d'euros (SHR, 2002).

Dans ce contexte, une évaluation des bénéfices de ces actions est nécessaire. Cette évaluation peut notamment être abordée par le biais des suivis. Ceux-ci sont conduits durant plusieurs années après l'intervention. Il est ainsi possible de mieux identifier le temps nécessaire aux ajustements et les conditions-seuils au-delà desquels les bénéfices écologiques sont effectivement observés.

Ainsi, pour répondre aux exigences du suivi des formes fluviales, diverses techniques conventionnelles ou plus originales ont été employées. Il en est une qui est encore peu utilisée et qui, pourtant, présente de grandes potentialités compte tenu des avancés techniques et méthodologiques récentes : **la télédétection**.

Méthodes de restitution des formes fluviales

A. Apports de la télédétection

1. La géodésie
2. L'imagerie de télédétection

B. Les techniques de télédétection active

1. Restitution des surfaces émergées
2. Restitution de la bathymétrie

C. Les techniques de télédétection passive

1. Restitution des états de surface
2. Restitution topographique

D. Paramètres clés des restitutions des processus fluviaux par télédétection

1. Le contexte général
2. Résolution spatiale
3. Fréquence de passage
4. Avènement de nouvelles plates-formes radio télécommandées

Dans cette partie, un état de l'art a été réalisé, portant sur les moyens d'acquisition de données « terrain » et de données « images » et les procédés de restitution les plus utilisés en géomorphologie fluviale pour caractériser l'occupation du sol, la topographie et la bathymétrie. Les différentes techniques décrites appartiennent à un même domaine : celui de la télédétection (*remote sensing*) qui, dans son acception la plus large, désigne « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (CCT, 2007).

Certaines techniques de mesure, détaillées dans les chapitres suivants (stations totales, DGPS, ADCP), ne répondent réellement qu'en partie à la définition de la télédétection, car « l'absence de contact matériel avec l'objet » est une condition qu'elles ne remplissent pas. Cependant, les mesures sont toutes effectuées à distance.

A. Apports de la télédétection

1. La géodésie

Issues du domaine de la géodésie (science qui étudie la forme de la Terre), les techniques de restitution des formes terrestres sont depuis longtemps employées en géomorphologie fluviale. Habituellement utilisés par les géomètres, les appareils de topographie classique **niveau, station totale laser** (théodolite) sont adaptés au milieu fluvial lorsque le lit est praticable à pied. La géométrie des sections en eau est communément restituée sous la forme de profils en travers et profils en long (Malavoi et Souchon, 1989). Plus récemment, l'amélioration des précisions de localisation du système GPS a permis l'émergence d'une nouvelle solution topographique de précision centimétrique : le **DGPS** (*Differential Global Positioning System*). La station totale et le DGPS sont également utilisés pour caractériser les déplacements des chenaux (Higgitt et Warburton, 1999) et quantifier des volumes sédimentaires (Brasington *et al.*, 2000 ; 2003 ; Veyrat-Charvillon, 2005 ; Veyrat-Charvillon et Memier, 2006).

Les avantages de ces techniques de terrain portent principalement sur leur simplicité d'utilisation, leur précision (centimétrique) et leur faible coût. Cependant, ces techniques ne peuvent être utilisées que sur de petites surfaces car elles sont « consommatrices » en moyens humains et en temps d'utilisation. Néanmoins, le système DGPS s'avère moins contraignant que les techniques de terrain classiques pour sa mise en place et sa rapidité d'exécution lorsque la surface des relevés topographiques à couvrir n'excède pas le kilomètre carré et lorsque la configuration du site (relief complexe) n'impose pas une densité élevée de points. Le principal inconvénient du système DGPS est sa sensibilité face aux objets qui l'entourent. Seuls les corridors ouverts peuvent être prospectés car la présence de masques (végétation arborée ou rivière encaissée) parasite et dégrade la précision du signal.

En raison des restrictions spatiales, des temps de réalisation et des moyens humains qui doivent être mobilisés, certaines échelles spatiales ne peuvent être prospectées. Face à ces limitations, nous nous sommes donc orientés vers l'imagerie de télédétection.

2. L'imagerie de télédétection

Compte tenu de ses capacités synoptiques et multi-temporelles, la télédétection est couramment utilisée pour caractériser les formes fluviales et leur évolution au cours du temps. Contrairement aux outils décrits précédemment, l'imagerie imprime l'état des lieux d'une scène, ce qui lui permet d'appréhender les différents faciès fluviaux tels que la végétation, les états de rugosité et, plus généralement, l'occupation des sols. Les avantages et limites de ces technologies ont été mis en évidence par plusieurs auteurs (Chandler, 1999 ; Lane, 2000 ; Gilvear et Bryant, 2003 ; Ferguson, 2007).

L'image est une matrice de **valeurs radiométriques**, dont le pas représente la **résolution spatiale**. Celle-ci définit la taille au sol d'une unité élémentaire de l'image : le pixel. L'analyse radiométrique d'une image correspond à la mesure de la **signature spectrale** des objets qui la composent. C'est une analyse qui permet de caractériser les propriétés physico-chimiques de l'objet présent dans le pixel étudié. L'analyse spatiale permet, quant à elle, de quantifier la surface occupée par un objet sur l'ensemble de la scène étudiée, d'effectuer des inventaires et d'analyser l'agencement des différentes unités qui composent cette scène.

2.1. Principes

La télédétection repose sur le principe que tout corps naturel réfléchit ou émet **un rayonnement électromagnétique (REM)** suivant ses propriétés physiques et chimiques, de façon distincte dans divers spectres (fig. 2-1). Ces ondes électromagnétiques correspondent à deux champs, électrique et magnétique, se déplaçant dans le vide à la vitesse de la lumière et perpendiculaires entre eux (Robin, 1995). Elles sont caractérisées par leur vitesse, leur longueur, leur fréquence et leur polarisation. L'ensemble des longueurs d'onde ou des fréquences du REM, allant des ondes radioélectriques (pour les plus longues) aux rayons cosmiques pour les plus courtes, correspond au **spectre électromagnétique** (fig. 2-1).

Le REM est fonction du temps et de sa localisation dans l'espace. L'analyse des variations du REM provenant des objets visés par le capteur est dépendante, d'une part de la longueur d'onde, d'autre part du ou des moments d'observation et enfin de l'emplacement relatif de ces objets. Cette analyse permet en théorie :

- d'identifier la nature des objets,
- d'évaluer leur état ou de mesurer leurs propriétés,
- de surveiller leur comportement dans l'espace et le temps,
- de déduire la présence et l'absence des objets non directement « visibles » par les capteurs.

Les données acquises par les capteurs de télédétection permettent de reconstituer une image continue de la scène visée ou d'étudier le comportement des cibles selon un plan d'échantillonnage dans l'espace.

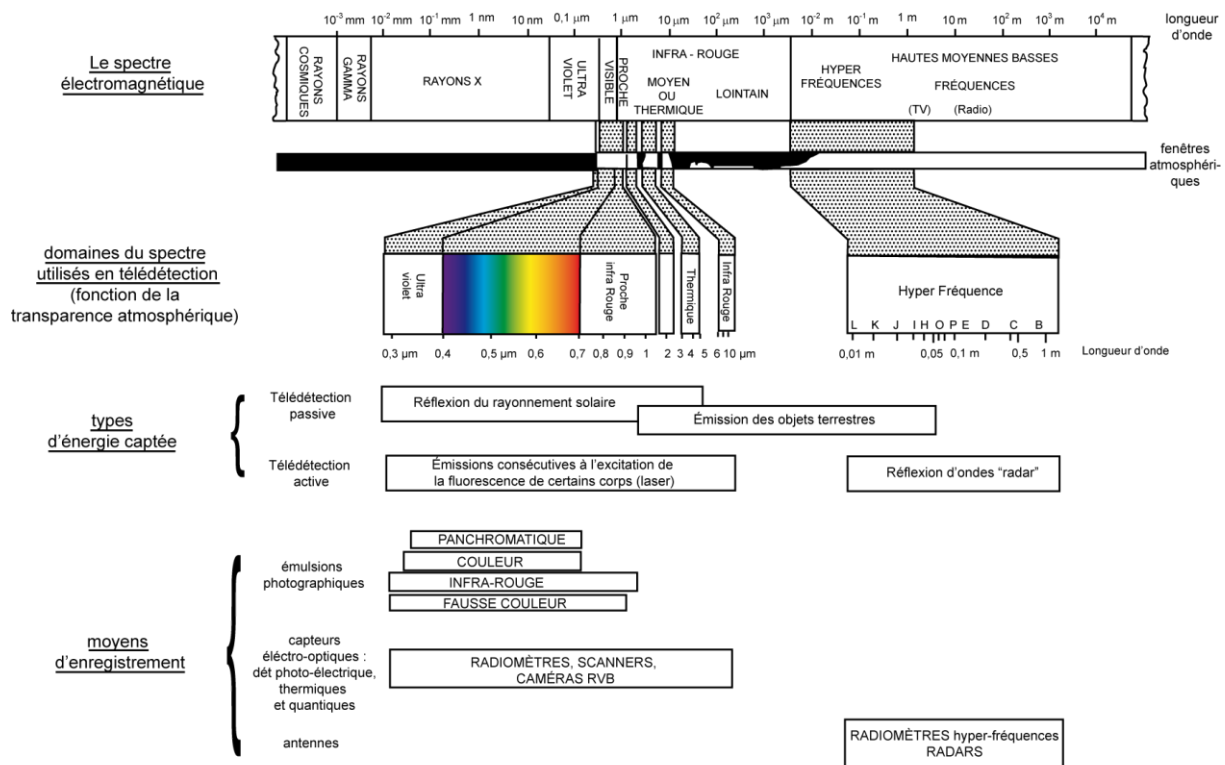


Figure 2-1. Le spectre électromagnétique et son utilisation en télédétection (modifié d'après Chaponnière, 2004)

2.2. Interaction entre un rayonnement et un cours d'eau

L'étude des propriétés physiques des surfaces en eau par télédétection a été initiée par des auteurs travaillant en milieu océanique et insulaire. On peut citer les travaux de Mobley (1994) sur les transferts radiatifs en milieu océanique, ceux de Maritorena (1996) sur les propriétés optiques de l'eau à partir d'images Spot, ou encore ceux de Holasek *et al.* (1998) sur l'utilisation de spectromètres aériens pour optimiser le choix des bandes spectrales en fonction des propriétés optiques des colonnes d'eau. De nombreuses recherches se sont focalisées plus particulièrement sur la caractérisation des profondeurs par modélisation des propriétés optiques de l'eau (Lyzenga, 1978, 1981, 1985 ; Bierwirth *et al.*, 1993 ; Sandidge et Holyer, 1998 ; Robert et Anderson, 1999 ; Lee *et al.*, 1999 ; Lee, 2001 ; Lafon *et al.*, 2000).

Le signal enregistré par télédétection dépend des conditions atmosphériques, des propriétés de réflectance de la colonne d'eau ainsi que de la nature du sol (immergé ou non).

2.2.1. Les conditions atmosphériques

Le rayonnement électromagnétique produit par le soleil est modifié lors de son passage dans l'atmosphère. Seulement 50 % du rayonnement émis ou réfléchi dans le domaine du visible par une surface est enregistré par le capteur (Robin, 1995). L'atmosphère joue le rôle d'un filtre en modifiant les signaux qui transitent à travers elle. Elle est définie par

deux composantes principales qui agissent sur le transfert radiatif : les molécules de gaz (azote, oxygène, carbone, argon et ozone) et les aérosols (poussières, vapeur d'eau, brouillard, pluie, fumée etc.). Les distorsions atmosphériques sont également dépendantes des configurations géométriques, comme l'élévation du soleil et l'angle de prise de vue.

2.2.2. Les propriétés de réflectance de la colonne d'eau

Les couches atmosphériques et aquatiques affectent le signal enregistré (Tanré *et al.*, 1990 ; Maritorena *et al.*, 1994 ; Zhang *et al.*, 1999). Ainsi, le capteur ne peut percevoir qu'une partie de l'énergie renvoyée par la cible. On suppose généralement que cette énergie est émise de manière uniforme, on parle de **réflexion lambertienne**, et que seul le signal allant dans la direction du capteur est enregistré. La mesure n'est enregistrée que sous un angle donné et non pour l'ensemble des directions. Lorsque le signal atteint la surface de l'eau, il est partiellement réfléchi et partiellement réfracté. L'ondulation de sa surface induit une réflexion, phénomène physique par lequel une surface renvoie une partie des rayons lumineux qui l'atteignent. La réflexion est dite **spéculaire** lorsque l'angle entre le rayon incident et la normale à la surface est égal à l'angle entre la normale et le rayon réfléchi. Chaque surface a un indice de réflectance qui lui est propre et qui correspond au taux de réverbération, c'est-à-dire à la part des rayons reçus qui sont réfléchis. On définit cette réflectance par le rapport entre l'énergie incidente et l'énergie réfléchie (Robin, 2005).

Dans l'eau, l'atténuation du signal lumineux est essentiellement due à l'**absorption**, **la diffusion** ayant une moindre importance. Cette atténuation est fonction de la longueur d'onde et des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau (fig. 2-2). Pour un éclairage naturel par le soleil, l'intensité lumineuse a une longueur d'onde donnée λ qui varie en fonction de la profondeur (Z) suivant une loi exponentielle (2.1) (Lyzenga, 1978) :

$$I_{\lambda}(Z) = I_{o\lambda} \exp(-k_{\lambda} \cdot Z) \quad (2.1)$$

Avec $I_{o\lambda}$: intensité de la lumière à la surface de l'eau et k_{λ} : coefficient d'atténuation verticale dans la colonne d'eau.

Le signal lumineux décroît ainsi en fonction de la hauteur de la colonne d'eau suivant la relation décrite précédemment (2.1).

L'étude des fonds immergés, des caractéristiques de la colonne d'eau ou bien des hauteurs d'eau, dépend donc de la profondeur de pénétration du signal incident et de sa réflexion, pour une bande spectrale donnée (Robin, 1995) (fig. 2-2). Pour des eaux claires, ce sont les canaux situés dans la gamme des longueurs d'onde comprises entre 400 et 500 nm qui pénètrent le plus profondément la colonne d'eau (domaine du visible de 450 à 650 nm). Pour des eaux chargées en particules et en substances dissoutes (turbides), les plus grandes profondeurs sont observées dans la gamme des longueurs d'onde comprises entre 500 et 600 nm. Ces profondeurs restent toutefois limitées à 25 / 30 mètres dans les

eaux claires (Philpot, 1989). Toujours pour des eaux claires, la gamme des longueurs d'onde comprises entre 600 et 700 nm n'atteint qu'une profondeur d'environ 3 à 7 mètres. Plus loin dans le spectre, la pénétration du signal lumineux est limitée à quelques centimètres.

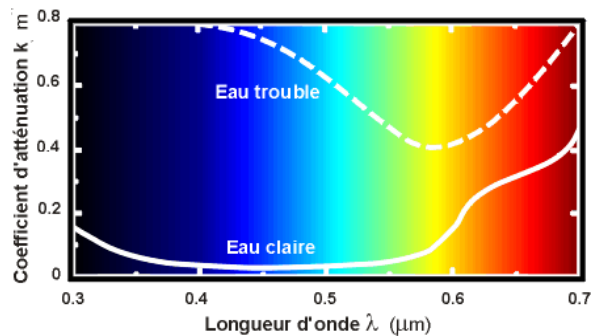


Figure 2-2. Evolution du coefficient d'atténuation en fonction de la longueur d'onde pour une eau claire et une eau trouble riche en matières organiques ou en suspension (d'après Le Calvé, 2002)

2.2.3. L'émissivité du sol

Le signal lumineux est réfléchi par le fond du chenal avant d'être, en partie, absorbé par l'eau au cours de son trajet vers la surface. Dans le cas d'un chenal en eau, la topographie du fond du lit, caractérisée par les successions de seuils et de mouilles, induira une variation du signal lumineux. Des études réalisées en bio-optique sur le comportement spectral des objets récifaux (Hochberg et Atkinson, 2000) et en morphologie fluviale sur les signatures spectrales à partir d'images aériennes (Milton *et al.*, 1995) mettent en évidence la possibilité de discriminer la signature spectrale des différents objets de cette « mosaïque » de fond de chenal et de ses berges (fig. 2-3).

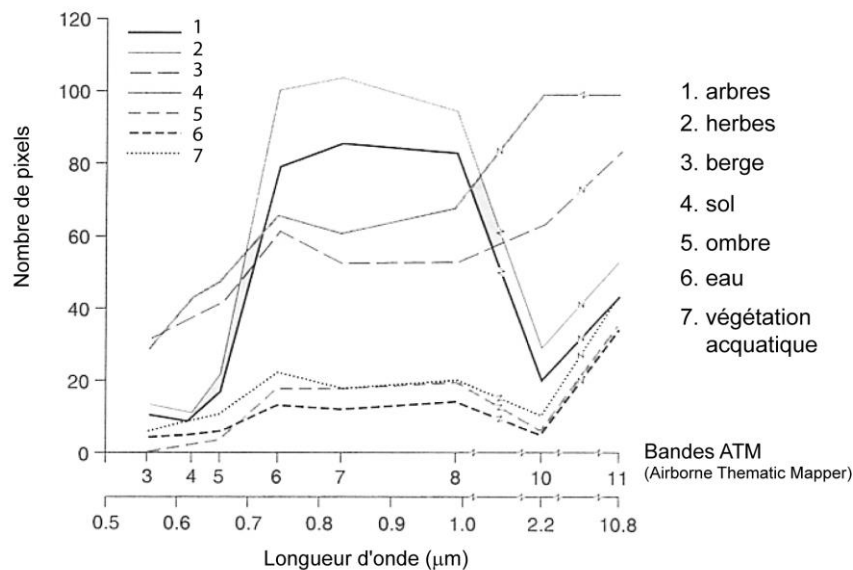


Figure 2-3. Signatures spectrales d'un environnement fluvial basées sur une image aérienne de la rivière Teme, Angleterre (d'après Milton *et al.*, 1995)

2.3. Les paramètres affectant le signal mesuré

En supposant homogènes les conditions atmosphériques et de substrat, le signal enregistré par le capteur n'est dépendant que de la hauteur d'eau. En réalité, de nombreux paramètres intrinsèques à chacune des couches traversées (atmosphère / colonne d'eau / fond du chenal) engendrent une distorsion du signal qu'il faut pouvoir évaluer ou, au mieux, identifier. La figure 2-4 illustre l'impact des principaux paramètres affectant le signal mesuré dans le contexte d'un système fluvial.

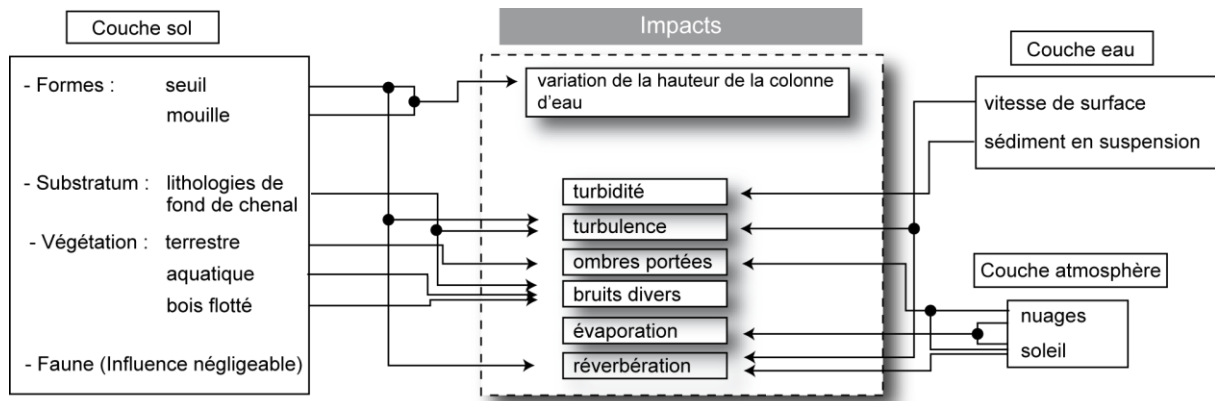


Figure 2-4. Schéma des principaux paramètres affectant le signal mesuré par le capteur

Toutes ces composantes, en déviant le signal, induisent une variation spectrale directement enregistrable sur les images. Marcus et Fonstad (2008) dénombrent quatre principaux artefacts (bruits) susceptibles de modifier le signal lumineux à partir d'images aériennes et satellites (ombre, turbidité, réverbération et fond de lit hétérogène pour une même colonne d'eau). Dans le cadre de notre travail, cinq paramètres retranscrivant cette variation et traduisant un bruit ont été listés : **les ombres portées, les phénomènes d'évaporation, de turbulence (réverbération), de turbidité et l'hétérogénéité du fond du lit** (regroupé sous l'intitulé « bruits divers » sur la figure 2-4). Ces paramètres ne constituent pas une liste exhaustive, mais ce sont les principaux artefacts auxquels nous avons été confrontés dans les différents traitements appliqués.

2.3.1. Ombres portées

Les ombres portées sont des zones créées par l'interposition d'un corps opaque entre cette zone et la source lumineuse. La taille de l'ombre portée et son intensité dépendent de la taille de l'objet intercalé, de sa distance à la source de lumière et de la puissance de la source lumineuse.

Avec l'accroissement des résolutions, l'ombre est un facteur de plus en plus prégnant sur les images aériennes et satellites. Il existe une information sur ces zones saturées qui se traduit par une variation radiométrique qui n'est simplement pas visible à l'œil nu (fig. 2-5). Afin d'exploiter cette information, plusieurs recherches, portant principalement sur des problématiques urbaines, ont été réalisées dans le but de développer des algorithmes de

correction des ombres à partir de photographies aériennes. On peut citer les travaux de Boldo (2003), basés sur la création d'un modèle radiométrique adapté aux zones urbaines ou bien ceux de Martinoty (2006), améliorant les travaux précédents par la prise en compte des phénomènes de *Hotspot* des images aériennes.

Dans notre travail, la prise en compte de cet artefact s'est bornée à un traitement manuel (digitalisation) ou bien automatique (classification) afin de les extraire pour ne pas perturber les restitutions bathymétriques.

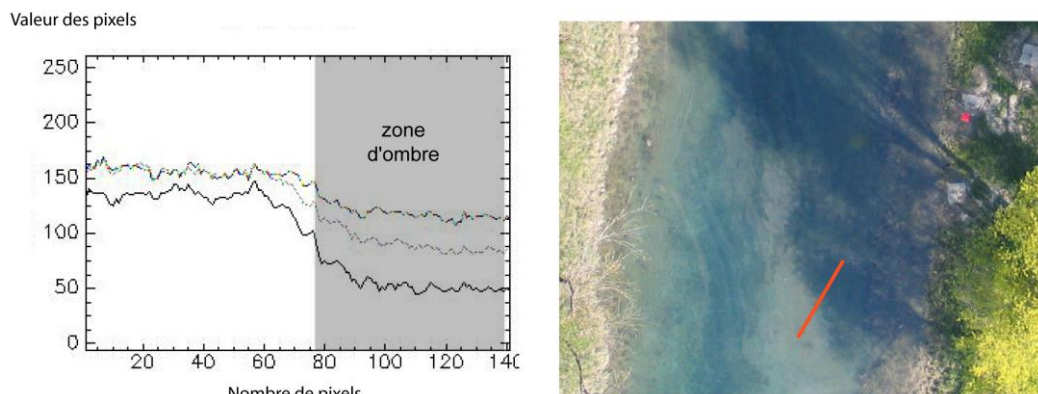


Figure 2-5. Impact d'une ombre portée sur les valeurs radiométriques d'une image aérienne (20 avril 2006) (profils radiométriques à partir des 3 canaux RVB)

2.3.2. Evaporation

L'évaporation de l'eau est un mécanisme essentiel d'échange et de transport d'énergie thermique qui se produit lorsque l'écart entre la température de l'eau et la température de l'air atteint un certain seuil. Ce phénomène est observé sur plusieurs des images aériennes exploitées et visible à travers l'exemple de la figure 2-6. Le phénomène pouvant être très localisé sur le plan d'eau ou pouvant à l'inverse couvrir une partie du chenal, il reste très difficile à délimiter et donc à appréhender. Son traitement s'est limité à un tri sélectif des images ne présentant pas cet artefact (lorsque c'était possible).

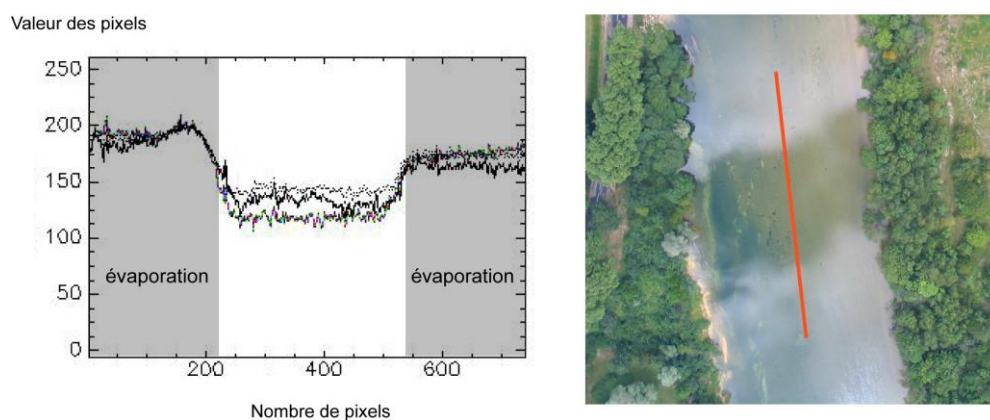


Figure 2-6. Impact du phénomène d'évaporation sur les valeurs radiométriques d'une image aérienne (19 juillet 2005) (profils radiométriques à partir des 3 canaux RVB)

2.3.3. Turbulence

La turbulence désigne l'état de l'écoulement du cours d'eau dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire, tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Ces trois paramètres ont une grande influence sur l'état de surface du plan d'eau et sont à l'origine du phénomène de réverbération (réflexion spéculaire). Ce phénomène se traduit sur les images par des zones saturées générées par l'irrégularité du plan d'eau et par l'angle de prise de vue (fig. 2-7).

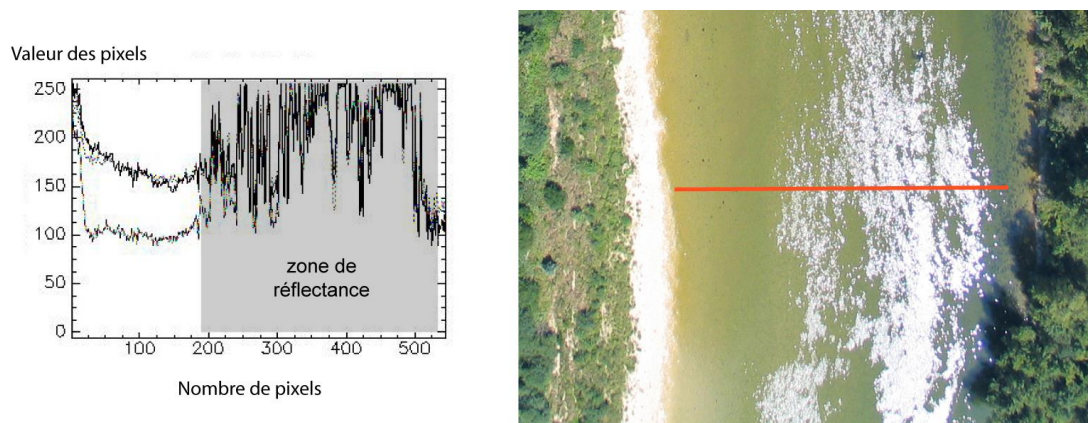


Figure 2-7. Impact de la turbulence sur les valeurs radiométriques d'une image aérienne. (20 juillet 2005) (profils radiométriques à partir des 3 canaux RVB)

Ces zones saturées, caractérisées par la présence de vaguelettes, se produisent principalement dans deux contextes :

- le souffle d'une brise au-dessus du plan d'eau : ce phénomène est localisé dans l'espace et le temps et varie rapidement. Il est donc facilement appréhendable par une sélection rigoureuse des prises de vue ne présentant pas cet artefact.
- la topographie du chenal : le phénomène de turbulence s'observe principalement au droit des seuils (affleurements rocheux). Afin de l'appréhender, un test de mesure des vitesses des écoulements de surface a été effectué par courantomètre électromagnétique (Flo-Mate Model 2000, Marsh-McBirney). Cette démarche s'est révélée compliquée, car les mesures sont difficiles à réaliser dans les zones de forte turbulence (localisées sur les seuils). De plus, des tests ont établi qu'il n'y avait pas de corrélation entre le signal radiométrique des surfaces saturées et la mesure du courant (signal trop bruité) (fig. 2-7). En conséquence, ces secteurs de turbulence étant spatialement localisés, le bruit identifié sur les images a été isolé par un traitement automatique (classification).

2.3.4. Turbidité

La turbidité désigne la quantité de matières en suspension (MES) présentes dans l'eau. La figure 2-2, page 37, illustre l'impact d'une eau trouble sur le coefficient d'atténuation du signal lumineux dans le domaine du visible. Plusieurs travaux ont mis en évidence la corrélation qui existe entre la réflectance du signal lumineux et la concentration des matières en suspension à partir d'images aériennes et spatiales sur les cours d'eau (Xia, 1993 ; Froidefond *et al.*, 1993 ; Aranuvachapun et Walling, 1998 ; Doxaran *et al.*, 2002).

La plupart des sites que nous avons étudiés présentaient une eau claire peu chargée de matière en suspension lors des levés. En revanche, en périodes de crue ou bien dans un contexte hydro-géomorphologique particulier, l'exploitation du signal lumineux de la colonne d'eau devient problématique. Les exemples d'une image aérienne d'une lône du Haut-Rhône et d'une image satellitaire (Quick Bird) d'un tronçon de l'Ain illustrent ces deux points (fig. 2-8).

Dans le premier exemple, des profils radiométriques à partir de l'image aérienne ont été réalisés afin de tester les propriétés spectrales des hauteurs d'eau (fig. 2-8a). Les profils radiométriques des secteurs aval et médian ont révélé que les 3 canaux (RVB) de la mosaïque n'enregistraient aucune variation susceptible de retranscrire la topographie. Seul le secteur le plus à l'amont a enregistré un signal radiométrique respectant la forme du chenal (fig. 2-8). Dans le second exemple, une comparaison a été effectuée entre un profil radiométrique issu d'une image satellite QuickBird et des levés bathymétriques *in situ* (fig. 2-8b). Les deux profils correspondent au même secteur du chenal. Le profil radiométrique produit à partir de l'image satellite présente un signal fortement bruité qui ne fait apparaître aucun point de comparaison avec les mesures de hauteurs effectuées *in situ*. L'interprétation de ces résultats met en évidence deux points principaux :

- L'impact du débit sur la colonne d'eau : les concentrations de MES augmentent avec le débit (Amoros et Petts, 1993 ; Bravard et Petit, 2000). Les conditions hydrologiques, précédant l'acquisition des deux images (fig. 2-8a et b), correspondent à des débits de crue. Ces conditions ont donc favorisé l'apport de matières en suspension qui brulent le signal radiométrique. Par ailleurs, le débit de l'image QuickBird correspond à une phase de décrue. Il a été démontré que la charge sédimentaire était également plus importante dans ce contexte (Klein, 1995 ; Antonelli, 2002 ; Rival 2006).
- L'impact des arrivées d'eau : à travers l'exemple de l'image aérienne de la lône du Haut-Rhône, nous pouvons observer que le profil radiométrique amont est moins affecté par ce phénomène : le signal retranscrit la topographie du chenal (fig. 2-8a). Rival (2006) a démontré, sur une lône de Pierre-Bénite (Rhône), une nette diminution des MES liée à la distance à l'embouchure aval. Nous pouvons également émettre l'hypothèse que des

apports phréatiques, provenant d'un banc de galets localisé en amont du plan d'eau, sont susceptibles d'alimenter la lône dans sa partie amont, rendant ainsi l'eau plus transparente.

Ces deux exemples mettent en évidence l'impact de la turbidité sur les propriétés spectrales de la colonne d'eau et donc sur le signal radiométrique des images. Dans le cadre d'une approche bathymétrique, la littérature ne présente pas de solution pour contourner ce problème. Des mesures réalisées à partir des disques de Secchi ont été souvent utilisées pour estimer les coefficients de turbidité et d'absorption, mais elles ne peuvent être effectuées que dans les lames d'eau peu profondes pour que le disque soit constamment visible (Fondstat et Marcus, 2005).

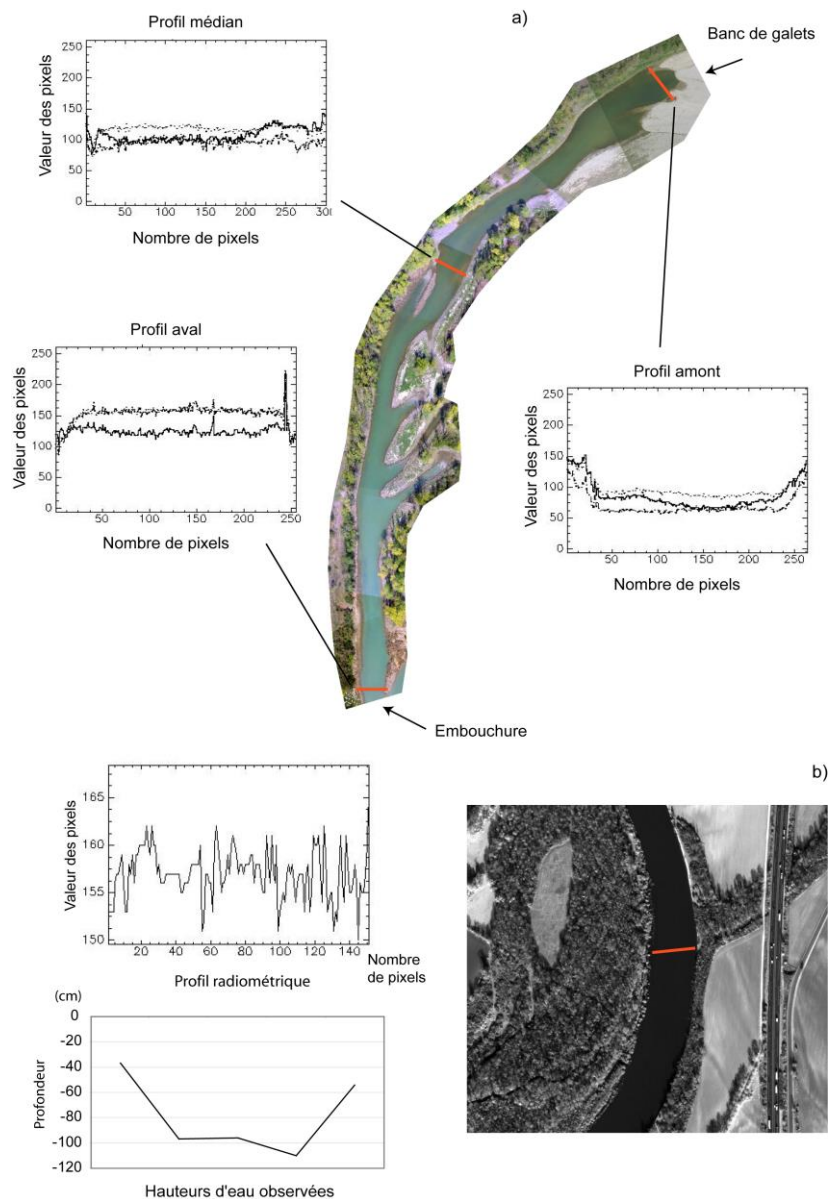


Figure 2-8. Impact de la turbidité sur les valeurs radiométriques, a) image aérienne d'une lône du Haut-Rhône (20 avril 2006) (profils radiométriques à partir des 3 canaux RVB), b) image satellite QuickBird de l'Ain (22 novembre 2006) (profil radiométrique et hauteurs d'eau observées)

2.3.5. Hétérogénéité de fond de chenal

L'hétérogénéité du fond du lit n'est pas un artefact en soi, puisqu'il caractérise des objets de l'image. Il le devient lorsqu'on souhaite étudier les propriétés spectrales d'une colonne d'eau. C'est dans ce contexte que nous nous positionnons.

Le fond d'un cours d'eau est une « mosaïque » de faciès plus ou moins hétérogènes composés de différents substrats (galets, sédiments fins, dalles calcaires ou marneuses), de végétations aquatiques (algues) et de végétations ligneuses (bois morts) (fig. 2-9).

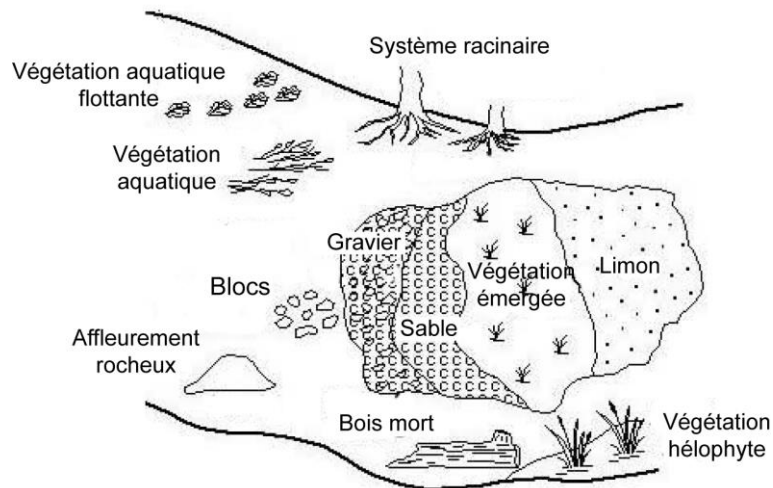


Figure 2-9. Synthèse des substrats du lit mineur (modifié d'après Sear *et al.*, 2003)

Ces substrats ont leur propre réponse spectrale, car la réflexion du signal lumineux est corrélée à la nature des surfaces réfléchies. Ainsi, lorsqu'ils forment des taches homogènes, leur signature est facilement identifiable. Sur certains tronçons, leur agencement spatial induit souvent des imbrications qui complexifient la réponse du signal enregistré par le capteur. Les exemples des figures 2-10 et 2-11 illustrent ce phénomène :

- Pour le premier, le zoom de l'image aérienne (photo prise au sol) met en évidence l'imbrication d'une matrice de galets dont certains sont enveloppés d'une concrétion algale de couleur sombre. Leur dissociation à l'échelle du tronçon est difficile à appréhender,
- Pour le second, une succession d'affleurements calcaires, de substrat graveleux et de végétation algale sont observés. La végétation est organisée en touffe et disséminée sur les deux autres substrats.

Issus des images, les deux profils radiométriques retranscrivent donc un signal fortement bruité. Ainsi, pour une même colonne d'eau, les valeurs radiométriques des transects varient de 60 à 190 pour le premier et de 50 à 210 pour le second. Cette structuration imbriquée rend sa restitution complexe.

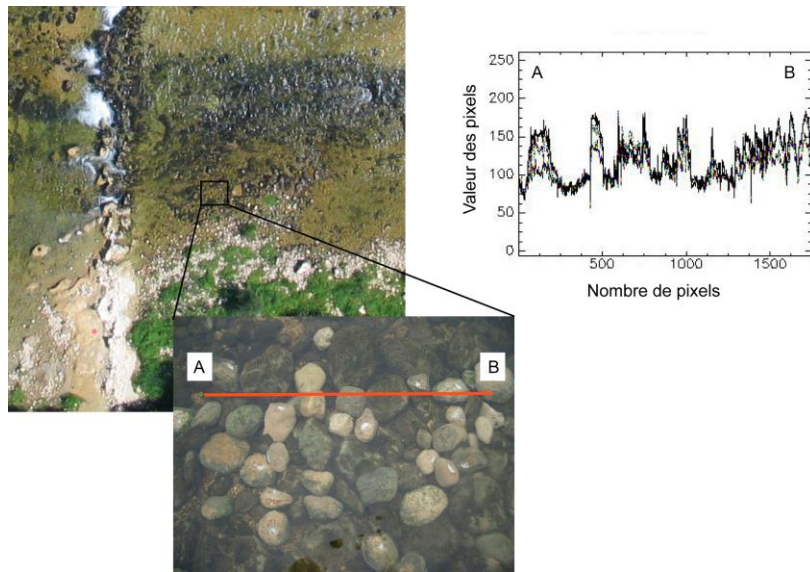


Figure 2-10. Impact de l'imbrication des faciès sur les valeurs radiométriques. Imbrication de galets (surfaces claires) et de concrétion algale (surfaces sombres) (profil radiométrique des 3 canaux RVB)

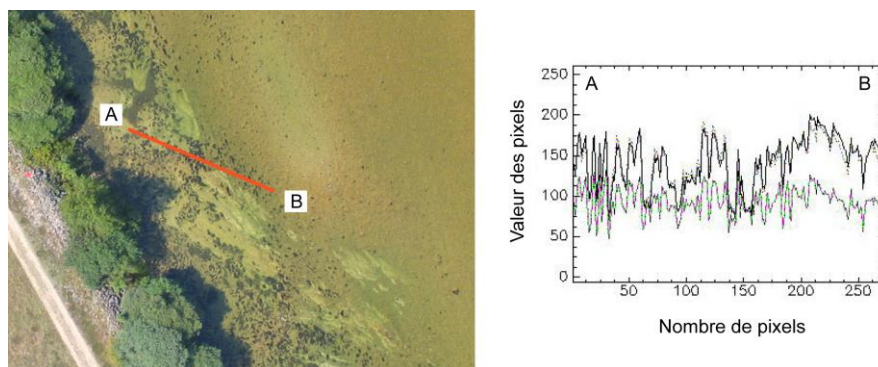


Figure 2-11. Impact de l'imbrication de faciès sur les valeurs radiométriques : affleurements calcaires, végétation algale et substrat graveleux (profil radiométrique des 3 canaux R,V,B)

B. Les techniques de télédétection active

La télédétection active est basée sur l'émission d'un rayonnement artificiel produit par un capteur qui enregistre la réponse du signal renvoyé par l'objet ciblé. A travers cette technique, deux approches sont utilisées en géomorphologie fluviale pour retranscrire la topographie : la restitution des surfaces émergées et la bathymétrie.

1. Restitution des surfaces émergées

Depuis plus d'une décennie, des techniques au sol de levées par laser ont été employées pour restituer le relief (Delacourt *et al.*, 2007). Elles sont principalement utilisées pour caractériser de petits objets directement observables depuis un point fixe. Ces techniques sont donc peu applicables au domaine fluvial.

Le Lidar (Light Detection and Ranging) est la plus récente des techniques aéroportées développées pour la reconstruction du relief à partir d'un signal laser. En 1996, une seule compagnie commercialisait cette technologie dans le monde. Trois ans plus tard, ils étaient plus d'une quarantaine à produire des données par Lidar (Baltsavias, 1999). Le Lidar émet un rayonnement laser dont la longueur d'onde se situe dans l'infrarouge. Il permet de s'affranchir de certaines contraintes rencontrées par l'utilisation de l'imagerie aérienne en photogrammétrie comme la nécessité de travailler à partir de couples d'images ne produisant une restitution 3D que sur une faible emprise au sol. Cette technique aéroportée autorise des couvertures spatiales importantes, avec une densité de points élevés (1 point pour 4 m²), comme l'illustre le programme réalisé sur la Loire moyenne (Ramirez, 2003). Son utilisation se généralise à travers de nombreuses études. Les mesures produites permettent de restituer le relief avec une précision inférieure à 15 cm (Magdaleno Mas *et al.*, 2006). Le facteur limitant de cette technologie est son coût, principalement pour des suivis topographiques à pas de temps court. Malgré tout, son utilisation se généralise à toutes les problématiques dans le domaine de la géomorphologie fluviale exigeant une topographie fine à grande échelle (Ritchie, 1996 ; Marks et Bates, 2000 ; Hicks *et al.*, 2001, 2002 ; De Joinville *et al.*, 2002 ; Lane *et al.*, 2003a ; Glenn *et al.*, 2006).

2. Restitution de la bathymétrie

Pour des rivières larges avec des sections profondes, qui ne peuvent être appréhendées par les techniques de mesures classiques (théodolite, DGPS, etc.), trois techniques actives ont été développées pour caractériser la forme des chenaux en eau.

Les sondeurs acoustiques sont utilisés pour la restitution des hauteurs d'eau. Ce sont des appareils qui émettent un signal ultra sonore. Le temps de parcours du signal calculé permet de prédire l'épaisseur de la colonne d'eau. Dans le domaine fluvial, les bateaux sondeurs sont devenus des outils clés, notamment lorsqu'il s'agit de suivre l'évolution des profondeurs pour sécuriser la navigation (Muste *et al.*, 2004 ; Doutriaux et Richard, 2005 ; Chen *et al.*, 2007). Si l'ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) permet de mesurer des profils en travers, il permet aussi des mesures de vitesse. Il ne peut cependant restituer les premiers et derniers centimètres de la colonne d'eau mesurée (Le Coz *et al.*, 2007).

Le GPR (Ground Penetrated Radar) est une technologie plus récente que la précédente et qui utilise les ondes radars. Le principe consiste à mesurer la réponse d'un milieu à une impulsion électromagnétique pendant un intervalle de temps donné et, ce, grâce à une antenne émettrice et réceptrice. L'énergie réfléchie (fonction directe de l'amplitude mesurée par le récepteur) est intrinsèquement liée à la variabilité des paramètres électromagnétiques du milieu (permittivité, conductivité, perméabilité). Le GPR peut être positionné sur un point fixe (câble, pont) pour des profils bathymétriques localisés (Spicer, 1997 ; Poole, 2002 ; Millot, 2003 ; Lunt et Bridge, 2004). Une version aérienne peut être

embarquée sur hélicoptère en volant à quelques mètres au-dessus du niveau de l'eau, afin de restituer une topographie à grande échelle (Melcher *et al.*, 2002). Cette dernière est exclusivement applicable sur de grands cours d'eau, car le survol à quelques mètres au-dessus de l'eau nécessite certaines précautions.

Il est à noter également que des capteurs spatiaux (ERS, Topex Poseidon, Envisat, Jerson), exploitant le domaine des longueurs d'ondes du radar, permettent de restituer le niveau des plans d'eau en rivière (Birkett, 1998 ; De Oliveira *et al.*, 2001 ; Soubirane *et al.*, 2001, Sandoz *et al.*, 2003, Kosuth *et al.*, en cours). Mais ces supports ne concernent que les grands fleuves, faute d'une résolution spatiale suffisante (supérieure au mètre). De plus, les données produites ne fournissent pas d'information directe sur les profondeurs, mais seulement sur l'altitude de la ligne d'eau.

Le Lidar bathymétrique est également une option technologique qui peut être utilisée pour restituer la topographie des chenaux en eau. De conception plus récente que le Lidar terrestre, il est utilisé maintenant par plusieurs sociétés (Balsavias, 1999). Fondé sur le principe d'une mesure par laser, le Lidar bathymétrique est aéroporté, ce qui lui permet de couvrir des linéaires importants. Contrairement à son homologue terrestre, qui n'émet qu'un seul signal, le Lidar bathymétrique génère deux signaux, un dans l'infrarouge (pour détecter la surface de l'eau) et un dans le vert (pour détecter le fond du lit). Les premiers travaux réalisés ont porté sur la couverture topographique des littoraux et des lacs (Lysenga, 1985 ; Irish *et al.*, 2000 ; Guenther *et al.*, 2000 ; Brock *et al.*, 2002 ; Stumpf et Holderied, 2003) et, plus récemment, sur les rivières (Millar *et al.*, 2005 ; Kinzel *et al.*, 2006 ; Magdaleno Mas *et al.*, 2006). Pour ce dernier cas, la technique du Lidar bathymétrique est encore expérimentale et les coûts très élevés. Néanmoins, c'est une technologie prometteuse, qui affiche des précisions altimétriques pouvant être comprises entre 15 et 23 cm (Millar *et al.*, 2005).

La télédétection active génère des « images bidimensionnelles », mais seulement à partir de mesures formant un nuage de points. Contrairement à la télédétection active, la télédétection passive permet, quant à elle, d'acquérir un état visuel de la scène enregistrée. Kohler *et al.* (2000) précisent que l'image est un support indispensable pour la définition de surfaces de références. C'est à partir de ce constat que les supports optiques ont été privilégiés dans le cadre de notre travail.

C. Les techniques de télédétection passive

La restitution des unités fonctionnelles du système fluvial est indispensable pour étudier les interactions qui existent entre la végétation (terrestre et aquatique), la granulométrie et la topographie (immergée ou exondée). Chacune d'entre elles est composée d'une variété de faciès qu'il faut pouvoir restituer. Pour cela, l'extraction de l'information à partir d'images satellites ou aérienne fait appel à des opérations plus ou

moins automatisées de traitement ou d'analyse d'image. Afin de restituer cette information, plusieurs méthodes ont été explorées.

1. Restitution des états de surface

1.1. Détermination d'unités spatiales homogènes

Le traitement des images peut se faire suivant plusieurs approches qui valorisent, soit la radiométrie (champ de valeurs) avec des techniques généralement automatiques (approches pixel à pixel), soit la structure (les formes) selon des techniques souvent à base de photo-interprétation (Haralick, 1989), mais qui ont fait l'objet de nouveaux développements à partir d'approches « orientées objets ».

1.1.1. Approche pixel à pixel

Les algorithmes de classification se fondent sur l'idée que chaque thème élémentaire d'occupation du sol a une réponse radiométrique propre, c'est-à-dire dont la variation est faible entre les pixels de la même classe et suffisamment forte entre pixels de classes différentes. Tout algorithme de classification consiste à partitionner l'espace des radiométries en classes selon des critères de proximité radiométrique (distance) ou de statistique (probabilité d'appartenance) et à affecter chaque pixel aux classes ainsi définies (Puech, 2000). Ces techniques de classifications sont bien connues et ont déjà été exploitées pour répondre à des questions de géomorphologie fluviale. Marcus *et al.* (2002) ont pu cartographier, à partir d'images aériennes, la structuration spatiale des bois morts de la bande active sur la rivière Soda Butte Creek (E.U.) par classification supervisée. Gilvear *et al.* (2004) ont utilisé, quant à eux, une classification non supervisée à partir d'images aériennes multi-spectrales pour caractériser la bande active et l'espace rivulaire, sur la rivière Tummel (R.U.).

1.1.1.1. Classification non supervisée

Le principe de la classification non-supervisée est d'attribuer à chaque pixel une classe suivant sa signature spectrale. L'attribution des classes se fait automatiquement, mais le nombre de classes est choisi par l'opérateur en fonction des informations qu'il souhaite extraire de l'image. L'algorithme qui a été utilisé dans le cadre de notre travail est l'ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technics*), car les résultats produits étaient conformes aux objectifs de détection fixés.

Un nombre de classes radiométriques est établi arbitrairement (fig. 2-12a). Pour déterminer la possible appartenance d'un pixel à une classe radiométrique donnée, un critère de distance est utilisé, en l'occurrence ici le centroïde. Il vise à minimiser la distance entre les pixels d'un même groupe et à maximiser la distance inter-groupes (fig. 2-12b). Le

processus est itératif jusqu'à équilibre du système déterminé par des seuils de convergence (fig. 2-12c).

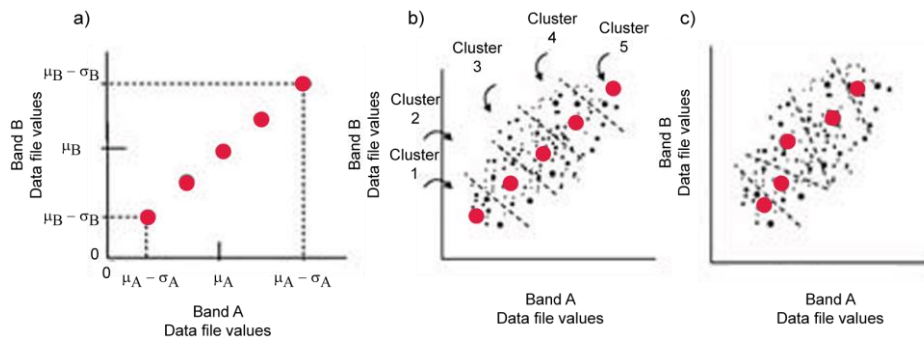


Figure 2-12. Principe de l'algorithme ISODATA (d'après Lillesand et Kiefer, 1979), a) identification de 5 classes, b) 1^{ère} classification intra-classe et interclasse, c) classification des pixels répondant aux critères définis

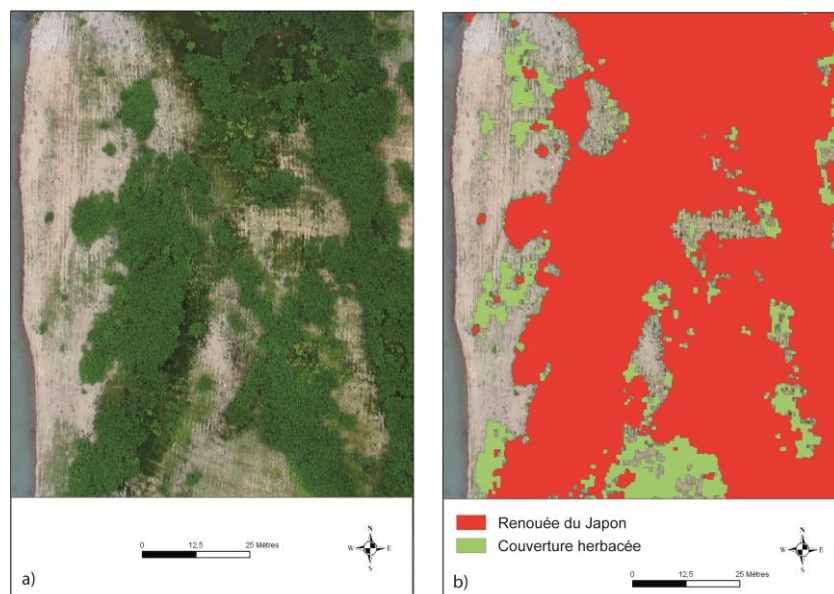


Figure 2-13. a) image aérienne d'un banc de galets du Haut-Rhône, b) carte des principales unités de végétation issues d'une classification non supervisée pixel à pixel

La figure 2-13 illustre le résultat d'une classification non supervisée sur une image aérienne d'un banc de galets partiellement végétalisé.

1.1.1.2. Classification supervisée

L'approche par classification supervisée a été exploitée par différents auteurs pour cartographier la couverture de la plaine alluviale (Vinot Kumar *et al.*, 1997 ; Wright *et al.*, 2000 ; Marcus *et al.*, 2003 ; Gilvear *et al.*, 2004 ; Leckie *et al.*, 2005). Elle repose sur des parcelles d'apprentissage identifiées manuellement par un opérateur.

Chaque substrat de l'image se caractérise par une réponse spectrale, et donc une signature radiométrique qui lui est propre. Le but est de mettre en rapport l'objet terrain et

l'ensemble des valeurs radiométriques lui correspondant. Cette technique repose sur plusieurs étapes :

- Attribuer un ensemble de zones caractéristiques (et représentatives) à une classe particulière du substrat. Il suffit pour cela de définir des régions d'intérêt (ou zone d'apprentissage). Les régions d'intérêt correspondent à des plages polygonales de pixels représentatives des substrats recherchés. L'identification de ces zones est dépendante à la fois des informations présentes sur les images et des observations de terrain. Comme l'illustre l'exemple de la figure 2-14, trois classes de substrats ont été identifiées : sédiment fin, végétation aquatique et sédiment grossier. La retranscription des moyennes et des écarts types des trois classes démontre une discrétisation distincte propre à chacune d'entre elles (fig. 2-14).
- Chaque pixel de l'image est comparé avec la signature radiométrique des zones d'apprentissage, ce qui permet de l'affecter à la classe la plus proche en fonction d'une analyse statistique basée sur différentes techniques. Les plus courants sont l'algorithme « distance minimale » (*minimum distance*), l'algorithme de « probabilité maximal » (*maximum likelihood*) et l'algorithme du « parallélépipède » (*parallelepiped algorithm*) (Lillesand et Kiefer, 1979). Ces techniques de classification sont bien connues et déjà implémentées dans la plupart des logiciels de traitement d'image du marché. Après différents tests réalisés sur une zone humide, c'est l'algorithme du parallélépipède qui a été retenu car les résultats produits étaient, là encore, conformes aux objectifs de détection fixés. Les classes sont rectangulaires et peuvent se recouper. Les seuils d'appartenance sont fixés implicitement par les valeurs minimales et maximales de chaque classe (pour chacune des bandes spécifiées) (fig. 2-15).

La figure 2-16 (page 51) illustre le résultat d'une classification supervisée sur l'image aérienne d'un bras mort. Comme pour la classification non supervisée, la classification supervisée s'appuie sur une connaissance préalable du terrain.

Afin de tester la validité de la classification, une matrice de confusion est produite, sur laquelle les pixels connus (issus des zones d'apprentissage) sont reportés aux pixels classés (ensemble des pixels de l'image) (fig. 2-17, page 51). La qualité de la classification est évaluée à l'aide du coefficient de Kappa (2.2, page suivante) (fig. 2-17). Il correspond au rapport entre l'erreur associée à une classification réalisée et l'erreur associée à une classification aléatoire. Lorsque le coefficient de Kappa dépasse 0,8 (80%), la classification est conventionnellement considérée comme pertinente (Landis et Koch, 1977).

$$N \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (2.2)$$

avec r le nombre de lignes de la matrice de confusion, x_{ii} le nombre d'observations dans la ligne i et la colonne i , x_{i+} et x_{+i} les totaux marginaux de la ligne i et la colonne i , N le nombre total d'observations.

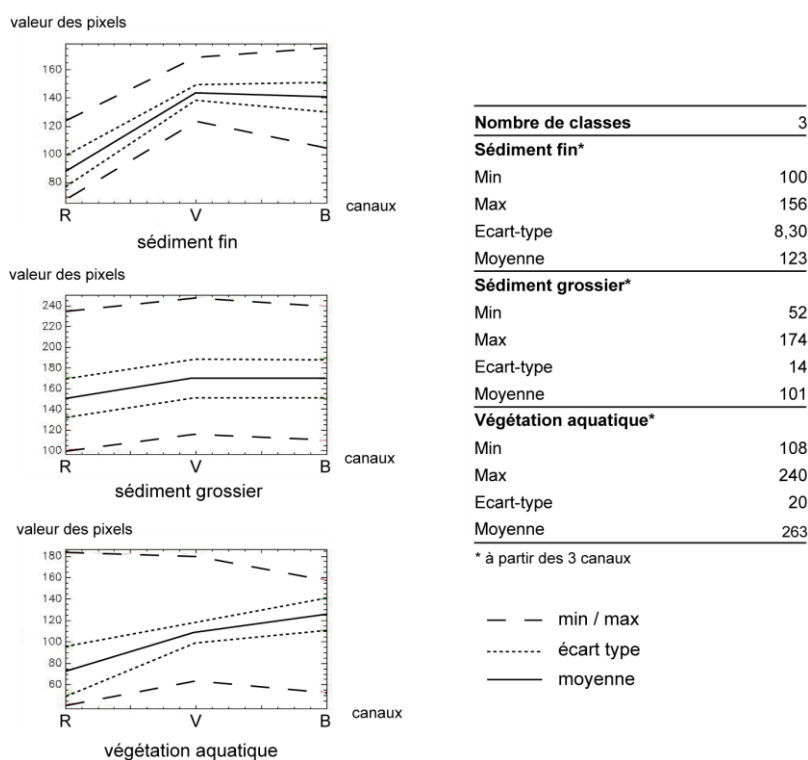


Figure 2-14. Identification de 3 classes représentant différents faciès de fond de chenal. A chacune de ces classes correspond une signature radiométrique produite par les régions d'apprentissage échantillonnées sur un plan d'eau.

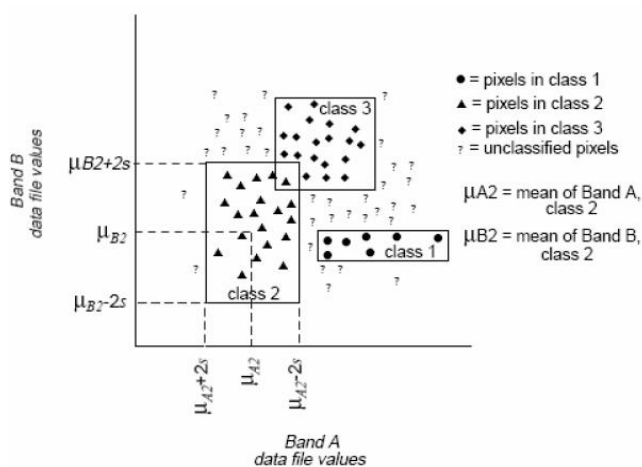


Figure 2-15. Algorithme du parallélépipède (Lillesand et Kiefer, 1979)

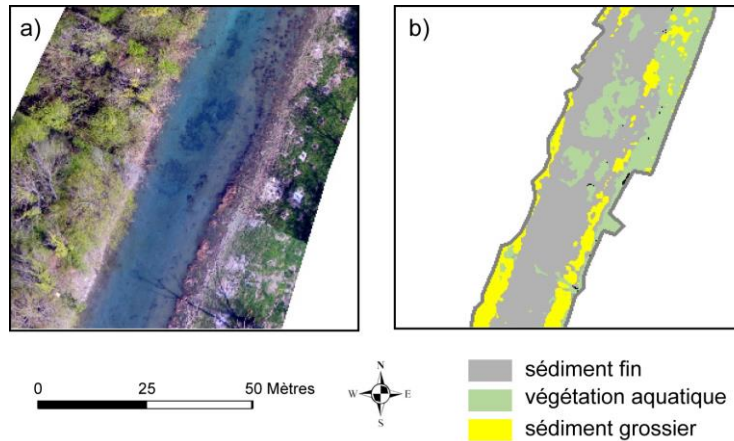


Figure 2-16. a) image aérienne d'un bras mort, b) cartographie des faciès de fond de chenal issue d'une classification supervisée pixel à pixel.

Coefficient Kappa 0,95

Vérité terrain (pixels)

Classes	sédiment fin	végétation aquatique	sédiment grossier	Total
non classé	0	94	35	129
sédiment fin	7658	14	143	7815
végétation aquatique	65	5672	90	5827
sédiment grossier	73	87	4702	4862
total	7796	5867	4970	18633

Vérité terrain (%)

Classes	sédiment fin	végétation aquatique	sédiment grossier	Total
non classé	0	1,60	0,70	0,69
sédiment fin	98,23	0,24	2,88	41,94
végétation aquatique	0,83	96,68	1,81	31,27
sédiment grossier	0,94	1,48	94,61	26,09
total	100,00	100,00	100,00	100,00

Figure 2-17. Matrice de confusion. Les colonnes correspondent aux données de la classification, les lignes correspondent aux régions d'apprentissage, les chiffres en diagonale (cellules grises) dénombrent les pixels correctement classés et leur pourcentage associé

1.1.2. Approche orientée objet

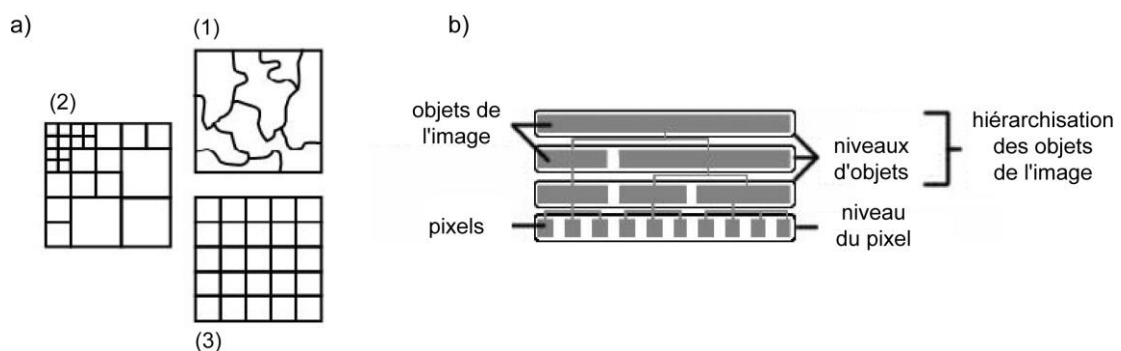
La classification orientée objet est basée sur l'idée que l'importante information sémantique nécessaire à l'interprétation d'une image n'est pas représentée dans les pixels individuels, mais dans des images-objets significatives et leurs relations mutuelles (Definiens, 2006). La classification par objets est donc basée sur des groupes de pixels associés. Elle permet d'éviter certains écueils des classifications pixel à pixel, à condition d'avoir bien résolu au préalable la définition des limites et des objets d'intérêt, qui doit être claire et non ambiguë (Puech, 2000). Bien que cette technique soit récente, plusieurs travaux ont été menés sur la caractérisation des unités du corridor fluvial par classification orientée objet à partir d'images aériennes. Perrez Corraera (2004) a développé une méthode

pour cartographier le corridor rivulaire et la structuration de la ripisylve. Slater (2007) a testé les potentialités de la méthode pour caractériser les zones de tressage sur plusieurs cours d'eau du bassin Rhône-Méditerranée-Corse.

La première étape de cette approche est la segmentation de l'image. Ce procédé permet d'agréger les pixels en extrayant des objets sans connaître l'appartenance de ceux-ci. L'algorithme de segmentation ne repose pas que sur les informations de valeurs des pixels individuels, mais aussi sur le voisinage du pixel (texture, forme, topologie). Il existe différents types de segmentation (fig. 2-18a) : (1) *multiresolution*, (2) *quadtree*, (3) *chessboard*. La segmentation utilisée dans le cadre de notre travail est la *multiresolution* car elle privilégie l'homogénéité des éléments de l'image pour restituer la taille des objets à identifier. Une succession de segmentations peut être réalisée sur l'image en fonction du résultat recherché. La première s'effectue au niveau des pixels. Il est ensuite possible de segmenter à nouveau les autres niveaux obtenus.

La deuxième étape est la classification. Elle consiste à regrouper en classes les objets partageant la même structure de donnée et le même comportement. Les classes sont identifiées soit manuellement (méthode experte), soit automatiquement.

Ainsi, la classification par segmentation comporte une notion de hiérarchie. Chaque niveau de segmentation correspond à « un niveau objet » (fig. 2-18b). Entre les différents niveaux hiérarchiques, il est possible d'obtenir une multitude d'informations statistiques sur la surface des objets, la proportion de sub-objets (classés en dessous) ou bien d'hyper-objets (classés au-dessus). Ce processus est mené jusqu'à atteindre le niveau d'extraction souhaité.



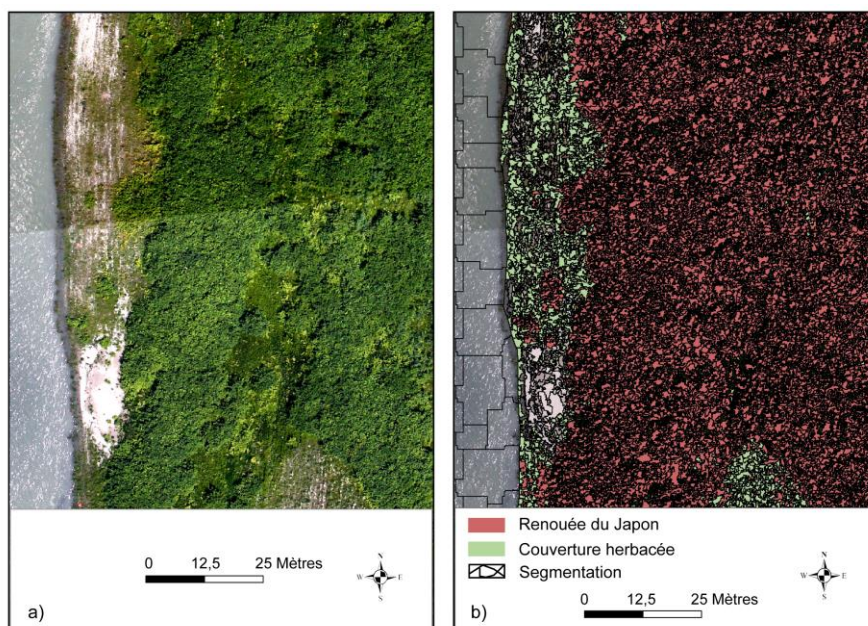


Figure 2-19. a) image aérienne d'un banc de galets végétalisé du Haut-Rhône, b) carte des unités végétales et segmentation issue d'une classification orientée-objet

La figure 2-19 illustre le résultat de la classification orientée objet à partir d'une image aérienne d'un banc de galets végétalisé.

1.1.3. Synthèse

Le choix d'une technique de classification dépend du potentiel de séparabilité des classes qui doivent être identifiées, c'est-à-dire de la façon dont les valeurs radiométriques propres à chaque faciès s'organisent à travers les canaux de l'image. La figure 2-20 illustre cette identification des classes à partir de deux canaux, vert et rouge, extraits des trois exemples traités précédemment : un banc de galets acquis à différentes dates (fig. 2-13, page 48 et 2-19) et un chenal en eau déconnecté (fig. 2-16, page 51). Ils sont traités par ordre de difficulté, afin de mettre en évidence l'impact du phénomène d'imbrication :

- La figure 2-20a représente le cas le plus simple à partir de l'image aérienne (fig. 2-13). Les trois faciès à caractériser sont le sol nu (galets), une végétation arborescente (la renouée du Japon) et une végétation herbacée. Ces trois objets sont parfaitement identifiables et peuvent être ainsi caractérisés automatiquement, d'où le choix de l'approche non supervisée.
- La figure 2-20b est plus complexe à appréhender à partir de l'image aérienne (fig. 2-16). Les trois faciès à caractériser sont une ripisylve, une végétation aquatique (algales et débris ligneux) et deux couches sédimentaires (fin et grossier). La ripisylve et les sédiments grossiers sont facilement identifiables. En revanche, la végétation aquatique et les sédiments fins ont des valeurs radiométriques communes (fig. 2-20b). L'utilisation d'une approche empirique,

c'est-à-dire basée sur une identification visuelle des objets à partir de fenêtres d'apprentissage, est donc nécessaire, d'où l'utilisation de l'approche supervisée.

- La figure 2-20c est le cas de figure le plus complexe. Trois faciès sont à caractériser à partir de l'image aérienne (fig. 2-19) : sol nu (galets), végétation (renouée) et végétation herbacée. Ces deux dernières classes sont complètement imbriquées. Elles ne peuvent donc être discriminées par leur valeurs radiométriques, d'où l'utilisation d'une classification orientée objet.

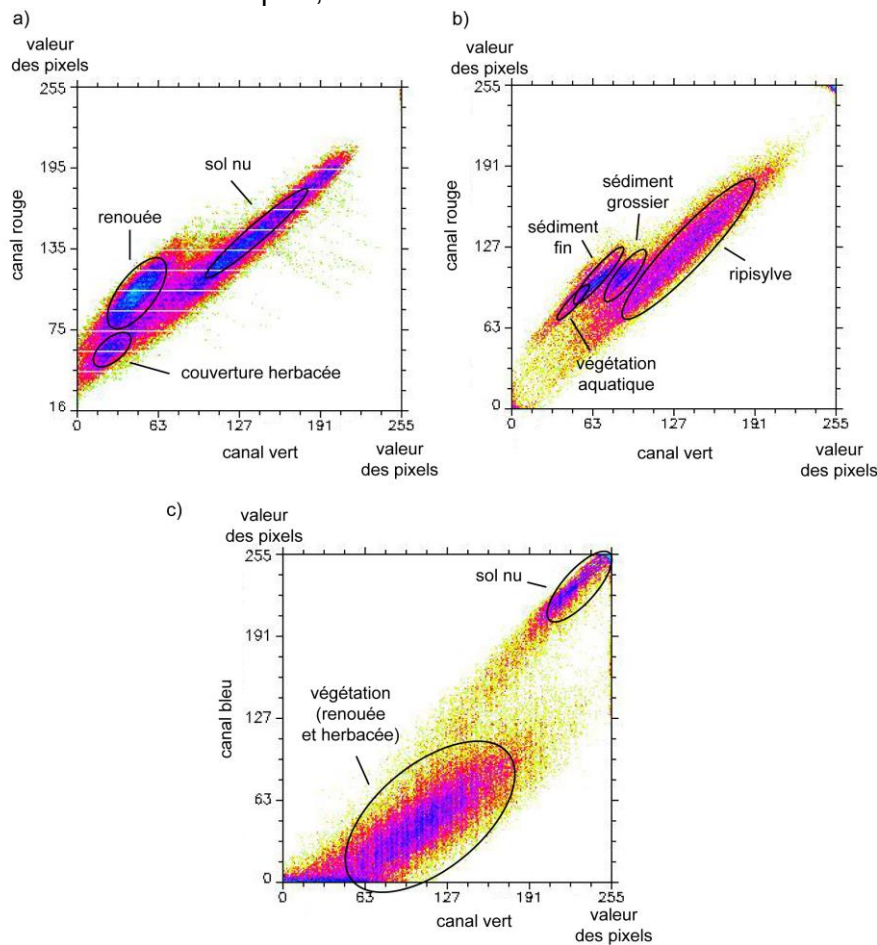


Figure. 2-20. Test de séparabilité sur deux canaux à partir d'images aériennes. Localisation de la radiométrie des faciès : a) sur une île, b) et c) sur un banc de galets

Dans un contexte de faciès très imbriqués ou de formes complexes, la méthode par classification orientée objet donne des résultats très probants, car elle permet une séparation plus satisfaisante des classes. Plusieurs études, réalisées à partir d'images satellites, ont démontré la supériorité des classifications orientées objets par rapport aux classifications pixel à pixel (Reddy *et al.*, 2004 ; Lennartz et Congalton, 2004). Cependant, ces dernières ont l'avantage d'être plus souples d'utilisation, plus rapides à mettre en place (pas de processus de segmentation) et sont efficaces lorsque les objets à classer comportent des variations radiométriques marquées.

1.2. Mesure de la granulométrie des bancs de galets

La restitution de la granulométrie des bancs de galets a pour objectif d'analyser, par des procédures automatiques, l'état textural des surfaces étudiées. Pour mieux comprendre, analyser et prévoir les changements morphologiques des lits, il importe d'étudier les flux solides et, pour cela, de procéder à des études granulométriques. Classiquement, la granulométrie d'un banc de convexité d'une rivière se structure longitudinalement : les parties amont, qui enregistrent des écoulements rapides, se caractérisent par des particules grossières, et les parties aval, beaucoup moins affectées par ces écoulements, disposent de particules fines (Bunte et Apt, 2001).

1.2.1. Principes

La granulométrie consiste à mesurer la taille des particules d'une entité morphologique afin d'étudier sa répartition en classe statistique. La taille des grains est l'élément fondamental qui conditionne le transport et le dépôt des particules (Blott et Pye, 2001). L'analyse de la forme des particules, en particulier leur sphéricité, est également utilisée comme un indicateur de la distance de transport de la charge (Bunte et Abt, 2001). Plus généralement, ces données sont des descripteurs fondamentaux dans de nombreux domaines de la géomorphologie fluviale, comme l'étude du transport des matériaux (Wiberg et Smith, 1987). Il a été également démontré que la taille des grains est une variable importante de la qualité des habitats piscicoles (Kondolf, 2000) et de macro-invertébrés (Rice *et al.*, 2001).

La granulométrie est traditionnellement caractérisée par des centiles, à savoir les D50, D84, D95 (Verdu *et al.*, 2005). Ils interviennent fréquemment dans les équations de transport solide. La taille des grains est difficile à estimer par imagerie à cause de problèmes d'échelle qui sont dus à la gamme étendue des diamètres des particules à considérer (sable de quelques millimètres à des blocs de plusieurs dizaines de centimètres) et à leur extrême variabilité spatiale (de quelques m² à plusieurs milliers de m²). Afin de répondre à ce problème de taille et d'échelle, de nombreuses méthodes d'échantillonnage ont été développées.

1.2.2. Méthodes d'échantillonnage manuel

Il existe plusieurs méthodes d'échantillonnage manuelles pour estimer la taille des particules. En fonction du questionnement scientifique, deux types de relevés sont généralement effectués : les **surfauques** et les **volumétriques** (Wolman, 1954 ; Leopold, 1970 ; Bunte et Abt, 2001). L'inconvénient principal de ces méthodes est qu'elles sont très coûteuses en temps et en moyen humain. La qualité des résultats dépend souvent de l'expérience de l'observateur et ces méthodes ne peuvent être mises en œuvre que sur des surfaces restreintes (Bunte et Abt, 2001). En effet, la collecte d'un échantillon de 100 particules par la méthode de Wolman nécessite de 20 à 30 minutes, cette opération devant être renouvelée plusieurs fois par banc.

1.2.3. Méthodes d'échantillonnage automatique

Tout comme d'autres domaines d'application, la granulométrie a profité de l'évolution des traitements et de l'accroissement de la résolution des images aériennes ou terrestres (Lane, 2001 ; Kondolf et Piégay, 2003). Les traitements développés ont porté sur deux échelles spatiales : la parcelle et le banc.

1.2.3.1. A l'échelle de la parcelle

En marge des techniques classiques de granulométrie, l'exploitation de photographies de terrain est une approche qui a depuis longtemps été éprouvée (Adams, 1979 ; Ibbeken et Scheyer, 1986 ; Landon, 1999). Contrairement aux précédentes, elle permet d'optimiser le temps passé sur le terrain et ne modifie pas le dépôt. En revanche, cette technique demande une préparation rigoureuse des prises de vue afin de ne pas induire de déformations géométriques sur les clichés (acquisition verticale). Deux traitements d'images ont été explorés à l'échelle de la parcelle (quelques m²) : la photogrammétrie et la segmentation d'images.

L'approche par photogrammétrie repose sur l'acquisition de deux photos prises à la verticale du sol à l'aide d'un portique. Elles doivent avoir une zone de recouvrement commune afin de produire une stéréo-restitution (Krauss et Waldhäusl, 1998). Parmi les travaux photogrammétriques réalisés, la restitution des particules a déjà été employée à partir d'images numériques à haute résolution prises *in situ* ou au sein de canaux expérimentaux (Butler *et al.*, 1998, 2002 ; Carbonneau *et al.*, 2003). Comme pour l'exploitation de photographies de terrain, cette technique a, pour le moment, une utilité restreinte, car elle n'est pas extrapolable sur de grands linéaires. De plus, elle pâtit des nombreux problèmes inhérents à la restitution photogrammétrique (Kraus et Waldhäusl, 1998).

Comme l'approche précédente, la segmentation d'images est basée sur l'utilisation de photographies verticales prises au sol. Le principe repose sur la détection des limites des particules de l'image par segmentation (Lejot, 1999 ; Rollet, 2002 ; Graham *et al.*, 2005). Elle utilise un opérateur de morphologie mathématique qui est l'algorithme de partage des eaux (*watershed segmentation algorithm*). Sur chacune des particules détectées, une ellipse d'ajustement est construite, permettant le calcul des principaux axes constituant la particule. La détection de l'ensemble des grains de l'image permet de déterminer une valeur du D50. Plusieurs travaux ont porté sur cette approche. Cette technique, comme les précédentes, permet d'optimiser le temps de collectes des données, mais elle se heurte aux problèmes de prise de vue des photographies : déformations géométriques, luminosité non homogène, ombres portées. De plus, l'imbrication des particules engendre des erreurs dans la restitution de l'axe b (axe correspondant à la plus grande largeur de la particule) et la technique est fastidieuse à grande échelle (Roller, 2007).

1.2.3.2. A l'échelle du banc

Pour qu'une mesure granulométrique puisse être transposée à l'ensemble d'un site, plusieurs techniques ont été proposées.

Parmi elles, l'analyse de la texture des images numériques a fait l'objet de récents travaux en géomorphologie (Aubry et Piegay, 2001), en s'appuyant notamment sur des images aériennes multi-spectrales pour la détection des formes fluviales (Wintebottom et Gilvear, 1997 ; Wright *et al.*, 2000 ; Zhang, 2000 ; Leigleiter *et al.*, 2004). Ces auteurs démontrent qu'il est possible de classer aisément des unités morphologiques telles que les seuils ou les mouilles pour des résolutions comprises entre 25 cm et 3 m. L'analyse texturale des images a également permis de caractériser la granulométrie en tout point de l'image (Verdu *et al.*, 2003 ; Carbonneau *et al.*, 2004 ; Verdu *et al.*, 2005 ; Carbonneau, 2005). Le principe retenu s'appuie sur des fonctions d'auto-corrélation. Il vise à s'affranchir de la structure (forme) et de la texture des objets (radiométrie) en travaillant sur la fréquence d'apparition des valeurs radiométriques qui caractérisent ces objets. Dès 2003, Verdu *et al.* (2003, dans Carbonneau *et al.*, 2004) ont proposé un modèle empirique combinant images aériennes à résolution centimétrique et photographies prises au sol à résolution millimétrique pour mesurer la taille des grains. A partir du calcul de la semi-variance sur une seule direction, une corrélation a pu être établie entre la taille des particules observées et la taille des particules prédites. Plus récemment, Verdu *et al.* (2005) ont utilisé une méthode similaire pour prédire les D50 par le calcul de la semi-variance couplé à des indices de texture et Carbonneau *et al.* (2004), Carbonneau (2005) ont complété les travaux précédents par l'utilisation d'une semi-variance directionnelle. Ces deux techniques sont développées dans le paragraphe suivant.

1.2.4. L'auto-corrélation spatiale

L'analyse bibliographique révèle qu'il existe deux principaux axes méthodologiques conduisant à produire des cartes granulométriques par imagerie : **l'analyse de la texture des images (matrice de co-occurrence) et la semi-variance.**

1.2.4.1. La matrice de co-occurrence

La texture représente l'agencement des valeurs radiométriques d'une image (Haralick *et al.*, 1973). La matrice de co-occurrence est construite par comparaison successive de paires de pixels séparées par une distance D et une direction d . L'élément (i,j) de la matrice P renvoie au nombre de fois où apparaît le couple de niveaux de gris (i,j) . Par conséquent, la matrice de cooccurrence peut mesurer combien de pixels ont des niveaux de gris semblables à leur voisin. Une fois que la matrice de co-occurrence a été construite, plusieurs paramètres de texture peuvent être calculés. Les plus usuels sont l'énergie, l'inertie, l'entropie et la corrélation. Connors *et al.* (1984) indiquent que l'inertie est sans doute le paramètre le plus pertinent dans la cadre d'une restitution granulométrique par image (2.3).

$$I = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i - j)^2 P(i, j, D, d) \quad (2.3)$$

où I est l'inertie de la texture, i et j les niveaux de gris considérés de la matrice P de taille (L) , D la distance et d l'orientation entre paires de pixels comparées.

L'exposant de la relation $(i - j)^2$ a pour effet d'exagérer la contribution des valeurs dans la matrice lorsque i diffère considérablement de j . Par conséquent, l'inertie de la texture a tendance à minimiser les secteurs de l'image où les niveaux de gris sont proches et, inversement, elle accentue les secteurs de l'image où les niveaux de gris diffèrent dans un proche voisinage. Ce traitement est donc bien adapté aux images présentant des surfaces de galets qui sont caractérisées généralement par des alternances de valeurs radiométriques claires (le galet) et foncées (l'ombre du galet).

L'inconvénient de la matrice de co-occurrence est qu'elle donne des valeurs texturales déduites de couples de pixels (paire de pixels) et non d'un ensemble de pixels. Ainsi, la taille des grains supérieurs au couple de pixels considéré sera mal restituée. De plus, la co-occurrence est basée sur le calcul de plusieurs matrices associées à des distances et des directions différentes ce qui accentue considérablement le temps des traitements.

1.2.4.2. La semi-variance

La semi-variance permet d'établir une relation de proximité entre les valeurs des pixels. Elle fournit une valeur unique qui décrit l'auto-corrélation spatiale d'un ensemble de pixels dans une fenêtre donnée. Le calcul de la semi-variance se base sur la somme des carrés de la différence entre les valeurs des pixels voisins. Elle est définie par l'équation suivante (2.4) :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)_{h_{ij}=h}} (z_i - z_j)^2 \quad (2.4)$$

Z_i étant la valeur radiométrique du pixel i , h la distance qui sépare deux pixels et $N(h)$ le nombre de paires de pixels ayant servi pour le calcul

Verdu *et al.* (2003) sont à l'origine de l'utilisation de la semi-variance pour la restitution de la taille des grains. Seulement, leur approche est basée sur une semi-variance à une dimension (une seule direction). Elle ne peut donc pas traiter des données spatiales originellement disposées dans un repère à deux dimensions, ce qui est le cas de la trame d'une image numérique. Il est donc nécessaire de prolonger la semi-variance à une dimension en deux dimensions afin d'exploiter toute l'information de l'image numérique. Carbonneau *et al.* (2004) présentent cette approche bidimensionnelle à travers l'équation suivante (2.5) :

$$\gamma(p, q) = \frac{1}{2(N - |p|)(M - |q|)} \sum_{i=1+\frac{|p|-p}{2}}^{N-\frac{|p|+p}{2}} \sum_{j=1+\frac{|q|-q}{2}}^{M-\frac{|q|+q}{2}} [Z(i + p, j + q) - Z(i, j)]^2 \quad (2.5)$$

Où p et q correspondent à la portée (*lag*) dans les directions x et y , M et N sont les dimensions de la surface des directions x et y , $Z(i, j)$ est la valeur de la radiométrie au point (i, j) , p et q sont à angle droit du Z . La semi-variance bidimensionnelle est donc une trame de valeurs donnant la moitié de la variance pour chaque combinaison p et q . Cette équation a été implémentée dans un programme développée sous IDL (annexe 1).

Carbonneau *et al.* (2004) ont mis en évidence l'intérêt du calcul de la semi-variance en fonction d'une taille de fenêtre donnée comparée aux limites du calcul de la texture d'une image (tab. 2-1). Le tableau 2-1 révèle une série de tests effectués à partir de fenêtres de taille croissante comparant les méthodes de co-occurrence (texture) et de semi-variance. A partir d'une taille de fenêtre optimale (33 x 33), les tests révèlent une meilleure corrélation par semi-variance entre D50 observé et D50 prédit. Cette comparaison démontre l'intérêt de la seconde méthode dans le cadre de la restitution de la taille des galets. Ainsi, cette dernière technique de prédiction des D50 par semi-variance 2D est l'approche que nous avons retenue pour restituer la granulométrie d'un banc de galets (cf. partie 3)

Tableau 2-1. Synthèse des résultats obtenus à partir de la matrice de cooccurrence et de la semi-variance pour différentes tailles de fenêtres (pas bidimensionnel) (d'après Carbonneau *et al.*, 2004)

Taille de la fenêtre (pixel)	Résolution (cm)	Taille de la scène (cm)	Méthode	R ²
5 x 5	3	15 x 15	T	0,33
10 x 10	3	30 x 30	T	0,44
20 x 20	3	60 x 60	T	0,65
33 x 33	3	99 x 99	T	0,7
50 x 50	3	150 x 150	T	0,58
5 x 5	3	15 x 15	SV	-
10 x 10	3	30 x 30	SV	-
20 x 20	3	60 x 60	SV	-
33 x 33	3	99 x 99	SV	0,8
50 x 50	3	150 x 150	SV	0,72

T (texture) SV (semi-variance)

2. Restitution topographique

2.1. Les surfaces émergées par photogrammétrie

La restitution topographique et la comparaison multi-dates des bancs exondés est maintenant largement dérivée des supports aériens et spatiaux complétant les relevés traditionnels de terrain par théodolite et DGPS, lesquels sont plus coûteux en temps et en manipulation.

2.1.1. Etat de l'art

Les modèles numériques de terrain (MNT) sont produits à partir d'acquisitions stéréoscopiques (aérienne ou satellitaire). Le développement de capteurs dédiés à la stéréoscopie, HSR (High Stereoscopic Resolution) pour le satellite SPOT5 ou par visée oblique mobile pour QuickBird2 & Ikonos2 (tab. 2-3, page 72), permet de produire des MNT ayant une résolution métrique (Toutin, 2004). Ces produits n'offrant pas une résolution suffisante pour la caractérisation en 3D des formes fluviales, les travaux photogrammétriques les plus récents sont réalisés à partir d'images aériennes (Brasington *et al.*, 2003a ; Lane *et al.*, 2003a ; Westaway *et al.*, 2003 ; Chaponnière, 2004 ; Lunt et Bridge, 2004 ; Gilvear *et al.*, 2003, 2004). La production de MNT multi-dates est principalement utilisée pour identifier les changements altimétriques des formes fluviales, comme les talwegs de rivières torrentielles (Veyrat-Charvillon et Memier, 2006) ou les bancs exondés de rivières en tresses (Lane, 2000 ; Lane *et al.*, 2003 ; Westaway *et al.*, 2003).

En morphologie fluviale, la photogrammétrie a été utilisée pour répondre à différentes problématiques. Parmi elles, on peut citer les travaux portant sur :

- la reconstruction du lit des cours d'eau au-dessus de la ligne d'eau pour étudier le transport des sédiments (Freyer, 1983 ; Stojic *et al.*, 1998 ; Westaway *et al.*, 2001, Hicks *et al.*, 2002 ; Igouzal *et al.*, 2003 ; Brasington *et al.*, 2003 ; Lane, 2003a ; Lane *et al.*, 2003b ; Westaway *et al.*, 2003 ; Lejot *et al.*, 2007),
- la modélisation de la topographie du fond du lit à l'échelle du bassin versant sur simulateur en laboratoire (Lane *et al.*, 2001 ; Brasington et Smart, 2003) ou *in situ* (Walker et Willgoose, 1999),
- la détection des laves torrentielles (Henry *et al.*, 2002 ; Veyrat-Charvillon, 2005 ; Veyrat-Charvillon et Memier, 2006),
- la mesure des érosions de berge (Pyle *et al.*, 1997 ; Martinez-Casasnovas *et al.*, 2004).

La reconstruction du lit des cours d'eau en-dessous de la ligne d'eau a également été prospectée (Westaway *et al.*, 2000 ; Gooch et Chandler, 2001 ; Butler *et al.*, 2002 ; Arrighi, 2004). Cette restitution des hauteurs d'eau par photogrammétrie ne peut être entreprise que dans un environnement physique particulier, comme c'est le cas pour des rivières en tresses (Arrighi, 2004) : végétation basse ou éparse, largeur de lit importante, faibles

profondeurs, fonds homogènes, eau peu turbide. Pour toutes ces raisons, nous nous sommes bornés à restituer uniquement la topographie des surfaces émergées et non le lit mouillé.

2.1.2. Principes de la photogrammétrie

La photogrammétrie aérienne est née il y a plus d'un demi-siècle, lorsque les géographes et topographes ont découvert l'intérêt des avions comme plate-forme de prise de vue. Cette technique a été mise en œuvre dans de nombreux domaines scientifiques. Lane *et al.* (1993) décrivent les principaux avantages qu'offre la photogrammétrie en géomorphologie : l'exploitation de nombreux points d'altitude à partir des MNT produits, une restitution non intrusive du site d'étude (accessibilité difficile ou bien risque d'une modification de la topographie en place) et la possibilité d'utiliser les archives considérables des missions aériennes, acquises depuis la deuxième moitié du 20^e siècle, afin d'établir des analyses diachroniques. Ce procédé présente également l'avantage d'être moins coûteux en temps sur le terrain et en moyens humains que les techniques classiques de relevé topographique.

La photogrammétrie est basée sur le principe de la stéréoscopie qui permet de reconstituer une vision en trois dimensions à partir d'images planes. Cette approche, similaire à la vision humaine, permet de fixer un même objet avec des angles incidents différents, permettant le passage d'un objet 2D en un objet 3D. Ainsi, pour restituer les coordonnées tridimensionnelles d'un objet, il est nécessaire d'obtenir une superposition de deux images. Ce couple d'images est nommé couple stéréoscopique.

Afin de produire ces restitutions en 3D, deux catégories d'appareils sont utilisées : les restituteurs analogiques et les restituteurs numériques. Les premiers fonctionnent à partir de films ou bien de photographies au format papier, les seconds, de conceptions plus récentes, ont été intégrés aux logiciels du marché (Erdas, Geomatica, Envi) ou bien à des restituteurs photogrammétriques (matériels très coûteux et réservés aux applications professionnels). L'inconvénient des logiciels du marché est qu'ils n'offrent aucune lisibilité sur les différentes étapes qui aboutissent à la production du MNT et qu'ils demandent un grand nombre de paramètres d'entrée auxquels il est difficile de répondre par manque d'information sur les modalités d'acquisition des images.

2.1.3. Les sources d'erreur

Tous les travaux sur la restitution de volumes à partir d'images (aériennes ou non) imposent une évaluation des distorsions des acquisitions, soit pour les quantifier, soit pour les atténuer. Deux sources d'erreur sont communément considérées, en lien avec **le système de positionnement du capteur et l'optique du capteur**.

- Le capteur doit être couplé à un système de positionnement précis pour calculer les positions et les angles de rotation au moment de la prise de vue. Ces derniers correspondent à trois angles de rotation qui s'expriment par le roulis, le tangage et le lacet. Le roulis est l'oscillation de l'avion par rapport à l'axe de vol, le tangage est l'oscillation de l'avion par rapport à un axe parallèle au sol et le lacet est l'oscillation de l'avion par rapport à un axe perpendiculaire au sol. Ainsi, l'angle oblique des acquisitions altère la géométrie des images. Une façon de s'affranchir de cette condition est de retrouver ces paramètres à partir de points d'appuis au sol.
- Les acquisitions aériennes sont réalisées à partir d'une chambre de prise de vue métrique calibrée qui minimise les déformations. Les deux principales déformations, liées à l'optique du capteur, sont tangentielle et radiale. La distorsion tangentielle, liée à l'assemblage de la lentille de la chambre d'acquisition, affecte la symétrie de cette lentille (Mikhail *et al.*, 2001 dans Casson, 2004). La distorsion radiale correspond à l'écart observé entre la position d'un point image et sa position théorique. Elle est liée à des variations d'angle entre le rayon optique et l'axe optique. Elle varie en fonction de la distance à l'axe optique (Mikhail *et al.*, 2001 dans Casson, 2004).

Parmi les autres sources d'erreur à l'origine de la distorsion des acquisitions se trouve le relief. La déformation due au relief est issue du passage d'un repère en 3D (le sol) à un repère en 2D (l'image aérienne). Le lien entre les deux repères est réalisé à partir de points d'appui au sol. Dans une moindre mesure, la rotondité de la terre induit également des déformations sur les images.

La qualité du couple stéréoscopique et la faisabilité d'une restitution finale en 3D dépendront de la maîtrise de ces paramètres. Pour minimiser ces erreurs, notre attention s'est focalisée sur l'optimisation de chacune des étapes de restitution photogrammétrique. L'utilisation d'une chaîne de traitement codée développée sous IDL a motivé cette démarche. Les algorithmes utilisés ne sont pas présentés en annexe car leurs développements n'ont pas été réalisés dans le cadre de ce travail (cf. Casson *et al.*, 2003 ; Casson, 2004).

2.1.4. L'orientation interne et externe des caméras

Les paramètres internes des caméras (l'appareil photographique) sont considérés comme connus (pour les photographies aériennes IGN, ils sont indiqués dans le certificat de calibration). Les paramètres externes d'orientation des caméras, c'est-à-dire la position des deux acquisitions et leurs angles de prises de vues, doivent être évalués.

Le système d'acquisition d'une image est caractérisé par la relation qui existe entre le sol et l'image (fig. 2-21) soit un repère 3D (X, Y, Z) représentant le référentiel de la zone d'étude, un repère 2D (ξ, η) de localisation de l'image dans l'espace et un repère pixel interne

à l'image (ξ_{px}, η_{px}). Donc, chaque point d'une image numérique est caractérisé par un couple de coordonnées image (ξ, η) et un couple de coordonnées image pixel (ξ_{px}, η_{px}), auxquels est associé un triplet de coordonnées au sol (X, Y, Z) (Casson, 2004) (fig. 2-21a). A partir de ces différents repères, une relation peut être établie entre les 3 systèmes de référence (2.6) (Krauss et Waldhäusl, 1998) :

$$\xi = \xi_0 - C \frac{r11(X - X_0) + r21(Y - Y_0) + r31(Z - Z_0)}{r31(X - X_0) + r23(Y - Y_0) + r33(Z - Z_0)}$$

$$\eta = \eta_0 - C \frac{r12(X - X_0) + r22(Y - Y_0) + r32(Z - Z_0)}{r31(X - X_0) + r23(Y - Y_0) + r33(Z - Z_0)}$$
(2.6)

Où X et Y sont les coordonnées, Z l'altitude d'un plan de référence (l'altitude moyenne du sol), X_0, Y_0, Z_0 les coordonnées du capteur dans le système de référence au sol, ξ et η les coordonnées images du point, ξ_0 et η_0 les coordonnées du point principal de l'image, C la focale et les paramètres « r » les éléments d'une matrice de rotation qui définit la position de l'image dans l'espace par rapport au système de coordonnées objets (X, Y, Z).

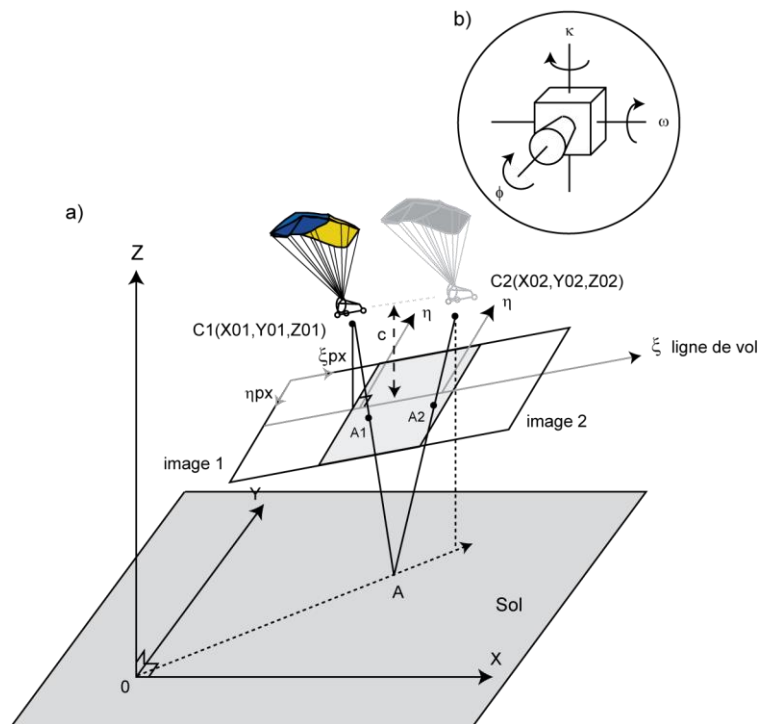


Figure 2-21. Système de référence « image / sol », a) caractéristiques géométriques du couple stéréoscopique, b) système de rotation des caméras (modifié d'après Krauss et Waldhäusl, 1998 ; Casson, 2004)

Les facteurs régissant l'ensemble des paramètres de localisation d'un capteur d'acquisition sont donc au nombre de six. Ils correspondent à la position de la caméra dans l'espace (x, y, z) et à ses trois axes de rotation (ω, ϕ, κ) (Krauss et Waldhäusl, 1998) (fig. 2-

21a et 2-21b). Ils sont propres à chaque cliché. Douze paramètres (6 par caméra) sont donc nécessaires pour reconstituer la géométrie d'un couple stéréoscopique et lever les inconnues des deux équations générales de la photogrammétrie (2.6) et (2.7) (Krauss et Waldhäusl, 1998). A partir de l'équation (2.7), nous pouvons déterminer les coordonnées au sol (X, Y, Z) à partir des coordonnées images (ξ, η).

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) + r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) + r_{33}c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) + r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) + r_{33}c}$$
(2.7)

Le système (2.7) est composé de deux équations à trois inconnues. En conséquence, à un point de l'image (ξ, η) correspond une infinité de points au sol (X, Y, Z) (Krauss et Waldhäusl, 1998). Puisque c'est l'altitude de l'objet qui est recherchée, le Z n'est pas connu. En conséquence, deux points images, représentant le point sol, seront nécessaires pour déterminer le système. Il faut donc des repères qui soient visibles sur les deux acquisitions.

Ces calculs sont réalisés par compensation des moindres carrés (Krauss et Waldhäusl, 1998 ; Casson, 2004). La compensation par moindres carrés (ou minimisation) permet d'ajuster les variables de localisation des deux caméras à partir de paramètres d'orientation externe approchés (le système de positionnement embarqué), des paramètres d'orientation internes (propriétés des caméras) et de points de contrôle au sol.

Afin de déterminer la position des caméras au moment de la prise de vue par compensation des moindres carrés, plusieurs points d'appui sont nécessaires. Deux types de points sont utilisés.

- Des points de calage *in situ*, disposés sur site, leurs coordonnées géographiques étant connues.

- Des points homologues appelés points de contrôle relatifs. Ce sont des points déterminés automatiquement sur les clichés (environ une centaine). Ils représentent des cibles fixes au sol (points d'amer), que l'on retrouve sur la zone de recouvrement, et dont seules les coordonnées pixels sont connues. De l'homogénéité de leur répartition sur la zone de recouvrement dépendra la qualité du calcul des positions des caméras.

Les résidus finaux de la compensation par moindres carrés permettent de calculer les écarts-types et donc la qualité des précisions de l'orientation des caméras (Krauss et Waldhäusl, 1998 ; Casson, 2004) (fig. 2-22). Dans le cas idéal, les droites C1M1 et C2M2 devrait s'intersecter au point A, ce qui n'est jamais le cas dans la réalité à cause des nombreuses approximations de calculs. On cherche donc à minimiser la distance constituée des points D1 et D2 entre ces deux droites. Le point A recherché est, par définition, le milieu du segment D1, D2 (fig. 2-22).

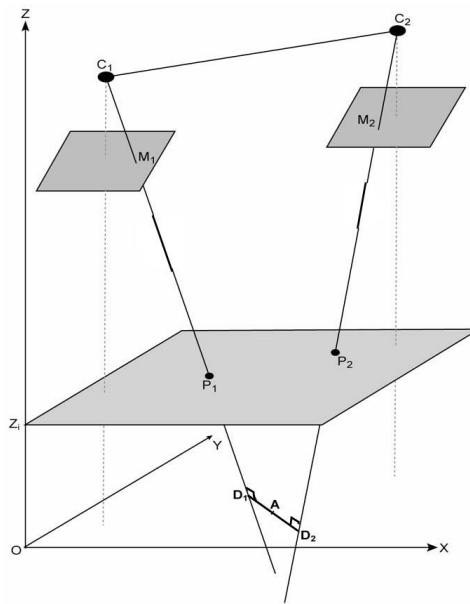


Figure 2-22. Calcul de la position approchée, dans le repère sol de deux points images homologues (modifié d'après Casson, 2004)

2.1.5. Corrélation des images stéréoscopiques

Après l'obtention des coordonnées des deux caméras, la deuxième étape consiste à établir un lien radiométrique entre les deux images du couple stéréoscopique. Elle correspond à la phase de **corrélation**. Les tests ont été réalisés en utilisant le corrélateur *MEDICIS* développé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et implémenté dans la chaîne de traitement.

Il s'agit de retrouver de façon automatique la position des pixels homologues (pixels communs aux deux images) sur l'ensemble de la zone de recouvrement. Cette étape de corrélation repose sur la « transformée de Fourier » (Wolf et Dewitt, 2000). Entre deux images, la translation d'un point de contrôle se traduit par un déphasage du signal. La mesure de cette translation permet de corrélérer les signaux radiométriques des images d'un couple stéréoscopique afin d'extraire des points homologues pour le couple considéré (Casson, 2004 ; Delacourt *et al.*, 2007). Dans le domaine cartésien, ce décalage ($d\xi$, $d\eta$) se traduit par un pic de corrélation entre l'image 1 et l'image 2 (fig. 2-23).

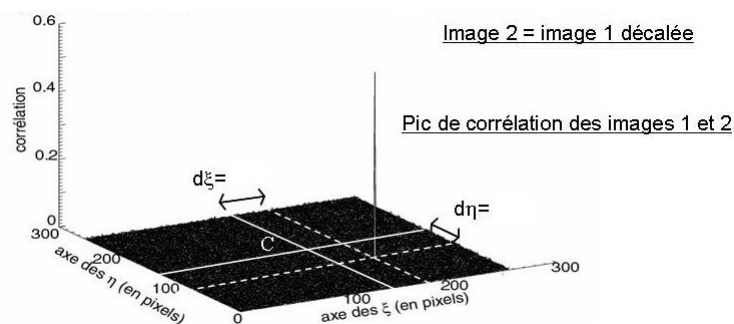


Figure 2-23. Exemple d'un pic de corrélation produit par la translation de deux images

Lorsque le décalage s'accompagne d'une rotation, la mesure devient alors impossible. Les causes de ces rotations / translations entre images sont dues aux changements brusques de trajectoire lors d'une passe (trajectoire rectiligne). Pour une même ligne de vol, différents décalages en rotation et / ou en translation peuvent ainsi être enregistrés. Le pic de corrélation entre points supposés homologues n'est alors pas observé. Afin de résoudre ce problème de « décorrélation », l'image est rééchantillonnée selon un pas défini avant d'être corrélée. Le procédé consiste à dégrader les images en appliquant des fenêtres de corrélation décroissantes pour abaisser leurs résolutions jusqu'à retrouver un pic homologue. Cette opération est répétée pour affiner le calcul du décalage entre points homologues et ainsi obtenir une grille de correspondance de points. La corrélation est une méthode progressive qui demande une analyse des résultats pour chaque corrélation (Casson, 2004).

2.1.6. Restitution et précision de la topographie

A partir des paramètres internes et externes de la caméra et des grilles de correspondance de la phase de corrélation, il est alors possible de générer un MNT. Le calcul du MNT est l'étape finale de la stéréorestitution. Il permet d'obtenir les positions X, Y et Z au sol en tout point de la zone de recouvrement des deux images. Le MNT est alors filtré (un filtre médian est appliqué pour éliminer les points aberrants) et interpolé en deux dimensions.

Le MNT a une précision qui correspond au pas d'échantillonnage choisi pour l'interpolation des points précédemment calculés. Ce pas tient compte de la résolution au sol des images et de la résolution de la corrélation. La résolution réelle du MNT est variable sur la surface de l'image. Elle est dépendante de la densité des points retenus par l'étape de corrélation et des aberrations géométriques de l'objectif de l'appareil photo utilisé (si non étalonné).

Afin d'estimer la qualité du MNT, les écarts types des variables X, Y et Z sont calculés en chaque point du MNT en fonction des résidus issus de l'étape de la corrélation par moindres carrés (Casson, 2004). Ces écarts types caractérisent l'écart à l'intersection entre les lignes de visées, pour chaque point du MNT. Ils sont donc représentatifs de la précision de la restitution de la topographie, encore appelée précision relative (Casson *et al.*, 2003). Ces valeurs permettent la construction d'une carte de précision planimétrique et altimétrique pour chaque MNT produit. La solution optimale pour évaluer la qualité du MNT produit reste la comparaison entre les points mesurés *in situ* et les points calculés.

Il est à noter que la création du MNT permet l'orthorectification de l'image correspondant à la zone de recouvrement du couple stéréoscopique.

Cette chaîne de traitement photogrammétrique a été utilisée dans les restitutions topographiques de bancs de galets traités dans la partie 3.

2.2. Les surfaces immergées

Basée sur les mêmes exigences que la restitution des surfaces exondées, la restitution bathymétrique nécessite des suivis à pas de temps courts (après chaque évènement hydrologique significatif) avec une précision élevée.

2.2.1. Etat de l'art

Actuellement, aucune étude bathymétrique de cours d'eau n'a été réalisée par imagerie satellite. Les premières avancées effectuées en bathymétrie ont été faites en premier lieu dans les domaines côtiers et insulaires (Philpot, 1989 ; Loubersac *et al.*, 1991 ; Lee *et al.*, 1998 ; Andrefouët, 2002 ; Smet *et al.*, 2006).

Plusieurs expériences ont été réalisées pour restituer la bathymétrie d'eau peu profonde par imagerie aérienne, en s'appuyant sur des modèles physiques fondés sur les propriétés radiatives de l'interface air / eau (testés sur zone lagunaire : Maritorea *et al.*, 1994, et sur cours d'eau : Legleiter *et al.*, 2004) ou bien à partir de relations statistiques (appelées modèles empiriques) reposant sur des mesures ponctuelles de hauteurs d'eau (Winterbottom et Gilvear, 1997 ; Bryant et Gilvear 1999 ; Mobley et Sundman 2001 ; Brasington *et al.*, 2003 ; Westaway *et al.*, 2003 ; Marcus *et al.*, 2003 ; Chaponnière, 2004 ; Carbonneau *et al.*, 2006). La plupart des études réalisées portent sur des rivières en tresses, qui ont pour avantage d'avoir une bande active très ouverte avec peu d'unités végétales en bord de chenal et un fond relativement homogène.

2.2.2. Les modèles bathymétriques physiques

Appliqués en premier lieu sur le domaine maritime, les modèles bathymétriques physiques ont ensuite été développés pour de grands cours d'eau à eau claire. Nous pouvons citer les travaux de Lyon *et al.* (1992), Lyon et Hutchinson (1995). Ils ont développé un modèle optique qui, couplé à des mesures de terrain, discrétise cinq classes de hauteurs d'eau sur la St. Mary's River (Michigan, USA). Cependant, ces modèles sont difficiles à transférer sur des cours d'eau à faibles profondeurs avec des fonds hétérogènes et présentant des zones de turbulence. De plus, les paramètres d'entrée exigés par les modèles lors d'une restitution de hauteurs d'eau plus importantes, tels que les valeurs spectrales des substrats de fond de chenal ou bien les propriétés optiques de la colonne d'eau, sont difficiles à obtenir sur le terrain. Dans ce contexte, la modélisation des interactions entre le signal lumineux et la colonne d'eau est complexe à restituer (Legleiter *et al.*, 2004).

2.2.3. Les modèles bathymétriques empiriques

En supposant que les conditions de l'atmosphère, de la masse d'eau et du fond du chenal, soient homogènes, le signal enregistré par le capteur n'est dépendant que de la hauteur d'eau. Dans un tel contexte, une relation statistique simple peut être établie entre le

signal radiométrique de l'image aérienne et les hauteurs d'eau mesurées *in situ*. De nombreuses études se sont basées sur cette technique. Plusieurs supports images ont d'ailleurs été testés pour restituer la bathymétrie des cours d'eau, qu'il s'agisse :

- d'images multi-spectrales : Lyon *et al.*, 1992 ; Winterbottom and Gilvear, 1997 ; Bryant et Gilvear, 1999 ; Gilvear *et al.*, 1999 ; Whited *et al.*, 2002, Stumpf et Holderied, 2003 ; Marcus *et al.*, 2002,
- d'images hyper-spectrales : Marcus *et al.*, 2003,
- ou d'images en couleur ou en noir et blanc : Winterbottom et Gilvear, 1997 ; Brasington *et al.*, 2003 ; Westaway *et al.*, 2003 ; Chaponnière, 2004 ; Carbonneau *et al.*, 2006 ; Lejot *et al.*, 2007.

Fonstad et Marcus (2005) ont développé une variante à cette relation « hauteur d'eau / radiométrie » intitulée HAB (*Hydraulically assisted Bathymetry*). Il s'agit d'associer des données hydrauliques, topographiques et d'absorption lumineuse de la colonne d'eau aux valeurs radiométriques des images.

Le principe du **Modèle Bathymétrique Empirique** (MBE) consiste à extraire une valeur radiométrique moyenne pour chaque mesure *in situ* appelée **Hauteur d'Eau Observée** (HEO). Une régression est appliquée afin de prédire les hauteurs d'eau à partir des valeurs radiométriques de l'image (2.8). En fonction des propriétés radiométriques des canaux RVB de l'image, un ou plusieurs canaux sont sélectionnés. Lorsque les trois canaux sont utilisés, la relation statistique s'écrit alors de la façon suivante :

$$\text{HEO} = aR + bV + cB + d \quad (2.8)$$

Avec R, V, B, les valeurs radiométriques des pixels des canaux rouge (R), vert (V), bleu (B) et a,b,c,d des constantes. Les valeurs radiométriques peuvent faire l'objet d'une transformation pour que leur distribution suive une loi normale. Le logarithme népérien est ainsi couramment utilisé.

A l'issue de la construction du modèle, une carte des hauteurs d'eau peut ainsi être produite. Afin d'exploiter cette approche par modèle bathymétrique empirique, une chaîne de traitements a été développée sous IDL (annexe 2).

D. Paramètres clefs des restitutions des processus fluviaux par télédétection

L'étude des formes fluviales nécessite d'évaluer de façon précise les variations altitudinales de leur topographie et, plus généralement, leur dynamique, et cela avec une fréquence de suivi importante.

1. Le contexte général

1.1. L'imagerie satellite

Les études réalisées en géomorphologie fluviale à partir d'imageries satellites optiques ont principalement concerné les rivières de grande taille et leur bassin versant (Muller *et al.*, 1993 ; Smith, 1997). Plusieurs études révèlent ce constat : le Mississippi (Gomez *et al.*, 1997), l'Amazone (Mertès *et al.*, 1993 ; Miranda *et al.*, 1998), le Yangtze (Zhang, 2004), (Hamilton *et al.*, 2007), le Mékong (Gupta et Liew, 2007), le Brahmapoutre (Takagi *et al.*, 2007). Jusqu'à présent, la capacité de résolution des satellites n'était pas suffisante pour identifier les unités de la bande active, telles que les chenaux en eau (bras principal et secondaire, île) et leurs faciès (seuils, mouilles) ainsi que le caractère des surfaces exondées (granulométrie, végétation riparienne, embâcles) (tab. 2-2, page 71). Depuis quelques années, de nouveaux satellites à **Haute Résolution (HR)** (Toutin, 2004) produisant des images sub-métriques (Ikonos 2 (1999) dont la résolution est de 1 m et QuickBird 2 (2001) dont la résolution est de 60 cm), sont disponibles pour caractériser les fleuves ou les rivières à bande active large, mais leur utilisation est encore à un stade exploratoire pour les rivières (tab. 2-3, page 72).

1.2. L'imagerie aérienne

L'exploitation des photographies aériennes est plus ancienne, quant à elle, dans l'étude des formes fluviales. Leur résolution centimétrique (Photographie IGN : 50 cm, tab. 2-3, page 72) permettant l'identification des unités du corridor fluvial de cours d'eau de plus petites tailles, de nombreuses études ont ainsi été réalisées à partir de couvertures aériennes pour étudier le lit des rivières (Lane *et al.*, 2000), la végétation riparienne (Marston *et al.*, 1995 ; Perrez Corraera, 2004 ; Dufour, 2005), l'impact d'une crue sur les dépôts sédimentaires (Gomez *et al.*, 1997) et la caractérisation des habitats aquatiques (Puestow *et al.*, 2001). Dans d'autres cas, les images aériennes ont également été utilisées pour évaluer la concentration des matières en suspension (Mertès *et al.*, 1993 ; Rainey *et al.*, 2000) ou l'inondation des plaines alluviales (Bates et De Roo, 2000) et la restitution des faciès granulométriques de bancs (Verdu *et al.*, 2005 ; Carbonneau *et al.*, 2004, Carbonneau, 2005).

De plus, du fait de leur ancienneté, les photographies aériennes constituent une base de données historique importante (plus de 50 ans), ce qui n'est pas le cas des images

satellites dont les premières acquisitions remontent à 1972 pour le satellite américain Landsat et 1986 pour le satellite européen Spot (tab. 2-2). Les analyses multi-temporelles à partir de photographies aériennes ont donc été largement utilisées pour évaluer les changements des formes fluviales (Downward *et al.*, 1994 ; Gilvear *et al.*, 1995 ; Gurnell, 1997) et, plus précisément, les phénomènes d'incision et d'exhaussement du chenal (Marston *et al.*, 1995 ; Bryant et Gilvear, 1999 ; Liébault *et al.*, 2003), les érosions de berges (Winterbottom et Gilvear, 2000 ; Piégay *et al.*, 2005), le volume de bois mort introduit par érosion (Lassetre *et al.*, 2007), l'évolution des courbures de méandre (Gurnell, 1997) ou la formation et la sédimentation des bras morts (Citterio et Piégay, 2000).

Afin de renforcer les connaissances des milieux fluviaux et de leur dynamique, l'objectif est maintenant d'accroître la résolution des images pour reconstruire la géométrie de rivières de plus petite taille et détecter les changements temporels avec un pas de temps plus court. Quelques études ont récemment ouvert cette voie (Westaway *et al.*, 2003 ; Lane *et al.*, 2003 ; Chaponnière *et al.*, 2004 ; Gilvear *et al.*, 2004 ; Carbonneau *et al.*, 2006) en se focalisant sur 2 points : les zones immergées (chenal en eau) et les zones émergées (bancs de galets).

En reprenant les critères des technologies terrestres, aériennes et spatiales, deux paramètres sont à prendre en considération lors d'une restitution de la topographie : la résolution qui va définir l'objet pouvant être restitué, et la fréquence de suivi, afin d'appréhender l'évolution de l'objet étudié. Ferguson (2007) a établi un schéma synthétisant les technologies qui ont été décrites précédemment (fig. 2-24). Il illustre le bilan des techniques prospectées à travers les deux échelles : spatiale et temporelle.

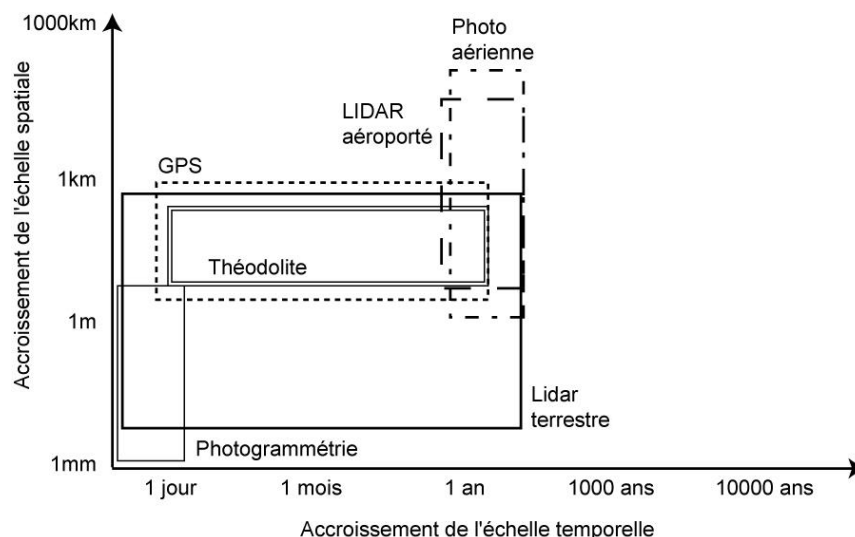


Figure 2-24. Les limites spatiales et temporelles des techniques de restitution morphologique (d'après Ferguson, 2007)

Tableau 2-2 : Tableau de synthèse des satellites optiques

Satellites optiques

	Pays	Date de lancement	Altitude (km)	Capteurs	Bandes spectrales (µm)	Résolution spatiale (m)	Dimension d'une scène (km)	Mode stéréoscopie	Fréquence de passage
LANDSAT	USA	1972	705	MSS (Multispectral Scanner)	1 (V) [0,5-0,6] 2 (R) [0,6-0,7] 3 (IR) [0,7-0,8] 4 (IR) [0,8-1,1]	60 x 80	185 x 185	non	18 jours
LANDSAT 4 et 5	USA	1984	705	TM (Thematic Mapper)	1(B) [0,45-0,52] 2(V) [0,52-0,60] 3(R) [0,63-0,69] 4(IR) [0,76-0,90] 5(IRM) [1,55-1,75] 6(IRT) [10,4-12,5] 7(IRM) [2,08-2,35]	30 bande 6 : 120	185 x 172	non	16 jours
LANDSAT 7	USA	1999	705	ETM+ (Enhance Thematic Mapper)	1(B) [0,45-0,52] 2(V) [0,53-0,61] 3(R) [0,63-0,69] 4(IR) [0,78-0,90] 5(IRM) [1,55-1,75] 6(IRT) [10,4-12,5] 7(IRM) [2,09-2,35] (Pan) [0,52-0,90]	30 bande 6 : 120 Pan : 15	185 x 172	non	16 jours
SPOT 1, 2 et 3	FRANCE	1986	822	HRV (Haute Résolution Visible)	1(V) [0,50-0,59] 2(R) [0,61-0,68] 3(IR) [0,79-0,89] (Pan) [0,51-0,73]	20 Pan : 10	60 x 60 (80 km en visée latérale extrême)	oui +/- 30° d'inclinaison	3 à 26 jours
SPOT 4	FRANCE	1998	822	HRVIR (Haute Résolution Visible et Infrarouge)	1(V) [0,50-0,59] 2(R) [0,61-0,68] 3(IR) [0,79-0,89] (Pan) [0,51-0,73]	20 Pan : 10	60 x 60 (80 km en visée latérale extrême)	oui +/- 27° d'inclinaison	3 à 26 jours
TERRA	USA	1999	705	ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)	1(V) [0,52-0,60] 2(R) [0,63-0,69] 3(IR) [0,78-0,86] 3B(IR) [0,78-0,90] 4(IRM) [1,60-1,70] 5(IRM) [2,145-2,185] 6(IRM) [2,185-2,235] 7(IRM) [2,235-2,85] 8(IRM) [2,295-2,365] 9(IRM) [2,36-2,43] 10(TIR) [8,125-8,475] 11(TIR) [8,475-8,825] 12(TIR) [8,925-9,275] 13(TIR) [10,25-10,95] 14(TIR) [10,95-11,65]	1, 2, 3B : 15 4 à 9 : 90 10 à 14 : 90	60 x 60	oui (bandes 3 et 3B)	16 jours
JERS-1	JAPON	1992	568	OPS (Optical Scanner)	1(V) [0,52-0,60] 2(R) [0,63-0,69] 3(IR) [0,76-0,86] 4(IR) [0,76-0,86] 5(IRM) [1,60-1,71] 6(IRM) [2,01-2,12] 7(IRM) [2,13-2,25] 8(IRM) [2,27-2,40]	18	75 x 75	oui (bandes 3 et 4)	44 jours
IRS-1C	INDE	1995	904	LISS3 (Linear Imaging Self-Scanner)	1(V) [0,52-0,59] 2(R) [0,62-0,68] 3(IR) [0,77-0,86] LISS3 : 1(V) [0,52-0,59] 2(R) [0,62-0,68] 3(IR) [0,77-0,86] 4(IRM) [1,55-1,70] (Pan) [0,50-0,75]	24	142 x 142 Pan : 70 x 70	oui +/- 26° d'inclinaison	24 jours (Pan 5 à 24 jours)
RESOURCESAT-1	INDE	2003	817	LISS3 & LISS4 (Linear Imaging Self-Scanner)	LISS3 : 1(V) [0,52-0,59] 2(R) [0,62-0,68] 3(IR) [0,77-0,86] 4(IRM) [1,55-1,70] (Pan) [0,50-0,75] LISS4 MX : 1(B) [0,52-0,59] 2(V) [0,62-0,68] 3(IR) [0,77-0,86] 3(IR) [0,77-0,86] (Pan) [0,50-0,75]	24 Pan : 5,8 LISS4 MX : 5,8	142 x 142 Pan : 70 x 70 LISS4 MX : 24 x 24	Pan : oui +/- 26° d'inclinaison	24 jours (Pan et MX 5 à 24 jours)

Tableau 2-3 : Tableau de synthèse des vecteurs optiques HR

Satellites optiques Haute Résolution

Pays	Date de lancement	Altitude (km)	Capteurs	Bandes spectrales (µm)	Résolution spatiale (m)	Dimension d'une scène (km)	Mode stéréoscopie	Fréquence de passage
FRANCE	2002	830	HRG (Haute Résolution Géométrique)	1(V) [0,50-0,59] 2(R) [0,61-0,68] 3(IR) [0,79-0,89]	B4 : 20 B1, B2, B3 : 10 Pan : 2,5 et 5 couleurs (THR + HX) : 2,5	60 x 60 (80 km en visée latérale extrême)	oui 2 modes : +/- 27° d'inclinaison en visée oblique et visée avant arrière	3 à 26 jours
INDE	2000	480	-	Pan [0,50-0,90]	1,8	12,6 x 12,6	oui	1,8 à 4 jours
USA	1999	681	-	1(B) [0,45-0,52] 2(V) [0,52-0,60] 3(R) [0,63-0,69]	4 Pan : 1	13 x 13	oui +/- 26° d'inclinaison	3 jours à 1m 1,5 jour à 1,5m
USA	2001	450	-	1(B) [0,45-0,52] 2(V) [0,52-0,60] 3(R) [0,63-0,69]	2,5 Pan : 0,61	16 x 16	oui	1 à 3,5 jours
USA	2003	470	-	1(B) [0,45-0,52] 2(V) [0,52-0,60] 3(R) [0,62-0,69]	4 pan : 1	8 x 8	non	3 jours
USA	prévu en 2007	684	-	1(B) [0,45-0,52] 2(V) [0,52-0,60] 3(R) [0,63-0,69]	1,64 Pan : 0,41	15,2 x 15,2	non	3 jours

Avion	
FRANCE	<p>depuis 1921 (service géo-graphique de l'armée)</p> <p>1939 à 1952 pour la 1ère couverture complète du territoire</p> <p>8,8 (en pratique mais très variable selon les séries)</p> <p>Argentique (f : 152mm)</p> <p>Postérieur à 2000 CCD Kodak (f : 152mm)</p> <p>Noire et blanc jusqu'en 1960</p> <p>Couleur</p> <p>En moyenne 0,5 (entre 1:2000 et 1:65000 selon les séries)</p> <p>Support papier : variable</p> <p>Ortho photo : 1 x 1 la dalle</p> <p>Variante avant 2000</p> <p>Depuis 2000 : 5 ans (du 15 mai au 15 septembre)</p>

Le facteur limitant l'utilisation des images satellites et des photographies aériennes dans l'étude des hydrosystèmes fluviaux demeure en premier lieu la résolution spatiale des supports. La résolution spatiale des images disponibles actuellement sur le marché varie de 50 cm pour les photographies aériennes à plusieurs dizaines, voire centaines, de mètres pour les images satellites (tab. 2-2 et 2-3). Cette résolution des images aériennes ou satellites est dépendante de la puissance des capteurs embarqués mais également de l'altitude de vol.

2. Résolution spatiale

En pratique, dans le domaine fluvial, l'inventaire que souhaiteraient le biologiste ou le géomorphologue se heurte souvent au fait que la taille des objets élémentaires n'est pas toujours suffisante pour que ceux-ci soient perceptibles compte tenu de la résolution spatiale de l'image. Il existe, cependant, de larges zones homogènes dominées par des sédiments (bancs de galets), des macrophytes, une ripisylve, qui posent moins de problèmes pour la définition des classes et leur identification sur l'image (fig. 2-25).

Néanmoins, le problème de l'hétérogénéité radiométrique des objets demeure quand on s'intéresse aux unités fonctionnelles et à leurs limites (Andréfouët et Roux, 1998). Si le pixel de l'image couvre une zone hétérogène, la valeur radiométrique mesurée par le capteur sera une somme pondérée des contributions de chacune des parties constituant cette zone hétérogène.

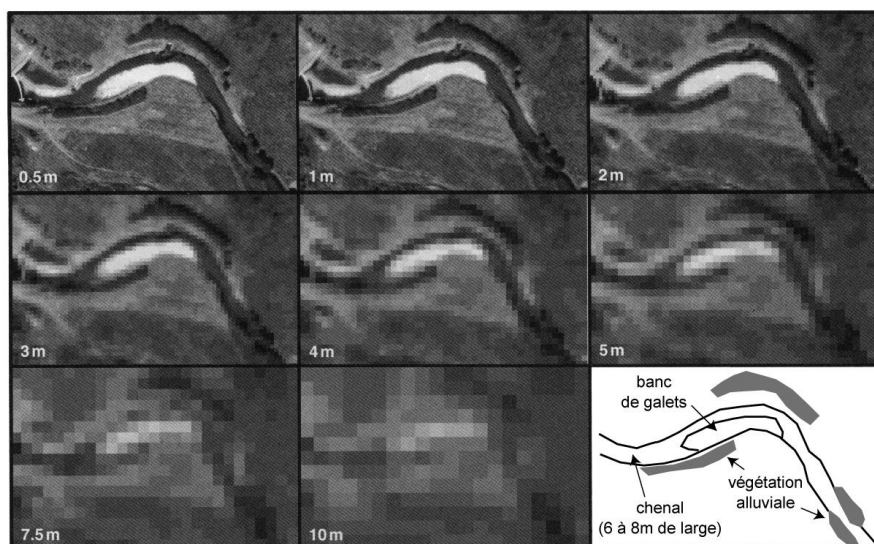


Figure 2-25. Implication de la résolution des images aériennes et satellites pour la caractérisation d'un secteur fonctionnel (d'après Downs et Priestnall, 2003)

En théorie, l'augmentation de la résolution spatiale des images permet d'identifier n'importe quel objet en fonction de critères structuraux (d'agencement) ou texturaux (radiométrique). En pratique, si la résolution spatiale augmente, la signature spectrale des

objets devient très sensible à des facteurs locaux. Elle présente alors une forte variabilité, qui rend difficile la reconnaissance sans ambiguïté des objets. Ainsi, la luminance des objets devient sensible aux fluctuations d'éclairement, engendrées par la géométrie intrinsèque de la scène (ombre portée, phénomène de vaguelette).

En résumé, une faible résolution spatiale induit une faible variance spectrale, mais la nature des objets est alors grossièrement décrite. En revanche, une résolution élevée permet d'atteindre le niveau des objets, mais implique une forte variabilité des mesures qui deviennent sensibles aux facteurs locaux et à l'hétérogénéité du site. Il existe donc des *optimums* de résolution spatiale pour la reconnaissance d'objets à partir d'images (Woodcock et Strahler, 1987). Gilvear *et al.* (2003) apportent des éléments de réponse sur ces *optimums* à partir de paramètres comme la taille des chenaux sur une photographie aérienne, l'échelle de la photographie, la longueur du tronçon à considérer et la taille du pixel dépendant, pour les photographies aériennes scannées, de la résolution retenue. Gilvear et Bryant (2003) considèrent que l'imagerie spatiale n'est pas adaptée à l'étude morphologique (2D et 3D) d'un chenal inférieur à 20 mètres de large et l'imagerie aérienne ne peut être utilisée que pour des supports ayant une échelle inférieure au 1 : 5000. Actuellement, l'IGN n'offre pas de telles échelles à partir des couvertures aériennes standards. Ainsi, certains ensembles fonctionnels du corridor fluvial, tels que les bras secondaires ou bien les bras morts, ne peuvent être étudiés à partir des offres commerciales actuelles.

Malgré le développement de nouveaux capteurs spatiaux, les satellites n'offrent pas encore une résolution suffisante pour restituer ces formes fluviales. Pour cette raison, les photographies aériennes ont été largement plébiscitées. Cependant, leurs échelles de restitution ne permettent pas d'atteindre la gamme des précisions centimétriques. Ces constats ont déjà été établis à partir d'autres travaux, réalisés notamment dans le domaine de la géologie (Baratoux *et al.*, 2001 ; Casson *et al.*, 2003 ; Casson, 2004 ; Casson *et al.*, 2005 ; Delacourt *et al.*, 2007). La dynamique des processus étudiés, tels que les glissements de terrain, impose des précisions qui nécessitent une très haute résolution.

3. Fréquence de passage

L'étude morphologique d'un site fait intervenir les notions d'inventaire ou bien de quantification, et cela à différentes dates données. La détection des modifications morphologiques nécessite donc la prise en compte d'une échelle temporelle afin de pouvoir établir des comparaisons et ainsi de restituer différents états. Dans le contexte d'un suivi de restauration, nous avons constaté (partie 1) que la notion de temporalité est primordiale dans la pertinence du choix des indicateurs mis en place pour l'évaluation d'une restauration. Cependant, l'utilisation d'images aériennes et satellitaires dans le domaine de la morphologie fluviale n'est pas abordée à l'échelle de l'évènementiel (exemple d'une crue), car les vecteurs disponibles sont pour le moment inadaptés. La fréquence des couvertures aériennes IGN, mises à jour tous les 5 ans, interdit toute possibilité de suivi évènementiel ou

annuel, ou bien à des coûts prohibitifs. On pourrait cependant croire que les fréquences de passage affichées par les fournisseurs d'images spatiales prouvent le contraire (tab. 2-2 et 2-3). En effet, la programmation d'images satellites est couramment utilisée, mais elle est dépendante de deux facteurs fondamentaux :

- le délai entre la date de la commande et la date effective de prise de vue. Il est fortement lié aux conditions météorologiques et notamment au taux de couverture nuageuse. Dupéret *et al.* (2004) considèrent qu'un satellite doit effectuer entre 6 et 10 passages pour être certain d'en avoir un qui soit satisfaisant,
- la qualité intrinsèque de l'image en lien avec la problématique abordée. Lorsque les conditions météorologiques sont adéquates, l'acquisition est réalisée sans pour autant que l'information enregistrée puisse répondre à d'autres critères tels que les conditions hydrologiques (débit, turbidité, quantité de matière en suspension...), édaphique (humidité du sol), ou bien les conditions d'acquisition (horaire non approprié par rapport à la position du soleil, induisant de fortes ombres portées).

En raison de ces limitations, très peu d'études comparatives ont vraiment été réalisées à pas de temps court.

4. Avènement de nouvelles plates-formes radio télécommandées

Avec l'augmentation du nombre d'études traitant de la restauration et du suivi morphologique des rivières, de nouveaux enjeux techniques se font jour, notamment pour détecter les variations planimétriques et altimétriques à l'échelle de l'année. Pour répondre à ces objectifs de **Très Haute Résolution (THR)** et de fréquence répétée des acquisitions, de nouveaux vecteurs issus de la famille des **LARS** (*Light Aerial Remote Sensing*), tels que les drones, les hélicoptères, les ballons dirigeables, etc. sont de plus en plus couramment utilisés dans l'étude des formes du relief (Casson *et al.*, 2003, Delacourt *et al.*, 2007), des érosions de versant (Raclot *et al.*, 2005) et dans la reconnaissance des états de surface (Corbane, 2006). Ces nouvelles plates-formes radio-télécommandées sont flexibles en termes d'utilisation et peuvent fournir des états observés successifs à intervalle régulier permettant de caractériser, crue après crue, le changement en plan des chenaux.

Les capteurs embarqués sur ces nouvelles plates-formes peuvent répondre à l'un des enjeux technologiques, qui est d'accroître la résolution des images et donc la précision des cartes bathymétriques et des MNT afin d'explorer l'échelle de la micro-topographie (centimétrique à décimétrique).

C'est à partir des constats explicités précédemment que ce travail a été engagé. Il s'agit d'avoir à disposition une plate-forme permettant à la fois de répondre à la résolution spatiale des formes fluviales étudiées (domaine de la Très Haute Résolution), mais également de répondre à la dynamique des formes par une résolution spatiale et temporelle

adaptée à des cours d'eau de taille intermédiaire afin de détecter et d'analyser les paramètres d'ajustement verticaux et horizontaux du système fluvial à l'échelle du tronçon. Dans ce but, un drone de la famille des « Pixy » a été acheté en 2003 par la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) et géré par l'UMR 5600 « Environnement, Ville, Société » et le CEMAGREF de Lyon. La présentation de ce nouvel appareil utilisé dans le domaine fluvial sera abordée dans le chapitre 1 de la partie 3.

Acquisition et restitution des formes fluviales par imagerie à très haute résolution

A. Mise en œuvre du drone Pixy

1. Présentation de la plate-forme
2. Potentialités et limites de la technologie
3. Positionnement du drone parmi les autres vecteurs aériens et spatiaux
4. Les protocoles développés

B. Restitution des états de surfaces en 2D : la granulométrie des bancs de galets

1. Calibrage du modèle par semi-variance 2D
2. Restitution des faciès granulométriques

C. Restitution des états de surfaces en 3D

1. La restitution de la topographie émergée
2. La restitution de la bathymétrie

D. Synthèse et discussion

1. L'outil drone : une solution miracle ?
2. Le modèle granulométrique 2D : entre paramètres d'ajustement et résolution des images
3. Les contraintes de restitution par photogrammétrie
4. La sensibilité des modèles bathymétriques

La synthèse bibliographique réalisée sur les techniques et supports de la télédétection (cf. partie 2) a révélé le potentiel des images aériennes et satellites à restituer des formes fluviales. Il apparaît clairement que les besoins en termes de précision et de répétitivité ne sont pas actuellement atteints avec ce type de capteurs. Le développement et l'utilisation d'un vecteur léger, produisant des images à très haute résolution, permettent de répondre à ces exigences.

Le premier chapitre est consacré à la présentation du drone, à ses potentialités et limites et à son positionnement parmi les autres plates-formes existantes. Les protocoles qui ont été développés pour acquérir et exploiter les images drone sont présentés.

Le second chapitre traite de la restitution de la granulométrie des bancs de galets à partir de modèles par semi-variance 2D dans le but d'étudier la répartition spatiale des sédiments émergés.

Le troisième chapitre porte sur la restitution des états de surfaces en 3D à partir de deux techniques : par photogrammétrie pour caractériser les surfaces exondées, et par modèle bathymétrique empirique pour caractériser les surfaces immergées. Ce type de restitution, difficile à acquérir à une échelle fine, permet d'appréhender la topographie du lit mineur, informations primordiales pour comprendre les processus alluviaux, définir la qualité des habitats aquatiques et participer à l'amélioration des modèles hydrauliques.

Les logiciels utilisés dans le cadre de ce travail sont ArcGis (*ESRI*) et Envi (*ITT*). Cependant, les fonctions offertes par ces logiciels ne couvrent que partiellement nos besoins en traitement d'images. Il a donc été nécessaire de développer de nouvelles fonctions et procédures. Nous avons choisi le langage IDL, qui outre son interfaçage aisé avec ENVI, est particulièrement adapté (*via* des procédures de fonctions dédiées) au traitement des images. Ce métalangage de programmation, dérivé du langage C++, est dédié au traitement d'images (<http://www.itvis.com>).

A. Mise en œuvre du drone Pixy

1. Présentation de la plate-forme

Le drone « Pixy », initialement développé par l'IRD (Institut de recherche pour le développement) (Asseline *et al.*, 1999), est un petit para-moteur radio-télécommandé construit par la société Philae Concept (France) (fig. 3-1). Il est constitué d'une nacelle, reliée par des suspentes à une voile tubulaire, et d'un moteur thermique 25 cm³ / 3 ch - 10000 tours/minute. Son poids est de 7 kg à vide. La nacelle est configurée pour embarquer des appareils de mesures pour un poids maximum de 4kg. Le tableau de la figure 3-1 reprend l'ensemble des caractéristiques techniques de l'appareil.



Dimensions	84 x 63 x 61 cm
Poids complet	7 kg
Charge utile	4 kg
Voile	3 m ²
Moteur	ZENOAH 25 cm ³ / 3 ch 10000 tr/mn
Réservoir	1 litre
Vitesse de vol	15 à 35 km/h

Figure 3-1. Le drone Pixy et ses caractéristiques techniques

Il décolle comme un avion et atterrit en planant, moteur coupé. Le décollage et l'atterrissage doivent se faire dans un espace ouvert (goudronné ou sur herbes rases) avec une surface minimum de 40 m de longueur sur 20 m de largeur. Lorsque ces conditions d'utilisation et de sécurité ne peuvent être remplies, le décollage se fait à partir d'une rampe de lancement (fig. 3-2). Constituée de trois tubes guidant les roues de l'appareil, cette structure est spécialement conçue pour être utilisée sur banc de galets et peut s'installer sur des herbes hautes.

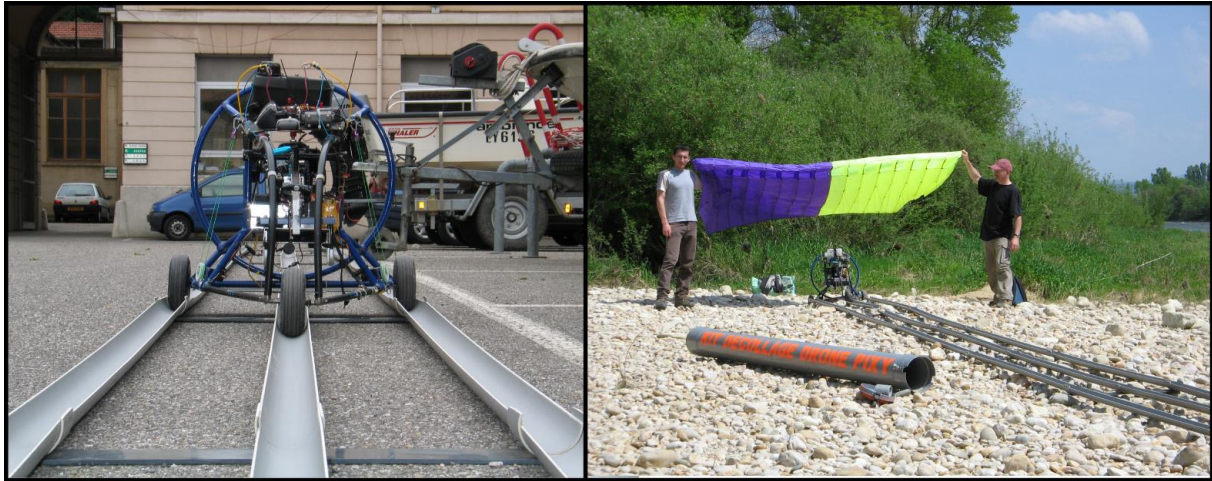


Figure 3-2. Rampe de lancement drone « tri-tube » et son installation *in situ*

Le pilotage du drone s'effectue à vue. La distance au sol pouvant être couverte à partir d'un même point est de 800 m, soit un linéaire maximal de 1600 m. Grâce à son réservoir d'un litre, il a une autonomie de vol d'une heure. Sa puissance moteur lui permet d'atteindre facilement les altitudes de 400 / 500 m. Sa vitesse est comprise entre 15 et 35 km/h.

Les prises de vue sont réalisées *via* des capteurs optiques. Ils sont disposés sur un pantographe équipé de vérins assurant leur verticalité. Le matériel utilisé est un appareil photo numérique (CANON PowerShot G5 - 5M de pixels - focale 35 mm), un appareil numérique très haute résolution (CANON EOS 5D - 13M de pixels - focale 35 mm) et, en dépannage, un appareil argentique (CANON EOS 500 N Reflex – focale 35 mm). Les paramètres des capteurs restent identiques quelles que soient les images acquises. La focale est bloquée sur l'infini et réglée sur l'hyperfocale afin que la mise au point reste fixe pour éviter les flous liés aux variations de distance par rapport à l'objet visé pendant le déplacement du drone. Le diaphragme est à 8, pour une grande profondeur de champ, et la vitesse d'obturation est en mode « priorité vitesse », afin de figer l'image pour éviter les « flous de bougé ». Cette configuration assure une cohérence entre images, indispensable lors de leur traitement.

La réponse spectrale enregistrée par le capteur d'un appareil photo numérique correspond aux longueurs d'ondes du visible (cf. fig. 2-1, partie 2), comme l'illustre la figure 3-3a. Certains appareils disposent d'une bande spectrale plus large vers le proche infrarouge (fig. 3-3b). Les longueurs d'ondes de ces derniers sont, par défaut, filtrées, mais peuvent être exploitées moyennant une modification matérielle de l'appareil numérique.

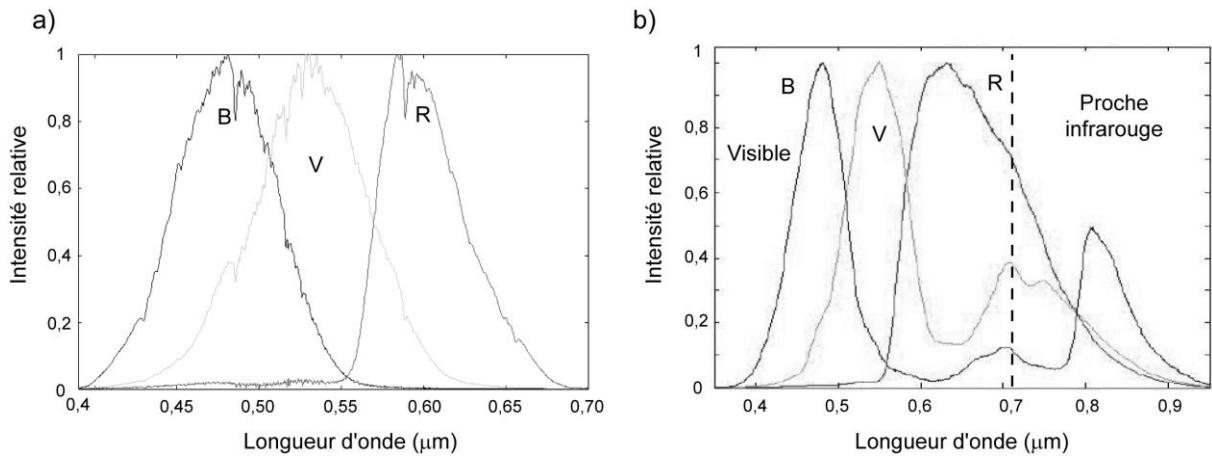


Figure 3-3. Sensibilité spectrale d'un appareil photo numérique, a) capteur CMOS Canon EOS 10D, b) capteur EOS 350D sans filtre

Le signal du CANON PowerShot G5 est transmis au sol par onde radio vers un système de réception (petit écran CCD) incrusté dans une paire de lunettes afin de restituer en temps réel au pilote les scènes survolées par le drone (fig. 3-4). La nacelle est également équipée d'un GPS (Garmin II+). L'altitude de vol, l'orientation et la vitesse sont ainsi contrôlées à partir d'un pocket PC installé sur le poste de pilotage (fig. 3-4). Ces systèmes confèrent au pilote une assistance durant le vol pour garantir le succès des missions.

Paramètres de vol (altitude, vitesse, orientation)

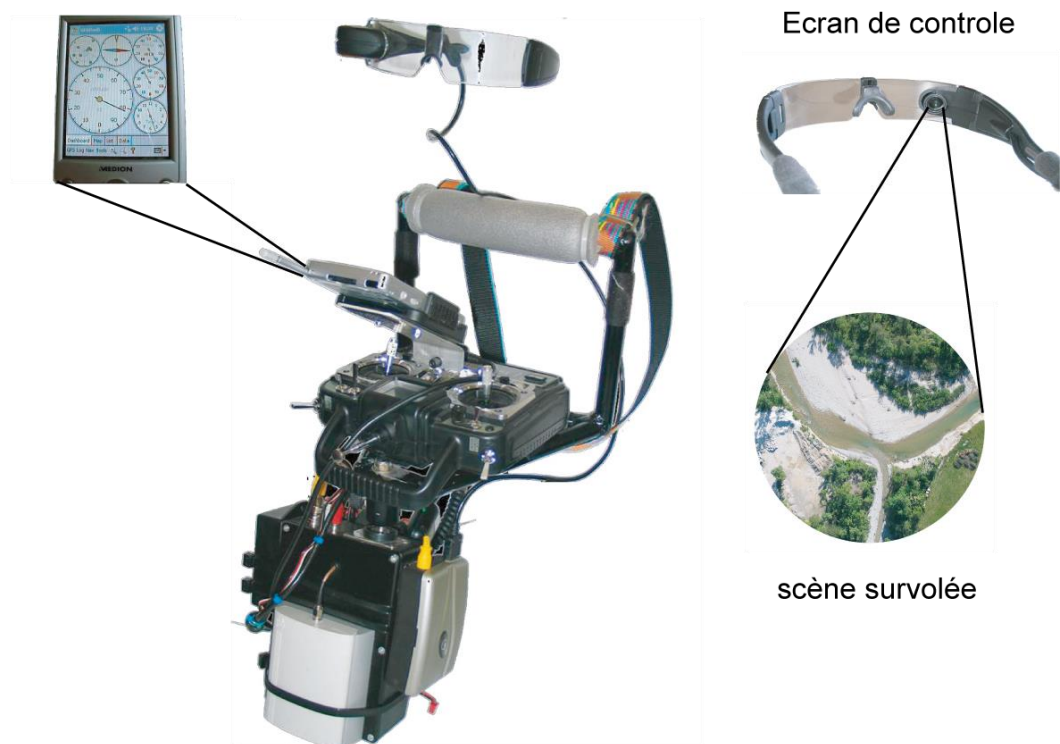


Figure 3-4. Le cockpit du drone composé du poste de pilotage, du système de visualisation en temps réel et de la réception des paramètres de vol sur pocket PC

Afin d'apprécier le potentiel des images drone, une planche photo (fig. 3-5) présente un panel d'acquisitions correspondant à un échantillon de formes fluviales.

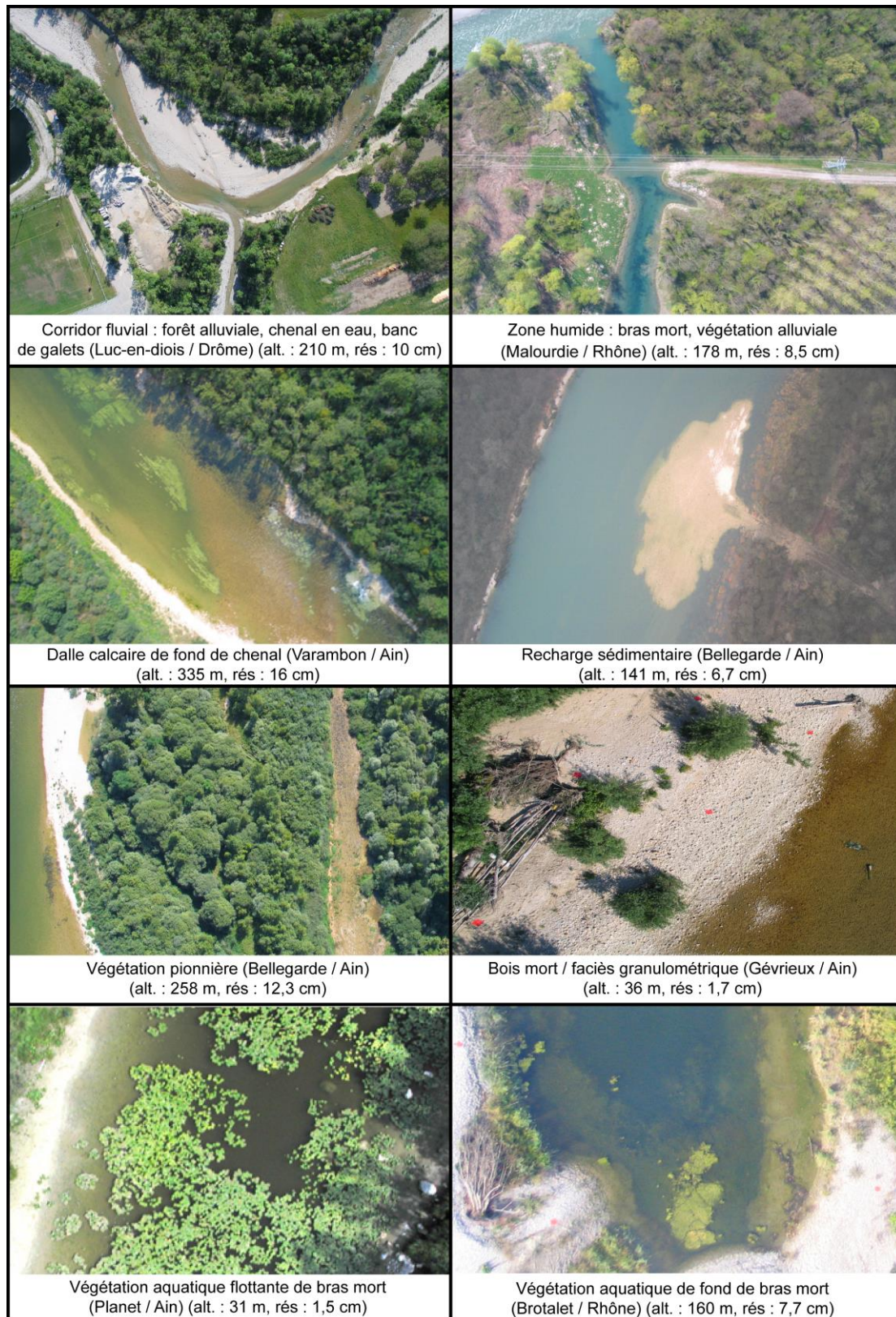


Figure 3-5. Exemples d'images drone portant sur différents milieux et faciès fluviaux (alt. : altitude de la prise de vue, rés : résolution en cm / pixel)

2. Potentialités et limites de la technologie

Différents auteurs ont précédemment utilisé et exploité le drone Pixy pour acquérir des images (Chaponnière, 2004 ; Casson, 2004 ; Raclot *et al.*, 2005) mais ses potentialités et ses limites n'ont pas été réellement évaluées. Dans cette perspective, toutes les missions drone réalisées dans le cadre de ce travail ont été listées dans le tableau 3-1 et les images acquises ont été analysées dans le cadre des applications développées dans le chapitre 4.

Tableau 3-1. Caractéristiques des missions drone

Sites	Situation géographique	Linéaire couvert (m)	Durée des missions (jour)	Nombre de balises	Nombre d'images par mosaïque	Altitudes moyennes (m)	Résolution (cm/pixel)	Nombre de personnes
Banc de Luc-en-Diois (29/01/2004)	Drôme	300	1	63	5	230	11	3
Lône du Planet (03/02/2004)	Ain	350	1	41	6	105	5	3
Banc de Gévrieux (18/06/2004)	Ain	200	1	35	7	70	3,4	3
Banc de Gévrieux (21/07/2004)	Ain	200	1	82	6	70	3,5	3
Tronçon de Varambon (20/06, 22/07/2004)	Ain	1900	2	74	25	150	7	3
Tronçon de Gévrieux (15/07/2004)	Ain	1200	1	63	22	180	8,6	4
Banc de Gévrieux (21/07/2004)	Ain	200	1	81	6	75	3,6	3
Tronçon de Varambon-Priay (19,20/07/2005)	Ain	4 700	2	180	29	290	14	4
Banc de Gévrieux (26/10/2005)	Ain	200	1	61	3	210	10	3
Tronçon de Bellegarde (22/02/2006)	Ain	900	1	68	7	190	9	3
Lône de Brotalet (20/04/2006)	Haut Rhône	700	1	88	10	170	8	3
Lône de la Malourdie (20/04/2006)	Haut Rhône	430	1	50	9	85	4	3
Tronçon des Carronnières (04/05/2006)	Ain	440	1	39	4	230	11	3
Banc des Grandes Iles (16/06/2006)	Haut Rhône	500	1	160	5	230	11	3
Tronçon de Bellegarde (30/06/2006)	Ain	1 350	1	87	12	190	9,4	3
Lône de la Malourdie (29/09/2006)	Haut Rhône	430	1	55	8	85	4,4	3
Lône de Brotalet (10/10/2006)	Haut Rhône	700	1	57	9	105	5	3
Lône de la Malourdie (16/03/2007)	Haut Rhône	430	1	31	4	230	11	3
Banc des Grandes Iles * (28/06/2007)	Haut Rhône	500	1	59	3	355	10	3

* capteur canon EOS 5D

2.1. Résolution spatiale et fréquence d'acquisition

La résolution spatiale des acquisitions et leur emprise au sol dépendent de l'altitude de vol. La figure 3-5 et le tableau 3-1 permettent d'illustrer la variété des résolutions offertes (de 3,4 à 14 cm) par la technologie drone et les thématiques hydro-morphologiques qui peuvent être étudiées : végétation alluviale, végétation aquatique, bancs de galets, chenal, site de restauration etc. Pour couvrir l'ensemble d'un périmètre, des recouvrements longitudinaux (entre clichés) et latéraux (entre axes de vol) peuvent être nécessaires afin d'assurer une parfaite continuité de la couverture photos du site survolé.

Classé comme un appareil d'aéromodélisme, le drone Pixy n'est pas soumis à la législation régissant les conditions de circulation aérienne. Il peut donc décoller sans autorisation et à partir de n'importe quel site, sous condition de ne pas dépasser l'altitude

autorisée de 150 m. En pratique, cette limite est régulièrement franchie (tab. 3-1). Il peut donc être mobilisé à tout moment pour le suivi d'évènements hydrologiques ou bien pour caractériser des évènements saisonniers.

2.2. Les contraintes météorologiques

Les développements technologiques réalisés afin d'améliorer les conditions de pilotage et de décollage (fig. 3-4, page 81) ont permis de réduire les contraintes d'utilisation de cet appareil. Cependant, il reste un paramètre impossible à maîtriser, à savoir les conditions météorologiques et, plus particulièrement, l'aérodynamique et la pluviométrie.

La configuration aéronautique du drone (voile / nacelle) explique qu'il soit sensible au vent. Au dessus de 20 km/h de vent, son pilotage devient délicat et la stabilité de la nacelle, qui garantit des acquisitions verticales, n'est plus assurée. La voile rend le drone également sensible aux évènements pluvieux. L'humidification de cette dernière change les conditions de portabilité du drone entraînant un pilotage délicat et donc dangereux.

Afin d'estimer l'importance de ces deux contraintes, les données météorologiques correspondant aux sites d'étude présentés en partie 4 ont ainsi été analysées. Elles ont été enregistrées aux stations d'Ambérieu-en-Bugey et de Belley (respectivement à 6 km des sites de l'Ain et 16 km des sites du Rhône de Chautagne).

2.2.1. Conditions aérodynamiques

Une estimation du nombre de jours durant lesquels il est potentiellement possible de voler a été réalisée à partir de données fournies par Météo France. Celles-ci concernent les vitesses instantanées maximum journalières qui ne prennent donc pas en compte la variabilité intra-journalière. Les mesures ont été effectuées à deux mètres du sol. Elles peuvent donc être différentes de mesures enregistrées à l'altitude opérationnelle du drone. Après vérification, les mesures d'altitude sont soit inexistantes, soit indisponibles. La période d'enregistrement des données météorologiques analysées n'est pas identique d'une station à l'autre, car les données de certaines années ne figurent pas dans la base de données de Météo France.

La figure 3-6 illustre le nombre mensuel de journées présentant un vent supérieur à 20 km/h durant la période 2000 / 2005 à la station d'Ambérieu-en-Bugey pour l'Ain. Le même graphique est produit à partir des données de la station de Belley pour le Rhône durant la période 2001 / 2004 (fig. 3-7).

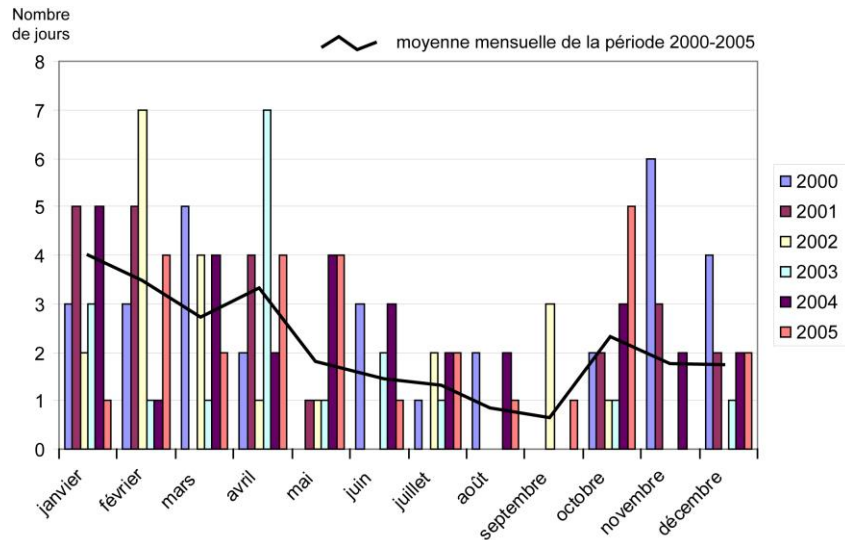


Figure 3-6. Nombre mensuel de journées présentant un vent supérieur à 20 km/h (vitesse instantanée maximum journalière) (période 2000 – 2005), station d'Ambérieu-en-Bugey

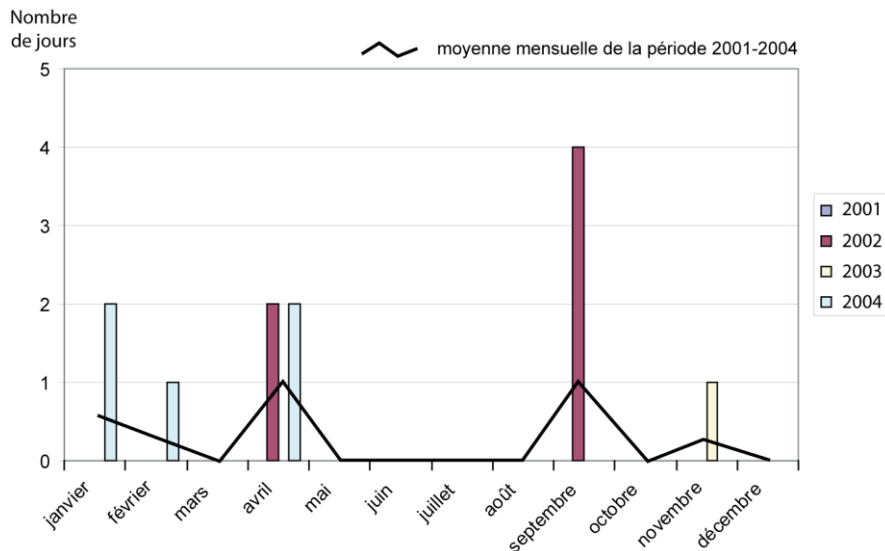


Figure 3-7. Nombre mensuel de journées présentant un vent supérieur à 20 km/h (vitesse instantanée maximum journalière) (période 2001 – 2004), station de Belley

Les figures 3-6 et 3-7 montrent clairement qu'il existe de nombreuses « fenêtres » aérologiques disponibles tout au long de l'année. Deux critères peuvent étayer cette analyse : la localisation géographique des stations et la saisonnalité.

- La localisation du site d'étude est une contrainte importante pour l'utilisation du drone. A périodes égales (2001/2004), le nombre de journées favorables pour effectuer des vols drone est de 91 pour la station d'Ambérieu-en-Bugey contre 12 pour la station de Belley. Ces valeurs peuvent s'expliquer par les contextes orographiques différents qui existent entre les deux stations de mesures. La station d'Ambérieu-en-Bugey est localisée en plaine tandis que la station de Belley se trouve dans une vallée plus encaissée. Ainsi, la

Chautagne (Belley) est dans un contexte d'abri par rapport au vent dominant, ce qui constitue un net avantage pour l'utilisation de la technologie drone.

- La contrainte saisonnière est clairement mise en évidence à la station d'Ambérieu-en-Bugey. La période estivale est propice à l'utilisation du drone principalement de mai à septembre (le minimum apparaît en septembre). En revanche, les mois de janvier, février, mars, sont moins favorables. Pour la station de Belley, les conditions aérologiques sont en revanche favorables tout au long de l'année (inférieures à 4 jours / mois, fig. 3-7).

Dans l'ensemble, les conditions aérologiques sont donc plus favorables en Chautagne (Belley) et, ce, quelle que soit la période de l'année.

2.2.2. Conditions pluviométriques

Nous avons réalisé une étude comparable pour la pluviométrie. Les journées prises en compte enregistrent une pluviométrie journalière supérieure ou égale à 0,6 mm. Cette valeur permet d'écarter tout phénomène de rosée.

Contrairement aux conditions aérologiques, les conditions pluviométriques sont sensiblement les mêmes entre les deux stations (fig. 3-8 et 3-9). En effet, à période identique (de 2001 à 2004), la station d'Ambérieu-en-Bugey comptabilise 771 jours de pluie (médiane à 10, fig. 3-8) contre 693 jours pour celle du Belley (médiane à 9, fig. 3-9). L'écart qui existe entre ces deux valeurs est considéré comme négligeable pour une période de 5 ans.

Les variabilités pluviométriques saisonnières sont également plus marquées que pour les conditions aérologiques. La station d'Ambérieu-en-Bugey enregistre une moyenne mensuelle minimum au mois de février. A la station de Belley, la variabilité mensuelle du nombre de jours de pluie est plus marquée avec une fenêtre météorologique favorable pour la période estivale (juin et juillet).

Dans l'ensemble, les deux stations présentent des conditions pluviométriques identiques, même si une variabilité saisonnière est légèrement plus prononcée à la station de Belley.

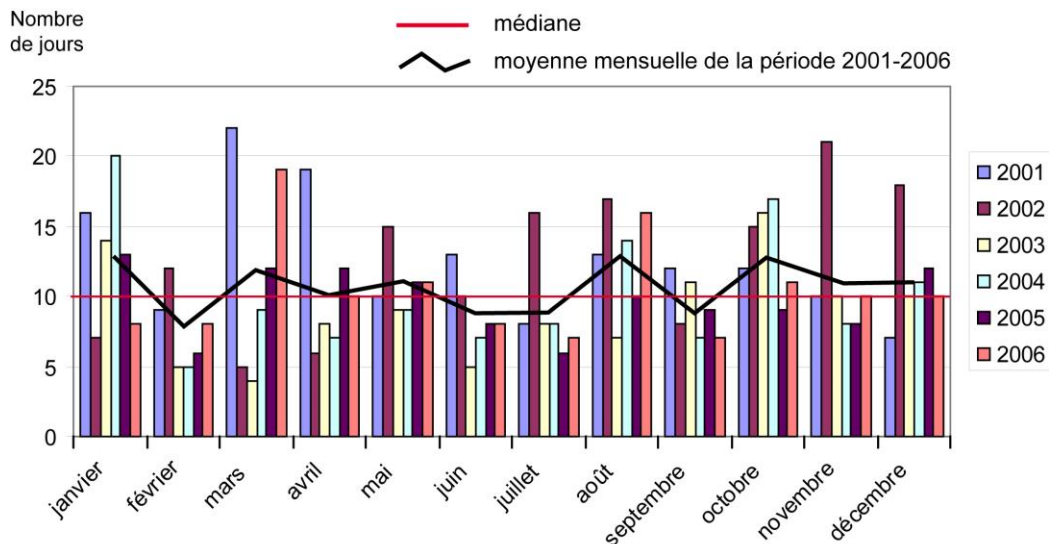


Figure 3-8. Nombre mensuel de journées présentant des précipitations (moyenne journalière) (période 2001-2006), station d'Ambérieu-en-Bugey

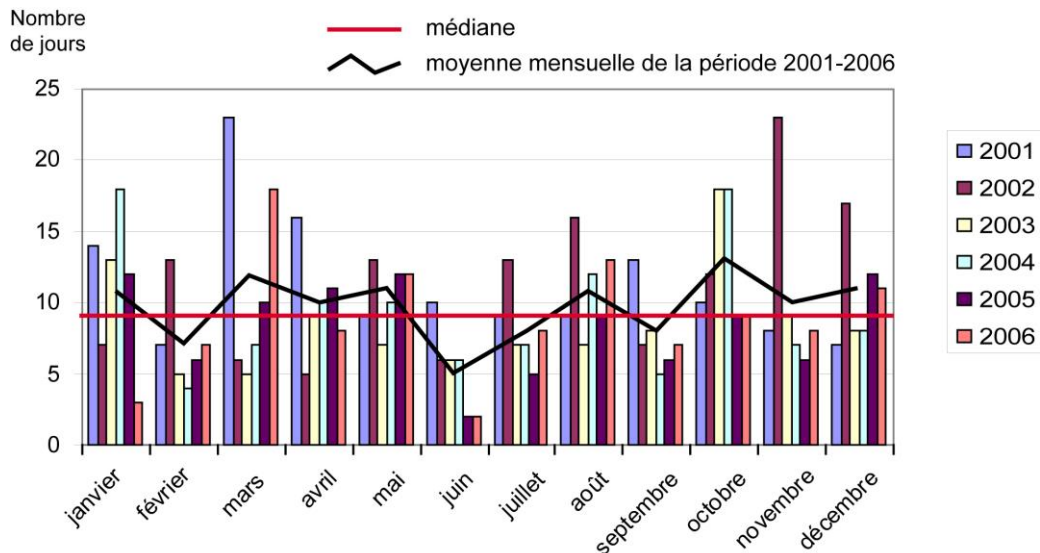


Figure 3-9. Nombre mensuel de journées présentant des précipitations (moyenne journalière) (période 2001-2006), station de Belley

2.2.3. Bilan

Lorsqu'on établit le bilan des conditions climatiques défavorables pour l'utilisation du drone, en prenant en considération à la fois le facteur aérologique et le facteur pluviométrique, deux observations principales ressortent (fig. 3-10 et 3-11). La contrainte pluviométrique est largement plus contraignante que la contrainte aérologique et, ce, quelle que soit la saison. En revanche, il existe des fenêtres météorologiques plus favorables toutes conditions climatiques confondues. La période estivale est naturellement la plus favorable, mais les disparités intersaisons restent faibles.

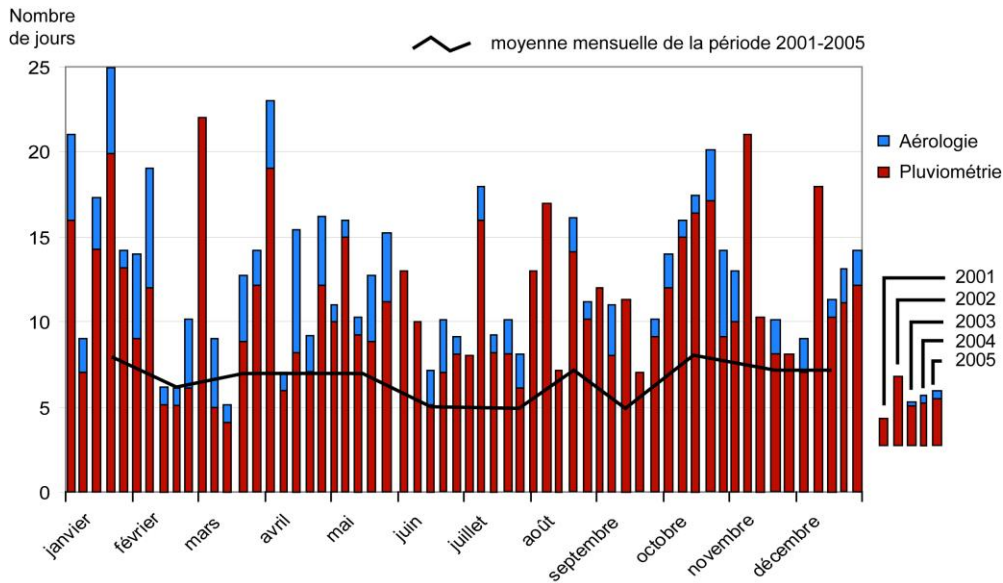


Figure 3-10. Cumul mensuel de journées présentant à la fois du vent supérieur à 20 km/h ou des précipitations (moyenne journalière) (période 2001 / 2005), station d'Ambérieu-en-Bugey

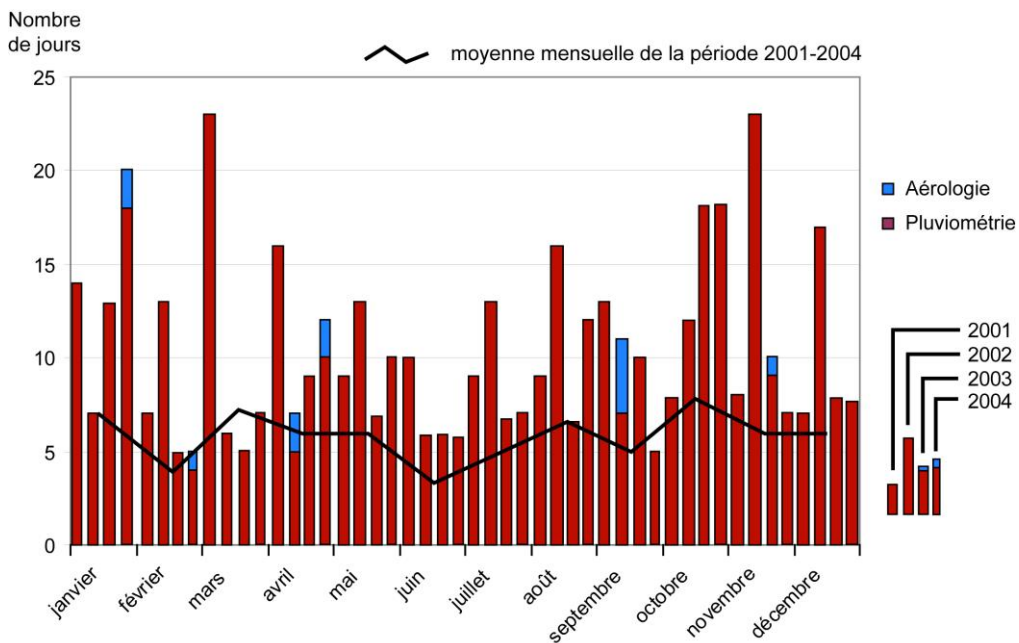


Figure 3-11. Cumul mensuel de journées présentant à la fois du vent supérieur à 20 km/h ou des précipitations (moyenne journalière) (période 2001 / 2004), station de Belley

3. Positionnement du drone parmi les autres vecteurs aériens et spatiaux

La synthèse bibliographique figurant dans la partie 2 témoigne de la quantité et de la diversité des travaux réalisés dans le domaine de la télédétection fluviale. Les paramètres-clés mis en avant par les différents auteurs (résolution, emprise au sol, fréquence et coût)

ont été repris dans le paragraphe qui suit afin de comparer les capacités du drone face aux plates-formes existantes.

Notre système a été comparé aux différents vecteurs de télédétection les plus utilisés (tab. 3-2) : SPOT 5, QuickBird 2, et les acquisitions aériennes réalisées par l'Institut Géographique National (IGN). Le découplage entre panchromatique et multi-spectrale pour les satellites SPOT 5 et QuickBird 2 permet de mettre en valeur la résolution optimale du capteur en mode panchromatique (noir et blanc) et du capteur en mode multi-spectral (sensible à différentes gammes de longueurs d'onde et produisant une composition colorée).

Tableau 3-2. Tableau comparant la technologie Pixy et un échantillon de plates-formes produisant des images à haute résolution

		Résolution (m)	Largeur de la scène (km)	Taille de la scène (km ²)	Fréquence (jour / an)	Prix d'une scène (euro)	
		(m) ¹	2,5 ²	60	3600	14	8100
		(p)	2,5 ²	60	3600	14	5400
		(m)	2,4	16,5	272,5	160	5400
		(p)	0,61	16,5	272,5	160	5100
		Avion (IGN) ³	0,5	3,6	12,96	0 ⁴	75
	Drone	0,02 ⁵	0,035 à 0,3	0,17 ⁶	180 ⁷	500	

1. (p) capteur panchromatique
(m) capteur multi-spectral

2. 1 : 20000 - scan 1000 dpi

3. Résolution interpolée

4. Une fois tous les 5 ans

5. En fonction de l'altitude de vol

6. Superficie couverte en une journée

7. Sur l'hypothèse d'1 jour sur 2

Le drone, évoluant à une altitude plus basse que les autres vecteurs, produit tout naturellement des images à plus haute résolution (variables selon les capteurs optiques embarqués). A cette altitude d'exploitation, il est le seul, parmi les plates-formes analysées, à pouvoir offrir une résolution centimétrique, c'est-à-dire inférieure à 10 cm (tab. 3-2). A cette résolution, toutes les unités d'un tronçon sont identifiables, que ce soit la végétation (herbacée, aquatique, arbustive, arborée), les chenaux de petite taille (les bras secondaires et morts) et les substrats (affleurement ou dalle en fond de chenal, bois morts) jusqu'à la structure granulométrique des bancs (restitution du D₅₀).

L'emprise au sol (la largeur de la scène), correspondant à la couverture générée en une seule passe par le drone, dépend de son altitude de vol ainsi que de la focale du capteur embarqué. Ce qui est un avantage en terme de résolution pour la technologie drone (passage à très basse altitude) devient un inconvénient pour couvrir de grandes surfaces ou bien au prix d'une multiplication du nombre d'acquisitions sur l'axe de vol et entre axes de vol.

La mobilisation rapide du drone autorise des fréquences d'acquisitions élevées. Ces fréquences permettent, non seulement d'effectuer un suivi saisonnier de l'activité végétale du corridor fluvial, mais également de détecter les changements morphologiques engendrés par des évènements hydrologiques au cours d'une année. Lorsque les conditions météorologiques le permettent, il est opérationnel dès la fin d'une crue pour un premier état des lieux. La fréquence affichée sur le tableau 3-2 est basée sur la prévision d'un vol possible tous les deux jours. Cette prévision optimiste est comparable à celle qu'établissent les fournisseurs d'images satellites. Dans la pratique, ces fréquences de passage ne peuvent être respectées (cf. conditions météorologiques).

A titre d'exemple, la programmation d'une image QuickBird2, fin 2006, sur un périmètre prédéfini de la basse vallée de l'Ain, n'a été réalisée qu'un mois et demi après la date de la commande. Pourtant, la fréquence de passage affichée par le satellite QuickBird 2 est en moyenne de 160 jours/an (tab. 3-2) soit un enregistrement tous les 2 à 3 jours. L'image finalement acquise présentait peu de nuages (< à 20%, qui est le seuil de qualité pratiqué par le fournisseur) mais ne répondait pas aux facteurs intrinsèques de l'image, c'est-à-dire :

- une faible couverture nuageuse empiétant sur le périmètre d'étude,
- de fortes ombres portées dues à l'heure matinale de l'acquisition,
- un débit élevé interdisant toute quantification surfacique des bancs de galets (débit correspondant à la date d'acquisition : 255 m³/s pour un module annuel de 125 m³/s, station Pont-d'Ain - Source Banque Hydro).

Le dernier des facteurs à considérer est le coût d'une acquisition. Naturellement, la comparaison devrait se faire à travers le prix d'une image au km² (pratiqué par plusieurs fournisseurs). Ce rapport est cependant peu représentatif de ce que peut apporter une image car plusieurs paramètres diffèrent en fonction de la problématique et de la taille de l'objet à étudier (résolution, fréquences, emprise au sol et types de capteur). Le choix d'une référence de comparaison s'est donc porté sur le coût minimal d'une scène, sachant que le périmètre couvert peut être supérieur aux besoins réels (tab. 3-3). Les zones grisées correspondent aux vecteurs présentant la meilleure rentabilité par rapport à la superficie couverte. En partant de ce postulat, le drone est effectivement très coûteux par rapport aux autres vecteurs, à superficie égale, et cela quelle que soit la surface. En revanche la technologie drone est plus compétitive pour de faibles périmètres d'étude : 500 euros (maintenance du drone et mise à disposition d'un pilote) pour 0,34 km² (superficie maximale couverte par le drone en une journée soit 170 m × 2000 m) comme l'illustre le tableau 3-3. Seul l'avion de l'IGN reste moins cher (prix correspondant à une image d'archive et non à une programmation) mais sans pouvoir optimiser, comme le drone, la couverture d'une emprise linéaire correspondant à la forme du cours d'eau.

Tableau 3-3. Coût minimal en euros par vecteur en fonction de la superficie effective de l'étude (en grisé : vecteur présentant la meilleure rentabilité par superficie couverte)

Surface (km ²)	Drone	Avion IGN (*)	QuickBird 2 (p)	QuickBird 2 (m)	Spot 5 (p)	SPOT 5 (m)
0,34	500	75	5100	5400	5400	8100
2		75	5100	5400	5400	8100
4		75	5100	5400	5400	8100
8		75	5100	5400	5400	8100
16			5100	5400	5400	8100
32					5400	8100
64					5400	8100
128					5400	8100
256					5400	8100
512					5400	8100
1024					5400	8100

(*) images d'archive

4. Les protocoles développés

Toutes analyses spatiales réalisées à partir de photographies aériennes ou bien d'images satellites nécessitent de connaître les paramètres de localisation des vecteurs aériens et spatiaux au moment de l'acquisition, ou bien d'établir un référentiel au sol permettant de les retrouver.

4.1. Rectification des images

L'imagerie drone, produisant des acquisitions à faibles altitudes, nécessite de combiner plusieurs images pour couvrir une zone suffisamment étendue (une mosaïque). Chaque image a ses propres déformations géométriques dépendantes de l'altitude de vol du drone et de l'orientation du capteur au moment de la prise de vue (effet de roulis, lacet, tangage). La variabilité de ces paramètres durant les prises de vue produit des distorsions entre images. Il est donc nécessaire de corriger chacune d'entre elles indépendamment. La correction de ces distorsions a pour objectif de :

- minimiser les déformations géométriques liées aux propriétés optiques des capteurs utilisés. Non concernés par ce critère, les satellites enregistrent des longueurs d'onde et non une image. Ils doivent cependant faire face à d'autres inconvénients, comme les distorsions générées par les couches atmosphériques,
- minimiser les déformations liées aux reliefs (les images du drone sont peu affectées par ce paramètre, car le vol est réalisé à très basse altitude).

Lorsque les paramètres de prises de vue sont parfaitement connus (exemple des acquisitions aériennes de l'IGN), il est théoriquement possible de corriger toutes les distorsions. Cependant, en raison de la résolution centimétrique des images à traiter, la connaissance de ces paramètres nécessiterait des précisions centimétriques, ce qui est impossible avec le système de localisation actuel du drone (GPS). L'alternative est donc de

repérer des cibles ou points de contrôle au sol (*Ground Control Point*) sur les images dont les coordonnées sont connues.

De la qualité des mosaïques produites dépendront les traitements et les analyses spatiales effectués *a posteriori*. Peu de travaux géographiques abordent ce sujet. Des tests, réalisés par Hughes *et al.* (2006) à partir de photographies aériennes sur cours d'eau, mettent en évidence l'impact des procédures de rectification (correction) et l'optimisation des points de contrôle au sol. Deux paramètres sont donc à prendre en considération dans un processus de rectification multi-images : l'algorithme de transformation et la stratégie d'échantillonnage des points de contrôle.

4.1.1. Les algorithmes de transformation

L'opération qui consiste à corriger l'intégralité d'une image est une ortho-rectification. Cette dernière requiert l'utilisation d'un MNT. Etant donné le nombre d'acquisitions à traiter et la complexité de l'opération à partir de couples d'images (Lejot *et al.*, 2007), l'opération imposerait des temps de réalisation trop importants. De plus, les zones d'intérêt étant relativement « plates » (fonds de vallée), la rectification des images ne nécessite pas la prise en compte de la topographie, d'où l'utilisation de polynômes d'ordre « n » à partir de points de contrôle.

Le fait de prendre appui sur des points de contrôle permet de corriger la géométrie des images. Ces points de contrôle, ou points connus, sont corrélés à ceux de l'image qui va s'ajuster à une nouvelle grille (ou grille de transformation). Cet ajustement de l'image, qui peut être important en fonction des critères de déformation précédemment cités, va engendrer un rééchantillonnage (un réagencement) des pixels selon différentes transformations géométriques.

Le logiciel utilisé pour la rectification des images est ArcMap (ESRI). Trois types de transformations géométriques (affines) sont proposés, correspondant à trois polynômes d'ordre « n ». Une transformation affine permet d'effectuer une translation, une rotation, une homothétie et un désaxement. La fonction de transformation affine est la suivante (3.1) :

$$\begin{aligned}x' &= Ax + By + C \\y' &= Dx + Ey + F\end{aligned}\quad (3.1)$$

x et y sont les coordonnées image

x' et y' les coordonnées géographiques

A : taille du pixel

B : coefficient de rotation

C : coordonnée x du 1^{er} pixel en haut à gauche de l'image

D : coefficient de rotation

E : le négatif de la taille du pixel

F : coordonnée y du 1^{er} pixel en haut à gauche de l'image

La transformation affine ne conserve pas les propriétés géométriques de l'image (distances et angles). En théorie, cette transformation nécessite trois points connus (**quatre points** seront nécessaires pour valider la qualité de la transformation). Les polynômes d'ordre supérieur nécessiteront un nombre de points connus plus important pour que l'on puisse résoudre leurs équations et valider leurs transformations, 2^e ordre : **six points connus**, 3^e ordre : **dix points connus**. Les transformations seront alors optimales localement par rapport aux points connus mais plus imprécises sur les espaces ne disposant pas de points de contrôle.

Ces transformations engendrent des erreurs car l'image ne peut être déformée au-delà d'un certain seuil, au risque de la détériorer. Ces erreurs, appelées résidus, peuvent être appréciées à l'échelle de l'image. Elles sont appelées « erreurs moyennes quadratiques » ou plus communément RMS (*Root Mean Square*). La RMS est calculée en prenant la racine carrée de la somme des carrés des erreurs résiduelles de chaque point de contrôle (3.2).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N S(i)^2}{N}} \quad (3.2)$$

S(i) : résidu des points issu de la transformation polynomiale (valeur métrique)

N : nombre de points connus

La figure 3-12 illustre l'impact des déformations géométriques de l'image et les résidus associés. Nous pouvons constater que les valeurs des résidus sont homogènes car les points de contrôle au sol sont bien répartis sur l'image, quel que soit le polynôme appliqué. En revanche, pour une transformation d'ordre élevé, l'ajustement se fait localement au détriment des bords (fig. 3-12c).

Les observations constatées sur des surfaces exondées sont à vérifier sur un périmètre où il y a présence d'une zone « morte », comme c'est le cas d'un plan d'eau. Afin d'évaluer l'impact de cette zone morte sur la rectification des images, un test a été réalisé à partir de l'image d'une lône (fig. 3-13). Deux observations peuvent être faites :

- La première, comme pour le test précédent, permet de mettre en exergue l'impact d'un polynôme d'ordre élevé sur les bords de l'image (fig. 3-13c). Le phénomène est d'autant plus accentué lorsque l'implantation des points de contrôle forme deux structures linéaires (de part et d'autre du chenal), et réparties de façon non homogène sur l'image.
- Le second point nous permet d'affirmer que l'absence de balises au centre de l'image n'engendre que peu de déformations sur le plan d'eau quels que soient les polynômes appliqués car les points de contrôle entourent l'objet d'étude. La disposition de ces dernières est donc une configuration suffisante pour préserver les caractéristiques géométriques de l'objet à étudier.

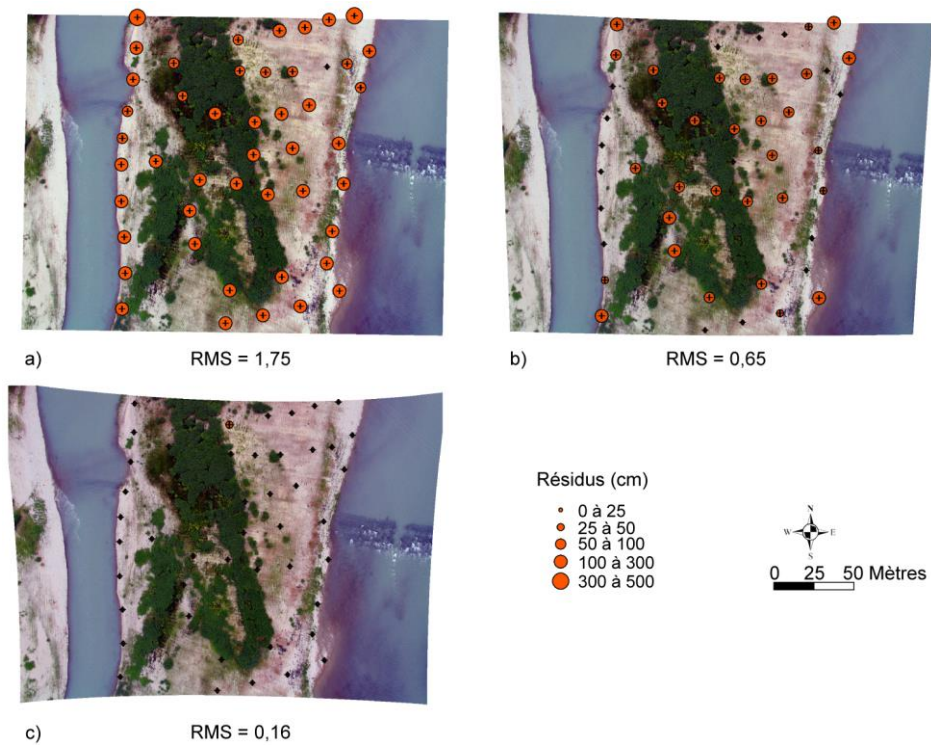


Figure 3-12. Effet des polynômes sur les images rectifiées. a) polynôme d'ordre 1, b) polynôme d'ordre 2, c) polynôme d'ordre 3 - (image drone)

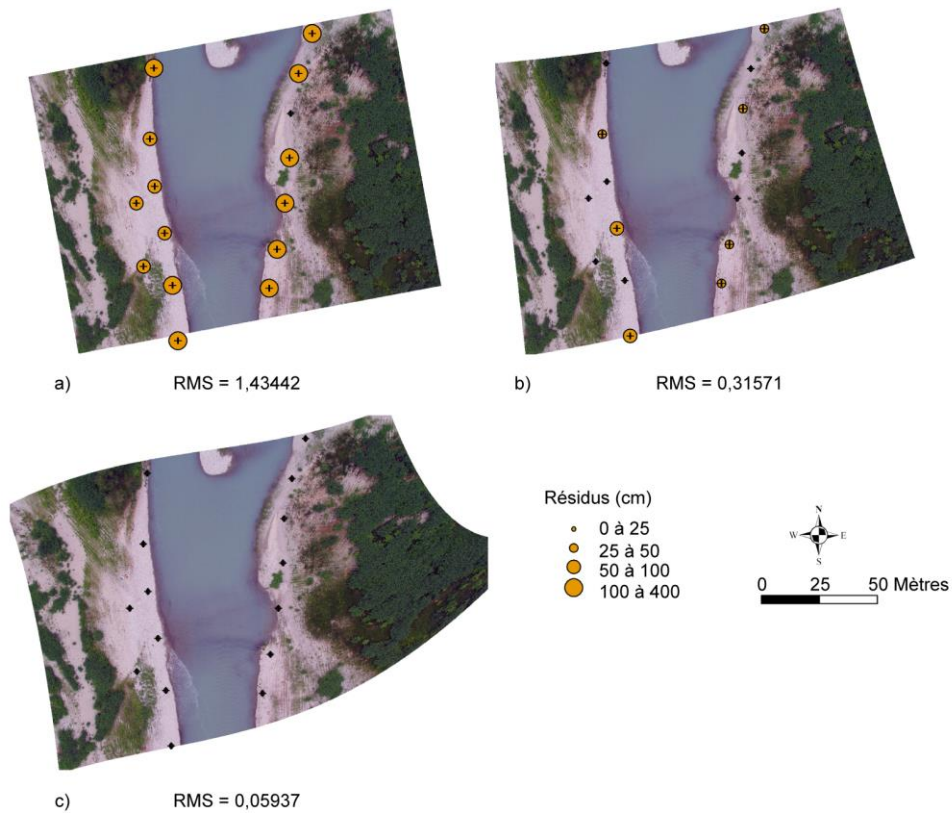


Figure 3-13. Effet de la localisation des balises sur les polynômes de transformation. a) polynôme d'ordre 1, b) polynôme d'ordre 2, c) polynôme d'ordre 3 – (image drone)

Les valeurs des résidus lors de l'application d'un polynôme d'ordre 1 peuvent sembler importantes pour des images à très haute résolution (centimétrique) et pour un terrain relativement peu accidenté (respectivement 1,75 m et 1,43 m - fig. 3-12 et 3-13). La cause de ces grandeurs est due à la position du capteur, qui n'est pas verticale au moment des acquisitions malgré le pantographe qui permet de compenser les inclinaisons. Cette dernière observation est mise en évidence par la figure 3-14. Elle représente l'agencement des images de deux mosaïques : la lône du Planet et le tronçon de Gévrieux.

Sur un secteur linéaire (fig. 3-14a), l'utilisation d'un polynôme d'ordre 1 permet d'assurer une concordance entre les images drone.

Sur un secteur sinueux, survolé en suivant le chenal (fig. 3-14b), la rectification des images nécessite des polynômes d'ordres élevés et l'ajout de points de contrôle supplémentaires pour assurer une continuité entre images.

La production d'une mosaïque, comme la rectification d'une seule image, seront donc sensibles à deux principaux critères : la localisation des points de contrôle au sol et le choix du polynôme de transformation.

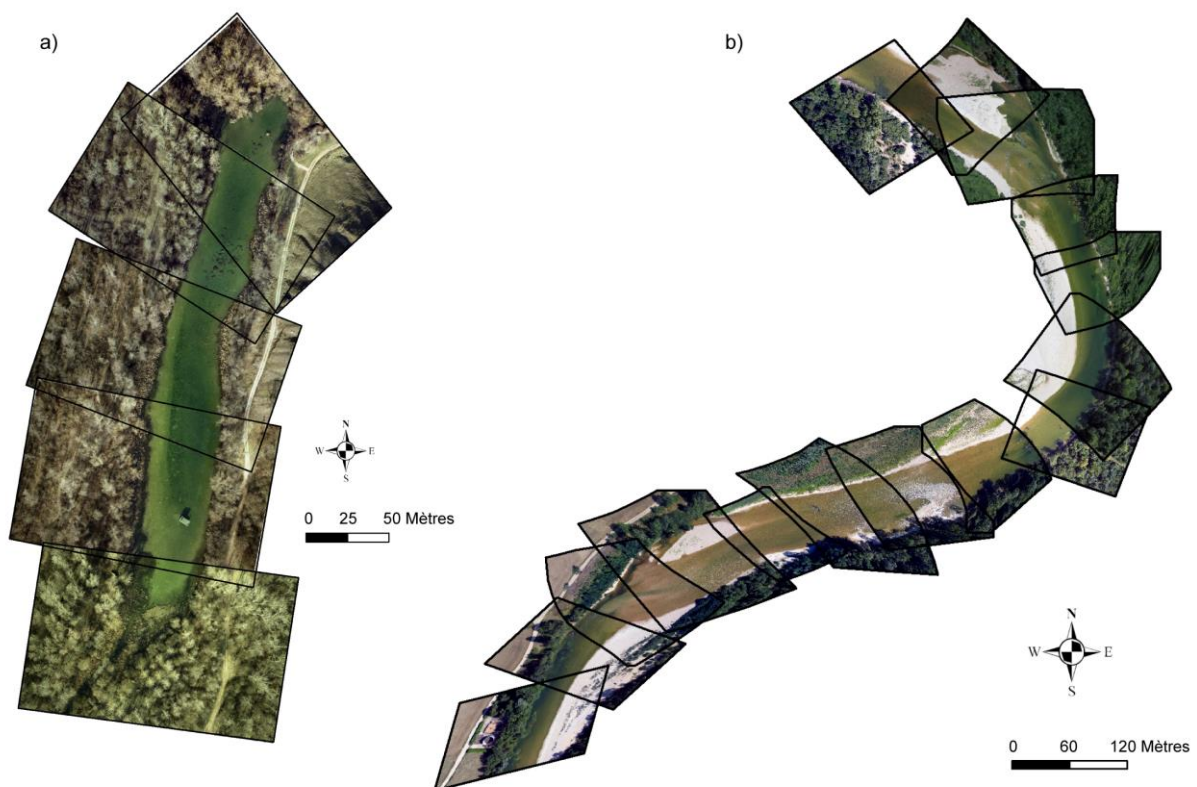


Figure 3-14. Mosaïques d'images drone. a) la lône du Planet, b) le tronçon de Gévrieux

4.1.2. Stratégie d'échantillonnage des points de contrôle

Fort des observations réalisées précédemment, la préparation des sites d'études répond à deux logiques spatiales de positionnement de points de contrôle au sol : linéaire pour le survol des chenaux (de part et d'autre de la zone immergée) et surfacique pour le

survol des bancs de galets (zone exondée) (fig. 3-15). Des cibles immergées, testées sur la Durance, ont été ajoutées aux points de contrôle au sol afin d'accroître le nombre de repères disponibles sur le périmètre du chenal en eau (Chaponnière, 2004).

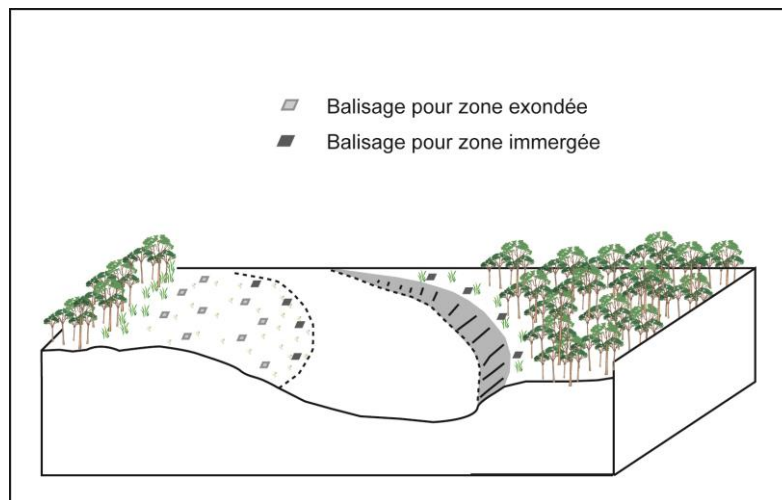


Figure 3-15. Schéma synthétique de la répartition des balises en fonction des surfaces à restituer

4.2. Le géoréférencement des points de contrôle

Pour pouvoir minimiser les déformations géométriques des images drone, l'acquisition précise des coordonnées de localisation des points de contrôle au sol est nécessaire. Cette opération est réalisée par DGPS (Trimble 5800 RTK : *Real Time Kinematic*). Le centre de la balise est pris comme référence. Le matériel utilisé permet d'obtenir des précisions centimétriques. Le réglage des seuils de précision sur les trois axes a été fixé à 5 cm. Au-delà de cette valeur, l'initialisation du récepteur est impossible et la position ne peut être validée. Lorsque ces conditions de configuration ne sont pas réunies (PDOP élevé « *Position Dilution of precision* » : constellation insuffisante, mauvaise répartition des satellites et présence d'un masque : végétation, relief), l'acquisition du point est forcée au détriment de la précision, s'il est jugé nécessaire pour une bonne couverture du site, ou bien annulée pour ne pas intégrer une erreur trop importante dans l'étape de rectification. Le semis de points ainsi créé permet d'alimenter les algorithmes de transformation des images.

4.3. La préparation des sites d'étude

Afin d'appréhender les déformations géométriques des images vues précédemment, une préparation des sites est nécessaire. Elle consiste à équiper de balises la zone à survoler. Le lieu d'implantation de ces dernières dépend de l'accessibilité du périmètre à équiper et du choix des techniques de restitution employées. Leur nombre est dépendant de la taille de la zone à couvrir et du nombre d'images produites par le drone selon l'altitude de vol choisie. En fonction de ces deux critères, une distance inter-balise est déterminée (de 20 à 40 mètres en général).

Le choix d'un balisage mobile se justifie pour deux raisons : l'impossibilité de mettre des balises fixes sur des sites mobiles tels que les bancs de galets ou bien les berges soumises à érosion et le risque de détériorations ou bien de destructions des balises fixes sur des périmètres fréquentés.

Les balises fabriquées correspondent à des carrés de toile cirée rouge (fig. 3-16). Le matériau choisi répond à trois contraintes :

- une contrainte de robustesse pour répondre aux nombreuses manipulations qu'elles endurent durant les différentes missions,
- une contrainte de résistance à l'humidité (liée à la proximité immédiate de l'eau),
- un entretien facile.

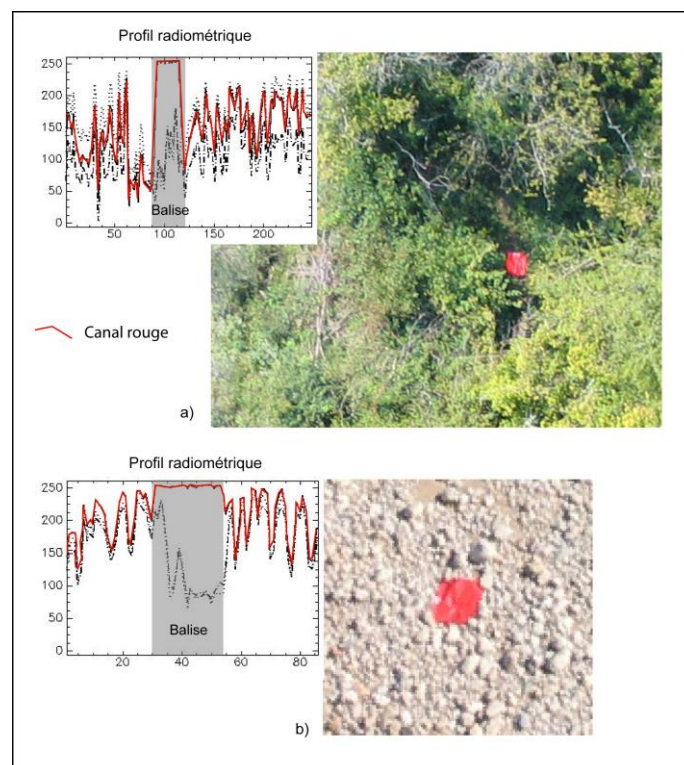


Figure 3-16. Propriétés radiométriques des balises, a) sur couverture végétale, b) sur galets

Du fait de ses propriétés de réflectance, la couleur rouge choisie est appropriée au contexte environnemental dans lequel les balises sont insérées. Comme cela est illustré sur la figure 3-16, le canal rouge permet d'avoir une réponse radiométrique significative dans le milieu végétal fermé (fig. 3-16a). Sur substrat graveleux, le signal radiométrique des balises permet une différenciation significative par rapport aux canaux vert et bleu (fig. 3-16b). Le signal aura également pour avantage d'être perceptible (jusqu'à un certain seuil) dans les zones d'ombre.

Deux tailles de balises ont été définies : 40 et 50 cm. Ce choix est lié à la résolution des images drone. La gamme de résolutions présentée sur le tableau 3-4 correspond à l'étendue de ce que l'imagerie drone peut produire (entre environ 20 et 400 mètres d'altitude

avec une focale de 35 mm). La taille des balises est optimale pour une gamme de résolution allant de 1 à 10 cm. Au-delà, les balises sont plus difficilement repérables.

Tableau 3-4. Rapport entre la capacité de résolution de l'imagerie drone et le choix de la taille des balises (test effectué avec le capteur CANON PowerShot G5 - focale 35 mm)

Résolution image (cm/pixel)	altitude de vol (m)	Balise 40x40cm (pixel)	Balise 50x50cm (pixel)
1	21	160	250
5	105	64	100
10	210	16	25
15	315	7	11
20	420	4	6

Le balisage mis en place correspond à un référentiel relatif, c'est-à-dire dépendant du site d'étude. Pour intégrer les traitements réalisés dans un système d'information géographique, des points connus complètent le dispositif terrain (réseau NGF).

4.4. Acquisition des images pour des applications photogrammétriques

Pour répondre aux contraintes de la photogrammétrie à partir d'images acquises avec le drone, il a été mis en évidence dans la partie 2 la nécessité d'acquérir des couples stéréoscopiques optimaux. Les conditions de vol doivent ainsi permettre d'obtenir :

- Une verticalité optimale (pour répondre aux calculs des paramètres externes),
- Une parallaxe optimale (pour répondre à l'étape de corrélation).

Afin d'estimer la capacité du drone à produire des acquisitions qui remplissent ces deux conditions dans le but de produire des MNT par photogrammétrie, une analyse des images (227 clichés) à partir de deux missions a été réalisée (tab. 3-5).

Tableau 3-5. Nombre d'images des missions réalisées dans le cadre d'une approche photogrammétrique

Sites	Nombre d'images
Banc de Gévrieux (Ain)	117
Banc de Luc-en-Diois (Drôme)	100

4.4.1. Les contraintes d'exploitation

Deux critères d'exploitation ont été définis pour sélectionner les images pouvant être retenues : **le nombre de balises** (par recouvrement) et **le taux de recouvrement des couples de photos**.

4.4.1.1. Le nombre et la répartition spatiale des balises

La préparation des sites testés doit suivre un protocole précis portant sur la disposition et la densité du balisage. Deux règles fondamentales sont à respecter :

- 4 balises au minimum doivent être présentes sur la zone de recouvrement de chaque couple d'images. Comme cela a été expliqué précédemment, les coordonnées des balises sont acquises par un DGPS. La précision centimétrique produite par celui-ci est un élément important pour déterminer les coordonnées des caméras,
- la disposition des balises se fait de façon homogène sur l'ensemble du site.

4.4.1.2. Le taux de recouvrement

L'obtention de couples stéréoscopiques impose une superposition minimale des clichés qui est estimée à environ 60 %. La géométrie des acquisitions doit également répondre à deux principaux critères :

- Le rapport B / H , appelé « base sur éloignement » (Kraus et Waldhäusl, 1998), correspond à la distance d'observation B (distance entre les deux clichés ou *baseline*) en fonction de la hauteur de vol H . Ce rapport peut être estimé avec les deux valeurs de l'angle d'incidence des caméras (3.3) :

$$\frac{B}{H} = \tan \alpha g + \tan \alpha d \quad (3.3)$$

où g correspond à la caméra 1, d à la caméra 2 et α l'angle des caméras

En théorie, le rapport B / H doit se rapprocher de la valeur 1 (rapport correspondant à un angle de 45 degrés entre les prises de vue). Si l'on se réfère à la fiche de commande de programmation du satellite SPOT, le rapport B / H peut être choisi autour des valeurs suivantes :

- 1 : valeur forte, valable surtout en traitement analogique,
- 2 : valeur moyenne, valable pour tous types d'applications,
- 3 : valeur faible, utilisable en traitement numérique.

- Les images composant un couple stéréoscopique ne doivent pas comporter, entre elles, de rotation ni de translation trop importante, car au-delà d'un certain seuil, la corrélation devient impossible (angle de rotation maximale : 4,5 °, translation maximale : 60 %, Kraus et Waldhäusl, 1998).

4.4.2. Bilan des acquisitions répondant aux contraintes d'exploitation

Afin d'évaluer les conditions d'exploitation des deux missions, une sélection des clichés a été effectuée tenant compte des deux critères précédents (tab. 3-6). L'analyse des résultats obtenus permet de considérer deux approches.

4.4.2.1. L'analyse des couples stéréoscopiques

Sur les 217 images traitées, seuls 19 % d'entre elles répondent à la fois aux deux critères définis. Ce chiffre démontre la difficulté de disposer de couples stéréoscopiques exploitables. Ce chiffre est encore surévalué car certaines acquisitions répondant à la fois aux deux critères ne présentaient pas une résolution suffisante (altitude trop élevée).

4.4.2.2. L'analyse des couples stéréoscopiques à l'échelle des bancs de galets

Contrairement à la mission de Gévrieux qui enregistre des valeurs identiques (15 et 14,5 %, tab. 3-6), nous observons, sur la mission de Luc-en-Diois, une différence entre les deux critères de sélection avec respectivement 25 % pour le premier et 32 % pour le second (tab. 3-6). Cette différence s'explique par la localisation de certains couples d'images positionnés en tête ou en queue de banc où peu de balises peuvent être disposées car ce sont des secteurs restreints par le chenal et la berge. Le banc de Gévrieux est moins affecté par ce problème car le balisage en queue de banc a pu être effectué au-delà du périmètre étudié.

Tableau 3-6. Critères de sélection des images pour une application photogrammétrique

Missions	Nombre et répartition spatiale des balises (%)	Taux de recouvrement (%)
Banc de Gévrieux (21/07/2004)	15	14,5
Banc de Luc-en-Diois (29/01/2004)	25	32
Total images analysées		217
% images retenues		19

Il apparaît ainsi que la part des images qui sont exploitables est assez faible, quelle que soit la mission analysée. L'obtention de plans de vol contrôlés et d'axes rectilignes (sensibilité du drone aux conditions aérologiques et pilotage pouvant s'avérer délicat) sont rares. Ainsi, la possibilité d'acquérir des couples stéréoscopiques de qualité s'est avérée très complexe.

4.5. Acquisition des images en milieu aquatique

4.5.1. Les contraintes d'exploitation

Trois contraintes d'exploitation ont été identifiées lors de la sélection des images pouvant être retenues pour une caractérisation de milieux aquatiques : **le nombre de balises**, **le cadrage** des acquisitions par rapport à l'objet ciblé et **le filet** des images correspondant au bougé du capteur au moment de l'acquisition. Ces trois points sont développés dans les paragraphes suivants. Le taux de recouvrement des images n'a pas été retenu comme critère de sélection, car il ne joue pas un rôle prépondérant dans la technique de restitution des surfaces en eau. L'analyse a porté sur 12 missions représentant un total de 1800 images (tab. 3-7).

Tableau 3-7. Nombre d'images acquises sur chacun des sites étudiés dans le cadre de survols de plan d'eau

Missions	Nombre d'images
Lône du Planet (30/02/2004)	36
Tronçon de Varambon (20/06, 22/07/2004)	368
Tronçon de Gévrioux (15/07/2004)	241
Tronçon Varambon/Priay (19,20/07/2005)	310
Tronçon de Bellegarde (22/02/2006)	128
Lône de Brotalet (20/04/2006)	185
Lône de la Malourdie (20/04/2006)	82
Tronçon des Carronières (04/05/2006)	68
Tronçon de Bellegarde (30/06/2006)	135
Lône de la Malourdie (29/09/2006)	83
Lône de Brotalet (10/10/2006)	107
Lône de la Malourdie (16/03/2007)	57

4.5.1.1. Le nombre de balises

Le nombre minimal de balises par image (4 balises) permettant de répondre aux critères de rectification a été abordé précédemment. Ce seuil est conditionné par deux paramètres qui dépendent :

- de l'emprise au sol de chacun des clichés (en fonction de l'altitude de vol du drone),
- de la densité des balises. Une forte densité occasionnera une préparation fastidieuse du site (pose des balises, acquisition des coordonnées planimétriques et altimétriques du centre de la balise et récupération des balises). La distance inter-balises est ainsi définie en fonction de l'échelle du site à couvrir, afin de concilier une densité acceptable et un temps de pose minimal.

Il est à noter que ces deux paramètres sont fortement influencés par l'environnement dans lequel s'inscrivent les missions. En effet, certains sites se prêtent plus facilement à la

pose de balises et à l'identification de points d'amer : un paysage fluvial ouvert avec de nombreux bancs émergés est plus facilement exploitable qu'un chenal en eau bordé par une forêt alluviale.

Le seuil ainsi retenu pour ce critère de sélection correspond à la présence d'un minimum de quatre balises par image.

4.5.1.2. Le cadrage

Le dispositif d'aide au pilotage développé dans le cadre de cette thèse a pour objectif d'optimiser les temps de vol, le nombre d'images produites, et d'obtenir des acquisitions dont l'emprise correspond à l'objet étudié. Le chenal en eau n'étant pas équipé de balises, une surface minimale de rives est requise pour que l'image puisse être rectifiée et géoréférencée. Le périmètre requis a été basé sur le rapport suivant : 60 % de chenal et 40 % de rive. Ce rapport permet d'assurer un recouvrement minimal du lit majeur pour permettre de positionner les balises. En théorie, le drone doit donc se positionner à la verticale dans l'axe du chenal. En pratique, ce rapport est difficile à respecter surtout lorsque les conditions aérologiques ne sont pas favorables.

Ainsi, une image sera sélectionnée uniquement si elle est prise dans l'axe du chenal et si les des deux rives sont visibles.

4.5.1.3. Le filé

La netteté des images dépend des effets dus au « filé » au moment de la prise de vue. Cet effet engendre un décalage des pixels plus ou moins prononcé sur les images, et est provoqué par un bougé au moment de l'acquisition (rafale de vent, modification de trajectoire). Les réglages des capteurs étant fixes (focale fixe, mise au point manuelle bloquée sur l'infini et réglée sur l'hyperfocale, mode « priorité vitesse », diaphragme à 8), les différences d'altitudes ou bien les variations de luminosité pendant l'acquisition n'ont pas d'incidence sur la netteté des images.

Seules les images qui ne présentent pas de filé lors d'une analyse visuelle ont été retenues.

4.5.2. Bilan des acquisitions répondant aux contraintes d'exploitation

Afin d'évaluer le nombre d'images répondant aux trois contraintes d'exploitation indiquées précédemment, les acquisitions des 12 missions (tab. 3-7), ont été analysées (tab. 3-8). Les missions sont classées par ordre chronologique.

Sur les 1800 images acquises, seuls 48 % répondent à la fois aux trois critères d'exploitation. Seule la moitié des missions atteint les 50 % (tab. 3-8) Ces chiffres, qui peuvent paraître faible, masquent en réalité une grande variabilité entre les critères.

Le critère qui semble le plus difficile à respecter concerne le cadrage des acquisitions. Les missions les plus touchées ont été : Bellegarde (5), Gévrioux (3), Varambon (2) et Bellegarde (9) avec respectivement, 23, 35, 38 et 39 % (tab. 3-8). Ces chiffres confirment les constatations effectuées sur la sensibilité du drone aux conditions aérologiques.

Le « nombre de balises » obtient des pourcentages acceptables. Seules les trois premières missions affichent des résultats inférieurs à 50 % (Lône du planet : 42 %, Tronçon de Varambon (2) : 36 % et tronçon Varambon / Priay : 48 %). Ces faibles pourcentages correspondent à la période de calage du protocole de balisage.

Le « filé » est un problème peu fréquent quelles que soient les missions (chiffre variant de 64 % à 100 %). Ces résultats permettent de valider les réglages effectués sur les appareils photos numériques et argentique qui ont été utilisés aux cours des missions.

C'est donc à partir de cette sélection d'images (48 % d'images retenues) que les traitements de restitution bathymétrique ont été réalisés.

Tableau 3-8. Nombre d'images exploitables pour l'étude des milieux aquatiques

Sites	Nombre de balises > à 4 (%)	Cadrage avec un taux de recouvrement de berge > à 40 % (%)	Filé (%)	Images répondant aux 3 critères (%)
(1) Lône du Planet	42	56	100	53
(2) Tronçon de Varambon	36	38	64	12
(3) Tronçon de Gévrioux	48	35	93	25
(4) Tronçon de Varambon / Priay	87	76	98	68
(5) Tronçon de Bellegarde	83	23	99	23
(6) Lône de Brotalet	84	60	100	56
(7) Lône de la Malourdie	91	85	100	79
(8) Tronçon des Carronnières	88	65	100	65
(9) Tronçon de Bellegarde	95	39	100	38
(10) Lône de la Malourdie	78	86	93	71
(11) Lône de Brotalet	59	75	69	39
(12) Lône de la Malourdie	91	46	100	46
Nombre d'images analysées		1800		
% total des images exploitables		48		

B. Restitution des états de surfaces en 2D : la granulométrie des bancs de galets

L'examen de la littérature, mené dans la partie 2, concernant la restitution de la granulométrie des bancs de galets, a révélé que le traitement d'images aériennes par semi-variance 2D était une approche adaptée à la prédiction des valeurs médianes des particules grossières. Cette méthode a été appliquée sur les images drone à partir de deux missions réalisées sur le banc de galets de Gévrieux (Ain) (fig. 3-17a et b).

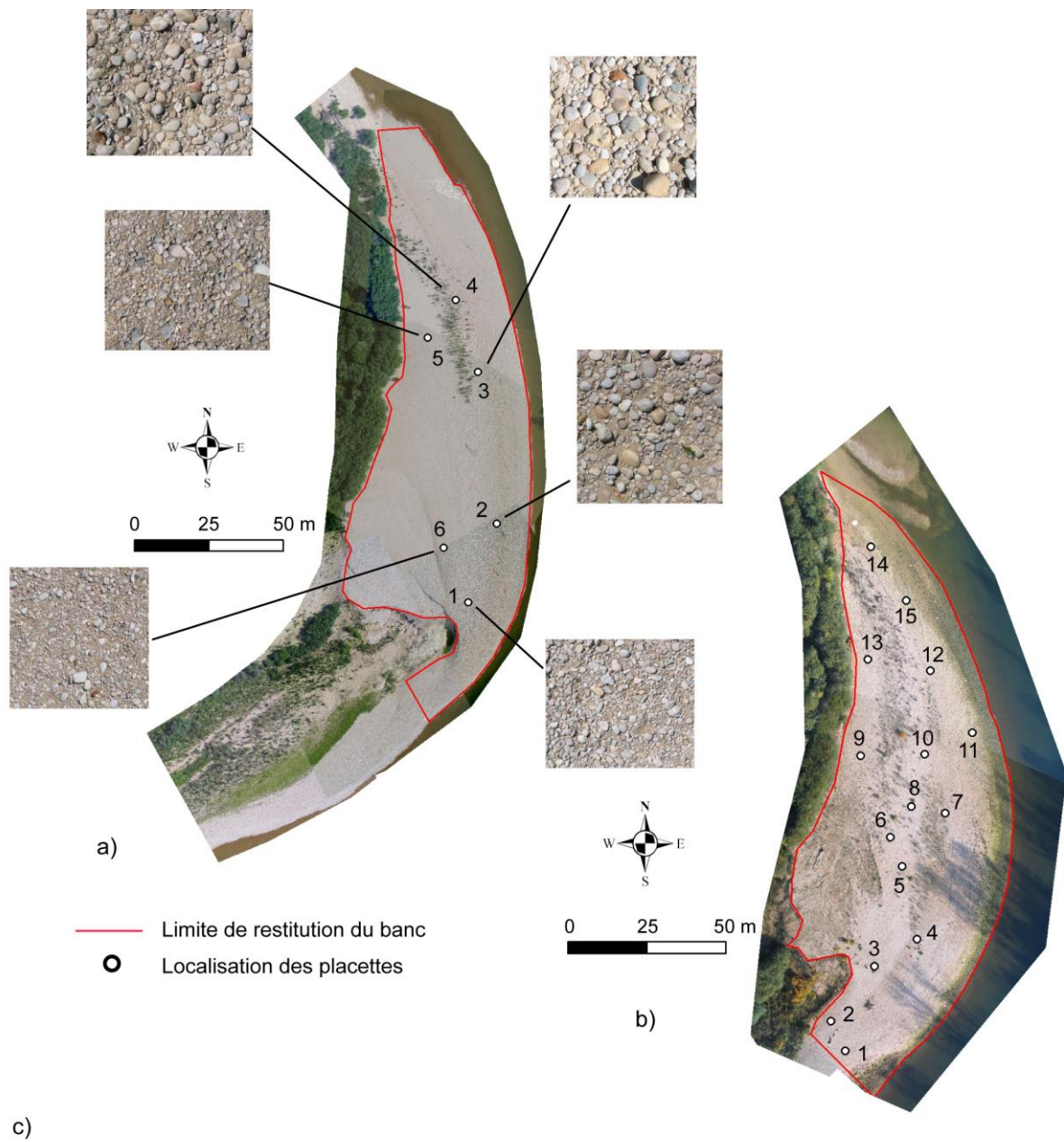
1. Calibrage du modèle par semi-variance 2D

L'objectif est ici d'établir une corrélation entre les caractéristiques d'un échantillon granulométrique *in situ* et les valeurs de semi-variance calculées à partir des images drone. Le tableau de la figure 3-17c reprend les caractéristiques des deux missions réalisées. Celles-ci correspondent à deux passages, basse altitude pour le premier et plus haute altitude pour le second, afin d'évaluer la résolution optimale des supports aériens pour répondre au problème posé.

1.1. Les mesures granulométriques de terrain

Comme l'indique le tableau 3-9 (page 106), deux campagnes de mesures granulométriques ont été réalisées sur le banc de Gévrieux (figure 3-17). Le protocole d'échantillonnage granulométrique adopté pour calibrer le modèle est basé sur la méthode de Wolman (*Wolman walk method*) (Wolman, 1954 ; Bunte et Abt, 2001). Elle est la plus adaptée à la gamme granulométrique concernée (entre 2 et 256 mm) (Bunte et Abt, 2001). Cette technique d'échantillonnage consiste à identifier visuellement des surfaces granulométriques homogènes. A partir de ces « placettes », une sélection manuelle des particules est réalisée. L'opérateur doit, du bout des doigts et les yeux fermés, sélectionner les particules à mesurer. Wolman (1954) et Kondolf (1997) suggèrent de recueillir un minimum de 100 particules pour minimiser l'erreur d'échantillonnage. Le pas d'échantillonnage doit correspondre à deux fois l'axe b maximal du faciès échantillonné, axe correspondant à la largeur de la particule.

Les particules sélectionnées sont ensuite mesurées grâce à un calibre (plaque constituée de mailles carrées de différentes dimensions). Une fois la particule mesurée, on lui affecte une classe granulométrique selon l'échelle de Wentworth (elle suit une distribution normale qui est plus adaptée aux analyses statistiques) (Bunte et Abt, 2001). Le calcul du D50 (taille médiane de la distribution) peut ainsi être effectué (tab. 3-9, page 106).



Missions	Superficie (m ²)	Nombre de balises	Nombre d'images retenues	Résolution de la mosaïque (cm)	Placettes granulométriques	Altitude de vol (m)	D50 (mm)
Gévrier (18/06/2004)	7490	35	7	3,4	6	70	[17 ; 68]
Gévrier (26/10/2005)	8147	61	2	10	15	210	[11 ; 49]

Figure 3-17. a) localisation des placettes granulométriques échantillonnées sur la mosaïque drone du 18/06/2004 (n=6), b) localisation des placettes granulométriques échantillonnées sur la mosaïque drone du 26/10/2005 (n=15), c) caractéristiques des deux missions

Tableau 3-9. Mesures granulométriques sur le banc de galets de Gévrioux (missions du 18/06/2004 et du 26/10/2005)

Placette	Mission du 18/06/2004 D50 (mm)	Mission du 26/10/2005 D50 (mm)
1	28,87	30,38
2	54,50	11,3
3	50,07	22,80
4	23,63	16,34
5	67,55	34,76
6	17,32	27,77
7	-	14,50
8	-	35,38
9	-	17,00
10	-	28,34
11	-	46,36
12	-	28,06
13	-	25,38
14	-	48,50
15	-	14,92

1.2. Les paramètres d'ajustements du modèle

Les précédents travaux qui ont porté sur les restitutions granulométriques à partir d'images aériennes (Verdu *et al.*, 2003, 2005 ; Carbonneau *et al.*, 2004 ; Carbonneau, 2005) ont permis de mettre en évidence un certain nombre de paramètres d'ajustement à considérer dans le cadre d'une approche par auto-corrélation spatiale. Il s'agit de : **la résolution, la taille de la fenêtre, la portée** (le pas). Un paramètre supplémentaire a été testé dans le cadre de ce travail : **les canaux** de l'image.

1.2.1. La résolution

La résolution des images aériennes est le facteur le plus fondamental. En effet, le pouvoir discriminant (le seuil de détection des objets) d'une image doit être équivalent à la taille de l'objet à discriminer. Autrement dit, un pixel risque d'échantillonner plusieurs particules s'il est plus grand que les dites particules. Ainsi la semi-variance obtenue ne pourra pas nous renseigner sur la taille réelle d'une particule. On peut donc établir une relation entre la résolution d'une image et la taille de l'objet à étudier.

La résolution de la mosaïque de la mission du 18 juin 2004 semble plus adaptée à la taille des particules échantillonnées que celle du 26 octobre 2005. En effet, la première présente une résolution de 3,4 cm (fig. 3-17c). Les valeurs des D50 mesurés (tab. 3-9) sont proches de la valeur de la résolution. En revanche, la résolution de la mosaïque de la seconde mission (10 cm) est largement au dessus des D50 mesurés *in situ* (tab. 3-9).

1.2.2. La taille de la fenêtre

La taille de la fenêtre à prendre en considération dans le calcul de la semi-variance doit correspondre au maximum à la surface échantillonnée par placette. Il faut s'assurer qu'aucun effet de bord (proximité de la limite de la mosaïque, proximité du couvert végétal) ne soit pris en compte par la fenêtre lors du traitement de la zone considérée. La fenêtre permet également d'inclure les erreurs de rectification des images de la mosaïque par rapport à la localisation des mesures de terrain.

Pour la mission du 18 juin 2004, la fenêtre de référence choisie correspond à une surface d'1 m² qui se traduit par une taille de 36 x 36 pixels. Pour la mission du 26 octobre 2005, la fenêtre de référence choisie correspond à une surface de 2 m² qui se traduit par une taille de 20 x 20 pixels.

1.2.3. La portée

Le dernier paramètre d'ajustement considéré par les auteurs est la portée correspondant au pas bidimensionnel de la semi-variance (Verdu *et al.*, 2003 ; Carbonneau *et al.*, 2003 ; Carbonneau, 2004 ; Verdu *et al.*, 2005). Dans le cas d'une image présentant une trame de type damier (alternance d'un pixel noir assimilable aux ombres et d'un blanc assimilable aux galets), la semi-variance sera maximale pour un pas de 1. Si le damier est composé d'une alternance de 2*2 pixels, la semi-variance sera maximale pour un pas de 2. Par conséquent, il y a un rapport entre la taille d'une particule et le pas considéré. Si les particules sont plus petites que la taille du pixel, en d'autres termes, que la résolution de l'image, alors, pour un pixel donné, il y aura plusieurs particules. Par conséquent, la valeur radiométrique du pixel sera une valeur moyennant toutes les particules qui lui sont associées.

Afin de définir la taille optimale de la portée de la semi-variance, des portées de tailles croissantes ont été testées (fig. 3-18 et 3-19). Les résultats obtenus suivent une distribution gaussienne pour la mission du 18 juin 2004, avec un maximum à (3*3). La mission du 26 octobre 2005 présente des résultats plus variables avec une taille optimale qui est localisée sur la portée (13*13).

Il est intéressant de constater que les seuils optimaux des deux missions révèlent bien une relation entre la taille de la portée choisie et la résolution des mosaïques traitées ou, plus implicitement, la « résolution des particules » présentes sur les images. Avec une résolution de 3,4 cm, la mosaïque du 18 juin 2004 obtient une corrélation optimale pour une portée de (3*3) (équivalente à une distance au sol de 10 cm), taille proche des D50 échantillonnés (de 1,7 cm à 6,8 cm). Avec une résolution de 10 cm pour la mosaïque du 26 octobre 2005, le seuil optimal de la portée (13*13) (équivalente à une distance au sol de 1,3 m) est nettement plus grande que la taille des D50 échantillonnés (de 1 cm à 4,9 cm).

Taille de la portée	Canal R (R ²)	Canal V (R ²)	Canal B (R ²)	Canal RV (R ²)	Canal RB (R ²)	Canal VB (R ²)	Canal RVB (R ²)
1*1	0,64	0,64	0,66	0,65	0,91	0,94	0,96
3*3	0,93	0,93	0,94	0,94	0,95	0,96	0,98
5*5	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95
7*7	0,88	0,89	0,87	0,94	0,88	0,90	0,95
10*10	0,79	0,81	0,77	0,91	0,82	0,90	0,95
13*13	0,80	0,81	0,77	0,89	0,82	0,86	0,92
15*15	0,82	0,83	0,79	0,90	0,88	0,90	0,92
20*20	0,76	0,76	0,72	0,76	0,91	0,96	0,96
25*25	0,83	0,81	0,80	0,86	0,88	0,85	0,88
30*30	0,75	0,67	0,71	0,76	0,76	0,72	0,76

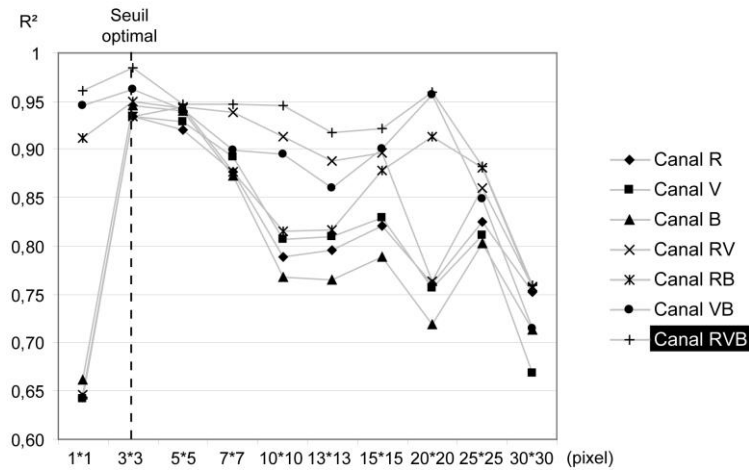


Figure 3-18. Influence des canaux et de la portée sur le coefficient de détermination R² (rapport entre le D50 mesuré et le D50 observé) (mission 18/06/2004)

Taille de la portée	Canal R (R ²)	Canal V (R ²)	Canal B (R ²)	Canal RV (R ²)	Canal RB (R ²)	Canal VB (R ²)	Canal RVB (R ²)
1*1	0,03	0,01	0,00	0,20	0,34	0,02	0,41
3*3	0,04	0,03	0,03	0,15	0,05	0,04	0,19
5*5	0,00	0,00	0,00	0,15	0,05	0,11	0,23
7*7	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,16	0,23
10*10	0,04	0,02	0,13	0,10	0,10	0,31	0,32
13*13	0,11	0,14	0,28	0,21	0,55	0,56	0,57
15*15	0,12	0,13	0,24	0,13	0,28	0,36	0,38
17*17	0,07	0,03	0,01	0,11	0,37	0,30	0,41
19*19	0,02	0,01	0,08	0,02	0,25	0,43	0,44

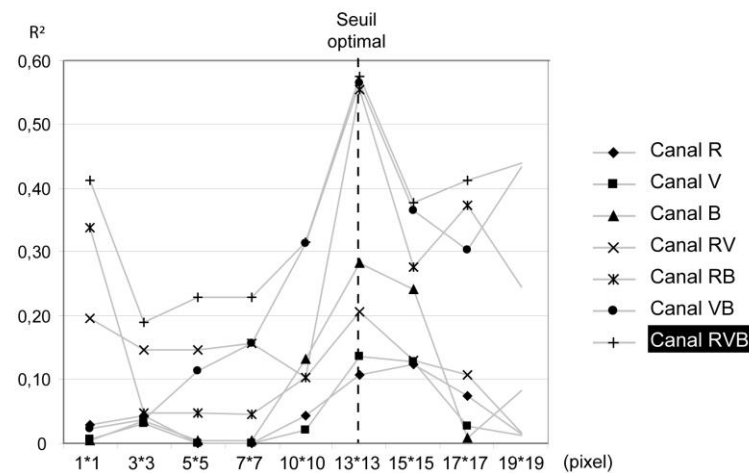


Figure 3-19. Influence des canaux et de la portée sur le coefficient de détermination R² (rapport entre le D50 mesuré et le D50 observé) (mission 26/10/2005)

1.2.4. Les canaux

L'impact des canaux de l'image sur les modèles granulométriques n'a pas été exploré dans la littérature (Verdu *et al.*, 2003 ; Carbonneau *et al.*, 2003 ; Carbonneau *et al.*, 2004 ; Verdu *et al.*, 2005). Pour une image couleur, les trois canaux, sont par défaut, utilisés dans la restitution du D50. Ce choix est conforté par les résultats que nous avons obtenus (fig. 3-18 et 3-19). En effet, les régressions multiples qui ont été réalisées à partir des 3 canaux des deux mosaïques démontrent la supériorité du triptyque RVB qui obtient la meilleure relation, quelle que soit la taille de la portée utilisée. Nous pouvons également observer une tendance dans la répartition des valeurs. En effet, les couples de canaux [RV, RB, VB, RVB] produisent un modèle beaucoup plus robuste que les canaux pris séparément [R, V, B], justifiant le constat fait précédemment (fig. 3-18 et 3-19). Cependant, nous observons une variabilité intra-canal plus significative sur les images de la mission du 26 octobre 2005.

2. Restitution des faciès granulométriques

A partir des tests réalisés précédemment et en reprenant les paramètres d'ajustement optimaux, deux restitutions granulométriques ont pu être produites issues des relevés de terrain et des images drone acquises à deux altitudes différentes. Les résultats sont présentés dans les paragraphes suivant :

2.1. Survol à basse altitude

La mission du 16 juin 2004 correspond au survol du banc de Gévrieux réalisé à une altitude de 70 m. La mosaïque produite est constituée par 7 images avec une résolution de 3,4 cm (fig. 3-17a et c, page 105). Le modèle granulométrique qui a été réalisé à partir des paramètres d'ajustement retenus est illustré par la figure 3-20b. Les valeurs de semi-variance des pixels correspondant au D50 observés sont visualisées sur la figure 3-20a. A partir de ces graphes, deux observations peuvent être effectuées :

- la relation entre les valeurs de semi-variance et les D50 observés met en évidence une bonne répartition des points (fig. 3-20a),
- le modèle granulométrique retranscrit parfaitement les D50 observés et, ce, quelle que soit la taille des particules mesurées sur le terrain ($n = 6$, $R^2 = 0,98$) figure 3-20b.

Une cartographie de la granulométrie des D50 a été produite (figure 3-20c). Les secteurs du banc de galets présentant de la végétation (des pousses de Saules – *salix sp.*) ont été extraits de la représentation car ils constituaient un artefact. A partir de cette carte, plusieurs observations peuvent ainsi être formulées :

- la classe des D50 estimés correspond à la localisation des placettes mesurées *in situ*, la tête du banc est majoritairement constituée de particules fines,
- les particules les plus grossières sont localisées en queue de banc,
- les classes granulométriques [22-64] présentent des directions amont / aval en milieu et en queue de banc,
- la présence d'un liseré entourant l'ensemble du banc correspond à un effet de bord issu du programme et généré par la taille de la fenêtre,
- deux ruptures obliques localisées en tête et en queue de banc traduisent la limite d'images constituant la mosaïque.

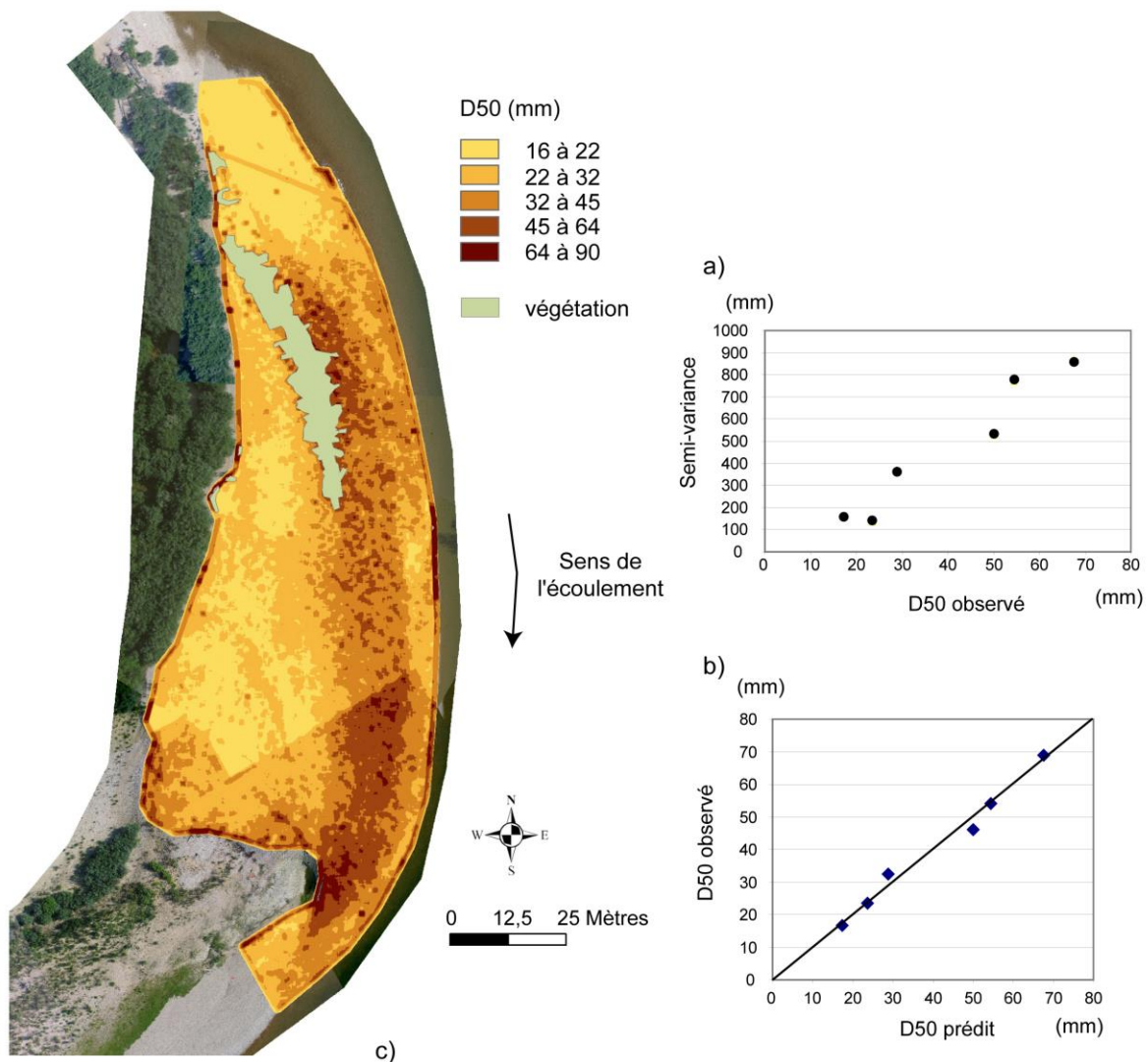


Figure 3-20. Mission du 18/06/2004, a) relation entre semi-variance et D50 observés, b) modèle granulométrique, c) cartographie des D50 prédits (classification de Wentworth)

2.2. Survol à altitude moyenne

La mission du 26 octobre 2005 correspond au survol du banc de Gévrieux réalisé à une altitude de 210 m. Une mosaïque, constituée de deux images avec une résolution de 10 cm, a été produite (fig. 3-17b et c, page 105). Le modèle granulométrique qui a été réalisé à partir des paramètres d'ajustement retenus est illustré par la figure 3-21b. Les valeurs de semi-variance des pixels correspondant au D50 observés sont visualisées sur la figure 3-21a. Deux observations peuvent être effectuées :

- la relation entre les valeurs de semi-variance et les D50 observés met en évidence une forte variabilité entre les points (fig. 3-21a),
- malgré un nombre de points de mesures *in situ* élevé (contrairement à la mission précédente), la corrélation des D50 est faible ($n = 15$, $R^2 = 0,57$) principalement sur les particules les plus fines (entre 10 et 30 mm, fig. 3-21b). Seules les valeurs comprises entre 30 et 50 mm (supérieures à la limite de détection, fig. 3-21b) présente une corrélation cohérente entre D50 observé et D50 prédit (droite d'ajustement 1, fig. 3-21b).

Comme pour la mission précédente, le modèle a permis de produire une cartographie de la granulométrie des D50 (figure 3-21c). Seules trois classes ont été représentées. Les particules inférieures à 30 mm n'ont pas été discrétisées, car leur prédiction ne présente pas de cohérence. Plusieurs observations peuvent être ainsi formulées :

- aucun gradient granulométrique amont / aval n'est observé,
- il n'y a pas de gradient granulométrique latéral (en général les points hauts du banc situés à l'opposé du chenal correspondent à la zone de dépôt des sédiments fin),
- la majorité des D50 mesurés ne correspondent pas sur la carte aux D50 estimés. Seuls les D50 prédits de 3 placettes sur 15 appartiennent à la bonne classe granulométrique mesurée *in situ*,
- la présence d'un liseré constant, déjà observé précédemment, entourant la zone d'étude est nettement visible,
- une rupture oblique localisée en queue de banc correspond à la limite de deux images constituant la mosaïque.

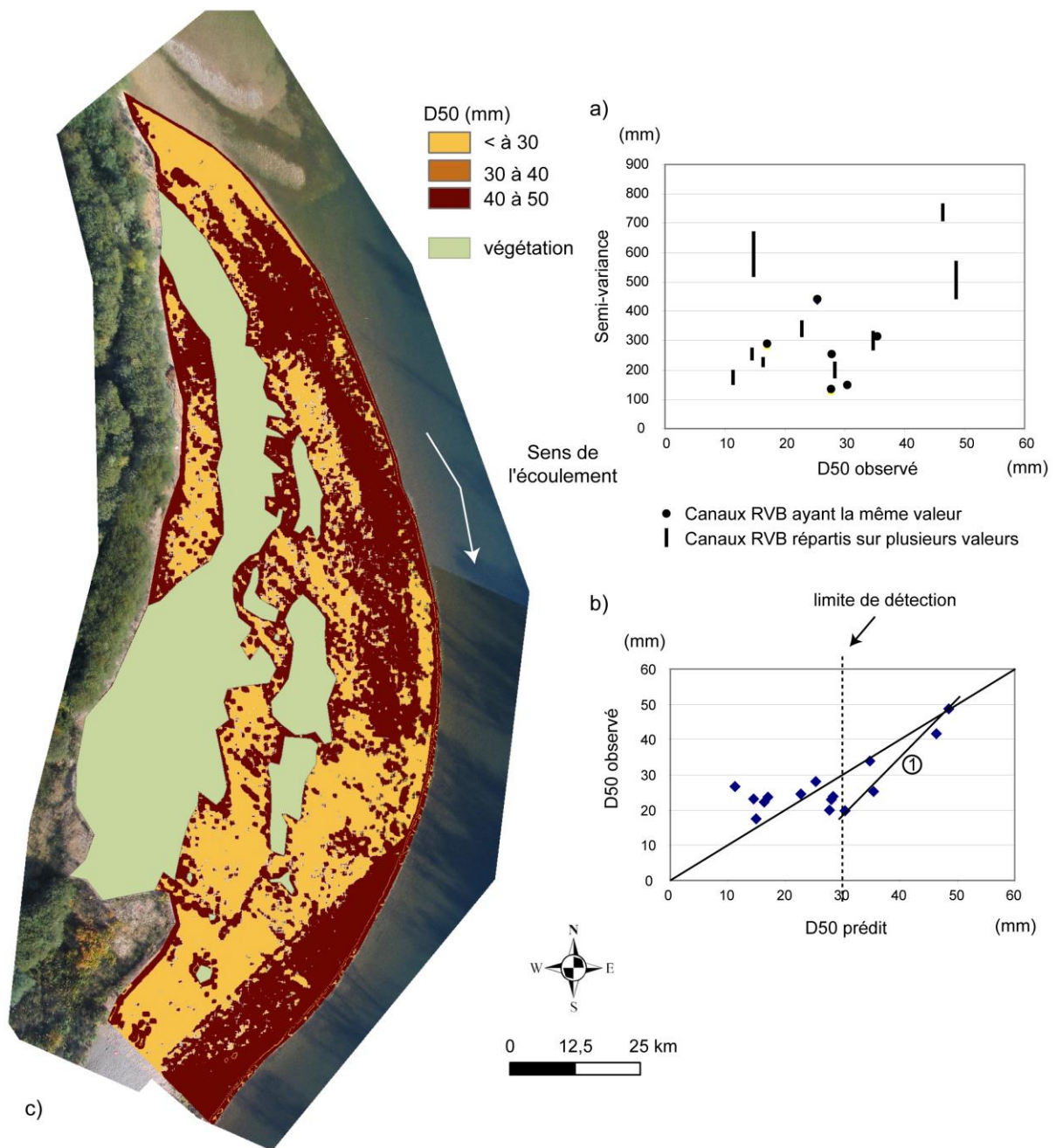


Figure 3-21. Mission du 26/10/2005, a) relation entre semi-variance et D50 observés, b) modèle granulométrique, c) cartographie de la granulométrie des D50 prédits

2.3. Impact des résolutions sur les modèles

La comparaison des deux missions réalisées à des altitudes différentes permet de mettre en évidence l'impact de la résolution sur les modèles produits. Avec un R^2 à 0,98, la mission réalisée en 2004 (à une altitude de 70 m) confirme la robustesse du modèle granulométrique qui a été produit pour des D50 compris entre 17,32 et 67,5 mm. La résolution de la mosaïque (3,4 cm), qui est en adéquation avec la taille des échantillons mesurés sur le terrain (fig. 3-17c, page 105), explique la qualité du résultat obtenu malgré le faible échantillonnage réalisé *in situ* ($n = 6$ soit 0,0008 pt/m²). Avec un échantillonnage plus

dense pour une superficie à peu près égale ($n = 15$ soit 0.002 pt/m^2), la mission réalisée en 2005 (à une altitude de 210 m) démontre que la résolution de la mosaïque (10 cm) ne permet pas de prédire les D50, car cette résolution est supérieure à la valeur des particules mesurées *in situ* (entre 11,3 et 48,5 mm). Cette observation est renforcée par la mise en évidence d'une meilleure corrélation sur les D50 ayant des tailles plus grandes (fig. 3-21b).

Afin de conforter ce constat, un test a été réalisé à partir de la mission du 26 octobre 2005 (10 cm de résolution) mais avec, cette fois-ci, la prise en compte des valeurs du D90. En effet, ce dernier comporte des valeurs plus grandes (de 21 à 125 mm) que le D50 (de 10 à 49 mm). L'hypothèse avancée est que le modèle devrait être mieux corrélé avec les valeurs du D90 car ils sont plus proches de la résolution de la mosaïque (10 cm). La figure 3-22 illustre les résultats des tests effectués. Un seuil optimal à 0,72 pour une portée de 1*1 a été détecté (fig. 3-22a). Ce résultat est supérieur au précédent seuil associé aux valeurs du D50 (0,57) pour la même mission. Le modèle granulométrique produit confirme une bonne corrélation entre D90 observé et D90 prédit (fig. 3-22b). Ces résultats vérifient l'hypothèse d'une forte corrélation entre particules mesurées et résolution des images traitées.

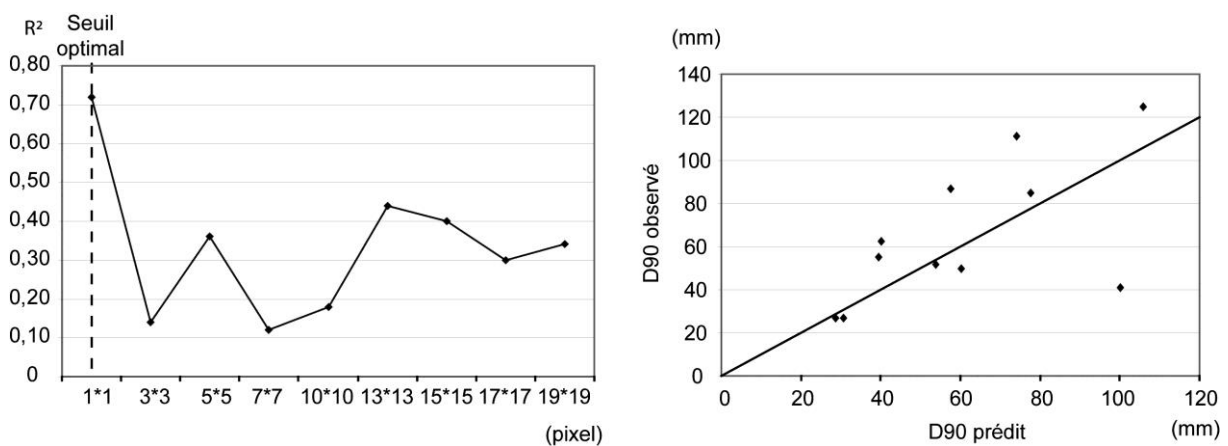


Figure 3-22. Tests réalisés à partir de mesures granulométriques du D90 (mission du 26/10/2005), a) Influence de la taille de la portée sur le R², b) modèle granulométrique

2.4. Interprétation des cartes granulométriques

Fortes de ces observations, l'interprétation et la comparaison des restitutions cartographiques des D50 des deux missions sont donc à aborder avec précautions.

Nous pouvons cependant constater que le schéma classique concernant la répartition des faciès granulométriques n'est pas respecté et ce, quelle que soit la mission. En effet, aucun gradient amont / aval (grossier / fin) n'est observé (Bunte et Abt, 2001). A l'inverse du schéma classique, nous remarquons la présence de particules fines en tête de banc. Des particules grossières sur les points topographiquement hauts et en queue de bancs sont également observées alors que ce sont des secteurs qui, habituellement, enregistrent le dépôt de particules fines, dans la mesure où ils sont moins soumis aux contraintes d'écoulement (fig. 3-20c et 3-21c). Ces observations peuvent être expliquées par la

présence d'une végétation sur les missions 2004 et surtout 2005. Celle-ci peut perturber le schéma classique de répartition des faciès granulométriques. En effet, la végétation induit une rugosité qui perturbe les contraintes d'écoulement et qui favorise le dépôt des sédiments fins en aval de celle-ci. Cette observation peut expliquer l'agencement des taches granulométriques constatée à travers les deux restitutions produites.

Malgré une mosaïque de même résolution, les images qui la composent ont été acquises à des altitudes variables (70 et 210 m). L'information radiométrique de chaque image n'est donc pas la même, malgré le rééchantillonnage opéré lors de la procédure du mosaïquage. Les ruptures observées sur les retranscriptions granulométriques peuvent expliquer ce phénomène. Nous pouvons cependant affirmer que les éventuels écarts de luminosité constatés entre les images ne peuvent être à l'origine du problème, car le principe de l'auto-corrélation est basé sur l'analyse de la fréquence d'apparition des valeurs radiométriques et non sur les valeurs en elles-mêmes (c'est-à-dire la texture).

C. Restitution des états de surfaces en 3D

Après avoir testé les potentialités de la technologie drone pour caractériser les surfaces granulométriques en 2D, nous nous sommes attachés à restituer les états de surfaces en 3D. Afin d'exploiter au maximum la résolution offerte par l'imagerie drone, deux approches méthodologiques ont été mises en œuvre : la photogrammétrie pour caractériser la topographie exondée (bancs de galets) et les modèles bathymétriques empiriques pour restituer les hauteurs d'eau du lit mouillé.

1. La restitution de la topographie émergée

1.1. Les micro-formes fluviales

L'étude des contraintes d'exploitation des images drone pour des applications photogrammétriques a montré la difficulté qu'il y a à obtenir des couples stéréoscopiques à partir desquels un traitement pouvait être appliqué. Fort de ce constat, les tests prévus initialement à l'échelle d'un banc de galets n'ont été réalisés que sur deux couples stéréoscopiques, l'un sur le banc de galets de Gévrieux (Ain) et l'autre sur le banc de galets de Luc-en-Diois (Drôme). Les paramètres internes des caméras pour ces deux essais sont :

- une focale de 35 mm,
- une taille de 7,176 x 5,319 mm pour la matrice CCD (Canon PowerShot G5),

1.1.1. Essai d'une restitution topographique du banc de Gévrieux (Ain)

Le couple stéréoscopique testé est localisé sur la queue du banc de Gévrieux (fig. 3-23a et b). Ce secteur très mobile correspond au front de progression vers l'aval d'une langue de gravier (fig. 3-23c). Ce banc se caractérise par des formes bien identifiables avec des ruptures topographiques importantes (plus d'un mètre).

Grâce aux balises réparties sur le site ($n = 17$) et aux points homologues définis sur la zone de recouvrement (une centaine), un MNT a pu être construit (fig. 3-23d). Les altitudes produites sont comprises entre 270,5 m et 272,5 m. Associée au MNT, une carte des précisions altimétriques a été réalisée afin d'apprécier la validité de chacun des points de la restitution (fig. 3-23e). Comme cela a été expliqué dans la partie II, cette carte des précisions affiche les résidus des étapes de la corrélation et de la minimisation du calcul de la position des caméras. La gamme des résidus varie entre 2 et 40 cm avec une moyenne de 20 cm.

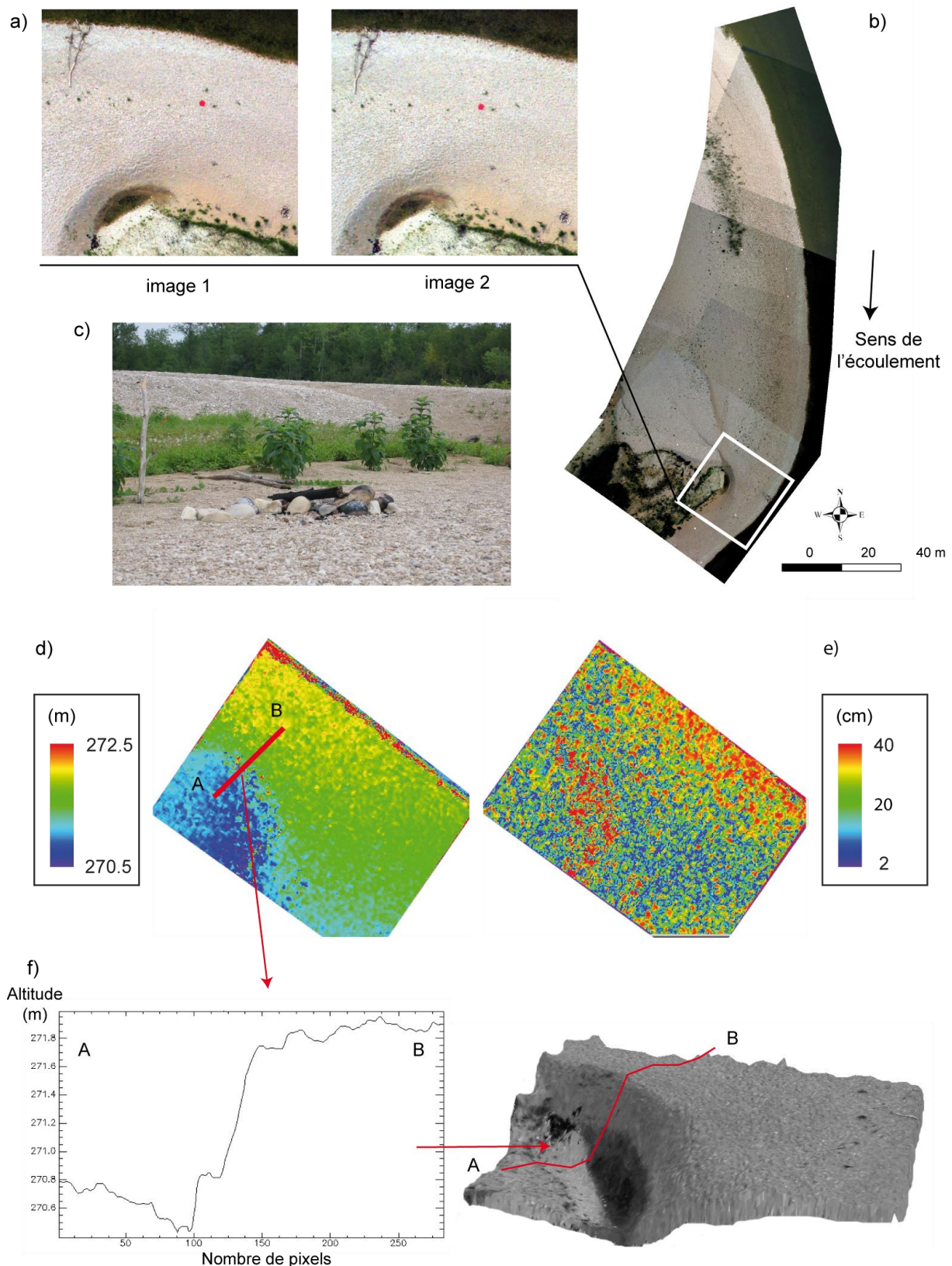


Figure 3-23. Test photogrammétrique réalisé sur le banc de Gévrier (mission du 21/07/2004), a) couple stéréoscopique, b) mosaïque drone du banc, c) langue de progression de galets à restituer, d) MNT e) carte des précisions altimétriques, f) profil topographique de la langue de progression issu du MNT et essai d'une restitution en 3D

Une représentation en 3D a été réalisée (fig. 3-35f). Le front de progression du banc de galets qui servait d'indicateur de la restitution se traduit par une rupture de pente de plus d'un mètre sur le profil topographique proposé.

1.1.2. Essai d'une restitution topographique du banc de Luc-en-Diois (Drôme)

Le second couple stéréoscopique testé est localisé sur la tête du banc de galets situé à quelques kilomètres à l'aval de Luc-en-Diois (fig. 3-24a). Ce secteur se caractérise par un gradient topographique de forme lenticulaire. Une végétation éparse et des micro-chenaux sont visibles sur l'image.

Comme pour le site de Gévrioux, la détermination des paramètres internes et externes des caméras (14 balises) et la corrélation d'un couple stéréoscopique (fig. 3-24b) ont permis de produire un MNT (fig. 3-24c). Les altitudes sont comprises entre 579 et 580 m. La carte des précisions altimétriques associée au MNT affiche des valeurs comprises entre 0,1 et 10 cm avec une moyenne de 5 cm (fig. 3-24d). Une représentation en 3D du MNT a été réalisée (fig. 3-24e). Elle retranscrit la topographie du secteur concerné avec l'identification des micro-chenaux observés sur les images ainsi que l'identification des formes globales de la végétation arbustive localisée sur les points haut du banc et qui se surimpose au MNT (fig. 3-24e). Un zoom du MNT révèle également un « pic » topographique dans la partie amont (fig. 3-24e). Après vérification sur les images drones et les photographies prises sur le terrain, ce pic correspond à l'emplacement d'un tronc flotté (fig. 3-24a et b). Ce qui était au départ considéré comme un artefact dans la définition du Modèle Numérique de Terrain (contrairement au MNS : Modèle Numérique de Surface qui intègre la végétation) va se révéler être un excellent indicateur de la précision du MNT produit.

La figure 3-25a et d correspond respectivement à une vue oblique du bois flotté et à un zoom réalisé sur l'orthophotographie produite grâce au MNT. Deux transects, réalisés à partir du MNT, ont été positionnés sur l'arbre : le premier, localisé sur le tronc (fig. 3-25c) et le second sur le système racinaire (fig. 3-25d). La comparaison des deux profils permet d'identifier une variation topographique de 35 cm sur le tronc et de 68 cm sur le système racinaire.

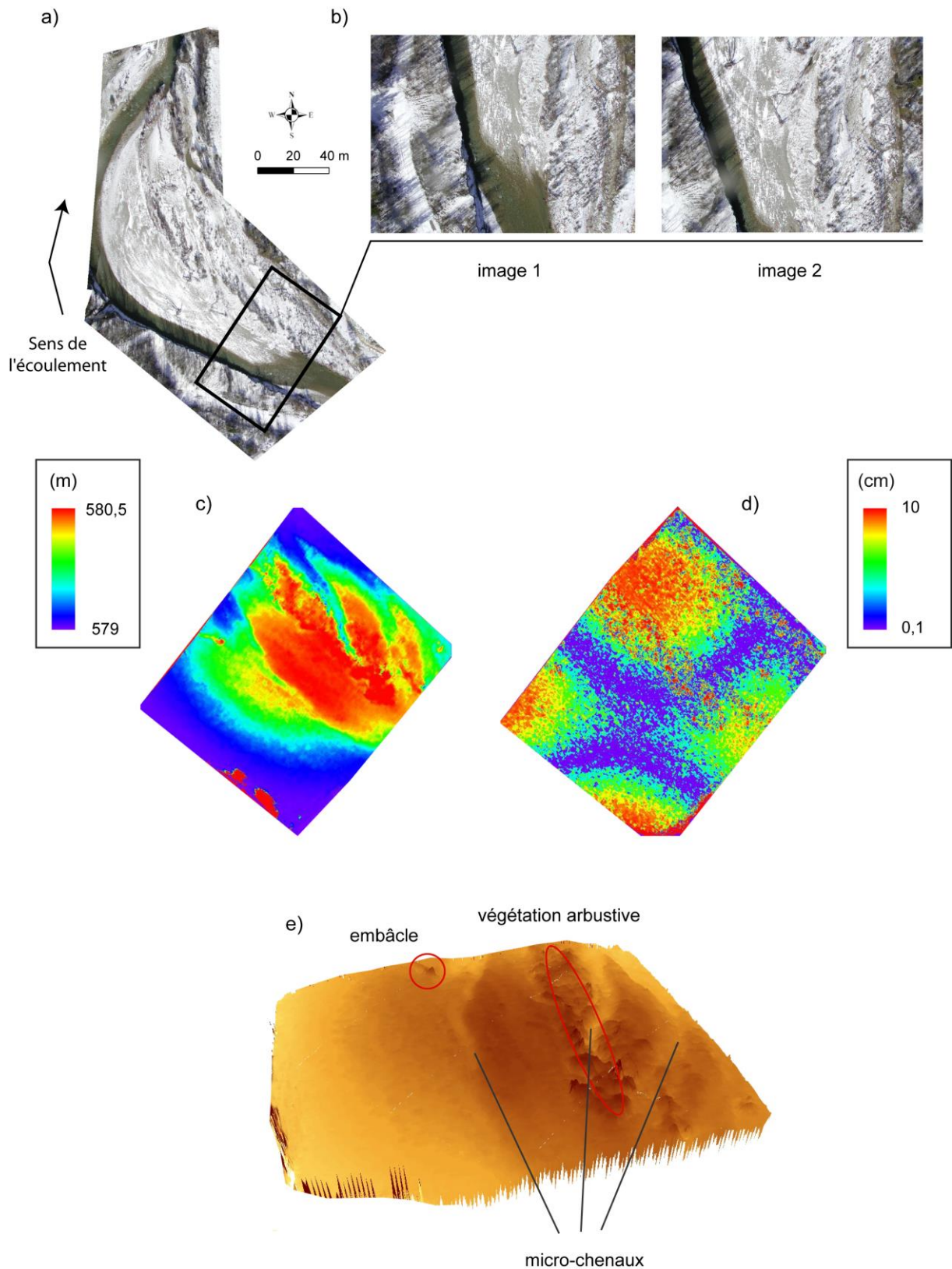


Figure 3-24. Banc de galets de Luc-en-Diois (mission du 29/01/2004), a) mosaïque drone, b) couple stéréoscopique, c) MNT, d) carte des précisions altimétriques, e) représentation 3D

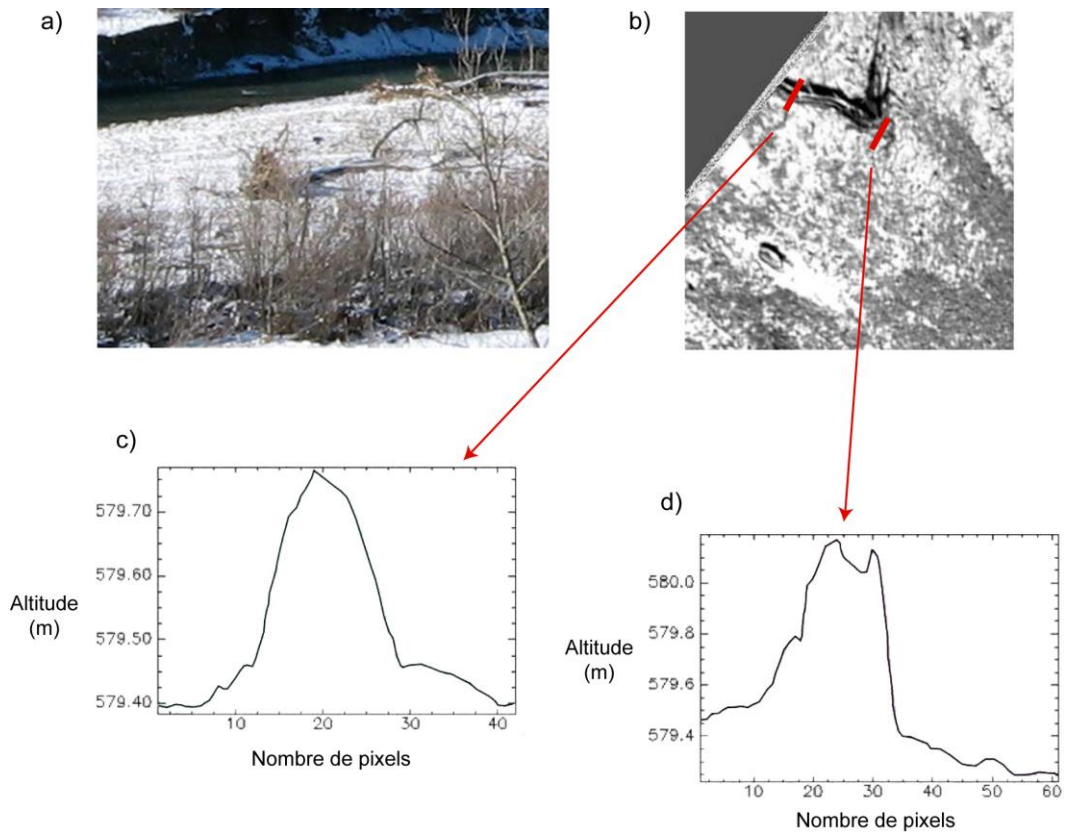


Figure 3-25. a) photographie oblique du tronç, b) orthophotographie, c) transect du tronç, d) transect du système racinaire

1.2. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus sur les deux sites tests permettent de formuler plusieurs observations.

- les deux MNT produits retranscrivent correctement la topographie générale des sites,
- leur précision permet également de restituer les micro-formes des deux bancs (micro-chenaux, langue de progression des galets, végétation de banc et bois mort).

L'amplitude des erreurs observées sur les cartes de précisions (fig. 3-23e et 3-24d) est associée à deux phénomènes :

- le premier correspond à un manque de points homologues (absence de points remarquables) ou bien à la présence d'artefacts (végétation) qui explique que des zones n'ont pas été correctement corrélées,
- le second provient de l'optique de l'appareil photo. Le capteur utilisé au cours des deux missions (Canon PowerShot G5) étant un appareil photographique numérique grand public et non une chambre de prise de vue métrique, il génère des déformations géométriques sur les images (coussinet, barillet, Kraus et Waldhäusl, 1998). Ces déformations se traduisent sur les cartes de précisions par des structures radiales, visibles principalement sur celle de

Luc-en-Diois. Ces distorsions n'ont pas été prises en compte dans les tests présentés, mais elles pourraient être quantifiées par étalonnage de l'appareil photo numérique.

Les résultats montrent que le MNT du banc de Luc-en-Diois (5 cm de précision moyenne) est 4 fois plus précis que celui de Gévrioux (20 cm). Lorsque nous analysons en détail les propriétés des caméras et des acquisitions (tab. 3-10 et 3-11), nous constatons des différences notables :

- Concernant les paramètres externes des caméras (paramètres de localisation) :
 - les valeurs correspondant à l'altitude du drone au moment des acquisitions (Z_0 , tab. 3-10) sont largement surévaluées pour les deux missions (pour la première : alt. calculée 619,32 m / alt. mesurée 75 m et pour la seconde : alt. calculée 941,03 m / alt. mesurée 230 m). Au-delà de 900 m, le pilotage devient impossible car le drone n'est plus visible. L'explication d'un tel décalage reste à trouver,
 - nous pouvons également noter que les coordonnées des positions des caméras pris sur l'exemple de Gévrioux présentent des angles d'acquisitions identiques, contrairement à ceux de Luc-en-Diois dont les angles convergent (tab. 3-10),
 - la moyenne des erreurs des positions des caméras est beaucoup plus faible sur la Drôme que sur l'Ain (tab. 3-11).

- Concernant la configuration du couple stéréoscopique :

La distance de base entre les deux clichés est beaucoup plus petite pour le banc de Gévrioux que pour celui de Luc-en-Diois. Ainsi le rapport B / H (évoqué précédemment) est plus favorable au couple stéréoscopique du banc de Luc-en-Diois, avec une valeur à 0,2, que celui de Gévrioux, qui obtient 0,05. Dans les deux cas, la marge de progression pour s'approcher de la valeur 1 reste importante.

Tableau 3-10. Paramètres externes issus de l'étape de minimisation (Gévrioux : mission du 21/07/2004 ; Luc en Diois : mission du 29/01/2004)

	Ain		Drôme	
	Image 1	Image 2	Image 1	Image 2
Z_0 (m)*	619,32	618,52	951,67	941,03
ω (°)	5,59	0,72	28,08	3,39
ϕ (°)	12,33	15,17	19,5	-1,19
κ (°)	-36,01	-35,77	46,25	44,18

(*) altitude calculée

Tableau 3-11. Estimation des erreurs de localisation entre les points mesurés *in situ* (balises) et les points calculés pour les deux sites tests

Points connus	Ain			Drôme		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,571	-0,578	2,591	-0,079	0,006	-0,267
2	-0,126	-0,013	-0,06	0,06	0,043	-0,175
3	-0,657	0,505	-3,158	0,121	-0,017	-0,106
4	-0,486	0,271	-2,981	0,138	-0,051	-0,146
5	-0,095	0,531	-0,779	-0,043	-0,42	0,471
6	0,175	0,07	2,057	0,1	-0,009	0,095
7	1,787	-0,568	4,724	0,303	0,308	0,32
8	0,987	-0,53	3,93	0,062	0,225	0,241
9	0,55	-0,012	1,835	-0,095	0,115	0,193
10	0,201	-0,06	1,109	-0,286	-0,369	-0,253
11	0,134	0,114	-0,66	-0,087	0,108	0,081
12	0,314	-0,103	-1,616	0,008	-0,013	0,014
13	-0,257	0,115	-2,59	-0,137	0,055	-0,148
14	-0,293	0,358	-2,298	-0,122	-0,051	-0,163
15	-0,293	-0,416	-0,276			
16	-0,522	-0,151	-0,834			
17	-0,494	-0,012	-1,97			
Moyenne	0,467	0,259	1,069	0,096	0,105	0,157

Les difficultés qui ont été mises en avant pour acquérir des couples stéréoscopiques à l'échelle d'un banc à partir des images drone ont démontré que cette méthode n'était, actuellement, pas suffisamment fiable pour être mise en œuvre dans le cadre de missions topographiques. Pour répondre à ce problème et pour assurer un suivi topographique des sites étudiés en partie 4, nous avons donc été amenés à utiliser une autre technologie qui n'est pas basée sur l'imagerie drone : le DGPS.

1.3. Le DGPS : technique de substitution

Pour restituer la topographie à l'échelle d'un banc, des tests ont été effectués à partir d'un DGPS (Trimble 5800 RTK). Cette approche a déjà démontré son efficacité dans la retranscription des formes fluviales (Brasington *et al.*, 2000, 2003 ; Veyrat-Charvillon, 2005). Brasington (2000) préconise l'acquisition des levés topographiques par transects et, lorsque le micro-relief le justifie, en tenant compte spécifiquement des ruptures de pente significatives. La précision planimétrique d'un MNT dépend de la densité des points observés et donc de leur espacement et, implicitement, du temps disponible pour réaliser les levés.

A partir des levés topographiques, un MNT est construit par interpolation. Différents auteurs ont listé les avantages des algorithmes d'interpolation (Ham, 2005 ; Veyrat-Charvillon, 2005 ; Merwade *et al.*, 2006 ; Yilmaz, 2007). La méthode la plus pragmatique pour choisir la meilleure interpolation est d'en essayer plusieurs et de comparer les résultats produits avec les formes du terrain observées (Veyrat-Charvillon, 2005). Dans ce but, des tests de rendu et de quantification volumétrique ont été réalisés (fig. 3-26).

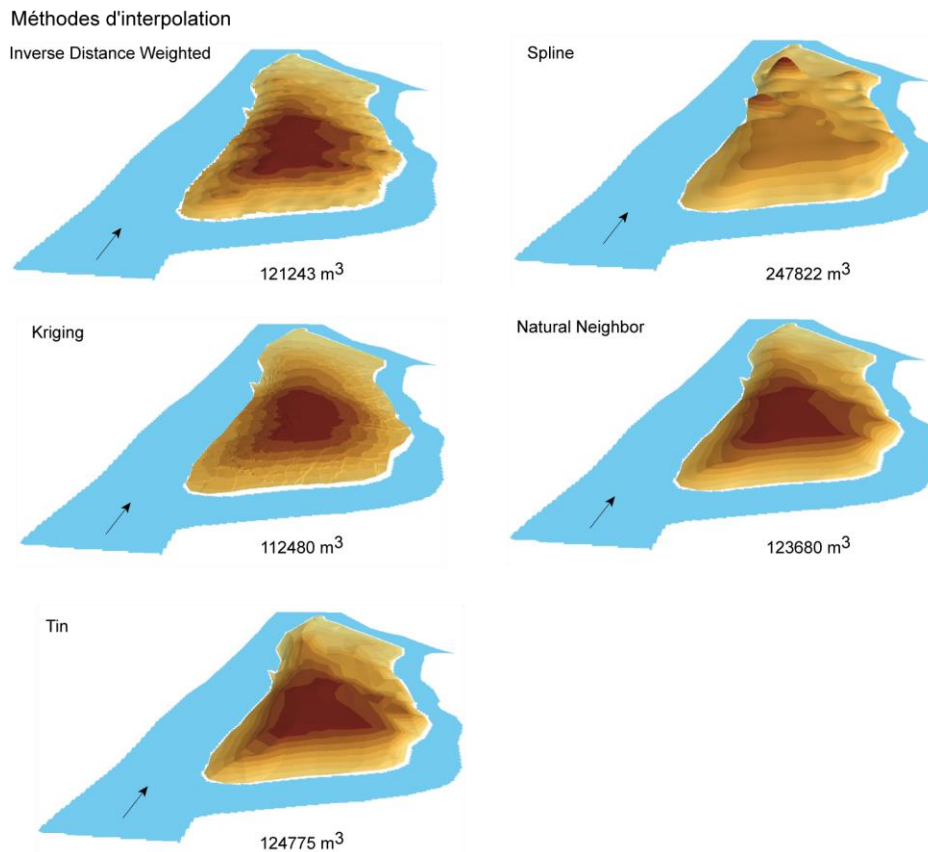


Figure 3-26. Tests des méthodes d'interpolation pour la restitution d'un MNT sur un banc du Haut-Rhône (site « les Grandes Iles »)

Cinq méthodes d'interpolations ont été testées : IDW (*Inverse Distance Weighted*), *Spline*, *Kriging*, *Natural Neighbor* (plus proche voisin) et *Tin* (*Triangulation*). Pour chacune d'elles, un MNT a ainsi été réalisé. Les résultats obtenus permettent de formuler plusieurs observations :

- des distorsions importantes sont observées sur les restitutions topographiques réalisées avec l'*IDW*, le *Spline* et le *kriging*,
- le *Spline* et le *Kriging* respectivement surestime (+50 %) et sous-estime (-50 %) les quantités sédimentaires *in situ* par rapport aux trois autres interpolations dont les volumes estimés varient entre 120000 et 125000 m³ (*IDW* : 121243 m³, *Natural Neighbor* : 123680 m³, *Tin* : 124775 m³) (fig. 3-26).

Ainsi, seules deux interpolations allient à la fois une bonne restitution des formes et une bonne quantification des volumes. Il s'agit des interpolations *Natural Neighbor* et *Tin*. Veyrat-Charvillon (2005) retient l'interpolation triangulaire (*Tin*) comme étant la plus adaptée à la restitution des formes fluviales torrentielles, car les ruptures de pente du chenal sont très marquées, ce qui n'est pas le cas pour un banc de galets. Le *Tin* retranscrit mal les formes en courbes ou bien seulement au prix d'une densité de points très élevée (Veyrat-Charvillon, 2005). Ainsi, l'interpolation qui a été retenue dans le cadre de ce travail est la *Natural Neighbor*.

Les MNT produits permettent de restituer un volume sédimentaire stocké au-dessus de la ligne d'eau du chenal. Ainsi, pour des hauteurs d'eau constantes, il sera possible d'évaluer l'état morphologique du banc à différentes dates afin d'étudier son engraissement ou bien son érosion.

2. La restitution de la bathymétrie

L'analyse bibliographique menée dans la partie 2 sur la restitution des hauteurs d'eau par traitements d'image nous a conduit à utiliser des modèles bathymétriques empiriques. Basés sur les propriétés de réflectance d'une colonne d'eau, ces modèles sont fortement dépendants des phénomènes de réfraction (ombres, évaporation, turbulence, turbidité) qui se produisent le long du parcours du signal lumineux. Dans la partie qui suit, nous présentons les différents moyens qui ont été mis en œuvre pour produire des cartes bathymétriques portant sur un chenal principal et sur deux bras morts.

2.1. Travaux préparatoires

L'utilisation des images drone et des relevés bathymétriques nécessite des travaux préparatoires.

2.1.1. Le mode multi-photos

Quelles que soient les missions réalisées, les surfaces à survoler par le drone sont plus étendues que l'emprise d'une seule acquisition. La distance à couvrir nécessite donc de travailler en mode multi-photos. Les temps de survol durant en moyenne une demi-heure, les conditions de luminosité peuvent fortement varier entre le premier et le dernier cliché. La figure 3-27 permet d'observer ce phénomène. L'image n° 4066 a été enregistrée à 11h33 et l'image n° 4103 à 11h41. Durant le temps qui s'épare les deux images (huit minutes), les conditions de luminosité ont changé ce qui a engendré un décalage de 50 sur les valeurs des pixels.

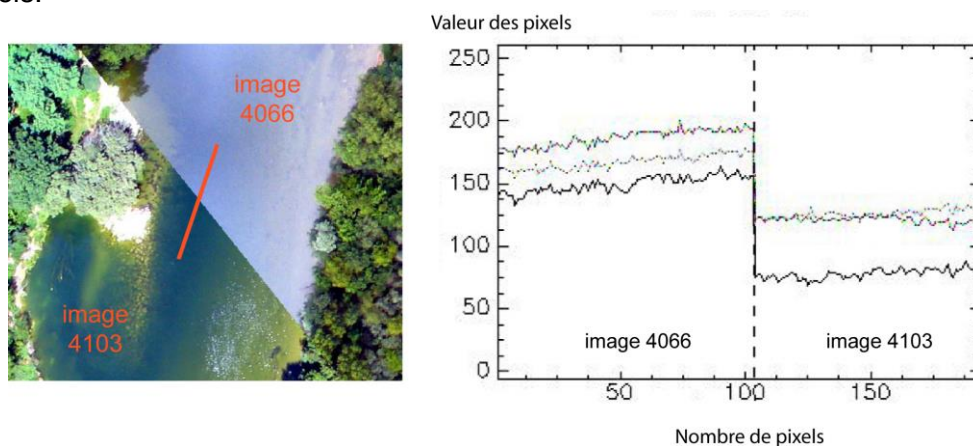


Figure 3-27. Impact des variations lumineuses sur les valeurs radiométriques de deux images communes

Contrairement aux idées reçues, un ciel sans nuage est plus contraignant qu'une couverture nuageuse homogène, car la réflexion du signal aura une direction préférentielle. Les surfaces réfléchies seront donc non lambertiennes c'est-à-dire fortement liées à la position du soleil et du capteur par rapport à l'objet. Ce facteur est moins important sur le traitement des photographies aériennes classiques, et encore moins sur les images satellites car celles-ci sont prises à plus haute altitude (plusieurs centaines de kilomètres). Les travaux faisant référence à ce problème en morphologie fluviale sont récents (Fonstad et Marcus, 2005 ; Carbonneau *et al.*, 2006). Afin de minimiser ce décalage de luminosité, des traitements ont été réalisés sur les histogrammes des images. Ces traitements correspondent à un **étirement dynamique** (*stretching*) suivi d'un **ajustement radiométrique** (*matching*).

- L'étirement dynamique est un processus qui permet de ré-étalonner les valeurs radiométriques sur l'ensemble des niveaux disponibles d'une image codée sur 8 bits (de 0 à 255 niveaux) (fig. 3-28a et équation 3.4). Cette opération permet de rehausser les contrastes et de standardiser les plages radiométriques des images.

$$VP' = \left(\frac{VP - Min}{Max - Min} \right) * 255 \quad (3.4)$$

Avec VP' : valeur du pixel étiré, VP : valeur du pixel, Min et Max : valeurs extrêmes des pixels de l'image.

- L'ajustement radiométrique, quant à lui, opère par comparaison entre l'histogramme de l'image qui est à corriger et l'histogramme de l'image de référence (fig. 3-28b). Cette procédure a été appliquée en utilisant le module de « mosaïquage » du logiciel *ENVI (ITT)*. Ce module présente une option d'ajustement basée sur l'analyse statistique de la radiométrie de chacun des canaux des images à traiter. Ainsi, les images d'une mosaïque sont réajustées à partir d'une image de référence. La sélection de l'image de référence est réalisée grâce à un code développé sous IDL qui sélectionne automatiquement l'image présentant la meilleure dynamique radiométrique par analyse d'histogramme (annexe 3). Les paramètres considérés sont la valeur du pic maximal des pixels et la détection des bornes « min » et « max » de l'histogramme après l'étape du « *stretching* ».

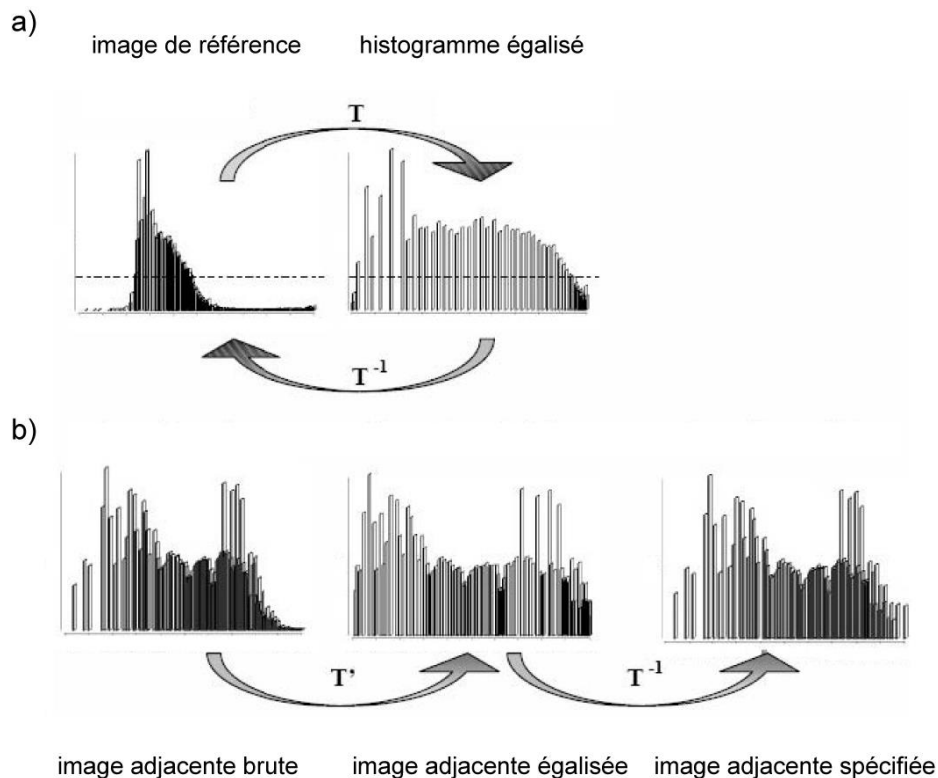


Figure 3-28. Traitements des histogrammes, a) principe de l'étirement dynamique, b) principe de l'ajustement dynamique (d'après Rougier, 2006)

2.1.2. Calibration des mesures de hauteur d'eau

Pour établir une relation entre les valeurs radiométriques des images et les hauteurs d'eau, des mesures bathymétriques ont été réalisées. L'échantillonnage se fait de manière semi-aléatoire ou bien par transect, afin de couvrir l'intégralité de la surface du plan d'eau. L'ensemble des plans d'eau survolés ont ainsi été échantillonnés. Ces mesures sont réalisées à partir d'un bateau pneumatique équipé d'un récepteur DGPS (Trimble RTK 5800) couplé à un récepteur fixe sur berge pour l'enregistrement des coordonnées planimétriques et d'un capteur de pression (0-5 mètres) pour l'enregistrement des hauteurs d'eau.

Les mesures bathymétriques sont réalisées avec une précision centimétrique sur les trois axes (DGPS & capteur pression). En revanche, les images rectifiées de la mosaïque souffrent d'imprécisions dues aux déformations géométriques abordées précédemment. La relation entre la localisation des mesures bathymétriques (précision centimétrique) et le pixel de l'image (précision sub-métrique) intègre donc une incertitude qu'il faut évaluer et considérer.

Dans ce but, une fenêtre de convolution (élément de taille carrée) a été appliquée sur chacun des points mesurés (fig. 3-29). La taille de cette fenêtre doit ainsi être supérieure à l'erreur des rectifications des images de la mosaïque. Bainbridge & Reichelt (1988) définissent une taille de référence, correspondant à la plus petite unité discernable, qui s'exprime de la façon suivante (3.5) :

$$S = R(1 + 2E) \quad (3.5)$$

Avec S la surface de convolution, R la résolution du pixel et E l'erreur de localisation en nombre de pixels.

Cette méthode a l'avantage d'établir un seuil minimal à prendre en considération dans la définition d'une taille de fenêtre. Cependant, cette formule est trop restrictive pour notre application car la mosaïque est composée d'images qui n'ont pas été prises à la même altitude. Elles n'ont donc pas, avant mosaïquage, la même résolution. Ainsi, notre choix s'est porté sur la relation suivante (3.6) :

$$S = \frac{\frac{1}{P} \sum_{i=0}^p RMS}{R} \quad (3.6)$$

Avec S la surface de la fenêtre de convolution en pixel, P le nombre d'images de la mosaïque, RMS l'erreur moyenne quadratique de la rectification des images, R la résolution de la mosaïque.

C'est ainsi la moyenne des résidus des images rectifiées, et non plus une seule erreur de localisation, qui est prise en compte.

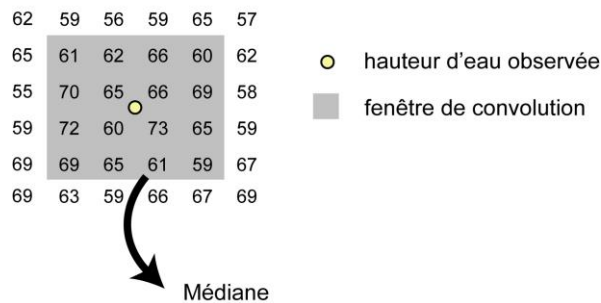


Figure 3-29. Fenêtre de convolution et extraction d'une valeur médiane par canal

La surface des fenêtres de convolution est donc définie par l'équation (3.6). La valeur qui est extraite de cette fenêtre correspond à la médiane des valeurs des pixels, et non pas à la moyenne, afin de minimiser l'effet des valeurs aberrantes. La mise en place de cette fenêtre est une étape manuelle fastidieuse lorsque les mesures sont nombreuses (plus d'une centaine sur certains plans d'eau). Afin d'automatiser cette procédure, un programme codé sous IDL a été développé (annexe 2).

2.2. Impacts du signal lumineux sur les modèles bathymétriques empiriques

La relation simple « signal lumineux / hauteur d'eau », mise en évidence dans la partie 2, n'est exploitable que dans le cas d'un chenal à fond homogène, sans turbidité ni turbulence et d'une seule prise de vue. A l'échelle d'un tronçon ou d'une lône, ces cas de figures sont, pour les trois premiers, peu probables et pour le dernier, difficile à obtenir à partir d'images aériennes prises à très basses altitudes avec de faibles emprises au sol.

Afin d'appréhender l'impact de ces deux phénomènes, des tests ont été réalisés à partir de différentes missions drone (fig. 3-30) portant sur un chenal actif (l'Ain) et sur deux lônes : Planet (Ain) et Malourdie (Haut Rhône). Le tableau 3-12 résume les caractéristiques de chacune d'entre elles.

Tableau 3-12. Caractéristiques des missions au cours desquelles les modèles bathymétriques ont été testés

Mission	Superficie des plans d'eau (m ²)	Nombre de mesures - pt/m ²	Nombre d'images par mosaïque
Lône du Planet (03/02/2004)	11357	54 - 0,005	6
Tronçon de Varambon/Priay (19,20,21/07/2005)	301247	122 - 0,0004	29
Lône de la Malourdie (20/04/2006)	6103	119 - 0,002	9
Tronçon des Carronnières (04/05/2006)	24085	40 - 0,002	4
Tronçon de Bellegarde (30/06/2006)	85848	31 - 0,0004	12
Lône de la Malourdie (16/03/2007)	4441	59 - 0,01	4

La programmation des missions correspond, pour les lônes, à la période hivernale pour limiter la variété des couverts végétaux de fond de chenal et, pour le chenal principal, à la période estivale, afin d'être en condition d'étiage. Les mesures de hauteur d'eau localisées sous la canopée de la végétation riveraine, sous la végétation aquatique flottante et dans les zones d'ombre, ont été exclues des traitements.

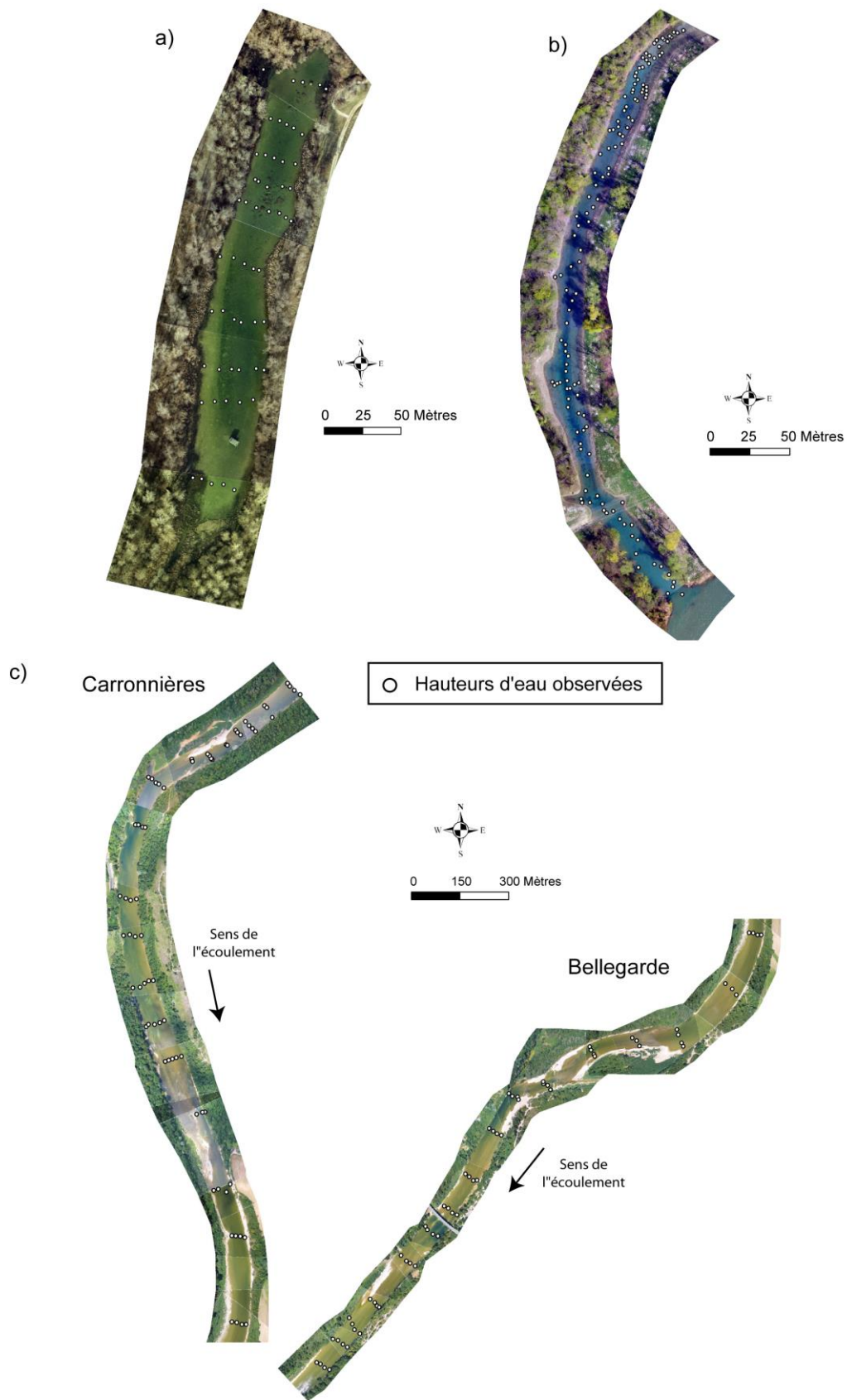


Figure 3-30. Mosaïques drone et localisation des hauteurs d'eau observées, a) lône du Planet (03/02/2004), b) lône de la Malourdie (20/04/2006), c) tronçon Varambon / Priay (19,20,21/07/2005) (tronçon comprenant les secteurs Carronnières et Bellegarde)

2.2.1. Réponses des valeurs radiométriques sur les hauteurs d'eau

Les figures 3-31 et 3-32 illustrent, pour chacune des missions, le comportement des valeurs radiométriques correspondant aux HOB (Hauteur d'Eau Observée) par rapport aux substrats et aux images qui leur sont associés. Chacun des trois canaux des mosaïques (Rouge : C1, Vert : C2, Bleu : C3) a été testé. Par souci de clarté, seul le canal C1 a été affiché.

L'analyse par substrat des mosaïques, correspondant aux graphes de la première colonne des figures 3-31 et 3-32, révèle que seule la mosaïque de la lône du Planet (fig. 3-31a) présente une dissociation nette entre les deux substrats qui composent le fond de son chenal (limon et végétation aquatique). Les substrats identifiés sur les autres mosaïques présentent soit une imbrication importante difficile à traiter (fig. 3-31b), soit des regroupements correspondant à une même tendance (fig. 3-31c et 3-32c). Les figures 3-32a et b ne révèlent aucune tendance particulière.

L'analyse par image des mosaïques, correspondant aux graphes de la deuxième colonne des figures 3-31 et 3-32, met en évidence deux types de comportement dans l'agencement des valeurs radiométriques. Le premier correspond à une disposition des images regroupées sur une même gamme de valeur ce qui suppose des conditions lumineuses constantes (fig. 3-31ac et 3-32ab). Le décalage de l'image 1, observé sur la figure 3-31c, n'est pas lié à un écart de luminosité mais à la présence d'un certain nombre de mesures localisées sur une langue de gravier de fond de chenal caractérisée par une réponse radiométrique élevée. Le second comportement correspond à une forte variabilité inter-images, ce qui suppose des conditions de luminosité variables pendant le vol (fig. 3-31c et fig. 3-32c).

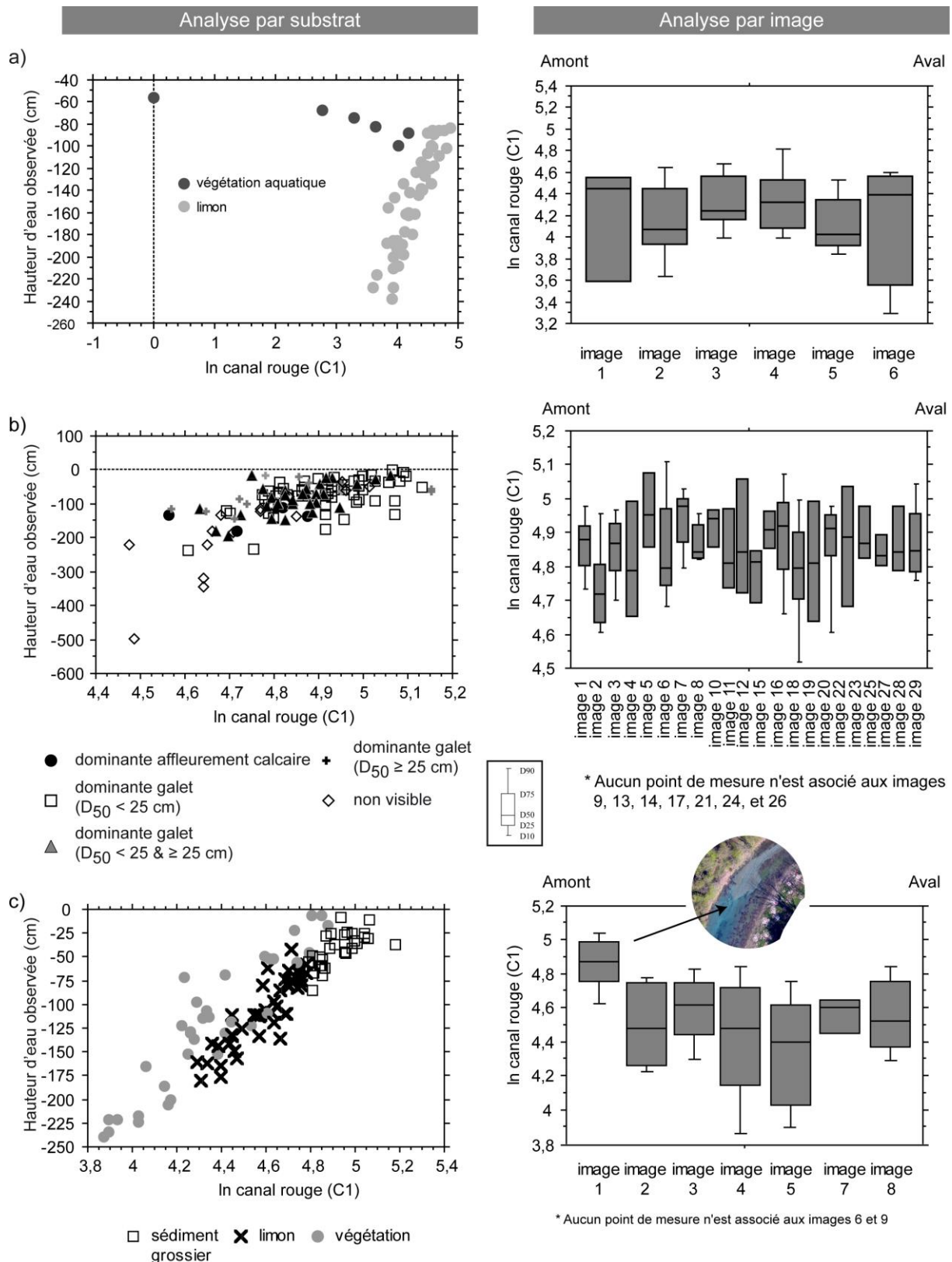


Figure 3-31. Analyse des valeurs radiométriques par substrat et par image, a) lône du Planet, b) tronçon Varambon / Priay, c) lône de la Malourdie (année 2006)

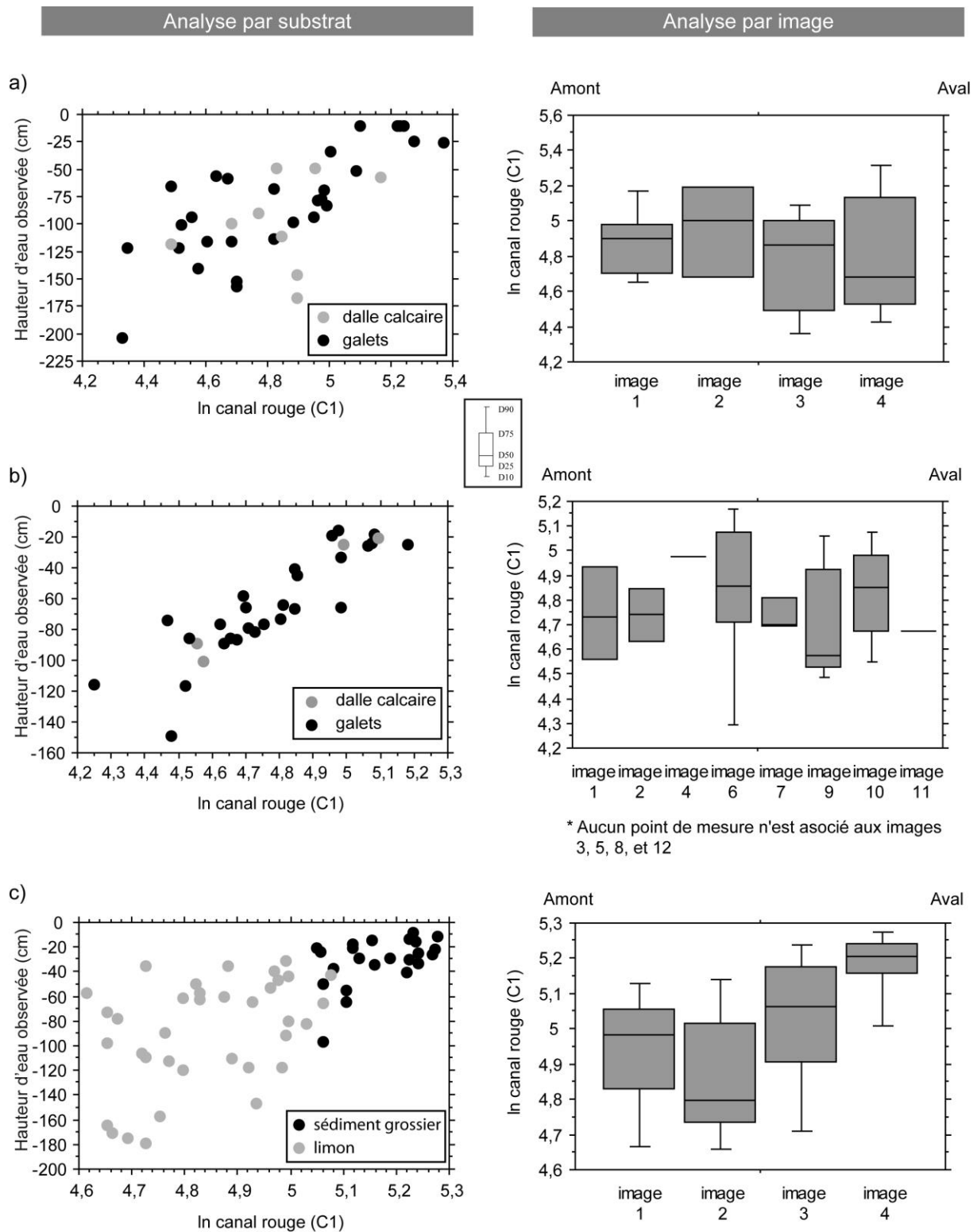


Figure 3-32. Analyse des valeurs radiométriques par substrat et par image, a) tronçon des Carronnières b) tronçon de Bellegarde, c) lône de la Malourdie (année 2007)

2.2.2. Conséquences sur les modèles

Fort de ces observations, la relation qui a été mise en avant dans la partie 2 entre les HEO et les HEP (Hauteur d'Eau Prédite) a été appliquée pour chacune des mosaïques (fig. 3-33 et 3-34). Seuls les canaux les plus significatifs ont été retenus (après un test d'indépendance des régresseurs). Deux types de modèles ont été produits par régression simple ou multiple (en fonction des canaux utilisés) : le modèle global (1^{ère} colonne, fig. 3-33 et 3-34) et les modèles ajustés (2^e colonne, fig. 3-33 et 3-34).

- Le premier correspond à une relation simple sans dissociation des substrats et des images.
- Le second est basé sur la prise en compte des observations qui ont été faites précédemment.

L'analyse par substrat a démontré que seules les valeurs radiométriques de la mosaïque du Planet avaient une réponse corrélée aux substrats (fig. 3-31a). Leur prise en compte a permis une amélioration significative de l'ajustement de la relation « HEO / HEP » avec des coefficients de détermination de 0,81 (limon) et 0,90 (végétation aquatique) pour les modèles ajustés contre 0,61 pour le modèle global (fig. 3-33a).

L'analyse par image a révélé que les valeurs radiométriques des mosaïques Varambon / Priay (fig. 3-31b) et Malourdie (fig. 3-32c) comportaient de fortes variations entre images. Pour le premier site, les résidus du modèle bathymétrique global (fig. 3-33b'), ordonnés selon l'heure des acquisitions, sont beaucoup plus élevés sur les premières images. Ces dernières correspondent aux acquisitions réalisés le premier jour de la mission (la couverture aérienne du tronçon Varambon / Priay a été réalisée du 19 au 20 juin 2005). Les conditions de luminosité ont donc fortement varié entre les deux dates. Un évènement pluvieux au début de la matinée du premier jour a en fait provoqué des phénomènes d'évaporation qui ont perturbé le signal radiométrique des images.

L'optimisation du modèle global n'a pu être réalisée par image car seules 22 d'entre elles sur 29 comportent des points de calage (HEO). Afin de contourner cet obstacle, des regroupements d'images, basés sur les résidus du modèle global, ont été effectués (fig. 3-33b). Le regroupement des images a été organisé en cinq catégories, correspondant au positionnement de la médiane des résidus des images :

- de 0 à +25 cm : bon ajustement positif,
- de +25 à +50 cm : moyen ajustement positif,
- de 0 à -25 cm : bon ajustement négatif,
- de -25 à -50 cm : moyen ajustement négatif,
- > à -50 cm : mauvais ajustement négatif.

Pour chacune des cinq catégories, une régression a été réalisée. La figure 3-33b illustre les résultats obtenus, avec une amélioration significative des coefficients de détermination, ceux-ci variant de 0,59 à 0,9.

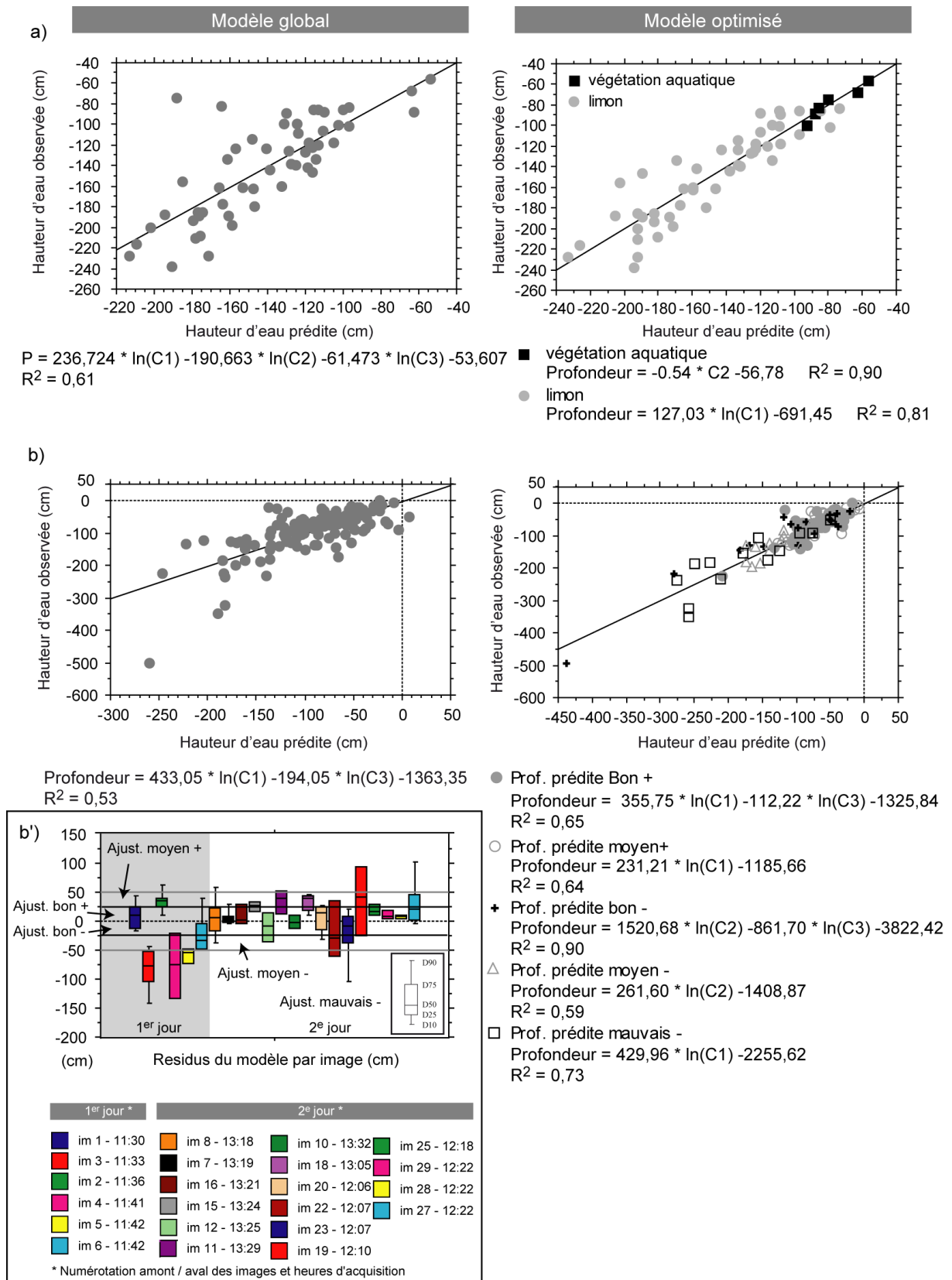


Figure 3-33. Modèles bathymétriques globaux et optimisés, a) lône du Planet, b) tronçon Varambon / Priay, b') résidus du modèle global ordonnés par heure d'acquisition

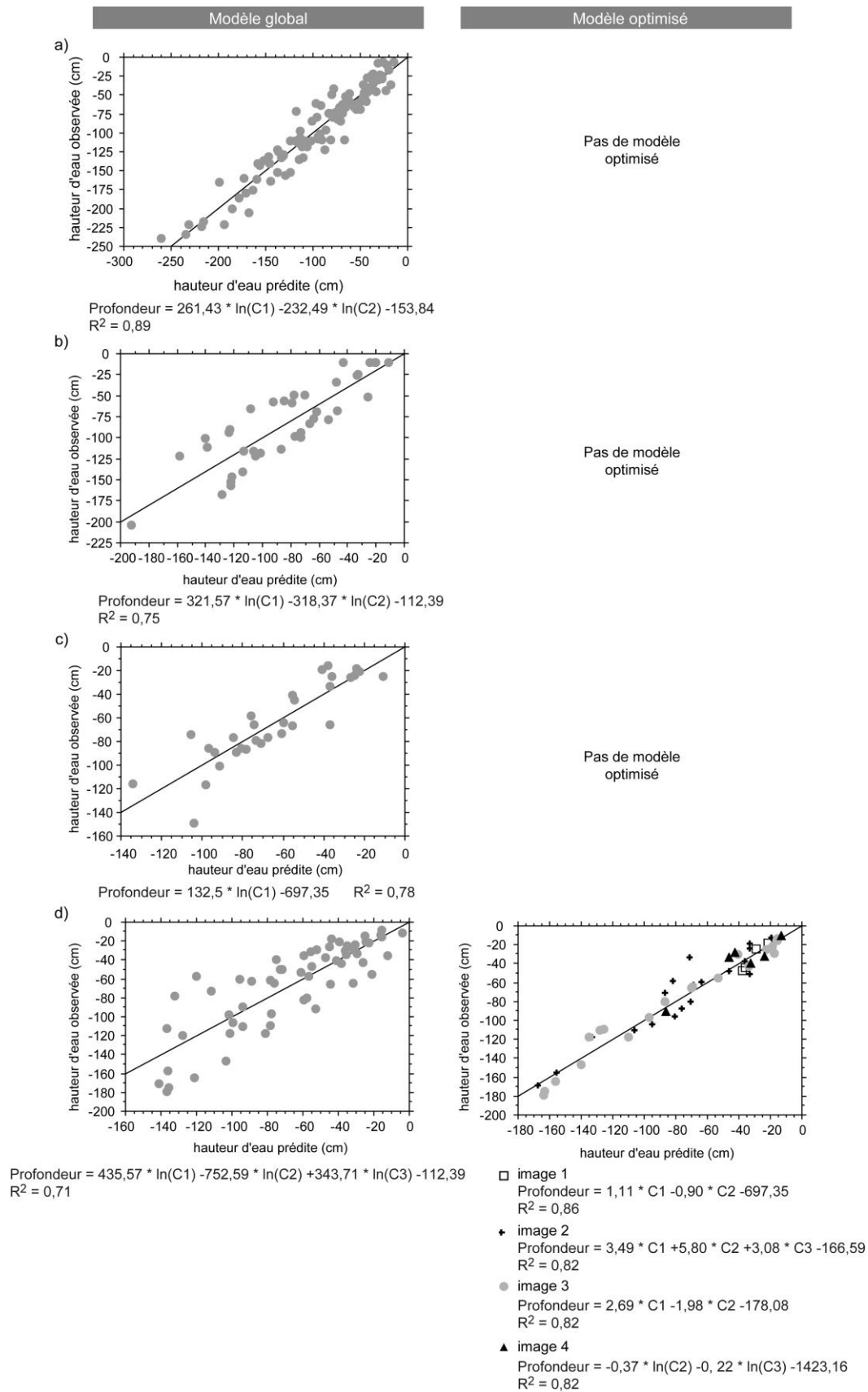


Figure 3-34. Modèles bathymétriques globaux et optimisés, a) lône de la Malourdie (année 2006), b) tronçon des Carronnières, c) tronçon de Bellegarde, d) lône de la Malourdie (année 2007)

La prise en compte des images de la mosaïque de la Malourdie a révélé une variabilité significative des valeurs radiométriques entre image (fig. 3-32c). N'étant pas affecté par les contraintes rencontrées sur le précédent site (météorologie, heures d'acquisition, insuffisance du nombre de points de calage), un ajustement par image du modèle bathymétrique global a pu être réalisé (fig. 3-34d). Alors que le modèle global avait un coefficient de détermination de 0,71, les modèles ajustés par image ont permis d'améliorer significativement les coefficients de détermination (de 0,82 à 0,86).

L'analyse des valeurs radiométriques des mosaïques de la lône de la Malourdie (année 2006) ainsi que des tronçons des Carronnières et de Bellegarde, a permis la réalisation de modèles bathymétriques globaux. L'absence de modèles ajustés s'explique par l'impossibilité d'améliorer les résultats avec la seule prise en compte des substrats et des images. Néanmoins, les relations produites entre HEO et HEP présentent de bonnes corrélations, avec un R^2 variant de 0,75 à 0,89 (fig. 3-34abc).

L'application des modèles bathymétriques sur l'ensemble des pixels des mosaïques a permis la réalisation de cartes de hauteur d'eau. Afin d'obtenir des plages bathymétriques homogènes, un filtre médian a été appliqué sur la restitution des hauteurs d'eau prédites. La taille du filtre correspond à la taille de la fenêtre de convolution utilisée pour extraire les valeurs des pixels associées aux hauteurs d'eau observées (cf. équation 3.6, page 126). La figure 3-35 illustre ces dernières ainsi que les cartes des résidus des modèles afin d'évaluer la qualité spatiale des restitutions. Les cartes bathymétriques de la lône de la Malourdie et des tronçons Carronnières et Bellegarde n'ont pas été représentées, car elles figurent dans la partie 4, traitant du suivi morphologique des sites de restauration. Ainsi, seules les restitutions bathymétriques du tronçon Varambon / Priay et de la lône de la Malourdie sont représentées.

Les cartes bathymétriques réalisées mettent en évidence plusieurs points (fig. 3-35) :

- la retranscription des berges et des profils en long des chenaux, caractérisés par des séquences seuils / mouilles, est cohérente avec la réalité topographique des sites,
- l'asymétrie transversale des profils topographiques respecte la géométrie des méandres (tronçon Varambon / Priay, fig. 3-35a),
- des ruptures bathymétriques sont observées dans la restitution des hauteurs d'eau (fig.3-35a, indice 1) ; elles correspondent à la jointure radiométrique entre deux acquisitions.

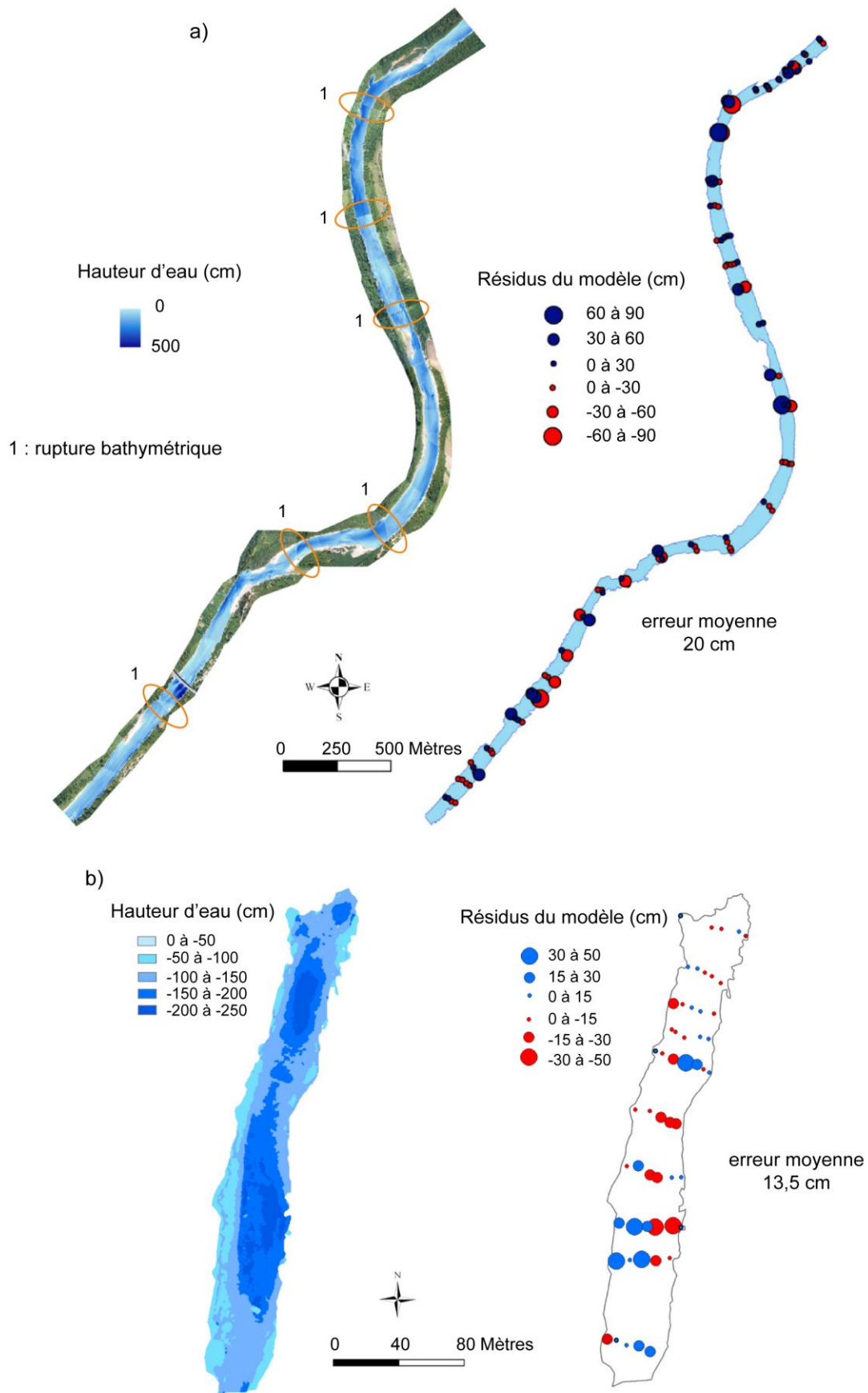


Figure 3-35. Cartes bathymétriques et cartes des résidus des modèles, a) tronçon Varambon / Priay, b) île du Planet

Les cartes des résidus des modèles ont été réalisées afin d'évaluer la cohérence et la validité des restitutions bathymétriques et d'analyser leur répartition spatiale. Plusieurs observations peuvent être formulées :

- les deux modèles présentés produisent des précisions altimétriques acceptables par rapport aux amplitudes bathymétriques observées (tronçon Varambon / Priay : 20 cm, lône du Planet : 13,5 cm),
- pour la lône du Planet, un gradient se dessine de l'amont (Nord) vers l'aval (Sud) (fig. 3-35b). Ce gradient pourrait être dû à la présence d'un ruisseau qui alimente la lône par l'amont (Nord). Cette arrivée d'eau pourrait avoir un impact sur la réponse spectrale de la colonne d'eau, en produisant une eau plus claire. De précédents travaux ont également permis d'observer lors de mesures *in situ*, une concentration algale plus importante dans cette même partie de la lône (observation réalisée en janvier 2001).

Le tableau 3-13 synthétise les résultats des modèles développés au cours des différentes missions. Plusieurs observations peuvent être ainsi formulées :

- pour la majorité des missions, l'utilisation de plusieurs canaux de l'image permet d'accroître la qualité des modèles,
- les valeurs radiométriques sont, la plupart du temps, loguées, ce qui confirme la relation exponentielle précédemment mise en avant entre le signal lumineux et la colonne d'eau traversée,
- la création de modèles optimisés par image ou par substrat a permis d'ajuster sensiblement les HOB aux HOP,
- les erreurs générées sont relativement faibles par rapport aux hauteurs d'eau mesurées (inférieures à 9 %)

Tableau 3-13. Synthèse des résultats des traitements bathymétriques réalisés sur les images produites lors des différentes missions

Missions	Modèles globaux		Modèles optimisés				Erreur moyenne (cm)	Erreur moyenne / hauteur d'eau max (%)
	Canaux utilisés	R ²	Répartition des mesures	Support	Canaux utilisés	R ²		
Lône du Planet	ln(C1), ln(C2), ln(C3)	0,61	48	limon	ln(C1)	0,81	13,5	6
			6	végétation aquatique	C2	0,9		
Tronçon Varambon / Priay	ln(C1), ln(C3)	0,53	50	9 images	ln(C1), ln(C3)	0,65	20	4
			29	5 images	ln(C1)	0,64		
			9	3 images	ln(C2), ln(C3)	0,9		
			12	2 images	ln(C2)	0,59		
			13	3 images	ln(C1)	0,73		
Lône de la Malourdie	ln(C1), ln(C2), ln(C3)	0,89	-	-	-	-	12,5	5
Tronçon des Carronnières	ln(C1), ln(C2)	0,75	-	-	-	-	21	9
Tronçon de Bellegarde	ln(C1)	0,78	-	-	-	-	12,5	8
Lône de la Malourdie	ln(C1), ln(C2), ln(C3)	0,71	14	image 1	C1, C2	0,86	9	5
			19	image 2	C1, C2, C3	0,82		
			20	image 3	C1, C2	0,82		
			6	image 4	C2, C3	0,82		

2.3. Trois approches à considérer

Suite aux différents tests précédemment réalisés, nous pouvons déduire que les modèles bathymétriques développés sont influencés par l'hétérogénéité des substrats de fond de chenal et par les conditions d'acquisition des images. La prise en compte de ces paramètres, *via* les modèles ajustés, permet d'améliorer les résultats.

La figure 3-36 synthétise les différentes étapes qui ont été mises en place à partir des exemples traités à travers les trois approches qui ont été développées pour produire une carte bathymétrique.

- l'approche globale (1) qui ne nécessite pas d'ajustement particulier car le modèle répond bien à la relation « hauteur d'eau observée / valeur radiométrique »,
- l'approche par image (2), qui permet de pondérer la variabilité des conditions d'ensoleillement sur le modèle bathymétrique. Dans cette optique, les images utilisées pour produire le modèle correspondent aux images sans traitement par ajustement radiométrique,
- l'approche par substrat (3), qui permet de minimiser l'hétérogénéité des substrats de fond de chenal sur le modèle bathymétrique.

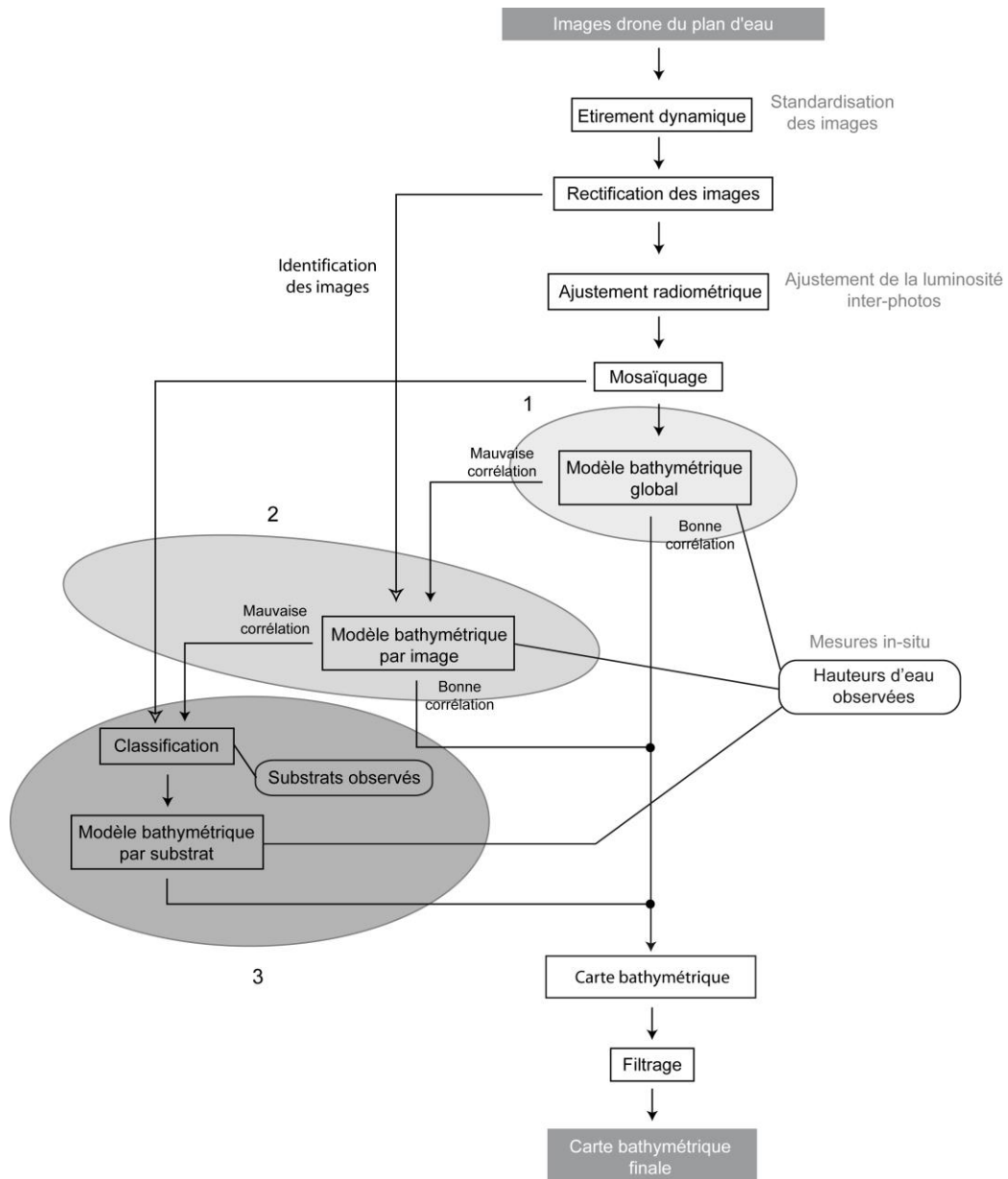


Figure 3-36. Schéma synthétisant la chaîne de traitements mise en place pour la restitution bathymétrique avec trois approches : (1) le modèle global, (2) le modèle par image, (3) le modèle par substrat

D. Synthèse et discussion

1. L'outil drone : une solution miracle ?

Le drone est avant tout une plate-forme aérienne qui permet la couverture de linéaires. Il est donc bien adapté aux systèmes fluviaux, que ce soit pour la couverture du chenal en eau ou bien celle de ses annexes fluviales. Au-delà de 5 km de linéaire, la durée d'une mission (survol et balisage) dépasse le cadre d'une semaine « travaillée » (nous comptons 1,5 à 2 km par jour). Ce chiffre est bien évidemment dépendant de l'environnement qu'offrent les sites en termes d'accessibilité, de cheminement le long du cours d'eau et des conditions météorologiques.

La résolution spatiale des images acquises par le drone est parfaitement adaptée à la détection des formes fluviales, que ce soit le chenal en eau, les bancs de galets, les lônes et leurs micro-faciès (affleurements, dalle de fond de chenal, végétation aquatique ou flottante, etc.) (cf. fig. 3-5, page 82).

Le prix d'une image étant principalement proportionnel à la résolution du support, la technologie drone fait la différence sur ce paramètre. Il n'est pour l'heure pas encore égalé par les produits commerciaux disponibles sur le marché (tab. 3-3, page 91) lorsqu'il s'agit d'étudier des objets ayant une échelle spatiale faible (centimétrique et métrique). Dans le cas contraire, l'imagerie aérienne conventionnelle ou satellite devra être préconisée.

Lorsqu'on établit un bilan des conditions climatiques défavorables à l'activité drone, en prenant en considération à la fois le facteur aérologique et le facteur pluviométrique, deux observations principales ressortent :

- l'activité pluvieuse est largement prépondérante par rapport à l'activité aérologique et, ce, quelle que soit la saison (fig. 3-10 & 3-11, page 88),
- il existe des fenêtres temporelles plus favorables, toutes conditions climatiques confondues. La période estivale est naturellement la plus favorable même si les disparités intersaisons restent faibles (fig. 3-10 & 3-11, page 88).

Nous avons pu observer que les conditions aérologiques varient fortement entre les deux stations. Il y a huit fois plus de chance de pouvoir faire voler le drone sur le site de Belley que sur celui d'Ambérieu-en-Bugey. Le vent est donc un facteur important pour la technologie drone. Ce paramètre n'a pas d'incidence sur les autres plates-formes (aériennes ou satellites). Une étude préalable des conditions aérologiques sera donc nécessaire pour transposer la solution drone à d'autres régions d'étude potentielles.

Concernant les conditions pluviométriques, nous avons pu observer qu'elles étaient semblables entre les deux stations. Le poids des précipitations sur l'activité drone est à pondérer, car c'est également un facteur limitant pour les autres plates-formes (satellite ou

bien aérienne). En effet, un évènement pluvieux interdira toutes acquisitions pour l'imagerie aérienne et générera des masques sur les images satellites.

Au-delà des développements technologiques de l'outil drone, nous avons pu constater que la préparation du terrain était une étape essentielle dans le protocole d'acquisition des images pour qu'elles soient exploitables. La disposition des balises et leur nombre sur chacune des images aura une incidence sur le choix de la rectification à opérer pour minimiser les déformations géométriques des acquisitions. Le choix d'un balisage mobile a pour inconvénient d'augmenter le nombre d'étapes à réaliser pour que le site à survoler soit opérationnel. La durée de réalisation de ce protocole de balisage pèse sur l'efficacité de la technologie drone et sur le nombre de personnes à mobiliser pour la mener à bien. Plusieurs missions ont dû être annulées car les conditions météorologiques avaient changé au cours de la préparation du terrain (exemple de la mission de Varambon / Priay). Cette contrainte de préparation du terrain peut être cependant amoindrie pour un site faisant l'objet de plusieurs survols, car les images acquises lors du premier vol peuvent servir de référence aux vols suivants. Nous avons, ainsi, la possibilité de réduire le nombre de balises à poser. Cette possibilité d'alléger le protocole terrain est cependant à considérer avec beaucoup de précautions, car les erreurs engendrées par la rectification des images du premier survol s'additionneront à celles des survols suivants.

Afin de s'affranchir de ces difficultés liées à la préparation du terrain, une autre approche consisterait à effectuer les survols sans la pose de balises au sol. Grâce à une imprimante portable, l'impression d'un échantillon d'images représentant l'ensemble du périmètre d'étude serait effectuée. Le repérage de points d'amer par photo-interprétation serait alors réalisé directement *in situ*.

Nous observons également que la plupart des missions ont été réalisées en une seule journée (tab. 3-1, page 83). Pour des survols devant couvrir plus de deux kilomètres, plusieurs jours sont nécessaires.

Il faut également souligner qu'en termes de moyens humains, un minimum de trois personnes est requis pour faire fonctionner le drone en toute sécurité.

2. Le modèle granulométrique 2D : entre paramètres d'ajustement et résolution des images

Les travaux qui ont déjà été réalisés dans le domaine de la restitution granulométrique à partir d'images aériennes ont mis en évidence deux principales approches méthodologiques pour aborder la texture et la structure d'une image, l'un s'appuyant sur la matrice de cooccurrence et l'autre sur la semi-variance (Carbonneau *et al.*, 2004 ; Verdu *et al.*, 2005 ; Carbonneau, 2005). Quelle que soit la méthode appliquée par ces derniers, les tests réalisés ont révélé l'existence d'une forte relation entre la taille des objets étudiés et la résolution des supports utilisés.

2.1. Réponses des paramètres d'ajustement

Différents paramètres d'ajustement ont été testés : résolution, portée, taille de la fenêtre et canaux de l'image.

La portée directionnelle est en partie liée à la résolution des images traitées. En effet, la portée qui a été identifiée comme étant la plus pertinente pour la mission 2004 correspond à une taille 3*3 (soit une distance de 10 cm au sol) pour une résolution de 3,4 cm et, pour la mission 2005, à une portée de taille 13*13 (soit une distance de 1,3 mètres au sol) pour une résolution de 10 cm. Verdu *et al.* (2005) appliquent une portée (unidimensionnel) de 12 cm pour une image aérienne ayant une résolution de 6 cm, ce qui correspond globalement au rapport « taille de la portée / résolution » appliqué dans le cadre de ce travail.

En revanche, Carbonneau *et al.* (2004) appliquent, quant à eux, un pas bidimensionnel de taille 33*33 (soit une distance de 1 mètre) comme étant le plus optimal alors que la résolution de l'image aérienne est de 3 cm. La taille granulométrique des D50 mesurée par ces derniers varie de 25 à 250 mm. Les particules échantillonnées couvrent ainsi une classe de tailles beaucoup plus étendue que les particules collectées lors des missions de 2004 et de 2005 avec respectivement de 17 à 68 mm pour la première et de 11 à 49 mm pour la seconde (tab. 3-14). Nous pouvons ainsi supposer que la portée directionnelle est également sensible à la taille des particules présentes sur les images.

La taille des fenêtres (placettes) sur lesquelles portent les calculs est un paramètre empirique qui doit considérer à la fois les surfaces granulométriques échantillonnées et les éventuels artefacts (exemple de la végétation). Ceci justifie la différence de tailles de fenêtres appliquées entre les deux missions avec des fenêtres d'1 m² pour le survol réalisé en 2004 (forte présence de taches de végétation sur le banc et à proximité des placettes échantillonnées) et 2 m² pour le survol réalisé en 2005.

Afin d'optimiser l'exploitation des images couleurs, différents tests ont été menés pour évaluer l'impact des canaux RVB sur les modèles. Les tests réalisés, sur les deux missions, ont conduit à exploiter les 3 canaux car ils se sont révélés, à chaque fois, les plus pertinents (fig. 3-18 et 3-19, page 108). Carbonneau *et al.* (2004) et Verdu *et al.* (2005) ne présentent pas, dans leurs travaux, de comparatifs inter-canaux. Carbonneau (2005) a réalisé des tests sur une image en niveau de gris, mais simplement dans le but de déterminer l'impact du codage de l'image (8, 16, 32, 64 bits) sur la calibration des modèles produits. Pour ce dernier, l'utilisation d'une image plus légère (à faibles bits) présenterait simplement l'avantage d'optimiser les temps de calcul.

2.2. Limites et perspectives des restitutions granulométriques par imagerie aérienne

Les résultats des modèles produits à partir des données acquises lors de missions sur le banc de Gévrioux sont conformes aux résultats trouvés par les précédents auteurs (tab. 3-14).

Pour la mission du 18 juin 2004, le modèle ajusté présente un R^2 de 0,98 % contre 0,58 % pour la mission du 26 octobre 2005 (tab. 3-14). Les deux résolutions qui ont été exploitées (3,4 cm et 10 cm) sont proches des résolutions des images aériennes utilisées par Carbonneau *et al.* 2004 (3 cm et 10 cm). Les résultats qui ont été obtenus par ce dernier à partir de la méthode par semi-variance 2D correspondent respectivement à des R^2 de 0,80 et de 0,39 (tab. 3-14). Verdu *et al.* (2005), avec une approche couplant à la fois un calcul basé sur la texture des pixels (matrice de cooccurrence) et sur la semi-variance, présentent un R^2 à 0,86 à partir d'une ortho-photo de 6 cm de résolution.

Tableau 3-14. Synthèse des propriétés des missions et des résultats des modèles granulométriques

	Echelle spatiale (m)	Résolution (cm)	Nombre de placettes	Etendue granulométrique (D50 en mm)	R^2
Carbonneau et al. 2004	?	3 10	70	25 à 250	0,80 0,39
Verdu et al. 2005	150 x 50	6	68	25 à 120	0,86
Lejot	200 x 40	3,4	6	17 à 68	0,98
	200 x 40	10	15	11 à 49	0,57

L'analyse des cartes granulométriques a permis d'établir plusieurs constats. L'agencement granulométrique ne traduit pas de structuration spatiale cohérente. Cependant, certaines hypothèses ont été mises en avant pour expliquer cette incohérence, comme la présence de végétation, l'identification d'artefacts liés au code développé ou bien un nombre insuffisant de mesures. Peu d'interprétations morphologiques ont été réalisées à partir des cartes granulométriques présentées dans les articles cités précédemment. Les auteurs mettent principalement l'accent sur les aspects méthodologiques des traitements appliqués et non sur l'interprétation géomorphologique des cartes produites. Seuls Verdu *et al.* (2005) constatent la présence d'un gradient morphologique correctement corrélé entre les D50 prédits et les différents niveaux topographiques explorés (toit du banc, pied de banc).

Nous pouvons donc percevoir, à travers ces différentes remarques, qu'un certain nombre de points reste à améliorer.

Premièrement, les tests réalisés sur les canaux RVB doivent être élargis aux images en niveau de gris. En effet, si l'application des traitements par semi-variance 2D sur ces dernières révélait une meilleure corrélation entre D50 observé et D50 prédit, un gain de temps certain pourrait être obtenu pour produire des cartes granulométriques. Actuellement, le temps moyen de calcul, pour une mosaïque couleur d'un banc de galets de 300 m de long sur 40 m de large avec une résolution de 3,4 cm, dépasse les 2 jours.

Deuxièmement, le nombre de placettes réalisées sur le terrain ($n = 6$ et $n = 15$) doit être densifié afin de renforcer la robustesse des modèles. Verdu *et al.* (2005) ont échantillonné 68 placettes par la méthode de Wolman et Carbonneau *et al.* (2004) ont échantillonné 70 placettes à partir d'une méthode d'acquisition par photographie in-situ (tab. 3-14).

Enfin, l'acquisition d'une gamme de résolutions plus étendue (inférieures à 3 cm et supérieures à 10 cm), pour une même mission et un même protocole d'échantillonnage, permettraient d'identifier de façon plus rigoureuse les seuils optimaux de résolution et, implicitement, permettraient d'ajuster de façon plus efficace les différents paramètres de contrôle des modèles produits.

3. Les contraintes de restitution par photogrammétrie

L'emploi d'une chaîne de traitement développée sous IDL, dans le cadre de précédents travaux photogrammétriques (Casson, 2004), nous a permis de préciser et d'évaluer les différents paramètres d'ajustement des traitements appliqués, ce que ne permettent pas la plupart des logiciels disponibles sur le marché.

Le point fort de la technologie drone, dans le cadre d'application photogrammétrique, est avant tout la résolution des images acquises. De ces résolutions dépendent les précisions altimétriques obtenues : une moyenne de 20 cm pour le banc de Gévrieux et une moyenne de 5 cm pour le banc de Luc-en-Diois. Cette gamme de précisions démontre la faisabilité de restituer des micro-topographies à partir d'un capteur optique grand public. Les valeurs obtenues sont 2,5 à 10 fois plus précises que les MNT fournis par l'IGN. Cette résolution centimétrique permet d'entrevoir l'éventail des possibilités que ces restitutions peuvent apporter dans les problématiques abordées en géomorphologie fluviale et déjà traitées par photogrammétrie : quantification du transport sédimentaire (Fryer, 1983 ; Stojic *et al.*, 1998 ; Westaway *et al.*, 2001 ; Hicks *et al.*, 2002 ; Igouzal *et al.*, 2003 ; Brasington *et al.*, 2003 ; Lane *et al.*, 2003a ; Lane *et al.*, 2003b ; Westaway *et al.*, 2003 ; Lejot *et al.*, 2007), caractérisation de la rugosité des faciès alluviaux (Butler *et al.*, 1998, 2002 ; Carbonneau *et al.*, 2003), mesure des érosions de berge (Pyle *et al.*, 1997 ; Martinez-Casasnovas *et al.*, 2004). Alors que les résolutions des MNT acquises à partir de photographies aériennes sont de l'ordre du mètre (Westaway *et al.*, 2003 ; Lane *et al.*, 2003 ; Veyrat-Charvillon et Memier 2006), les images du drone fournissent des résolutions centimétriques (de 1 à 10 cm) avec des précisions verticales de 5 à 20 cm.

3.1. Le couple stéréoscopique : une configuration difficile à obtenir

Nous avons pu constater que l'inconvénient majeur de la technologie drone est la difficulté à produire des couples stéréoscopiques. Les contraintes d'exploitation mises en avant (nombre de balises et taux de recouvrement), l'impact des conditions aérologiques sur la géométrie des acquisitions et le pilotage délicat, limitent le nombre d'images répondant

aux contraintes d'une restitution photogrammétrique (seuls 19 % des images dans notre cas).

Dans l'hypothèse où il serait possible d'obtenir des couples stéréoscopiques qui soient suffisants en nombre pour couvrir l'ensemble d'un banc, le nombre de MNT qui devrait être produit, ainsi que les contraintes de recouvrement entre clichés et entre lignes de vol, imposeraient une production et des temps de traitements difficiles à tenir. La production des deux MNT réalisés sur Gévrioux et Luc-en-Diois qui ne couvrent qu'une partie des sites traités, illustre bien le problème.

3.2. Les améliorations technologiques

Afin de contourner toutes ces limitations, un certain nombre de développements pourraient être envisagés.

La première amélioration consiste à utiliser un capteur ayant une plus grande résolution. Les tests photogrammétriques ont été réalisés à partir du Canon PowerShot avec une résolution de 5M de pixel. Depuis peu, l'appareillage drone a été complété d'un CANON EOS 5D ayant une résolution de 13M de pixels. Il sera ainsi possible de voler plus haut avec une même résolution tout en couvrant une surface de banc plus grande.

De plus, il conviendrait d'améliorer le système de positionnement (approximatif pour le moment) du drone durant le vol. Actuellement, seul un GPS classique nous renseigne sur les coordonnées des prises de vue, avec des précisions planimétriques de l'ordre de 5 à 10 m et altimétriques de 15 à 30 m. Les effets de lacet, roulis et tangage, ne sont pas pris en compte. La solution à ce problème serait d'équiper le drone d'un DGPS couplé à une station inertielle. Le premier produit des précisions centimétriques pour répondre au problème de la localisation, le second, équipé d'un accéléromètre et d'un gyroscope, permet d'enregistrer le paramétrage des trois angles de rotation produit par la position du capteur au moment de l'acquisition.

Enfin, une modification du pantographe et de la structure de la nacelle est envisageable. Ces modifications consistent à créer un pantographe à double support ayant un écartement suffisant pour produire à chaque prise de vue un couple stéréoscopique. Les tubes transversaux de la nacelle du drone devraient donc être modifiés pour ne pas apparaître sur les acquisitions. Cette solution, nettement moins complexe à mettre en œuvre et surtout moins coûteuse que ce qui est proposé précédemment, permettrait de s'affranchir de l'enregistrement précis des caméras au moment de l'acquisition et assurerait des couples stéréoscopiques optimaux.

Au vu des contraintes auxquelles nous sommes confrontés lors des acquisitions, nous pouvons légitimement nous poser la question de la pertinence de ce vecteur dans le cadre d'applications photogrammétriques. L'utilisation d'autres plates-formes radio-télécommandées, telles que l'hélicoptère, est déjà en cours de développement et semble garantir des couples stéréoscopiques de bien meilleure qualité.

4. La sensibilité des modèles bathymétriques

Les modèles bathymétriques développés ont mis en évidence l'intérêt d'analyser les valeurs radiométriques à partir d'images drone pour restituer les chenaux en eau. Nous avons pu observer, à travers les différents tests, que ces modèles étaient sensibles à un grand nombre de paramètres, tels que les contraintes d'exploitation des images, leur contexte d'acquisition et les mesures *in situ*.

4.1. Les paramètres clefs

Les résultats produits à partir des images drone peuvent être comparés à ceux acquis à partir d'autres vecteurs (Winterbottom et Gilvear, 1997 ; Brasington *et al.*, 2003 ; Westeway *et al.*, 2003 ; Marcus *et al.*, 2003 ; Chaponnière, 2004 ; Carbonneau *et al.*, 2006). Le tableau 3-15 reprend les principaux paramètres pris en compte dans l'élaboration des modèles et leurs incidences sur la qualité des résultats produits. La confrontation des résultats permet de formuler deux principales observations :

Premièrement, les coefficients de détermination que nous avons obtenus (de 0,59 à 0,92) correspondent, dans l'ensemble, aux ordres de grandeurs retrouvés dans la littérature (de 0,28 à 0,98). Nous pouvons également observer que la gamme de ces coefficients est extrêmement variable. Cette variabilité de la qualité des modèles est fortement liée aux conditions physiques du milieu (ombres portées, évaporation, turbulence, turbidité) et, plus particulièrement, à la nature du *substratum*, comme l'ont souligné Marcus *et al.* (2003) (tab. 3-15). Les erreurs moyennes des modèles produits dans la littérature sont comprises entre 13 cm et 21 cm contre 9 et 20 cm pour les modèles issus des missions qui ont été conduites. Nous pouvons citer ceux de Westeway *et al.* (2003) qui affichent une erreur moyenne de 19 cm dans la restitution des chenaux en eau d'un tronçon en tresses de la Waimakariri River (Nouvelle Zélande) pour une amplitude d'eau ne dépassant pas 1,5 m et ceux de Carbonneau *et al.* (2006) qui affichent 15,5 cm d'erreur concernant la restitution bathymétrique de la rivière Sainte Marguerite (Canada) pour une amplitude d'eau maximale d'1 m.

Deuxièmement, nous avons pu constater que le mode multi-photos avait un fort impact sur certains modèles bathymétriques. La technologie drone est très sensible à ce mode opératoire, puisqu'elle s'appuie sur un grand nombre d'images pour couvrir les sites d'étude. Dans la littérature, les modèles bathymétriques empiriques en mode inter-photo ont très peu été utilisés (tab. 3-15). Les tests ne portent, la plupart du temps, que sur une seule image (information parfois difficile à vérifier) à l'exception d'une étude réalisée par Carbonneau *et al.* (2006) qui ont exploité pas moins de 2 092 images (tab. 3-15). La carte bathymétrique présentée dans l'article n'est malheureusement associée qu'à une seule image. Cette thématique est nouvelle et les enjeux de l'analyse multi-photos sont importants pour traiter de vastes étendues.

Références	Type d'images	Taille du tronçon (m)	Nombre d'images	Gamme des hauteurs d'eau observées (m)	Nombre de mesures	Types de substrats	R ²	Erreur moyenne (cm)
Winterbottom et Gilvear 1997	Imagerie ATM (multispectrale)	400*70	-	0 à 1	206	-	0,67	-
	Photographie aérienne noir et blanc							
Brasington et al. 2003	Photographie aérienne couleur	70*190	1	0 à 1	158	-	0,74	16
Westeway et al. 2003	Photographie aérienne couleur	3000*1000	-	0 à 1,5	13000	-	0,5	20
Marcus et al. 2003	Imagerie hyperspectrale	3 sites sur 2 rivières (2km à 5km)	1	0 à 1	175	Tous les faciès combinés	0,44	0,59
					9	Zone de remous	0,93	0,91
					23	Mouilles	0,85	0,72
					60	Zone calme	0,41	0,98
					33	Écoulement	0,88	43,6
					29	Seuils à faible gradient	0,79	0,91
					16	Seuils à fort gradient	0,2	0,67
					58	Seuils	0,84	13
					100	Mouilles	0,82	21
					1500	-	0,58	15,5
Chaponnière 2004	Photographie aérienne couleur	120*220	1	0 à 1	100	-	-	-
Carbonneau et al. 2006	Photographie aérienne couleur	80000	2092	0 à 1	1500	-	0,58	15,5
Lejot	Photographie aérienne couleur	4 sites (350 à 4700)	71	0 à 5	416	Seuils, mouilles, végétation, affleurements rocheux	0,59 à 0,90	9 à 20

Tableau 3-15. Exemples de travaux ayant permis d'élaborer des modèles bathymétriques

4.2. Préconisations d'utilisation

Comme l'indique le mot « empirique » (terminologie correspondant à la famille du modèle bathymétrique utilisé), la qualité d'une restitution sera dépendante du contexte local des sites d'étude. La méthode étant basée sur une relation entre la transparence de l'eau et le signal lumineux enregistré, il est difficile à travers les protocoles développés d'influer sur les variations lumineuses qui existent au cours d'un vol et sur l'état hydrologique du plan d'eau (le *substratum* étant abordé par analyse d'image). L'impossibilité d'établir un lien entre valeur radiométrique sur zone turbide et vitesses du courant (mesurées par un courantomètre) a illustré cette difficulté. Cependant, en s'appuyant sur les cas étudiés et les tests et traitements réalisés, plusieurs préconisations peuvent être formulées :

- le niveau de luminosité doit être constant durant toute la mission (ce qui n'est jamais le cas ou bien très rarement). Un couvert nuageux homogène sera privilégié à un ciel sans nuage. L'horaire de survol idéal devra correspondre à la position du soleil au zénith, c'est-à-dire en milieu de journée,
- le pouvoir de pénétration de la lumière dans la colonne d'eau doit être optimal. Pour le chenal principal, il faut privilégier les débits les plus faibles, c'est-à-dire les débits d'étiage. Pour les îles, les survols doivent être réalisés en période hivernale, lorsque l'activité végétale aquatique est au repos,
- lorsque le chenal présente un fond composé de *substratum* bien localisé et non imbriqué (exemples de la île du Planet), l'échantillonnage par faciès est naturellement préconisé. Dans ce cadre, l'échantillonnage des mesures doit être réalisé en tenant compte de la localisation des substrats et de leur variété. Ce choix implique un nombre de mesures important afin d'avoir une représentativité statistiquement significative pour chacun des substrats et des modèles à produire,
- lorsque le plan d'eau présente des *substratum* difficiles à localiser et à identifier, l'échantillonnage des mesures devra être réalisé par transect. Une estimation du nombre de transects à mettre en place a été effectuée pour différents linéaires survolés (tab. 3-16). Cette estimation a été réalisée sur la base de deux transects par image afin d'assurer une densité de points suffisante pour alimenter les modèles bathymétriques. Un taux de recouvrement de 20 % a également été requis afin de garantir une continuité entre image.

L'échelle du site est un élément important à considérer, car le temps de réalisation des mesures bathymétriques servant au calage des modèles sera directement dépendant du nombre de mesures.

Tableau 3-16. Estimation du nombre de transects nécessaire en fonction de la longueur du tronçon à survoler

Pour une taille d'image de 200 m (largeur de la fauché) x 130 m (axe du chenal) et une altitude de 325 m (résolution à 9 cm/pixel - capteur Canon EOS 5D)

Longueur du tronçon (m)	250	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000
Nombre d'images	3	5	10	15	19	29	38	47
Nombre de transects (*)	6	10	20	30	38	58	76	94

(*) distance entre transect : 50 m

Toutes ces observations permettent de discerner les avantages et les faiblesses de la technique et des méthodes utilisées. Elles permettent d'alimenter le questionnement scientifique sur les améliorations pouvant être réalisées.

Dans le cadre de travaux interdisciplinaires, la question est de savoir si la donnée topographique produite par ces modèles bathymétriques est susceptible de pouvoir être intégrée dans des modèles hydrauliques, gros consommateurs en données de terrain et quel sera le comportement de ces modèles hydrauliques, compte tenu des marges d'erreurs des modèles bathymétriques empiriques.

4.3. Une perspective d'amélioration

Les problèmes rencontrés en mode multi-photos mettent en exergue la difficulté d'utiliser un capteur numérique non calibré et dont les coordonnées de positions et d'angles ne sont pas contrôlées. Une analyse portant sur l'orientation des images du tronçon Varambon / Priay a cependant révélé que l'axe des vols n'avait pas d'impact sur les résidus du modèle bathymétrique (médiane proche de zéro pour les trois orientations) (fig. 3-37).

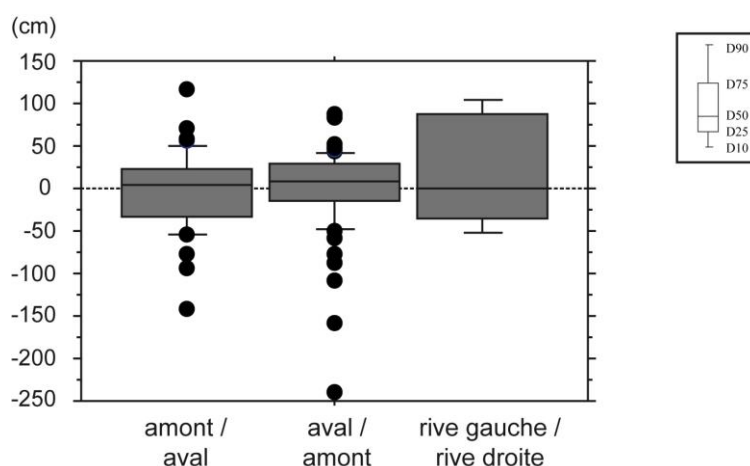


Figure 3-37. Résidus du modèle global du tronçon Varambon / Priay en fonction de l'orientation des images (n = 29) selon les axes de vol

Cependant, dans la perspective d'améliorer les modèles, une analyse pourrait être réalisée sur l'effet des angles d'acquisition sur la colonne d'eau traversée. En effet, plus

l'angle est important, plus la distance de parcours du signal lumineux est grande et plus la relation exponentielle sera affectée. Il serait alors possible d'obtenir un coefficient de pondération à appliquer aux valeurs radiométriques correspondant aux mesures des hauteurs d'eau échantillonnées. Les modèles bathymétriques pourraient ainsi être optimisés.

Partie 4.

Application de l'imagerie à très haute résolution pour le suivi des formes fluviales dans le cadre de programmes de restauration : basse vallée de l'Ain et Chautagne

A. Cadre géographique

1. La basse vallée de l'Ain
2. La Chautagne (Haut-Rhône)

B. Evolution de l'impact de la recharge sédimentaire sur les faciès alluviaux à partir d'images THR : exemple de la basse vallée de l'Ain

1. Caractéristiques du périmètre de suivi et des sites de recharge sédimentaire
2. Indicateurs de suivi de la recharge
3. Effets topographiques de la recharge sédimentaire dans le chenal
4. Synthèse des opérations de recharge

C. Evaluation des actions d'entretien et de restauration à partir d'images THR : exemple du RCC de Chautagne

1. Caractéristiques des sites
2. Description des suivis
3. Impacts des opérations d'essartages sur le site « les Grandes Iles »
4. Suivi morphologique de la lône de la Malourdie
5. Synthèse et discussion

Après avoir testé les potentialités des images drone dans le but de caractériser les formes fluviales en 2D et 3D, nous prenons en compte, dans cette quatrième partie, l'échelle temporelle. Cette dimension est primordiale dans le cadre de suivis des actions d'entretien et de restauration menées sur les cours d'eau. Elle permet de retranscrire, dans notre cas, les changements morphologiques. Cette approche diachronique permet également de produire des indicateurs morphologiques afin d'évaluer la pertinence des actions engagées.

Dans le cadre des actions de restauration et d'entretien réalisées sur l'Ain et le Haut-Rhône (programme Life Nature Ain et Plan décennal de restauration écologique et hydraulique du Rhône), une étude pilote a été menée afin d'évaluer l'efficacité des travaux engagés et leur pérennité. Les suivis entrepris à partir d'images drone ont pour but d'identifier les changements morphologiques résultant de ces actions sur une échelle de temps courte (de 5 à 10 ans). Cette quatrième partie présente, sur deux sites, l'application des traitements développés pour une restitution bathymétrique et une caractérisation de la végétation (aquatique et terrestre) :

- Après avoir présenté le cadre géographique dans un premier chapitre, nous aborderons, dans un second chapitre, l'étude et le suivi de la recharge sédimentaire réinjectée dans le lit mineur de l'Ain avant et après intervention. La géométrie du chenal au droit des sites d'intervention et leurs parties aval ont été analysées et un bilan du comportement de la charge a été dressé. Afin de prolonger les réflexions menées sur les modalités de suivi qui ont été appliquées, quelques préconisations ont été formulées dans le cadre de futurs plans de gestion de projets de recharge.
- Le troisième chapitre porte sur l'étude et le suivi de deux actions de réhabilitation menées sur le Haut-Rhône en Chautagne. La première action concerne la préservation des champs d'expansion de crues du Rhône court-circuité. Le suivi a porté sur un banc de galets (les Grandes Iles) annuellement entretenu par essartage dans le but de limiter la colonisation végétale afin de faciliter la remobilisation des sédiments lors de crues. La topographie et le taux de couverture végétale ont été analysés et des préconisations de gestion ont été formulées. La seconde action a abordé le suivi post-restauration d'une zone humide : la lône de la Malourdie. Les processus de sédimentation et de végétalisation aquatique ont été étudiés afin d'évaluer leurs impacts sur la pérennité des opérations et implicitement sur la durée de vie de la lône.

A. Cadre Géographique

Les méthodes développées à partir des images drone ont été appliquées sur deux sites de suivi localisés sur le bassin rhodanien en amont de Lyon. Le premier se trouve sur un affluent du Rhône, l'Ain (fig. 4-1a) et le second est localisé en Chautagne sur le Vieux Rhône (fig. 4-1b). Le tableau 4-1 reprend les caractéristiques hydrologiques des deux tronçons étudiés.

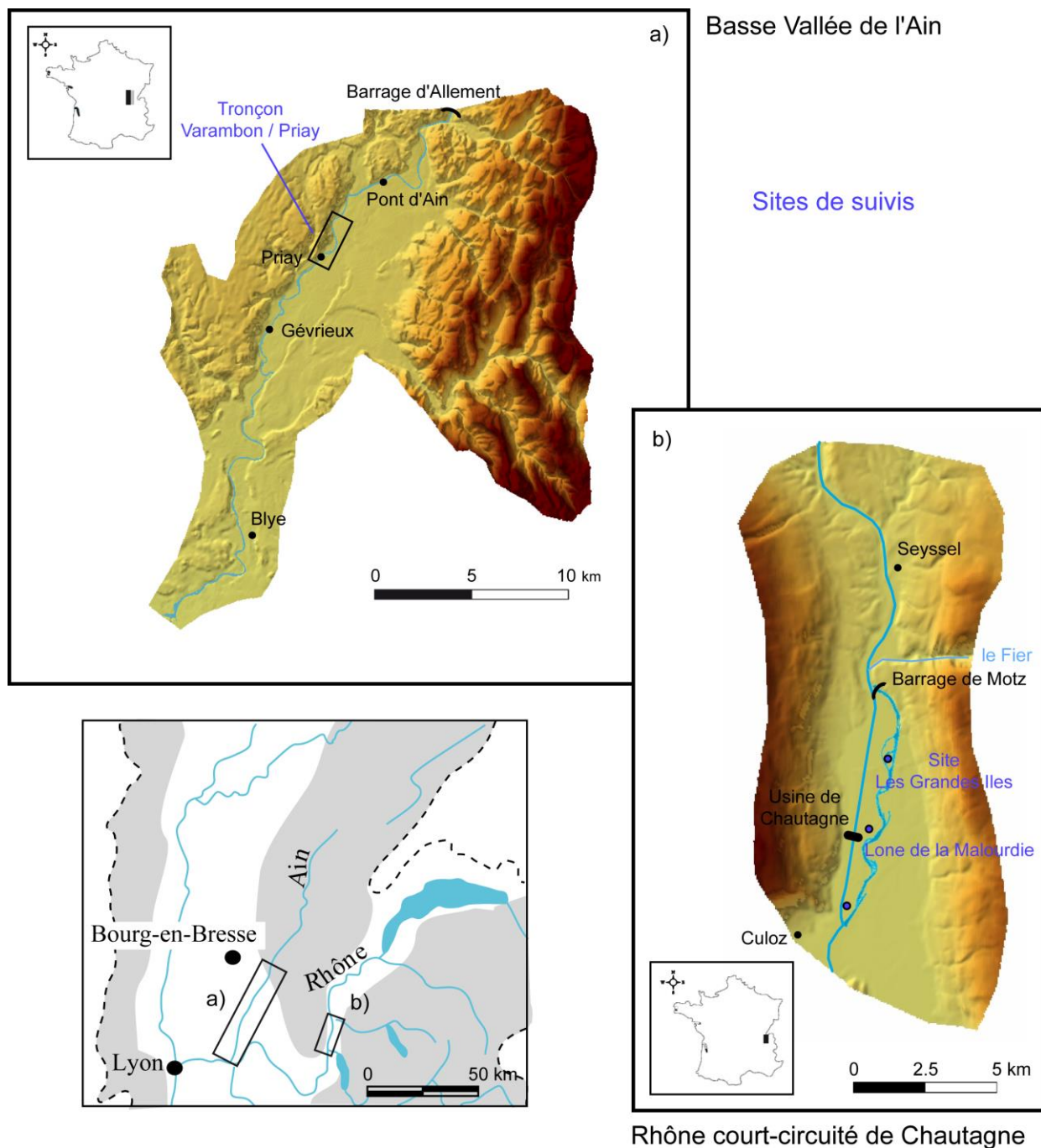


Figure 4-1. Localisation des sites de suivi, a) la basse vallée de l'Ain, b) la Chautagne (Haut-Rhône)

Tableau 4-1. Caractéristiques hydrologiques des tronçons étudiés (sources : banque HYDRO, CNR, 2000a ; Bravard, 1981, 1994)

	Ain	Rhône de Chautagne	
		En amont du RCC	Sur le RCC (Vieux Rhône)
Station hydrométrique	Pont d'Ain	Châteaufort	Motz
Superficie du bassin versant (km ²)	2760 ^(a)	12600	12600
Période d'enregistrement	1959-2007	1982-1992	1982-1992
Module (m ³ /s)	105	401	Qres ^(c)
Module spécifique (m ³ /s)	0,038	0,031	0,004
Etiage (m ³ /s)	16 ^(b)	160 ^(c)	Qres ^(d)
Q2 (m ³ /s)	690	1620	1420
Q10 (m ³ /s)	1100	2350	2050
Q50 (m ³ /s)	1500	2980	2680
Hautes Eaux	Déc. à mars	Juin à juillet	Juin à juillet

(a) basse vallée

(b) débit mensuel minimal annuel quinquennal sec

(c) débit dépassé 355 j/an

(d) Qres : débit réservé (50 m³/s de sept. à avril / 70 m³/s de mai à août)

1. La basse Vallée de l'Ain

1.1. Présentation générale

L'Ain est le plus grand affluent du Rhône en amont de Lyon, avec un bassin versant de 3630 km². La rivière prend sa source sur le plateau de Nozeroy, à 750 m d'altitude, et s'écoule sur 230 km en aval. Elle a un régime irrégulier, dominé par l'influence de la pluie avec des hauteurs d'eau maximales entre décembre et mars (tab. 4-1). Son régime est qualifié de pluvial, voire de pluvio-nival (Pardé, 1931 dans Piégay, 1995 ; Pagney, 1988). Elle est constituée de deux secteurs amont / aval contrastés :

- Le secteur à l'amont de Pont d'Ain est formé de gorges calcaires (partie du Jura méridional) où s'est développée la production d'hydroélectricité avec la présence de cinq barrages (d'amont en aval) : Vouglans (1963-1969), Saut-Mortier (1962-1968), Coiselet (1968-1970), Cize-Bolozan (1928-1931) et Allement (1956-1960). Ils régulent les débits de la basse vallée de l'Ain et contribuent au soutien d'étiage durant la période estivale. Seul le barrage de Vouglans (le plus à l'amont) dispose de la capacité à lamener les crues (Rollet, 2007).
- Le secteur aval correspond à la plaine alluviale qui s'étend de Pont d'Ain jusqu'à la confluence avec le Rhône, sur une distance de 40 km (fig. 4-1a). Contrôlé à l'amont, le régime hydrographique de la basse vallée de l'Ain est totalement dépendant des conditions d'exploitations des barrages (sous

concession EDF), comme l'illustre l'hydrogramme de la figure 4-2. Orientée NE/SO, la plaine est bordée à l'Est par le plateau calcaire de l'île Crémieu et, à l'Ouest, par le plateau calcaire de la Dombes. Cette dépression est héritée du surcreusement des glaces du Pléistocène et des écoulements proglaciaires fini-würmiens, qui ont construit une vaste zone d'épandage caillouto-sableuse inclinée vers le SO et avec laquelle la pente de l'Ain est en conformité (Mandier, 1989). Cet encaissement a engendré un système de terrasses emboîtées, parfois partiellement étagées, avec localement des affleurements molassiques et morainiques (Bravard, 1986).

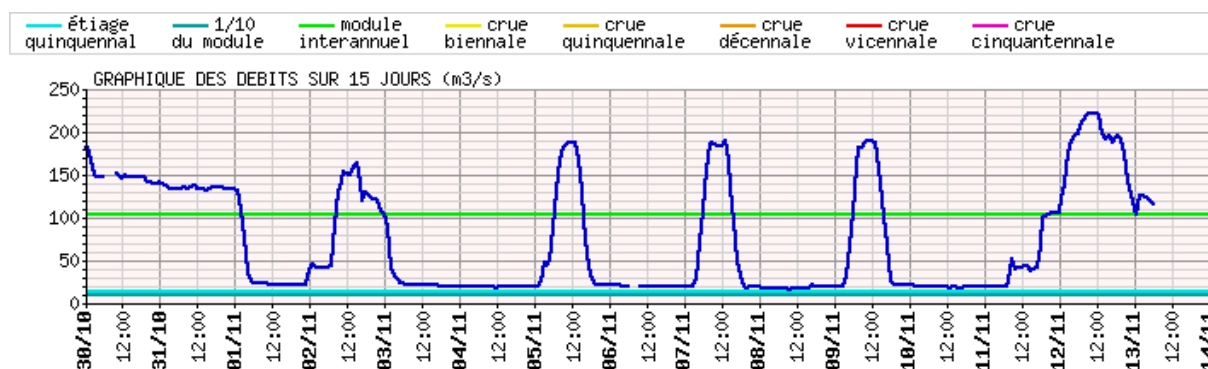


Figure 4-2. Hydrogramme de la station de Point d'Ain, période du 30 octobre au 14 novembre 2007 (source : Banque Hydro)

1.2. L'ajustement récent d'un cours d'eau

La métamorphose du système fluvial de l'Ain a été largement traitée depuis 1986 (Roux, 1986 ; Bravard *et al.*, 1989 ; Fagot *et al.*, 1989 ; Bravard *et al.*, 1990 ; Piégay, 1995 ; Piégay *et al.*, 2000 ; Dufour, 2004, 2005 ; Rollet, 2007). Zone de tressage au 19^e siècle, la basse vallée de l'Ain présente aujourd'hui un tracé sinueux (taux de sinuosité de 1,22 en 1989) avec localement des secteurs à méandres (Bravard, 1986). Il est difficile d'apprécier les changements hydrologiques potentiellement intervenus au 19^e et au début du 20^e siècle, car peu de données existent (Liébault et Piégay, 2002). Cependant, plusieurs observations ont pu être réalisées à partir de l'analyse de l'évolution de la bande active et de la dynamique sédimentaire.

1.2.1. Historique d'une métamorphose fluviale

L'ajustement du profil en long a été expliqué, en partie, par les modifications climatiques intervenues à la fin du Petit Age Glaciaire (Peiry, 1988 ; Bravard *et al.*, 1989 ; Bravard et Peiry, 1993), la réduction sédimentaire liée à la reforestation des versants de montagne (induite par la déprise rurale) et amplifiée par les aménagements précoces du Haut-Jura au cours du 19^e siècle (Bravard, 1985). La rivière avait alors de larges chenaux (entre 100 et 500 mètres, contre une moyenne de 100 mètres aujourd'hui, Bravard *et al.*, 1999). Le système produisait d'importantes quantités de sédiments.

Le premier changement morphologique marquant s'est produit entre la fin 19^e, et le début du 20^e siècle. Entre 1856 et 1920, le cours d'eau a connu une forte incision, estimée à 2 cm/an (Rollet, 2007). Cependant, le style en tresses est encore observable sur les cartes de 1931 (Bravard *et al.*, 1990). L'incision, constatée durant la période précédente, s'est prolongée dans une moindre mesure jusqu'en 1976 avec 1 cm/an (Rollet, 2007). Là encore, la réduction des arrivées sédimentaires est un facteur explicatif de ce phénomène d'incision. En revanche, elle ne peut être liée à la forte rétraction constatée durant la deuxième moitié du 20^e siècle.

1.2.2. Evolution récente (post 1945)

Le deuxième changement morphologique majeur est intervenu au milieu du 20^e siècle. L'analyse des photographies aériennes de 1945 a révélé une forte disparition des îles au sein du corridor alluvial (trait caractéristique du système en tresses). Cette disparition s'est accompagnée d'une rétraction de la bande active, mise en évidence par l'analyse des photographies aériennes (jusqu'aux années 1980) (Rollet, 2007). C'est donc à partir de la moitié du 20^e siècle que l'Ain adopte un style sinueux, localement à méandres. Liébault et Piégay (2002) ont observé cette même tendance sur l'ensemble du bassin rhodanien. Piégay (1995) et Dufour (2005) remarque que le paroxysme du processus de rétraction de la bande active était fortement corrélée avec la recolonisation végétale de la plaine alluviale, suite à la modification des pratiques agro-sylvo-pastorales.

Le tracé de l'Ain s'est donc simplifié au profit de méandres mobiles qui se développent et se recourent. Depuis quelques années, les grands méandres laissent place progressivement à des sinuosités plus faibles. La figure 4-3 illustre les deux principaux tracés observables sur la basse vallée de l'Ain.

Peu d'infrastructures ont été déstabilisées durant la période récente (fin du 20^e siècle) hormis les ponts de Priay (fig. 4-4a) et de Gévrieux (Piégay *et al.*, 2000). La bande active de l'Ain est dorénavant contrôlée verticalement par l'exhumation de *substratum* et de blocs morainiques (fig. 4-4b) et latéralement par des structures anthropiques (très ponctuellement).

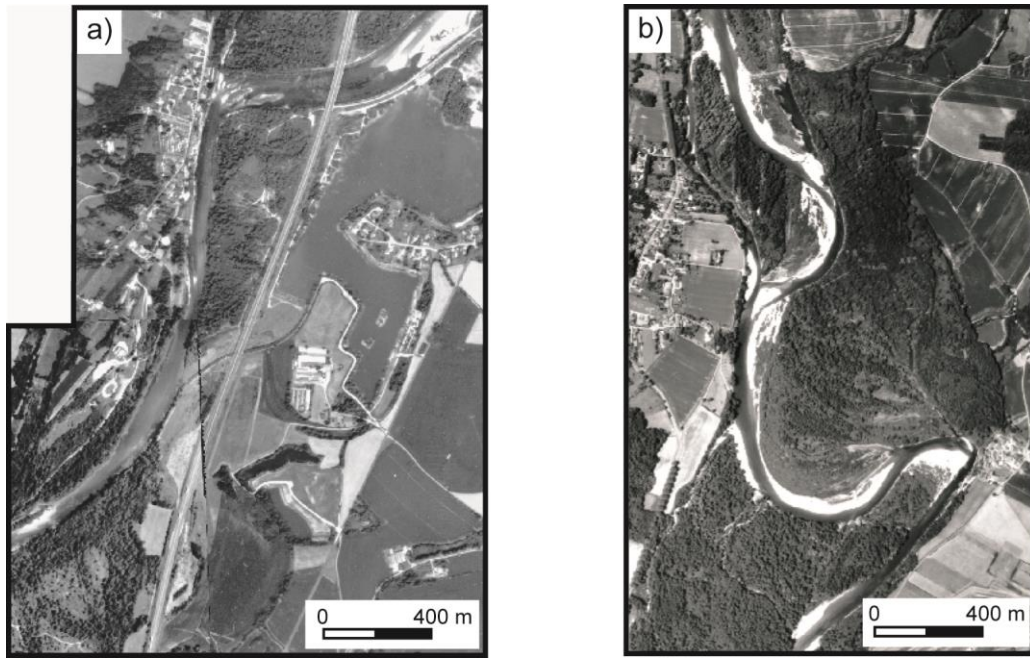


Figure 4-3. Photographies aériennes de l'Ain en 2000 (IGN), a) tronçon linéaire, secteur de Varambon, b) tronçon à méandre, secteur de Gévrioux

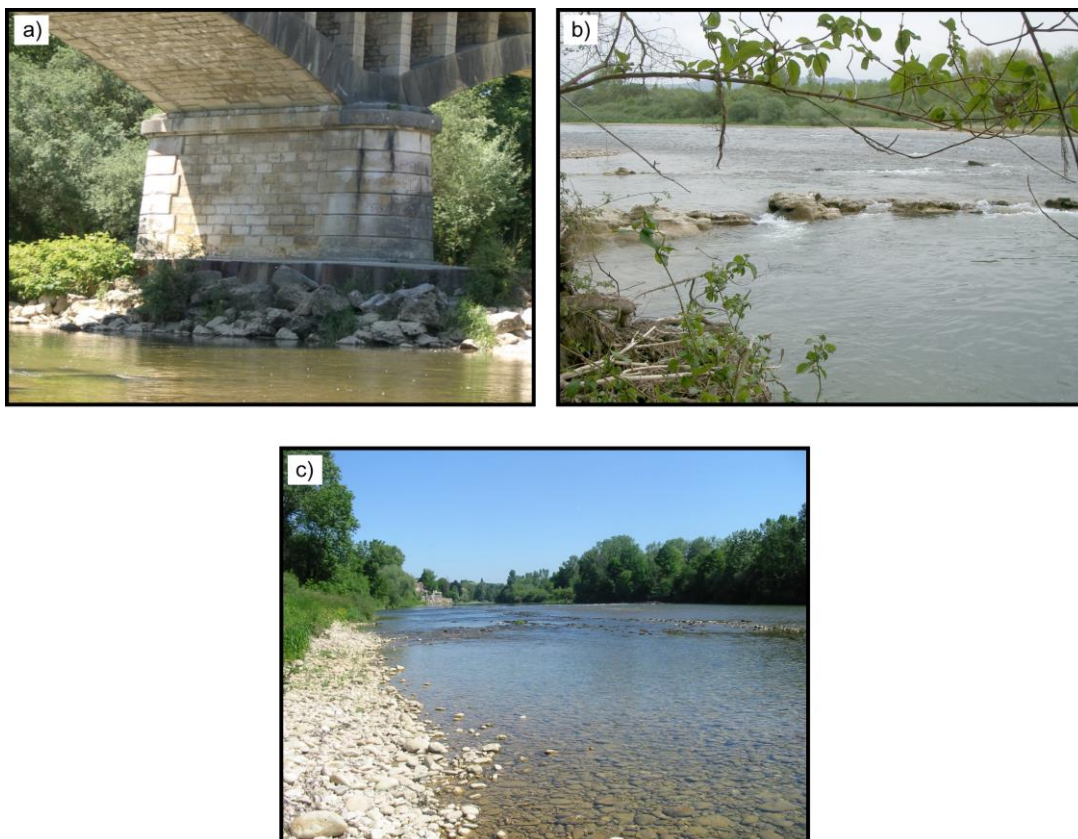


Figure 4-4. Impact des évolutions récentes du système fluvial, a) déstabilisation des piles de pont de Priay, b) exhumation de blocs calcaires au droit de Bellegarde, c) pavage du chenal et disparition des bancs de galets sur le tronçon de Varambon (clichés A.J. Rollet et personnel)

1.2.3. L'effet des barrages

Les travaux précédents montrent que l'implantation des barrages participe indéniablement à la modification des variables de contrôle telles que la réduction des débits morphogènes et la rétention en amont de la charge de fond, ainsi qu'à l'ajustement de nombreux paramètres du cours d'eau (Galay, 1983 ; Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1997 ; Rollet, 2007). Dans le cas de l'Ain, des études ont permis d'observer la formation d'un pavage de fond de chenal qui se développe sur une vingtaine de kilomètres en aval du barrage d'Allement (fig. 4-1, page 153) (Rollet, 2007). C'est un secteur qui présente un faciès morphologique homogène (chenal unique, forte disparition des bancs de galets et degré de pavage important (fig. 4-4c). Sur ce tronçon, Rollet (2007) observe une propagation continue du déficit sédimentaire de l'amont vers l'aval (fig. 4-5). Le front de pavage (secteur transitoire entre le secteur mobile et le secteur dégradé) est actuellement localisé au droit de Gévrieux (fig. 4-1, page 153). Sa progression a été estimée à 500 m par an (Rollet *et al.*, 2005).

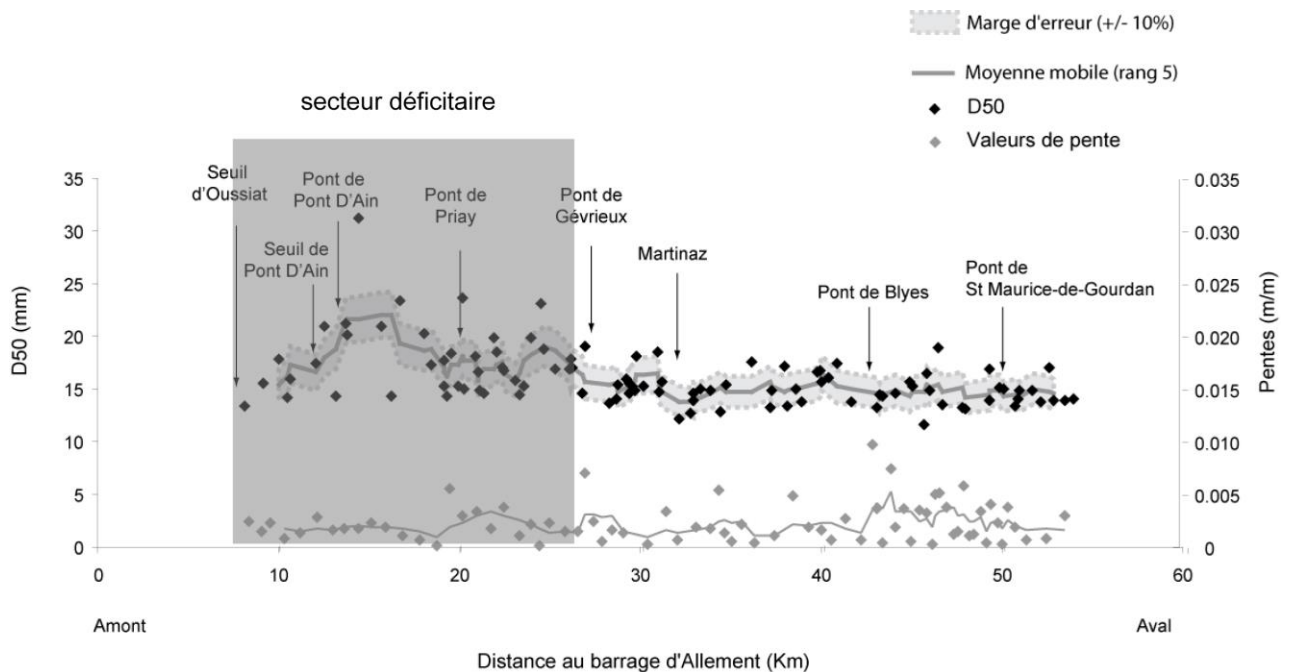


Figure 4-5. Variation longitudinale des D50 de têtes de bancs obtenus en 2002 par extraction semi-automatique et valeurs de pente issues des profils en travers de 2004 (source des profils : Cemagref, modifié d'après Rollet 2007)

Malgré un excédent sédimentaire global (Rollet, 2007), la basse vallée de l'Ain est menacée à court terme. A cause de l'incision et de l'absence de mobilité latérale précédemment constatées, le système n'est pas en capacité de se recharger suffisamment en sédiment à l'aval du barrage d'Allement. Il se vidange progressivement aggravant le déficit. Rollet *et al.* (2005) ont estimé la recharge sédimentaire du système à 15000 m³/an. Le maintien de son fonctionnement et de sa dynamique latérale ne peut dorénavant être assuré que par une recharge artificielle.

1.3. Un programme de recharge sédimentaire expérimental

La basse vallée de l'Ain est composée d'une mosaïque de milieux naturels qui abritent une faune et une flore sauvages exceptionnelles à l'échelle européenne. Conscients de la richesse patrimoniale de leur territoire, mais aussi de sa fragilité, les élus et les gestionnaires ont mis en place différentes procédures de sauvegarde : classement du site de la confluence Ain-Rhône (décret du 3 décembre 1990), périmètre Natura 2000 (pour l'ensemble de la plaine alluviale) et Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE créé en 2001 qui englobe 16 % de la superficie du bassin versant de l'Ain).

Ce dernier est piloté par le Syndicat de la Basse Vallée de l'Ain (SBVA, créé en 1998). Inspirés par des propositions de gestion dans le cadre d'études préalables (Bravard *et al.*, 1990 ; Bravard *et al.*, 1999 ; Piégay *et al.*, 2000), les objectifs de gestion du SAGE sont centrés sur « le maintien d'une dynamique fluviale active destinée à préserver les milieux annexes, les nappes et mieux gérer les inondations en limitant les prélèvements dans les lits mineurs et majeurs de la rivière et en préservant un espace de liberté ».

Pour l'aider à atteindre ces objectifs et préserver son territoire, le SBVA a fait appel à des financements européens. Les connaissances scientifiques déjà acquises dans le cadre du SAGE, ainsi que la motivation des élus locaux, ont été des atouts précieux pour l'obtention d'un programme de financement : le programme LIFE Nature « conservation des habitats créés par la dynamique de la rivière Ain (2002 – 2006) ». Le LIFE Nature Ain est piloté par le Syndicat de la Basse Vallée de l'Ain.

Dans le cadre de ce programme, des réflexions ont été menées quant aux actions à entreprendre pour revitaliser les paysages alluviaux et lutter contre le déficit sédimentaire constaté précédemment. Pour répondre au premier point, les 25 principales îles de la basse vallée de l'Ain ont fait l'objet d'une hiérarchisation en fonction de leur valeur écologique, de leur fonctionnalité, de leur état de conservation, de leurs potentialités de restauration et de la demande sociale des élus et des acteurs locaux. A partir de ces critères, cinq îles ont été sélectionnées et ont fait l'objet d'une restauration. Pour pallier au déficit sédimentaire, la priorité a été donnée à la restauration de îles localisées dans les secteurs très déficitaires et présentant un fort potentiel de matériaux pouvant être remobilisés. A partir de ces nouveaux critères, trois îles ont été retenues (d'amont en aval) : Terre Soldat (commune de Varambon), Carronières (commune de Varambon) et Bellegarde (commune de Priay) (fig. 4-1, page 153). Seules les deux dernières ont été restaurées et leurs matériaux injectés dans le chenal. Pour des raisons administratives, le site de Terre Soldat fera l'objet d'une opération de restauration plus tardive, en 2008.

Ces opérations de réintroductions artificielles ont été réalisées sur de nombreux cours d'eau, comme sur la Sacramento en Californie à l'aval d'un barrage (Kondolf, 1995), dans un contexte identique sur le Haut Rhône en Chautagne (1997 et 2007) ou bien encore sur le Rhin et le Danube à partir de péniches (Kuhl, 1992 ; Götz, 1994 ; Habersack et Piégay, 2007). Aucune de ces opérations n'a fait l'objet de suivi et d'évaluation concernant le

comportement des matériaux réinjectés, les distances parcourues et l'impact de cette recharge sur les tronçons aval. De nombreux travaux ont porté sur le suivi du transfert des sédiments (Petit *et al.*, 1996 ; Merz *et al.*, 2006) mais pas dans une logique de restauration physique d'un cours d'eau à partir d'une recharge artificielle.

Afin d'évaluer l'efficacité des travaux de recharge sédimentaire et leur pérennité, un suivi spatial et temporel des matériaux injectés dans le lit mineur a été réalisé. Le travail effectué sur les sites des Carronnières et de Bellegarde s'inscrit donc dans la perspective de mieux évaluer les actions de restauration en s'appuyant sur des indicateurs extraits d'images.

2. La Chautagne (Haut-Rhône)

2.1. Le Rhône court-circuité de Chautagne

La Chautagne est une plaine alluviale construite au Quaternaire (Bravard, 1981). D'orientation Nord-Sud, elle est encadrée par les montagnes du Grand Colombier à l'Ouest (Ain) et par le Gros Foug à l'Est (Savoie) (fig. 4-1b, page 153). Le Rhône, qui la traverse, a un régime de type nivo-glaciaire aux hautes eaux d'été (juin, juillet, tab. 4-1 page 154) et, dans une moindre mesure, de fin de printemps (Bravard, 1984).

2.1.1. La maîtrise d'un fleuve

Au 18^e siècle, le cours du Rhône dessinait un tracé anastomosé. La figure 4-6 permet d'apprécier ce que pouvait représenter la bande active de l'époque entre Seyssel et Culoz (fig. 4-1, page 153). Bravard (1981) décrit un tracé composé de 8 chenaux parallèles à l'axe du fleuve et comptabilise 125 îles. Ce même auteur explique que certains tronçons du lit pouvaient atteindre une largeur de 2,5 km. Les inondations et les déplacements incessants des chenaux du Rhône avant son aménagement ont sensibilisé très tôt (depuis le 18^e siècle) les communautés rurales et leur ont fait comprendre l'intérêt que pouvait présenter la mise en place d'un système de protection le long de ses berges.

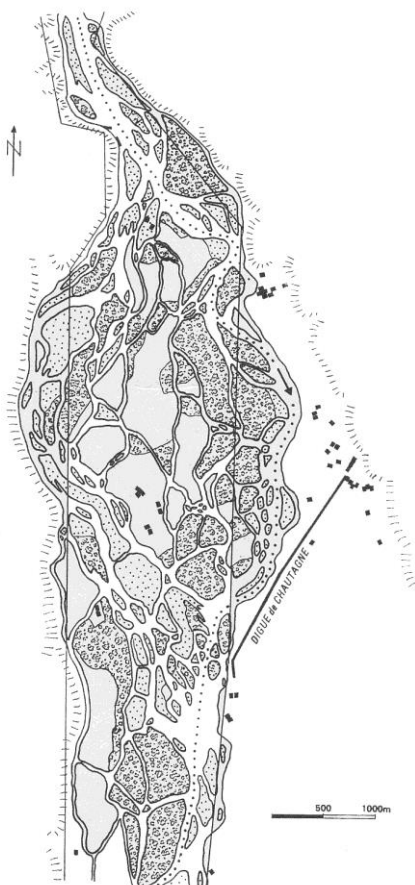


Figure 4-6. Le Rhône en 1760 d'après la carte géométrique au 1/30000° (d'après Bravard, 1981)

Ainsi, pour limiter l'impact des crues du Rhône et faire face à une demande croissante en énergie, une politique d'aménagement globale du fleuve et une surveillance constante ont été entreprises à partir du milieu du 19^e siècle. Cette démarche a abouti à la création de la Compagnie Nationale du Rhône en 1920 (CNR).

L'aménagement de Chautagne, réalisé par la CNR, a été achevé en 1980. Conçu sur le même principe que la majorité des autres aménagements hydro-électriques du Rhône (sauf pour le cas particulier des barrages usines), l'aménagement de Chautagne adopte le schéma fonctionnel suivant (fig. 4-7a) :

- Un barrage de retenue (fig. 4-7b), localisé dans la partie amont du Rhône court-circuité, alimente un canal de dérivation. Il laisse passer, hors période de crue, un faible débit (ou débit réservé) dans l'ancien lit du fleuve (Vieux Rhône, ou RCC) (station de Motz, tab 4-1, page 154).
- Un canal de dérivation, sur lequel est implantée l'usine hydroélectrique (fig. 4-7c). Sa partie amont correspond au canal d'amenée (permettant l'alimentation de la centrale) et sa partie aval au canal de fuite.

- Une usine hydroélectrique (fig. 4-7c). Elle est équipée de 2 groupes d'une puissance unitaire de 45 MW capable de turbiner 350 m³/s, soit un débit de fonctionnement de 700 m³/s et une production annuelle de 450 million de kWh.

Le Vieux Rhône, correspondant à l'ancien lit du fleuve, est désormais contraint de divaguer entre les digues de la rive gauche, construites au cours des siècles derniers (1760-1860), et le canal de dérivation. Il correspond au tracé partant du barrage de Motz jusqu'à sa confluence avec le canal de fuite (fig. 4-1b, page 153). Sa longueur est de 9,5 km à l'étiage et 9 km en hautes eaux, ce qui souligne une nette tendance au méandrage (CNR, 2000a). Lorsque le débit est supérieur à la somme du débit d'équipement de l'usine (700 m³/s) et du débit réservé (50 à 70m³/s), l'excédent se déverse dans le vieux Rhône, soit en moyenne 31 jours/an (CNR, 2000a). Actuellement, le débit réservé est de 50 m³/s de janvier à avril et de 70 m³/s de juillet à août. Le déversement par-dessus les digues submersibles situées en rive gauche du Vieux Rhône assure l'inondation des marais de Chautagne à partir d'un débit de 1400 m³/s (station Châteaufort, tab. 4-1, page 154).

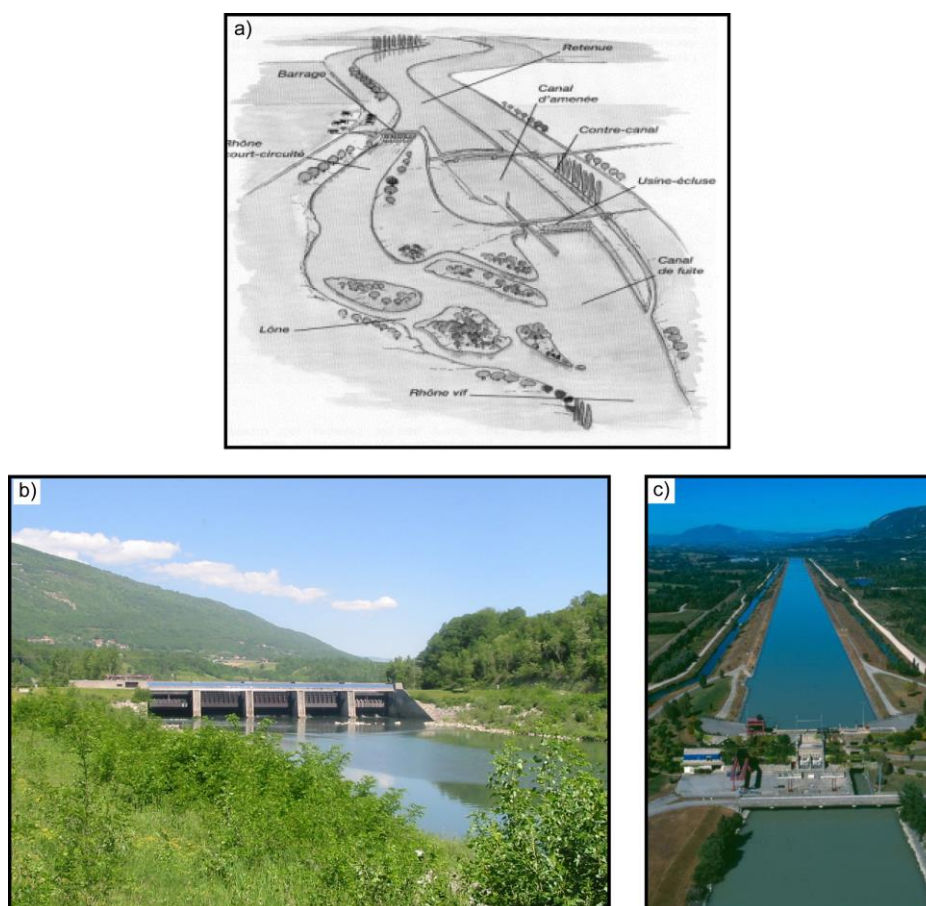


Figure 4-7. L'aménagement hydroélectrique du Rhône court-circuité, a) aménagement « classique » d'un tronçon court-circuité du Rhône, b) barrage de retenue de Motz sur le Vieux Rhône court-circuité, c) usine hydroélectrique de Chautagne avec en arrière plan le canal d'amené et en premier plan le canal de fuite (clichés CNR et personnel)

Le système en anastomose qu'était le Rhône de Chautagne s'est ainsi transformé progressivement en un système à méandres dont le débit est régulé par le barrage de Motz et par ceux localisés plus en amont (barrages de Génissiat et de Seyssel pour la partie française). La figure 4-8 schématise cette métamorphose du Rhône « naturel » au Rhône actuel. La mise en place des digues (fig. 4-8a) a réduit l'espace de divagation du lit, provoquant un creusement de son chenal et un abaissement de la nappe phréatique (fig. 4-8b). La rupture de charge, créée par les barrages en amont, a accentué cette tendance. Les milieux annexes (chenaux secondaires, communautés riveraines) ont été progressivement déconnectés du bras principal.

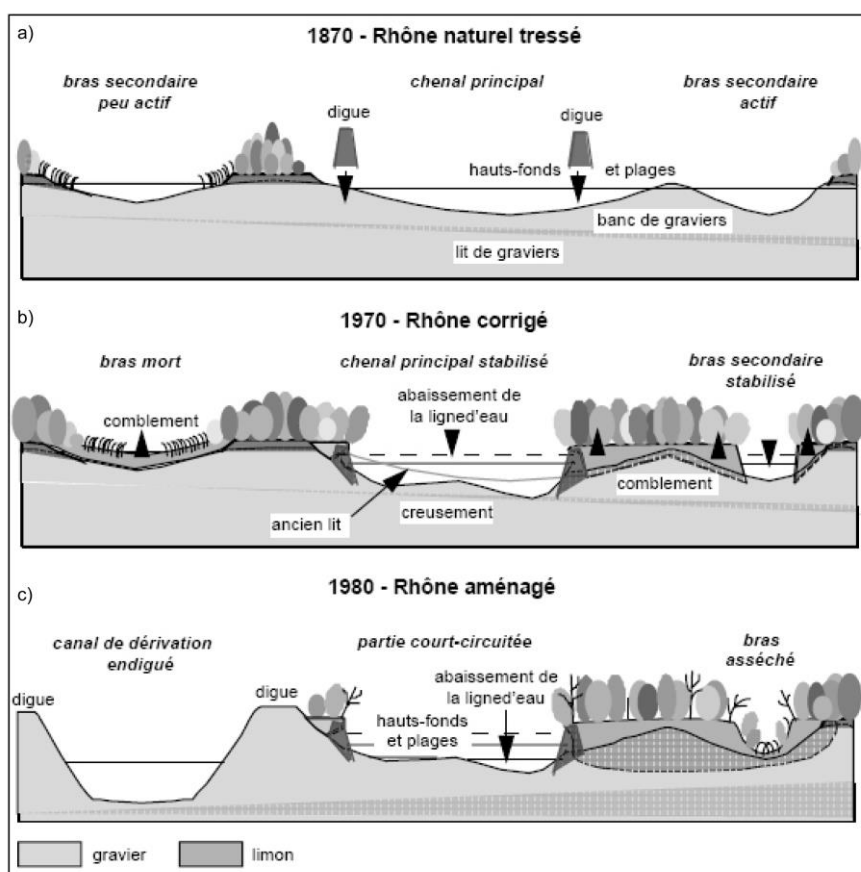


Figure 4-8. Changement du profil transversal du Rhône à la suite des différents travaux de rectification de son cours, a) profil avant les endiguements, b) profil un siècle après les premiers endiguements Girardon ; profil après l'aménagement CNR (Persat *et al.*, 1995 dans Fruget, 2003)

2.2.2. La mise en valeur du Rhône

La prise en compte, par les institutions, des conséquences graves de l'extraction de matériaux en rivière, de l'impact des barrages sur le transfert des sédiments, de l'équilibre des lits fluviaux et du déficit sédimentaire en général à la suite de la réduction de l'espace de liberté des cours d'eau, explique qu'il est aujourd'hui nécessaire de gérer avec discernement une ressource qui n'est pas renouvelable, et de réhabiliter des milieux aquatiques et riverains à forts potentiels écologiques. Face à cette situation, les pouvoirs publics ont mis en place différentes actions sur le Haut Rhône :

- A l'aval du barrage de Motz, entre le canal et le Rhône naturel, les îles de la Malourdie font l'objet d'un arrêté de biotope, géré par le Conservatoire du Patrimoine Naturel de la Savoie (CREN). Ce dernier assure ainsi la préservation du milieu naturel, en partenariat avec la CNR.
- L'ensemble de la plaine alluviale de Chautagne a été classée zone Natura 2000.
- Un programme de réhabilitation du vieux Rhône a été engagé en 1998, suite à la prise de conscience des élus locaux des risques d'inondation, notamment lors de la crue de 1990 (crue centennale). Il vise à rendre mobile la charge sédimentaire, qu'elle soit disponible sur site ou bien réinjectée artificiellement. Dans la mise en œuvre d'une gestion globale du corridor fluvial, ces actions portent également sur la remise en eau de bras morts atterris par re-calibration et curage. Le résultat recherché vise à limiter la disparition des zones humides d'intérêt écologique majeur. Ces opérations sont suivies d'une augmentation des débits réservés afin de remettre en eau les lônes restaurées et d'améliorer leur fonctionnement général. Elles ont également pour but d'améliorer les conditions d'habitat du lit mouillé proprement dit en restaurant un fleuve « vif et courant ».

Comme pour l'Ain, ce travail a pour but de mieux comprendre l'impact de ces opérations d'entretien et de restauration sur le milieu et leurs effets à plus ou moins long terme. Dans cette perspective, les sites de suivi qui ont été retenus sont (fig. 4-1b, page 153) :

- le secteur des **Grandes Iles**, qui fait l'objet d'un programme d'entretien dans le but de conserver les champs d'expansion des crues du Rhône, de favoriser la reprise des sédiments et de limiter la colonisation des espèces invasives,
- la lône de la **Malourdie**, restaurée en 2003 / 2004 et reconnectée au vieux Rhône afin de faciliter les écoulements et de favoriser le retour d'une biodiversité.

Ces programmes font partie des actions qui permettent à la CNR de respecter ses obligations de concessionnaire en matière d'écoulement des eaux. Les acquis doivent alimenter le questionnement collectif concernant le suivi des actions de restauration et d'entretien des lits fluviaux et des bras morts ainsi que l'évaluation du bénéfice-coût de ces actions.

B. Evolution de l'impact de la recharge sédimentaire sur les faciès alluviaux à partir d'images THR : exemple de la basse vallée de l'Ain

De récentes études réalisées, dans le cadre du SAGE et du programme LIFE Nature engagés sur l'Ain, ont été menées pour identifier les actions à entreprendre afin de revitaliser les paysages alluviaux et lutter contre le déficit sédimentaire (Rollet et *al.*, 2005 ; Lejot et Piégay, 2006a ; Rollet, 2007). Deux sites ont fait l'objet de réintroductions sédimentaires dans le lit mineur de la rivière durant l'hiver 2005 et le printemps 2006, à partir de la restauration des lônes des Carronnières et de Bellegarde.

1. Caractéristiques du périmètre de suivi et des sites de recharge sédimentaire

1.1. Le périmètre de suivi

L'état initial, faisant référence pour ce travail, porte sur un tronçon fluvial de 5 km de Varambon à Priay (fig. 4-9a). Ce tronçon englobe les deux sites de recharge sédimentaire « Carronnières » (commune de Priay) et « Bellegarde » (commune de Varambon). La longueur de ce linéaire a été choisie de manière à suivre la mobilité des masses sédimentaires après réintroduction dans le chenal. Trois secteurs de suivi, couvrant l'ensemble du périmètre d'étude ont été délimités : Carronnières, Bellegarde et Priay (amont / aval) (fig. 4-9b) :

- **Secteur des Carronnières** : situé entre les points kilométriques (pk) 16 et 18 (fig. 4-9ab), ce tronçon est fortement marqué par les effets du front d'érosion progressive liés aux barrages (Rollet, 2007). C'est un secteur pavé où peu de sédiments transitent. Les zones d'atterrissement (visibles sur les photographies aériennes de 1945) ont presque toutes disparues. Ce secteur correspond au site de recharge de la lône des Carronnières.
- **Secteur de Bellegarde** : situé entre les pk 18 et 20 (fig. 4-9ab), ce tronçon, comme celui des Carronnières, présente des faciès morphologiques dégradés malgré une berge d'érosion active en concavité. Il correspond au secteur de recharge de la lône de Bellegarde et il est sous l'influence directe de la recharge du secteur précédent.
- **Secteur de Priay** : situé entre les pk 20 et 21 (fig. 4-9ab), ce tronçon a un tracé contraint à la fois par la côtière sur laquelle se situe Priay (rive droite) et par le pont de la D12. Il présente quelques atterrissements dont la gamme granulométrique est plus contrastée que celle observée localement sur les bancs de Bellegarde et des Carronnières. Il correspond à un secteur transitoire entre la zone morphologiquement dynamique aval et le secteur stable de l'amont. Son suivi permettra d'enregistrer les changements

topographiques engendrés par la mobilité des masses sédimentaires des secteurs de recharge localisés plus en amont.

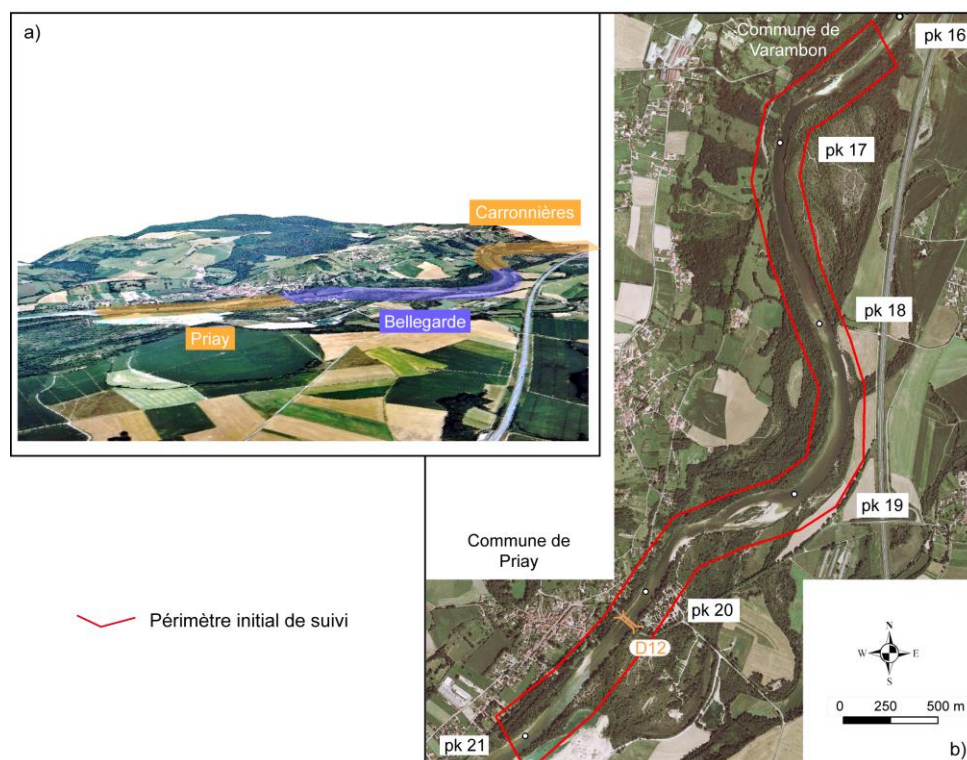


Figure 4-9. Secteurs de suivi de l'Ain, a) vue oblique du secteur de suivi, b) périmètre de la zone de suivi (source : orthophoto 2000 IGN)

1.2. Les sites de recharge : « Carronnières » et « Bellegarde »

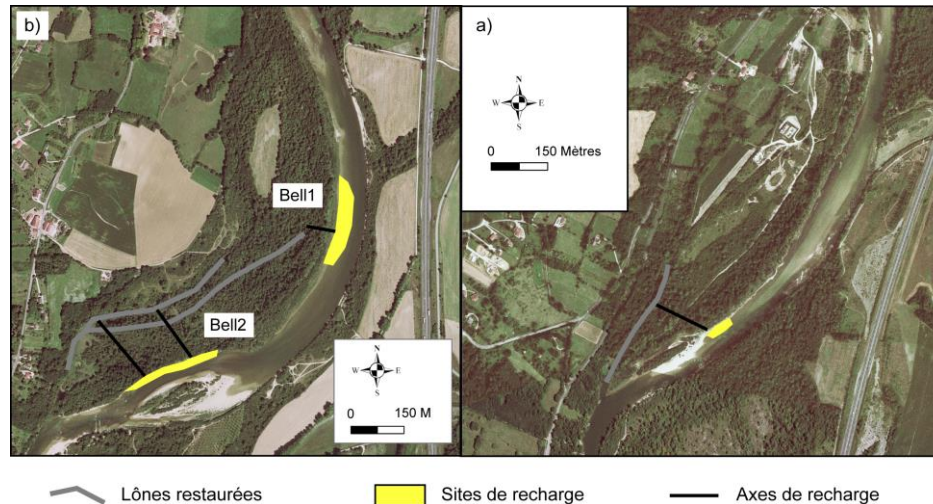
L'étude du transport sédimentaire réalisée par Rollet *et al.* (2005) a révélé que le système fluvial de la basse vallée de l'Ain a besoin, pour se recharger, d'entrées sédimentaires estimées à 15000 m³ par an. C'est en se basant sur cette valeur et sur l'estimation des stocks disponibles dans les îlons restaurés que la décision a été prise d'utiliser cette charge disponible pour engager cette action. Les sites de recharge « Carronnières » et « Bellegarde » sont ainsi à proximité immédiate des îlons restaurés (fig. 4-10).

1.2.1. Une recharge équivalente au déficit annuel

Sur le tronçon des Carronnières, 3660 m³ de gravier ont été réinjectés (source : CREN, 2007). Le site de recharge est localisé, en rive droite, en amont d'un banc résiduel fortement dégradé. Un chemin d'accès a été créé pour le transport de la charge à partir de la îlon restauré (fig. 4-10a).

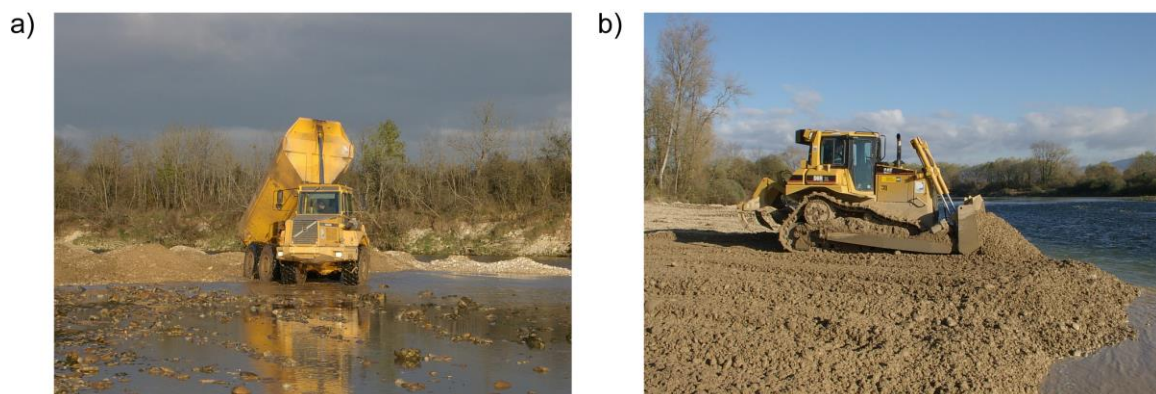
Sur le tronçon de Bellegarde, 18800 m³ de gravier ont été réinjectés (source : CREN, 2007) en deux points du chenal au niveau de la îlon restauré (environ 10000 m³ pour le site de dépôt amont et 8800 m³ pour le site de dépôt aval) (fig. 4-10b). Le site amont « Bell

1 » est constitué d'une zone d'accumulation en rive droite qui est reliée à la lône restaurée par un chemin d'accès. Le site aval « Bell 2 » est également constitué d'une zone d'accumulation en rive droite reliée à la lône par deux chemins d'accès. Ce secteur est localisé au droit d'une berge en cours d'érosion.



1.2.2. Modalités des opérations de recharge

Les moyens mécaniques qui ont été mobilisés pour la recharge correspondent à du matériel de transport et d'extraction utilisé en génie civil (fig. 4-11). Durant la phase de curage des lônes, les galets extraits ont été convoyés par camions bennes pour être déchargés sur les bancs déjà existants (exemples du secteur des Carronnières et du site de recharge amont du secteur de Bellegarde) ou bien le long de la berge (exemple du site de recharge aval du secteur de Bellegarde). Les dépôts ont ensuite été repris par un bulldozer pour être étalés au maximum vers l'amont et à l'intérieur du chenal. Seuls les matériaux correspondant à la charge de fond ont été réinjectés dans le chenal, les limons étant étalés sur les bords des lônes recreusées.



1.2.3. Calendrier des travaux et conditions hydrologiques

Les travaux engagés ont été réalisés entre fin 2005 et début 2006 (fig. 4-12). La période hivernale a été privilégiée afin de concilier : conditions hydrologiques favorables (sites non praticables par les engins lourds au-delà de 100 m³/s, fig. 4-12), activité végétale au repos et fin de la période de reproduction piscicole.

Malgré ces précautions, la réalisation des travaux sur le site des Carronnières a fortement été perturbée par les conditions hydrologiques (fig. 4-12). Les travaux commencés le 15 février 2006 ont été achevés le 24 avril 2006. Durant cette période, trois crues morphogènes ont été enregistrées : le 9 mars, 394 m³/s, le 31 mars, 643 m³/s, le 10 avril, 617 m³/s (station de Pont d'Ain, source : Banque Hydro). Le seuil de mise en mouvement des particules a été estimé par de précédentes études à 375 m³/s (Rollet, 2005) et le débit de plein bord à 530 m³/s (Dufour, 2005).

Les travaux de recharge sur le site de Bellegarde ont bénéficié, quant à eux, de conditions hydrologiques plus favorables entre le 3 et le 24 novembre 2006, période de leurs réalisations (fig. 4-12).

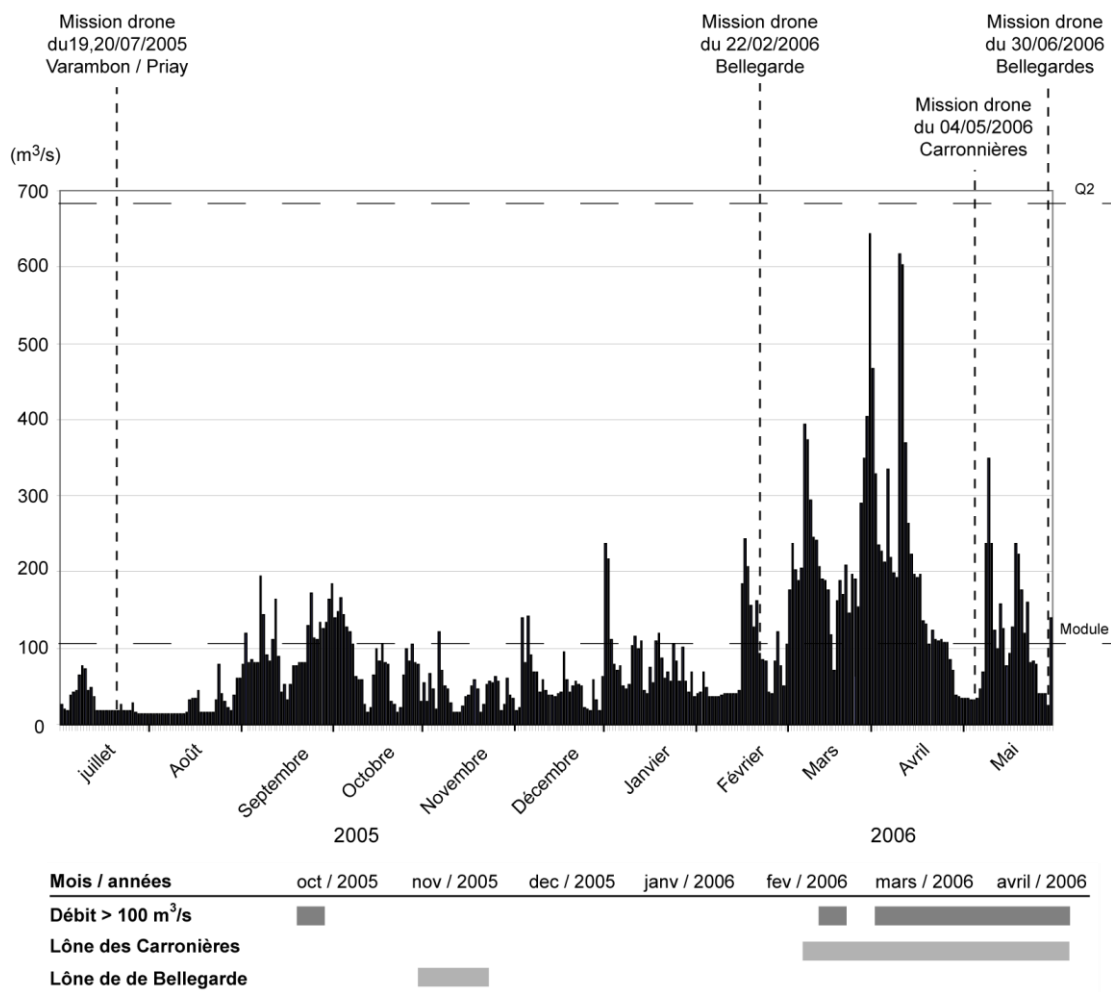


Figure 4-12. Hydrogramme correspondant à la période des suivis et planning des travaux de recharge sédimentaire sur Carronnières et Bellegarde avec identification des périodes de débits supérieurs à 100 m³/s (moyenne journalière, station de Pont d'Ain – Source : Banque Hydro)

2. Indicateurs de suivi de la recharge

L'évaluation d'un programme de restauration se base à la fois sur un calendrier et des indicateurs de suivi (Henry et Amoros, 1995). Afin d'évaluer l'impact de la recharge sur le milieu, un protocole a ainsi été mis en place. Il repose sur un état des lieux avant travaux et deux suivis en 2006.

2.1. Les paramètres observés

Nous avons pu voir, dans la partie 1, que les indicateurs de suivi sont définis à partir de bases scientifiques et de concepts déjà établis (Schumm, 1977 ; Amoros et Petts, 1993 ; Bravard et Petit, 2000). Ce sont des descripteurs du fonctionnement et de la dynamique des sites étudiés (Amoros *et al.*, 1987). Les levés topographiques sont à l'origine des indicateurs qui ont été retenus dans le cadre de nos investigations. Les paramètres ainsi pris en compte dans le suivi des sites de recharge correspondent :

- **Au suivi planimétrique de la bande active (2D).** Il s'agit d'analyser la superficie des bancs exondés et de détecter l'apparition ou non de nouveaux atterrissements, et la superficie des affleurements rocheux pour identifier les modifications topographiques de fond de chenal engendrées par l'action de recharge (afin d'aborder la dynamique d'engraissement du tronçon). Les résultats sont issus des méthodes de classification présentées dans la partie 2.
- **Au suivi altimétrique de la topographie du chenal (3D).** Il s'agit de restituer la topographie du lit mouillé à différentes dates à partir de modèles bathymétriques développés dans la partie 3. Ces référentiels bathymétriques permettront de produire des cartes de l'amplitude topographique entre deux états de suivis, principalement avant et après intervention, de calculer les volumes sédimentaires réinjectés et d'évaluer leur mobilité sur les tronçons aval.

La mobilité et la superficie des bancs ainsi que les variations topographiques du lit mouillé sont les indicateurs qui ont été retenus pour restituer les sédiments réinjectés dans le chenal et évaluer ainsi leur comportement sur les secteurs aval.

2.2. Le protocole de suivi

Le protocole de suivi mis en place repose sur trois états : un état initial avant recharge (état de référence), un état « n » (état de référence immédiatement après les travaux) et un état « n+1 » (état de la recharge à un an). Les différentes missions qui ont été réalisées dans le cadre de ce suivi ont été résumées dans le tableau 4-2. Les débits enregistrés, lors des missions, proviennent de la station de mesure hydrométrique de Pont d'Ain (code : V2712010, Banque Hydro) située à 2 km à l'amont du périmètre de suivi.

Tableau 4-2. Caractéristiques des différentes missions réalisées sur les deux sites de l'Ain

Planning	avant recharge			
	n		n + 1	
	Missions du 19-20/07/05	Mission du 22/02/06	Mission du 04/05/2006	Mission du 30/06/2006
Nombre d'images retenues	29	7	4	12
Nombre de balises	188	70	37	86
Résolution de la mosaïque (cm / pixel)	17	8 (amont) 10 (aval)	11	9
Débit (m ³ /s)*	18	93,2	33	16
Date - mesures des hauteurs d'eau	21/07/05 - 127	-	12/07/06 - 54	12/07/06 - 48
Débit - mesures des hauteurs d'eau (m ³ /s)*	18	-	16,5	16,5

* station hydrométrique de Pont d'Ain

Les images drone qui ont été retenues répondent aux contraintes d'exploitation développées dans la partie 3. Les coordonnées des balises et des relevés de hauteurs d'eau ont été corrigées (pour l'ensemble des missions) à partir des coordonnées d'un piézomètre (géré par le SIVU de la basse vallée de l'Ain) localisé sur le secteur de Gévrieux en rive gauche et référencé sur le système NGF de l'IGN (Système géodésique : NTF, Ellipsoïde : Clarke 1880, système de projection : Lambert II étendu).

2.3. Etat de référence post-travaux

Comme cela a été évoqué dans le chapitre B-1.2.3, les actions de recharge entreprises sur le site des Carronnières ont été perturbées par les mauvaises conditions hydrologiques. Le survol prévu pour caractériser les zones de dépôt n'a pu être réalisé.

Contrairement au site des Carronnières, un état initial post-travaux des sites de recharge de Bellegarde a pu être réalisé le 22 février 2006 (tab. 4-2) sans qu'un événement hydrologique perturbe la topographie entre la fin des travaux et la mission drone (fig. 4-12). En revanche, des relevés bathymétriques et topographiques (prévus initialement) n'ont pu être réalisés ni sur les zones de recharge ni dans le chenal, car les débits enregistrés en début d'année 2006 sont restés soutenus, empêchant toute mesure dans le lit mouillé (débits majoritairement supérieurs à 100 m³/s). Malgré les conditions hydrologiques défavorables (débit de la mission drone : 93 m³/s) et une eau un peu turbide, les différentes zones de dépôts ont pu malgré tout être observées sur les deux mosaïques produites (fig. 4-13, seules les surfaces en blanc étant ainsi exondées). Sur les deux secteurs de recharge identifiés dans le paragraphe B-1.2.1., quatre zones de dépôt ont été observées : deux sur le secteur amont et deux sur celui de l'aval. Sur le secteur amont, les dépôts sont situés sur la rive convexe de la sinuosité. Cette configuration favorable a permis d'épandre les galets très en

avant dans le chenal. Sur le secteur aval, la pente des berges étant plus abrupte, la réintroduction de la charge n'a pu se faire que sur le bord du chenal.

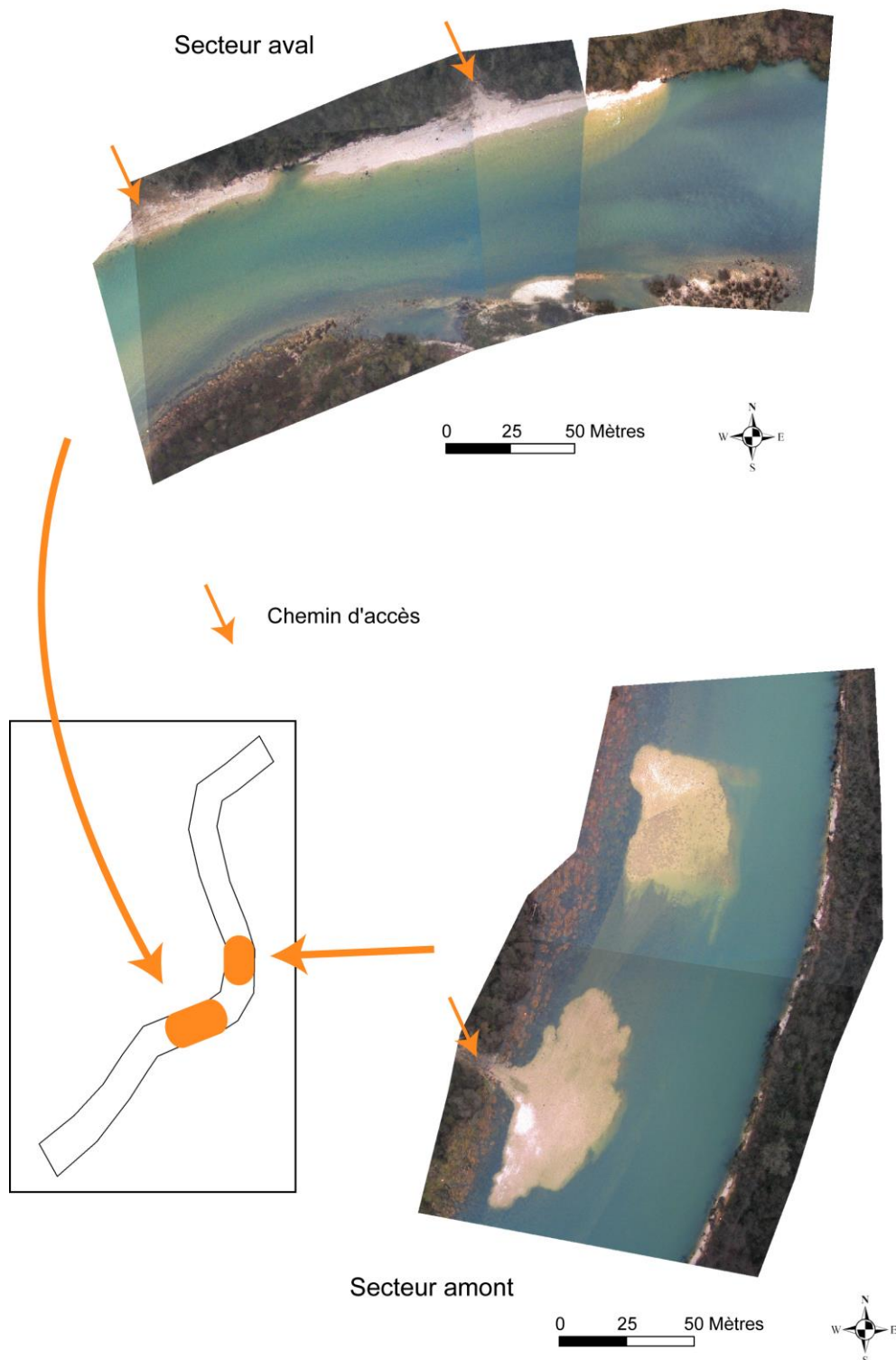


Figure 4-13. Secteur de recharge amont (Bell1) / aval (Bell2) et localisation des chemins d'accès ayant servi au transport des sédiments, site de Bellegarde (mission du 22/02/2006 – débit 93 m³/s)

3. Effets topographiques de la recharge sédimentaire dans le chenal

Une approche diachronique a été menée afin de dresser un premier bilan de la migration aval des sédiments réinjectés dans le chenal. L'interprétation des mosaïques drone a été effectuée à partir de l'identification de deux secteurs pour chaque mission : le secteur de dépôts et le secteur immédiatement aval.

3.1. Evolution des surfaces de bancs au sein de la bande active

3.1.1. Ajustement de la hauteur d'eau à un débit de référence

Afin de comparer planimétriquement les surfaces exondées avant et après travaux, une correction a été appliquée pour le site des Carronnières afin que les lignes d'eau des deux missions 2005 ($18 \text{ m}^3/\text{s}$) et 2006 ($33 \text{ m}^3/\text{s}$) correspondent à un même débit (débit de référence : $18 \text{ m}^3/\text{s}$). Le coefficient correctif a été déterminé à partir de la différence des mesures des lignes d'eau (planimétrique et altimétrique) entre les deux dates considérées (mesures réalisées au DGPS). Ainsi une zone tampon (*buffer*) de 2,5 m a été appliquée autour du banc (fig. 4-14).

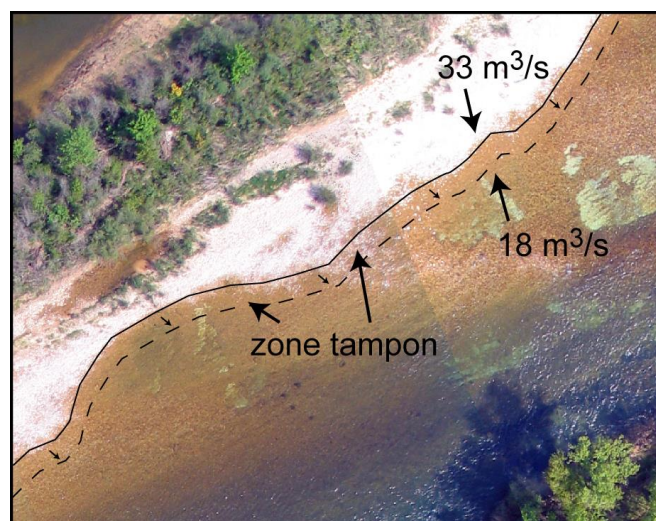


Figure 4-14. Principe de la correction planimétrique appliquée sur le site des Carronnières pour comparer les lignes d'eau à partir d'un débit de référence

Pour le site de Bellegarde, les débits enregistrés pendant les missions de 2005 et 2006 sont sensiblement les mêmes ($18 \text{ m}^3/\text{s}$ et $16 \text{ m}^3/\text{s}$), les lignes d'eau observées étant semblables. En conséquence, aucune correction planimétrique n'a été appliquée pour leur comparaison.

3.1.2. Comportement morphologique du site de recharge des Carronières

Malgré les 3660 m³ réinjectés sur le site des Carronières, aucun nouveau dépôt n'a été observé dans le périmètre de recharge « Carr-re » (fig. 4-15b) hormis la zone de galets se trouvant dans l'axe du chemin d'accès. Deux hypothèses peuvent être avancées :

- la première est liée au contexte de réintroduction des sédiments. En effet, les matériaux ont été déposés en plusieurs fois et ces différentes recharges ont été entrecoupées de crues (comme l'indique l'hydrogramme de la figure 4-12, page 168), ce qui a engendré la remobilisation immédiate des sédiments vers l'aval,
- la seconde hypothèse porte sur la quantité de galets réinjectés. En effet, le faible volume réintroduit a probablement limité la formation d'un dépôt dans le lit mouillé, la capacité de transport de la rivière étant estimée à 15000 m³/an (Rollet, 2007). A titre d'exemple, le volume de la recharge (3660 m³) reporté à l'échelle du tronçon étudié (100 m de large sur 440 m de long) représenterait seulement une couche de 8 cm d'épaisseur.

La comparaison des surfaces atterries, entre les deux dates, ne porte que sur un seul banc de galets. En 2005, la partie atterrie du secteur « Carr-re » (fig. 4-15a) correspond à la partie extrême de la tête du banc. L'analyse des superficies entre 2005 et 2006 démontre une augmentation significative (+ 84 %) des surfaces exondées localisées sur le périmètre de recharge (fig. 4-16a). Ce pourcentage ne représente, en réalité, qu'une très faible superficie à l'échelle du tronçon (489 m² soit 26 % du total de la superficie du banc) et ne correspond qu'aux sédiments non remobilisés car situés topographiquement haut sur la zone de dépôt.

La comparaison des surfaces d'affleurement rocheux du lit mineur, établie entre les deux dates, a permis d'identifier une forte régression de celles-ci sur le tronçon de recharge (- 42 %, fig. 4-16b). Les affleurements qui étaient présents sur la rive droite dans le périmètre de recharge en 2005 ont totalement disparu (secteur « carr-re » fig. 4-15b). Cette diminution des affleurements rocheux est logiquement liée à l'épandage de la charge réalisé sur le site. Ainsi, les dalles de fond de chenal se sont retrouvées recouvertes progressivement par les matériaux réinjectés.

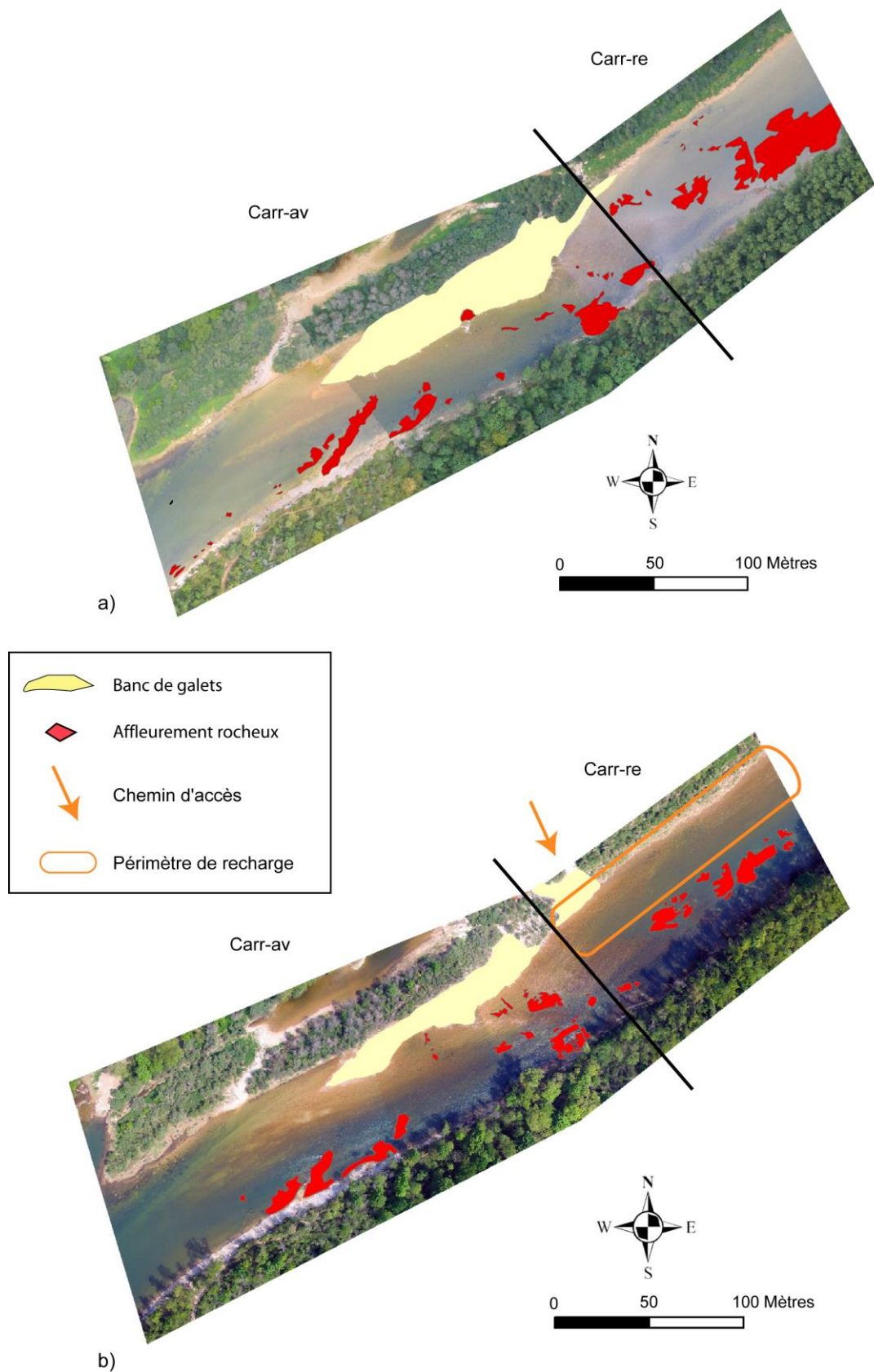


Figure 4-15. Cartes de la bande active des Carronnières, a) mission drone du 19/07/2005 (débit : 18 m³/s), b) mission drone du 04/05/2006 (33 m³/s)

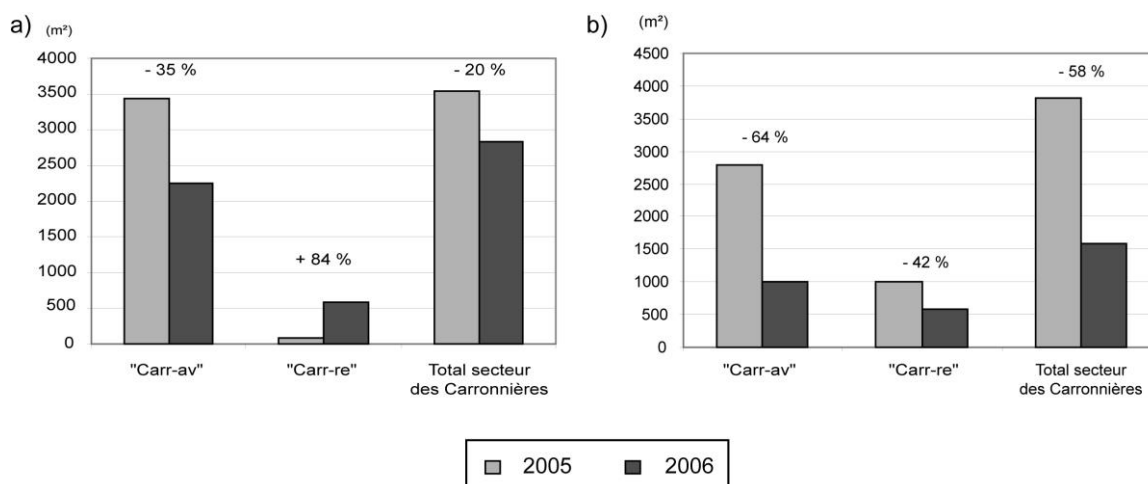


Figure 4-16. Site des Carronnières entre juillet 2005 et mai 2006 (comparaison pour un même débit de référence de 18 m³/s), a) superficie des bancs de galets, b) superficie des affleurements

3.1.3. Réponse du tronçon aval des Carronnières

Le banc, localisé sur les mosaïques drone « Carr-av », a été affecté par les modifications morphologiques du site amont (fig. 4-15). Sa superficie a été réduite de 35 % (fig. 4-16a). Cette réduction est en contradiction avec l'apport de nouveaux matériaux réinjectés en amont du banc. Cette diminution de superficie peut être expliquée par deux hypothèses :

- l'apport de nouveaux matériaux injectés dans le chenal à l'amont du banc a modifié les conditions d'écoulement. Cette nouvelle répartition, induite par l'exhaussement du fond du chenal suite à la recharge, peut être à l'origine de ce décapage,
- le résultat produit est dépendant d'un certain nombre d'imprécisions surfaciques telles que les erreurs de rectification des images drone et une erreur de calage des deux lignes d'eau. En effet, la mesure de la ligne d'eau sur un secteur dont les caractéristiques « hauteur / largeur » ont été modifiées par la recharge induit naturellement une modification de la géométrie de la section. Ainsi, une tendance à la sous-estimation de la superficie corrigée peut en découler.

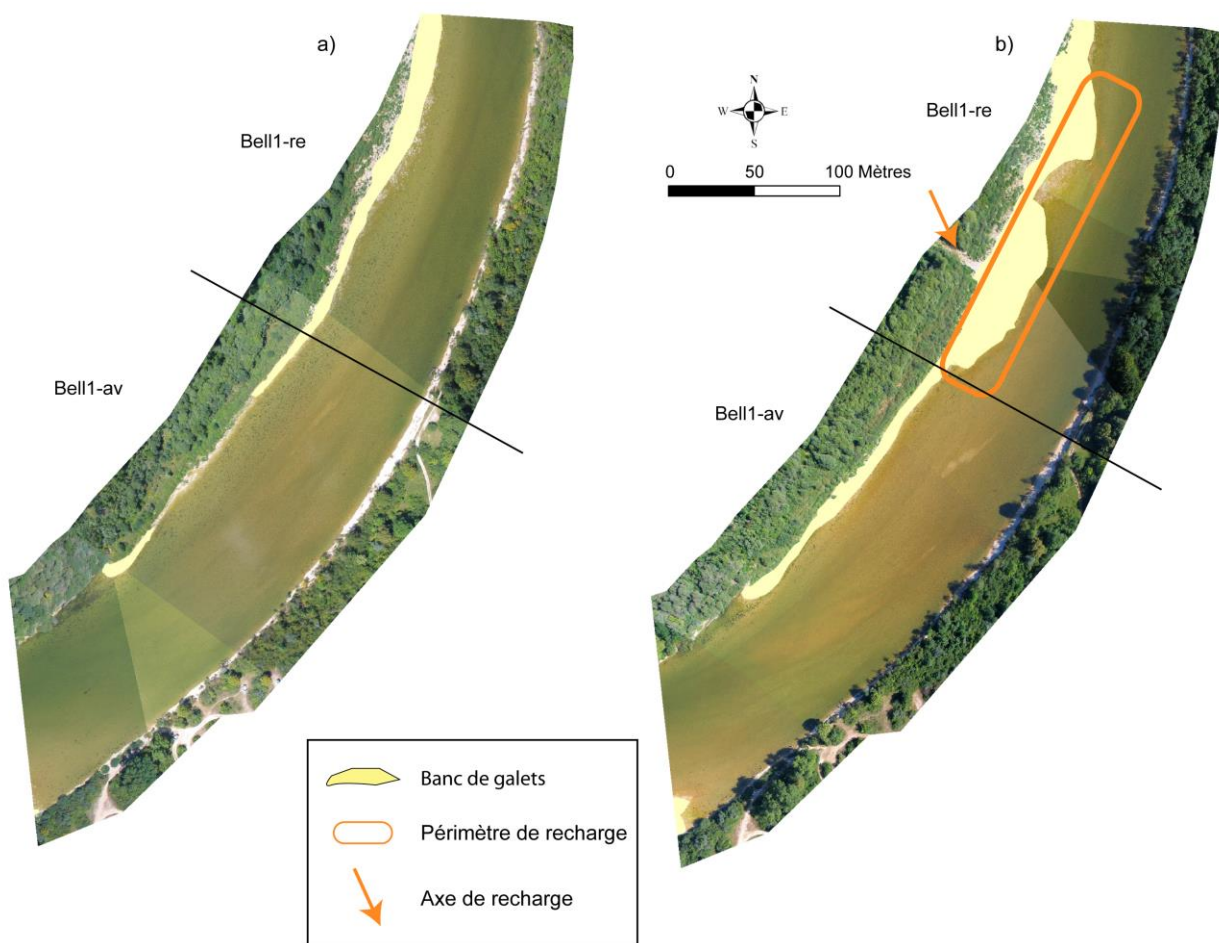
Soixante quatre pourcent des affleurements localisés sur « Carr-av » ont disparu (principalement en milieu de chenal) (fig. 4-16b). Cette observation est le premier élément prouvant que les sédiments réinjectés sur « Carr-re » ont été remobilisés jusqu'au secteur « Carr-av ». En effet, le site des Carronnières et l'ensemble du tronçon localisé en amont (commune de Varambon) sont des secteurs fortement impactés par le déficit de charge (absence de mobilité, chenal incisé et fond du lit pavé). Ils ne peuvent donc être à l'origine de nouvelles fournitures sédimentaires. La seule source possible provient donc de la recharge artificielle qui, malgré son faible volume, a la capacité « théorique » de couvrir l'ensemble du tronçon (épaisseur de 8 cm comme précédemment calculée).

3.1.4. Comportement morphologique du site de recharge de Bellegarde

La comparaison des mosaïques drone entre les missions de février 2006 (état « n ») et de l'été 2006 (état « n+1 ») (tab. 4-2, page 170) souligne une érosion significative des zones de dépôt. Cependant, celles-ci sont encore bien visibles en période d'étiage (fig. 4-17b et 4-18b). Ce secteur enregistre ainsi une rétraction significative du chenal de la rive droite (pour le tronçon « Bell1-re » la distance de rétraction est d'environ 10 m).

Les deux tronçons de recharge « Bell1-re » et « Bell2-re » enregistrent, entre juillet 2005 et juillet 2006, une progression des surfaces exondées de 60 % pour le premier et de 41 % pour le second (fig. 4-19a). Contrairement au site Bell1, il n'y avait pas de banc sur le site de recharge « Bell2 » (localisé sur l'ancienne berge d'érosion dans la concavité du méandre).

Les affleurements rocheux ne sont observés avant intervention que sur la zone de recharge « Bell2-re » (fig. 4-19b). Ceux identifiés en 2005 et localisés au droit du site de recharge ont totalement disparu en 2006. Cette disparition est logiquement associée à l'épandage de la charge recouvrant les affleurements rocheux qui étaient présents sur le site.



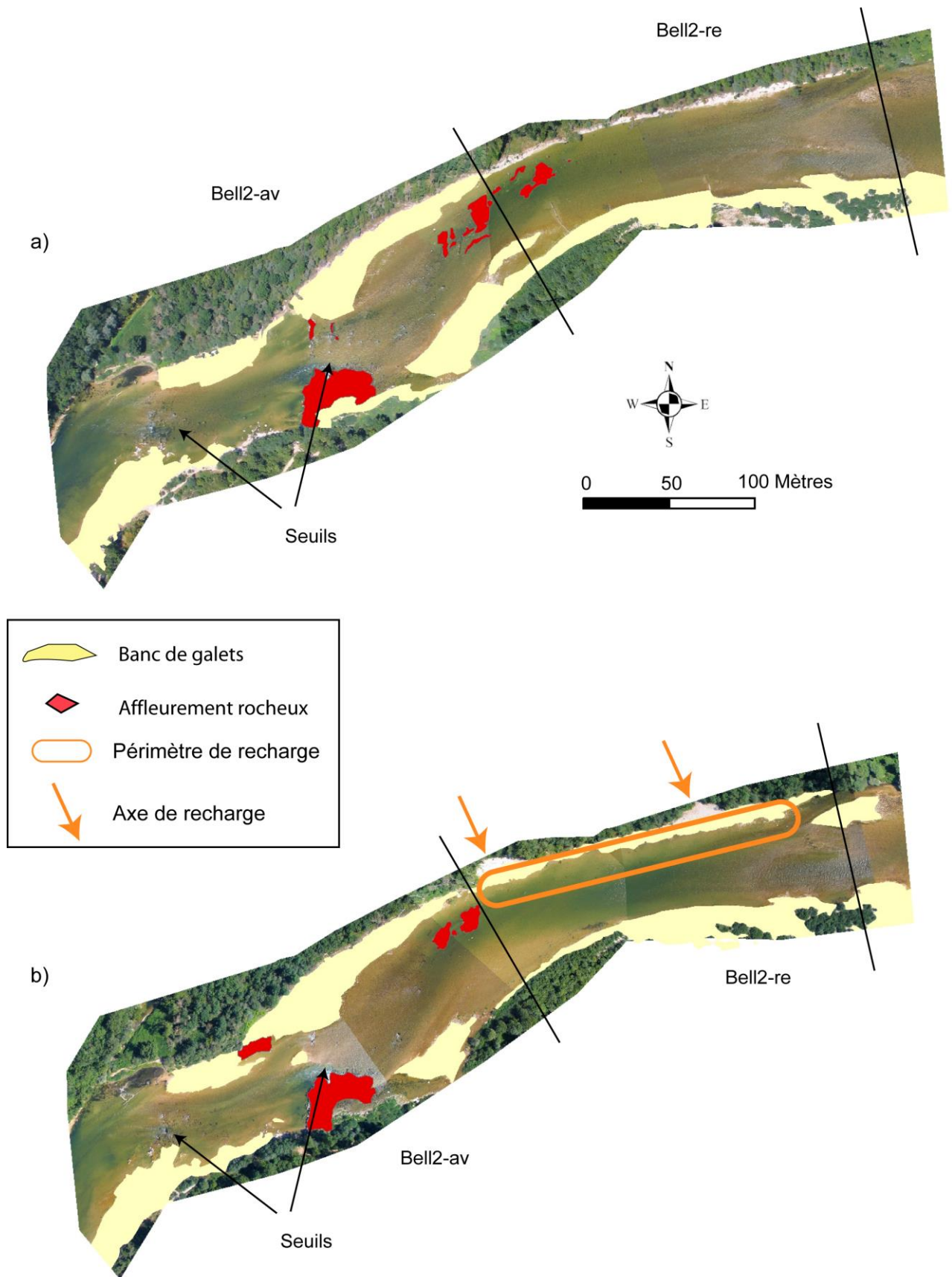


Figure 4-18. Carte de la bande active du secteur de recharge aval, site de Bellegarde, a) mission drone du 19 et 20/07/2005 ($18 \text{ m}^3/\text{s}$), b) mission drone du 30/06/2006 ($16 \text{ m}^3/\text{s}$)

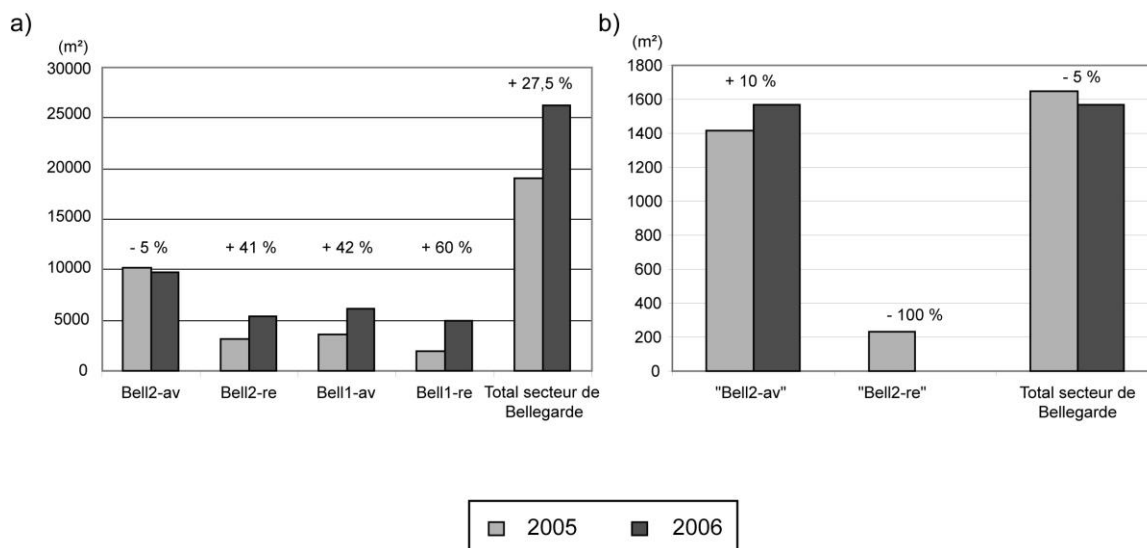


Figure 4-19. Site de Bellegarde entre juillet 2005 et juin 2006 (respectivement 18 m³/s pour 2005 et 16 m³/s pour 2006, a) superficie des bancs de galets, b) superficie des affleurements

3.1.5. Réponse du tronçon aval de Bellegarde

Le secteur de recharge « aval de Bellegarde » enregistre trois tendances concernant les superficies de bancs :

- une progression de 42 % sur le secteur « Bell1-av » (fig. 4-19a),
- une diminution de 5 % sur le secteur « Bell2-av ». Cette légère diminution est en contradiction avec l'apport de nouveaux sédiments en amont. Ce constat peut être expliqué par la présence de deux seuils sur le tronçon qui, en concentrant les écoulements, peuvent sensiblement perturber le dépôt des sédiments (fig. 4-18),
- aucune création de bancs n'est observée. Seul l'accroissement d'un petit banc médian, en amont de la zone de dépôt, a été constaté (fig. 4-18b).

Les affleurements localisés à l'aval du second site de recharge « Bell2-av » ne semblent pas avoir été affectés par la remobilisation de la charge. Leur emprise a même progressé de 10 % entre les deux dates (fig. 4-19d). Là encore, la présence des deux seuils concentre les écoulements et peut être en mesure de favoriser la remobilisation des sédiments plus en aval.

En prenant comme hypothèse différents *scenarii*, le volume réinjecté sur le site de « Bell2-av » (estimé à 8800 m³) reporté sur une largeur de 100 m (moyenne du tronçon), correspondrait à une bande de :

- 90 m de long pour 1 m d'épaisseur,
- 180 m de long pour 50 cm d'épaisseur,
- 440 m de long pour 20 cm d'épaisseur.

Pour cette dernière estimation, la longueur du périmètre de suivi n'est pas suffisante pour évaluer l'impact de la remobilisation des sédiments sur le secteur aval.

3.2. Evolution de la topographie du chenal

3.2.1. Ajustement de la hauteur d'eau à un débit de référence

L'évolution de la topographie du chenal a été traitée à partir des restitutions bathymétriques produites dans la partie 3. Les deux campagnes de mesures topographiques (missions du 21 juillet 2005 et du 12 juillet 2006, tab. 4-2, page 170) correspondent à des débits identiques (respectivement 18 m³/s et 16,5 m³/s). Les artefacts liés à la présence de turbulences et d'ombres portées sur le plan d'eau ont été identifiés par classification et extraits de la carte bathymétrique.

La comparaison de deux états bathymétriques a pour incidence de cumuler les erreurs des deux modèles utilisés. Abordées dans la partie 3, ces erreurs sont principalement liées aux problèmes de calibration des modèles (entre substrat et image) et aux écarts de luminosité engendrés par le mode multi-photos. L'estimation des volumes sédimentaires sera donc affectée. L'extrait d'une carte des variations des hauteurs d'eau produite à partir de la différence des deux états bathymétriques 2005 et 2006 illustre ce phénomène (variation initiale fig. 4-20, extrait du site de Bellegarde). Afin de minimiser ces erreurs, une correction a été appliquée. La figure 4-20 schématise les étapes de cette procédure :

- à partir de la différence des deux états bathymétriques, une carte des variations initiales est construite. La rupture altimétrique observée sur l'état bathymétrique 2005 est tout naturellement retranscrite sur la carte des variations initiales (fig. 4-20). Le décrochage brutal enregistré ne correspond pas à la réalité des changements topographique de fond de chenal observés,
- pour définir la valeur de la correction à appliquer, une zone tampon est construite au droit de la rupture sur la carte des hauteurs d'eau de 2005 (étape 1, fig. 4-20). La médiane des hauteurs d'eau correspondante à la zone tampon est calculée,
- cette valeur est réappliquée sur le secteur qui a été précédemment identifié (étape 2, fig. 4-20),
- le résultat final permet d'obtenir une variation corrigée (fig. 4-20).

Cette correction est réitérée pour tous les secteurs présentant les mêmes ruptures. Ainsi, les cartes des variations produites qui présentent un fort décrochement altimétrique ont été corrigées (fig. 4-22, 4-25, 4-26).

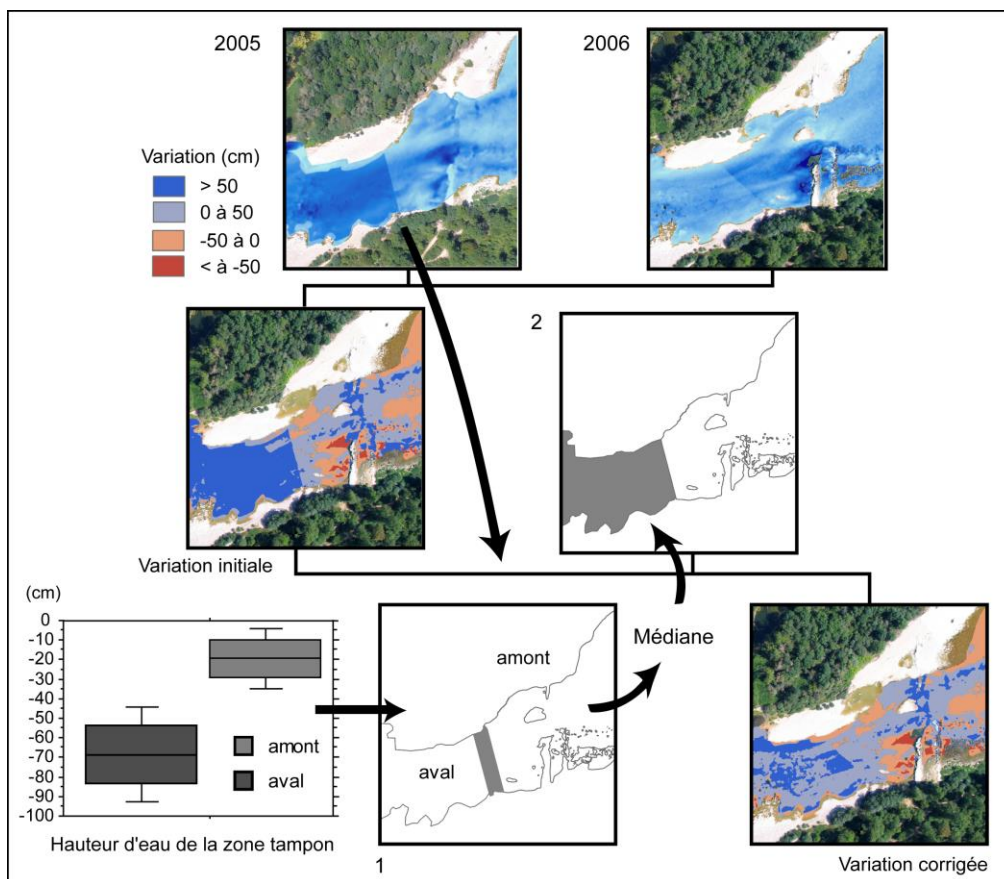


Figure 4-20. Principe d'une correction altimétrique à partir d'une carte des variations topographiques produite à partir de 2 états bathymétriques

3.2.2. Comportement morphologique du site de recharge des Carronières

A partir des deux états bathymétriques 2005 et 2006 (fig. 4-21, page 182), une carte des variations topographiques a été réalisée (fig. 4-22, page 183). Elle correspond à la différence des hauteurs d'eau entre 2005 (fig. 4-21a) et 2006 (fig. 4-21b). Son périmètre reprend le plan d'eau commun aux deux missions drone afin de ne pas intégrer d'erreurs liées à la différence de débits enregistrés au moment des vols (18 m³/s et 33 m³/s). Les variations topographiques ont été discrétisées en classes de même amplitude.

A partir de cette même carte, un graphique représentant la variation longitudinale des différences d'altitudes entre les topographies de juillet 2005 et mai 2006 a été réalisé (fig. 4-23, page 183). Il est constitué de 42 profils en travers (42 zones tampons « *buffer* » de 4 m de large espacées de 10 m). 7396 points en ont été extraits. Cette configuration graphique permet de visualiser l'impact de la mobilité amont / aval des sédiments rapportée à l'ensemble de la largeur du tronçon.

La carte des variations révèle un certain nombre de modifications spatiales et altitudinales entre les deux dates (fig. 4-22) :

- le secteur au droit du chemin d'accès enregistre un exhaussement important du lit sur toute la largeur du chenal (supérieur à 50 cm),

- le périmètre de recharge (rive droite, « Carr-re ») enregistre également un exhaussement, mais d'une plus faible ampleur. Cette observation a déjà été confirmée par la disparition des affleurements rocheux constatée sur la mosaïque des images drone 2006, car ce secteur correspond à la zone de dépôt des matériaux,
- inversement, la rive gauche est fortement affectée par une incision qui est observée dans la partie amont du tronçon de recharge (« Carr-re »). Ce secteur de rive gauche concentre les écoulements,
- malgré la recharge, le site présente un bilan déficitaire sur les $\frac{3}{4}$ de sa superficie avec une incision moyenne de 13 cm (moyenne des variations) (fig. 4-23). Seule sa partie aval enregistre un exhaussement topographique significatif (+37 cm). Cet exhaussement du lit, déjà localisé sur la carte des amplitudes, est dans l'axe du chemin d'accès ayant servi au transport des matériaux extraits de la lône. Le tronçon de recharge présente un bilan stable (1cm, fig. 4-23).

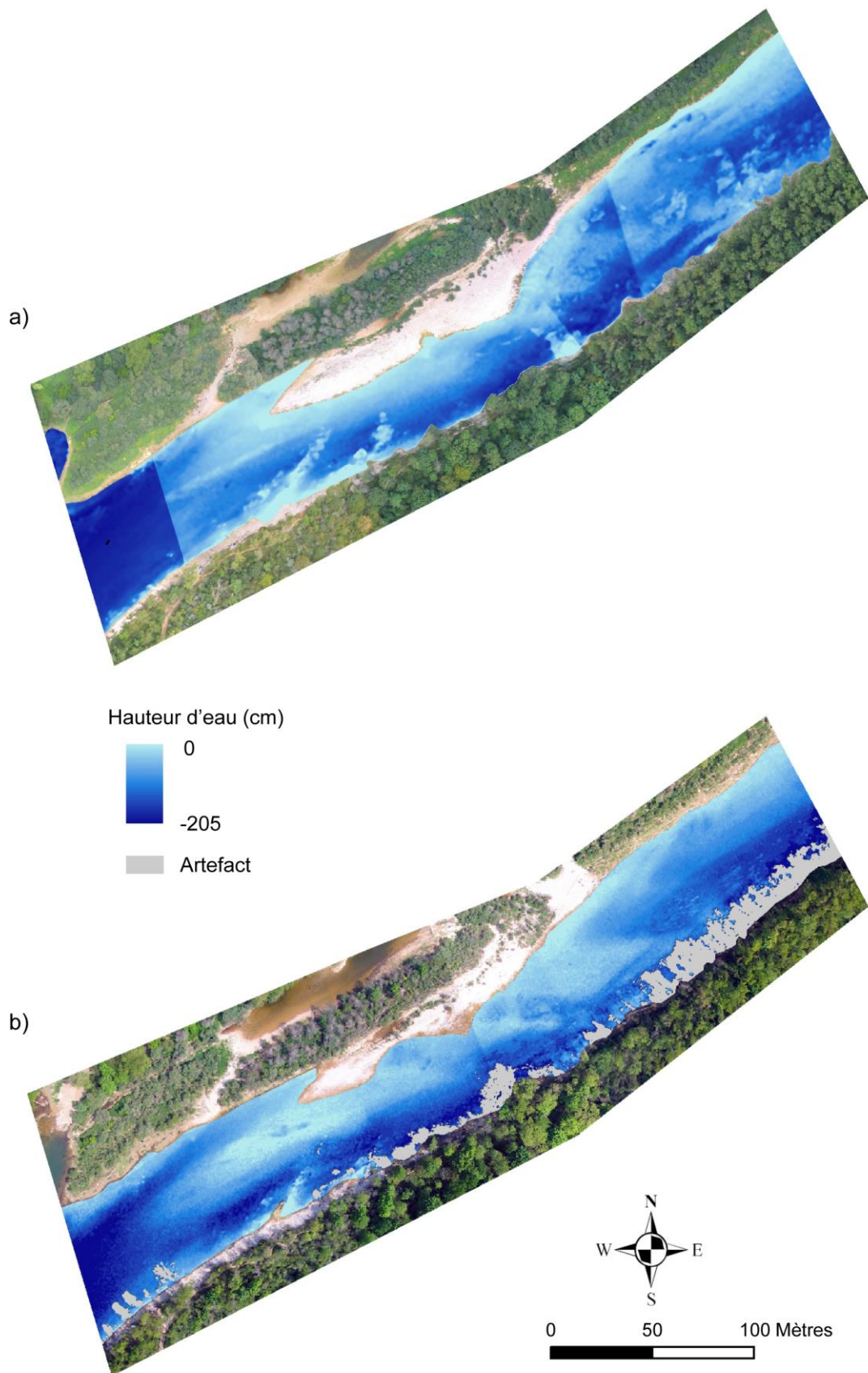
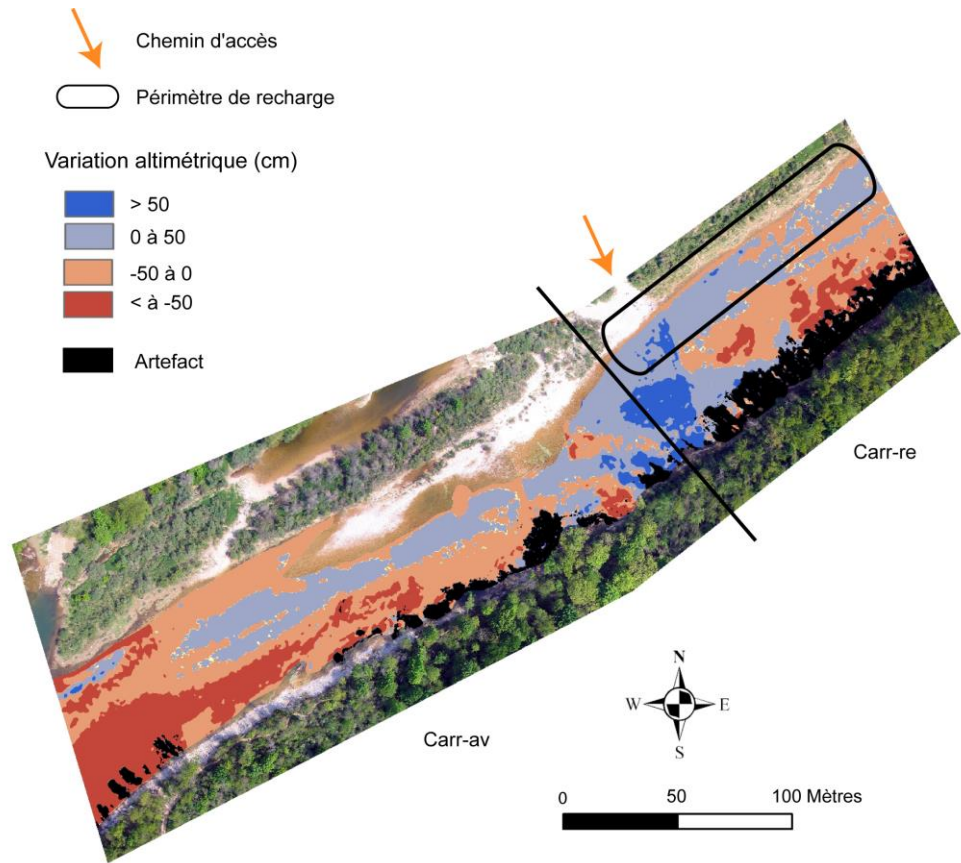


Figure 4-21. Cartes bathymétriques, a) mission du 19 juillet 2005 (avec un débit de $18 \text{ m}^3/\text{s}$), b) mission du 04 mai 2006 (avec un débit de $16,5 \text{ m}^3/\text{s}$)



	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Surface corrigée (m ²)	Volume corrigée (m ³)	Bilan de la charge (m ³)
Exhaussement	10606	2809	8467	1988	
Incision	10013	2898	11716	4415	- 2427

Figure 4-22. Carte des amplitudes topographiques entre juillet 2005 et mai 2006 et bilan du stock sédimentaire sur la période considérée (mosaïque en arrière plan : mission 2006)

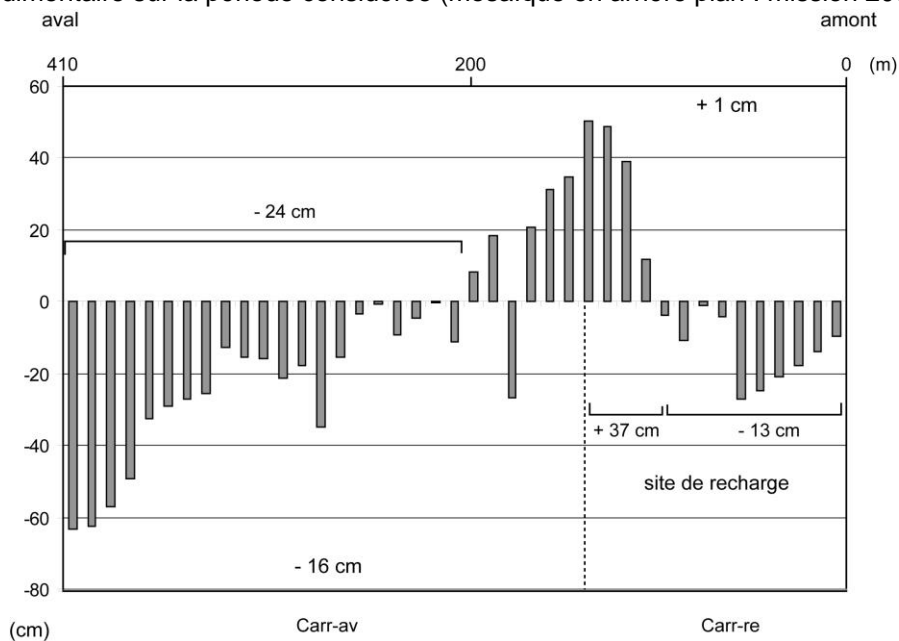


Figure 4-23. Variation longitudinale des différences d'altitudes entre les topographies de juillet 2005 et mai 2006 (pour un même débit)

3.2.3. Réponse du tronçon aval des Carronnières

La carte des variations topographiques du tronçon aval des Carronnières retranscrit une langue de progression à partir du site de recharge et sur une distance de 230 m vers l'aval (variation inférieure à 50 cm) (fig. 4-22, « Carr-av »). Cet axe est dans le prolongement du site de réintroduction de la charge. Le bilan des superficies exhausées et incisées est présenté sur la figure 4-22 pour l'ensemble du tronçon. Après correction altimétrique, le site des Carronnières présente un déficit sédimentaire de 2427 m³. Les variations longitudinales des altitudes du tronçon « carr-av » (fig. 4-23) enregistrent un bilan négatif sur les ¾ de sa largeur avec une incision moyenne de 24 cm. Seule la partie amont (à proximité du site de recharge) présente un bilan sédimentaire positif qui correspond au prolongement de l'exhaussement constaté au droit du chemin d'accès. Malgré la présence d'un axe d'exhaussement correspondant à une langue de progression des sédiments, l'enfoncement moyen du secteur atteint 16 cm (fig. 4-23).

3.2.4. Comportement morphologique du site de recharge de Bellegarde

A partir des deux états bathymétriques 2005 et 2006 (fig. 4-24), une carte des variations topographiques de fond de chenal a été construite et décomposée en deux parties : « Bell1 » (fig. 4-25) et « Bell2 » (fig. 4-26) (page 186). Par souci de cohérence, la carte produite reprend la même discrétisation des variations altitudinales que celle des Carronnières.

Comme pour Carronnières, un graphique correspondant aux variations longitudinales d'altitudes a été créé (fig. 4-27, page 187). Il est constitué de 77 profils en travers rapportés sur un même axe (77 zones tampons de 4 m de large, espacées de 20 m) pour un total de 15113 points. Les deux sites de recharge ont été replacés sur ce graphique (fig. 4-27).

La carte des variations topographiques et le graphique des variations longitudinales d'altitudes mettent en évidence plusieurs modifications morphologiques :

- Le secteur de « Bell1-re » ne présente pas de forte tendance à l'exhaussement ou à l'incision (fig. 4-25). Cette observation est confirmée par l'étude des variations longitudinales d'altitudes qui présente un bilan légèrement positif (+7cm) (fig. 4-27).
- Le secteur « Bell2-re » (fig. 4-26) enregistre une surface d'exhaussement parfaitement identifiée partant du périmètre de recharge et englobant celui-ci sur toute sa longueur. En revanche, le bilan rapporté sur l'ensemble du tronçon « Bell2-re » est négatif (-12 cm) (fig. 4-27). En effet, sur la berge opposée à la zone de dépôt de « Bell2-re », nous constatons une zone d'incision prononcée correspondant à l'axe de concentration des d'écoulements.

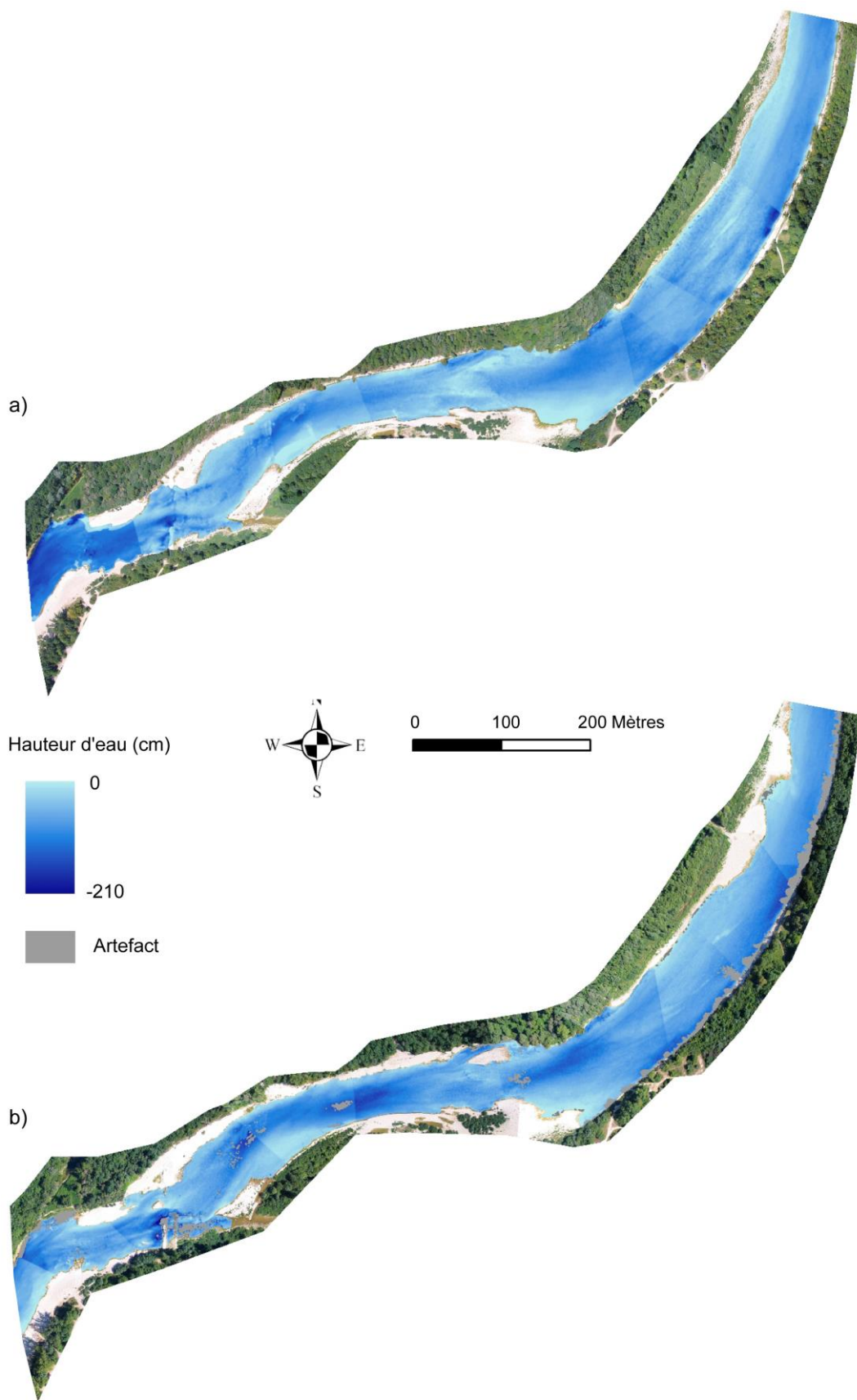


Figure 4-24. Cartes bathymétriques du secteur de Bellegarde, a) mission des 19 et 20 juillet 2005 (18 m³/s), b) mission du 30 juin 2006 (débit : 16,5 m³/s)

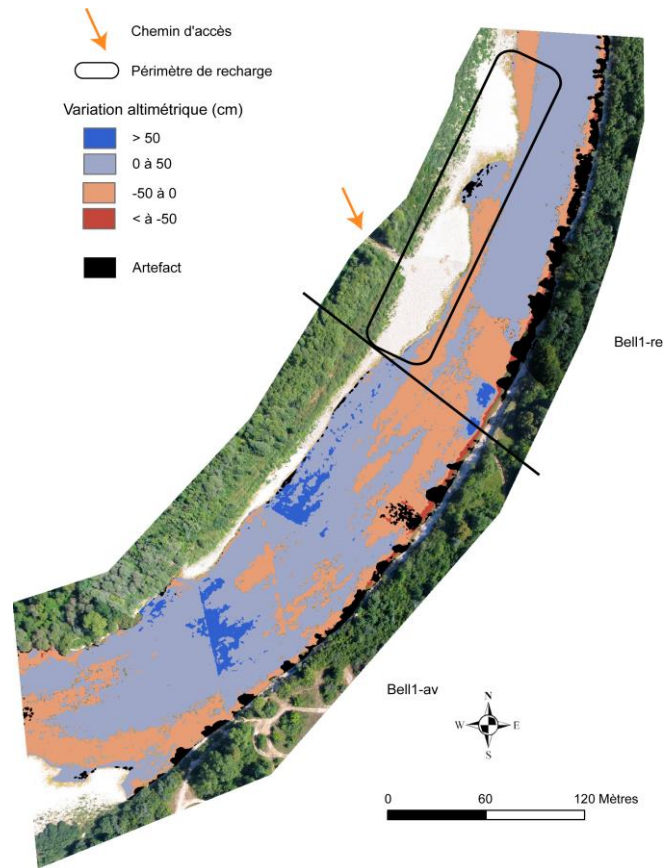


Figure 4-25. Carte des amplitudes bathymétriques du tronçon amont entre juillet 2005 et juin 2006

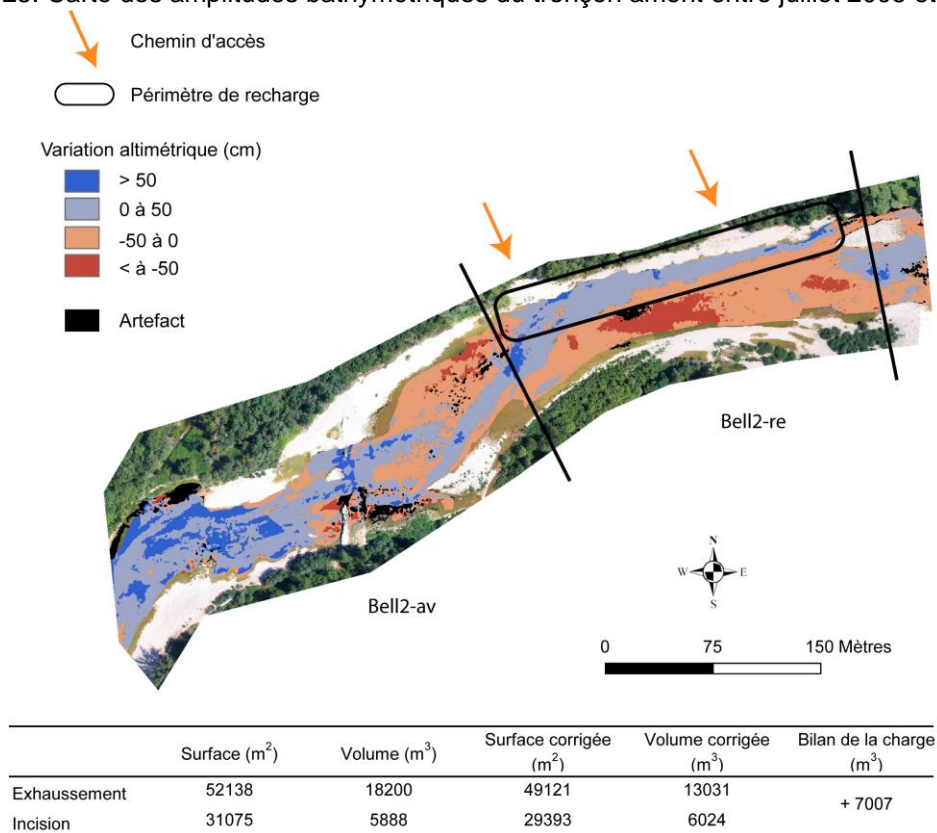


Figure 4-26. Carte des amplitudes bathymétriques du tronçon aval entre juillet 2005 et juin 2006 et bilan des stocks sédimentaires *in situ* des secteurs de recharge amont / aval

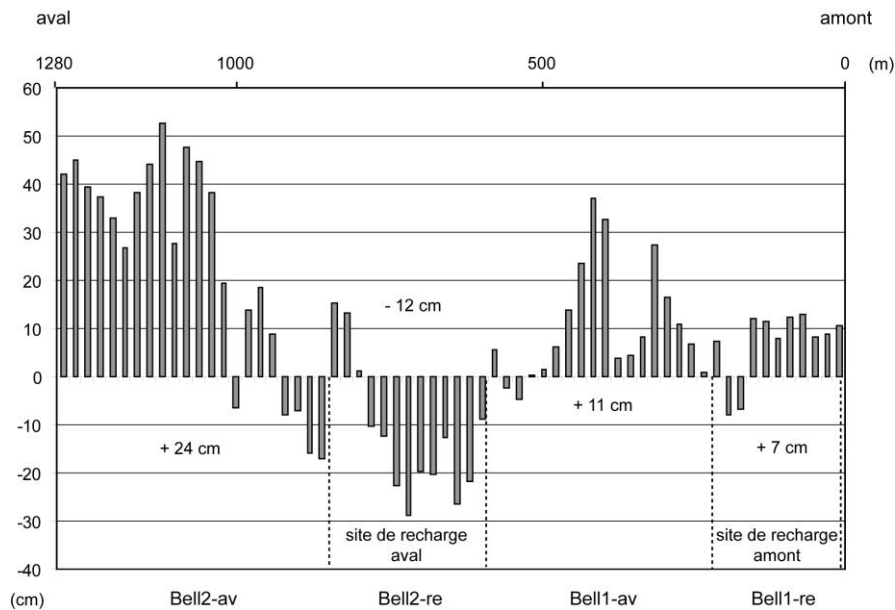


Figure 4-27. Variation longitudinale des différences d'altitudes entre les topographies de juillet 2005 et juin 2006 (pour un même débit)

3.2.5. Réponse du tronçon aval de Bellegarde

Sur le tronçon « Bell1-av », une zone d'exhaussement (variations supérieures à 50 cm) a été identifiée (fig. 4-25). Cette langue de progression est localisée dans le prolongement des deux sites de dépôt « Bell1-av ». Elle s'étend jusqu'au second secteur de recharge « Bell2-re » (dans sa partie amont). La distance estimée de cet axe d'exhaussement est de 380 mètres. Le bilan sédimentaire de ce tronçon est majoritairement excédentaire jusqu'au site de recharge suivant (+11 cm) (fig. 4-27).

Sur le tronçon « Bell2-av », une langue de progression sédimentaire a été également identifiée. Elle s'épand jusqu'à la limite de la zone d'étude et finit par couvrir, dans sa partie aval, toute la largeur du chenal (fig. 4-25). Les variations longitudinales des altitudes (fig. 4-27) enregistrent une alternance de variations altimétriques positives et négatives (entre les distances 800 et 1000 m). Ce secteur se traduit par la présence d'un seuil (affleurement rocheux) et d'un rétrécissement de la section du chenal engendrant de fortes turbulences. La partie aval (entre 1000 m et 1280 m sur le profil) présente un bilan très positif (+24 cm). Ce secteur correspond à une mouille au pied de la côtière de Priay.

Le bilan des volumes stockés et déstockés observés sur la carte des amplitudes bathymétriques est présenté sur la figure 4-26. Après correction altimétrique, le site de Bellegarde présente un excédent sédimentaire de + 7000 m³.

Les analyses surfaciques et altimétriques réalisées sur les tronçons aval ont démontré que la charge réinjectée en amont a été, pour partie, remobilisée. Les traces de cette mobilité, représentées par les langues de progression sédimentaires, ont été parfaitement détectées et leur distance estimée.

4. Synthèse des opérations de recharge

4.1. Bilan du site des Carronnières

Malgré une faible recharge sédimentaire (3660 m³, source CREN) réalisée en plusieurs étapes (crues morphogènes en mars et avril 2006), des modifications morphologiques ont pu être observées sur le secteur des Carronnières.

L'absence d'atterrissement sur la zone de recharge s'explique par une forte remobilisation des sédiments au fur et à mesure de leur dépôt, car ceux-ci ont été réalisés durant une période où plusieurs crues successives ont été enregistrées.

La disparition des affleurements rocheux de fond de chenal (-58%) correspond principalement au site de recharge recouvert par les sédiments réinjectés. Cette tendance est confirmée par un exhaussement du lit visible sur la carte des amplitudes. Le secteur localisé sur la rive opposée enregistre, en revanche, une incision du lit (supérieure à 50 cm). Cette tendance pourrait s'expliquer par une section plus restreinte au droit du périmètre de recharge favorisant la concentration des écoulements.

La zone de transition localisée entre le site de recharge et son tronçon aval a enregistré un fort exhaussement du fond du lit qui est bien retranscrit sur la carte des variations altimétriques et sur le graphique des variations longitudinales. Ce secteur est situé dans le prolongement d'un chemin d'accès utilisé pour véhiculer les matériaux (le lit mouillé étant peu praticable durant les travaux). Le cumul des matériaux poussés par bulldozer a pu conduire à la mise en place progressive d'une accumulation des galets en fond de chenal et dont les restes correspondent à cette surface exhaussée (volume estimé à environ 1000 m³). Les relevés topographiques par transect réalisés sur le terrain ne peuvent confirmer ou infirmer cette hypothèse car ils sont placés en amont et en aval du secteur concerné.

Le secteur en aval du site de recharge enregistre, quant à lui, une langue de progression des sédiments de l'amont vers l'aval localisée en rive droite et dans l'axe du site de réinjection. Sa longueur a été estimée à 230 mètres et représenterait un volume d'environ 950 m³ (en faisant l'hypothèse d'une épaisseur moyenne de 25 cm correspondant à la classe d'amplitude 0 à 50 cm, fig. 4-22, page 183). Nous pouvons en déduire que cette valeur de 230 m correspond à la distance moyenne parcourue par les galets réinjectés sur la base des deux crues morphogènes enregistrées au mois de mars et mai 2006 (respectivement 617 et 643 m³/s). Sur la basse vallée de l'Ain et pour la même période de suivi (2005 / 2006), Rollet (2007) a estimé cette distance à 150 m à partir de galets équipés de transpondeurs (PIT) sur un banc de convexité, sans doute protégé des flux les plus actifs. A titre de comparaison, Petit *et al.* (1996), dans une étude réalisée sur le Rhône à Miribel Jonage, estiment à 275 m la distance de parcours des galets réinjectés dans le chenal (distance moyenne calculée sur une période de 40 ans).

Le banc de galets, localisé en rive droite, a été érodé (-35% entre les deux dates) et ce malgré une granulométrie très grossière par rapport à celle susceptible d'être mobilisée pour ce niveau de crues (D50 de 94 mm en 2005, Rollet, 2007). Ce dégraissement a cependant été confirmé par la présence de nouvelles dalles calcaires à l'amont du banc.

La rive gauche, au droit du banc de galets et dans la partie aval (Carr-av), a été affectée par une incision engendrée par la concentration des écoulements et par les modifications topographiques de la section.

Malgré les 3660 m³ de galets réintroduits, le bilan de la charge sur le secteur des Carronières présente un déficit sédimentaire estimé à plus de 2400 m³. Le faible volume de matériaux réinjecté dans le chenal, par rapport aux capacités de transport du cours d'eau estimées à 15000 m³/an (Rollet, 2007), n'a pas suffi à combler le déficit sédimentaire du tronçon rechargé. Ces résultats confirment bien cette situation de déficit et l'impact du barrage amont sur le transfert sédimentaire dans ce secteur.

4.2. Bilan du site de Bellegarde

Le secteur de Bellegarde a enregistré une recharge significative de 18800 m³ (source : CREN). Les crues des mois de mars et de mai 2006 ont parfaitement joué leur rôle dans le remaniement des sédiments puisque les deux sites de recharge ont été érodés entre l'état « N » (22 février 2006) et l'état « N+1 » (30 juin 2006).

Les résultats produits ont permis de mettre en évidence un rétrécissement important du chenal au droit des zones de dépôt. La localisation des dépôts en berge de convexité (secteur Bell1-re), là où les contraintes d'écoulement sont les plus faibles, a engendré un bilan sédimentaire excédentaire du chenal et inversement la localisation des dépôts en berge de concavité (secteur Bell2-re), là où les contraintes d'écoulements sont les plus fortes, a favorisé le déficit du bilan sédimentaire du tronçon considéré. Ces deux observations ont été parfaitement retranscrites sur le graphique des variations longitudinales (fig. 4-27).

L'extension spatiale des bancs de galets (+ 27,5%) est due principalement à la prise en compte des seules zones de dépôts, et non à l'apparition de nouveaux atterrissements. Les affleurements rocheux n'ont pas été recouverts par de nouveaux bancs et leur superficie a donc peu varié durant la même période (- 5%).

Les secteurs en aval des sites de recharge (Bell1-av et Bell2-av) enregistrent quant à eux des langues de progression sédimentaires localisées dans l'axe des sites de réinjection. La langue de progression du secteur « Bell1 » a été estimée à 380 mètres de long. Comme sur le site des Carronières (estimée à 230 m), nous pouvons en déduire que cette valeur correspond à la distance moyenne parcourue par les galets réinjectés sur la base des deux crues morphogènes enregistrées au mois de mars et mai 2006.

4.3. Bilan d'un programme expérimental

En prenant en considération les différents paramètres de suivi traités (la superficie des bancs et des affleurements, les volumes de sédiment, la morphologie des langues de

progression), un bilan des actions de recharge sur l'exhaussement du chenal et l'engraissement des bancs est proposé (tab. 4-3). Ainsi, le tronçon des Carronnières obtient une évaluation mitigée en raison d'une recharge insuffisante. Le secteur de Bellegarde, quant à lui, obtient pour ces deux tronçons de recharge une évaluation positive.

Tableau 4-3. Bilan du bénéfice des actions sur les sites de recharge et leur tronçon aval

		Carronnières	Bellegarde	
			Bell1	Bell2
Tronçon de recharge (re)	Superficie banc	+	+	+
	Superficie affleurement	+	AV	+
	Volume de la charge	=	+	-
	Bilan	+	+	+
Tronçon aval (av)	Superficie banc	-	+	=
	Superficie affleurement	+	AV	-
	Volume de la charge	-	+	+
	Bilan	-	+	=
Bilan total		=	+	+

(AV) : absence de valeur

- + recharge positive (engraissement et exhaussement)
- recharge négative (érosion et incision)
- = état stable

Le protocole de suivi mis en œuvre sur les sites de recharge et les secteurs immédiatement aval a permis d'observer l'évolution de la bande active et le comportement de la charge sédimentaire réinjectée. Le suivi par imagerie et relevés topographiques a permis d'établir un diagnostic de l'efficacité des travaux engagés dans le cadre du programme Life. Une partie des 22500 m³ réintroduits a été remobilisée pendant les crues des mois de mars et de mai 2006. D'après les observations réalisées, les sédiments remobilisés ont parcouru des distances variant de 230 m à 380 m pour un débit de fréquence Q_{1,5} / Q₂. Cette fourchette de valeurs est cohérente avec les résultats d'autres auteurs (Petit *et al.*, 1996 ; Merz *et al.*, 2006 ; Rollet 2007). Seuls les secteurs à proximité des sites de recharge ont été affectés par la réintroduction des sédiments.

Cette dernière observation est cependant à nuancer, car les distances couvertes par le drone, à l'aval des sites de recharge, ont été volontairement limitées. Les tronçons aval portent sur trois linéaires différents : Carr-av, 300m ; Bell1-av, 960m (comprenant Bell2-av) ; Bell2-av, 350 m (tab. 4-4). L'appréciation qui a été faite de l'état morphologique des tronçons aval est donc susceptible d'être incomplète car non représentative des secteurs enregistrant la recharge. Cependant, au vu des distances de transport calculées (tab. 4-4), nous pouvons en déduire que les sites survolés couvrent un périmètre que nous jugeons suffisant (supérieur à la distance de transport calculée) pour apprécier le bénéfice des actions qui ont été engagées.

Tableau 4-4. Caractéristiques des tronçons aval

		Volume des recharges (m ³)	Distance de transport calculée (m)	Périmètre Couvert (m)
Carronnière		3660	230	300
Bellegarde	Bell1	10000	380	960
	Bell2	8800	> à 360 (?)	350

Afin d'assurer durablement le bénéfice des opérations déjà réalisées, des préconisations de recharge évaluées à 15000 m³/an sur une période de 10 ans ont été formulées (Lejot et Piégay, 2006a ; Rollet, 2007). En effet, seule une recharge continue peut affecter durablement les secteurs dégradés en aval par le déficit sédimentaire. Dans cette perspective, des préconisations de suivi par mesures topographiques et imagerie à haute résolution ont été développées pour évaluer le comportement des tronçons qui enregistreront ces futures recharges.

C. Evaluation des actions d'entretien et de restauration à partir d'images THR : exemple du RCC de Chautagne

Le suivi de la restauration des zones humides a fait l'objet de nombreux travaux depuis près de deux décennies, mais ceux-ci ont été essentiellement abordés sous un angle écologique (National Research Council, 1992 ; Henri et Amoros, 1995, 1996, 2001 ; Henri *et al.*, 2002 ; Amoros *et al.*, 2005 ; Bornette et Rivoire, 2007). Alors que le suivi des paramètres morphologiques revêt un caractère fondamental dans la compréhension des processus physiques régissant le fonctionnement d'une lône, cette approche n'a été abordée que récemment (Amoros *et al.*, 2005 ; Levrat, 2005 ; Lejot et Piégay, 2006b ; Michalkova et Piégay, 2006) comme nous avons pu le constater précédemment (partie 1).

Il en va de même concernant les actions d'entretien des lits fluviaux et notamment des bancs de galets. Les gestionnaires des cours d'eau ont à leur disposition tout un arsenal d'actions visant à favoriser la reprise des sédiments par les écoulements et à lutter contre certaines espèces invasives (Boyer, 1998 ; AREME, 2003). Ces programmes d'entretien sont appliqués depuis longtemps sur un grand nombre de cours d'eau comme le Rhône (CNR), l'Arve (ONF), la Drôme (Communauté de Commune du Val de Drôme), la Durance (EDF), dans le cadre de plans de gestion, mais il existe encore peu d'évaluations scientifiques permettant d'estimer leur efficacité et leur impact environnemental.

Dans le cadre du Programme décennal de restauration écologique et hydraulique du Rhône, des suivis scientifiques ont été réalisés depuis 2003 pour évaluer les paramètres physiques et biologiques des actions engagées afin de mesurer les gains environnementaux liés à l'augmentation du débit dans le vieux Rhône et à la restauration des lônes de Chautagne (André *et al.*, 2003 ; Levrat, 2005 ; Lejot et Piégay, 2006b ; Michalkova et Piégay, 2006). L'expérience engagée sur le Rhône est à ce titre tout à fait exceptionnel. Afin de renforcer les évaluations déjà entreprises, deux sites ont fait l'objet d'un suivi par imagerie drone et relevés topographiques : le site des « Grandes Iles », essarté annuellement, et la lône de la Malourdie, restaurée en 2003.

Nous avons donc tenté, dans ce chapitre, d'apporter de nouveaux éléments d'évaluation scientifique sur les effets de ces opérations de réhabilitation.

1. Caractéristiques des sites

1.1. Conditions hydrologiques pendant la période d'étude

L'hydrologie du R.C.C. de Chautagne est contrôlée par le barrage de Motz et l'usine hydroélectrique de Chautagne située sur le canal de dérivation. Les débits entrant dans le Vieux Rhône sont enregistrés par une station hydrométrique à l'aval du barrage de Motz (fig. 4-28 et fig. 4-1, page 153).

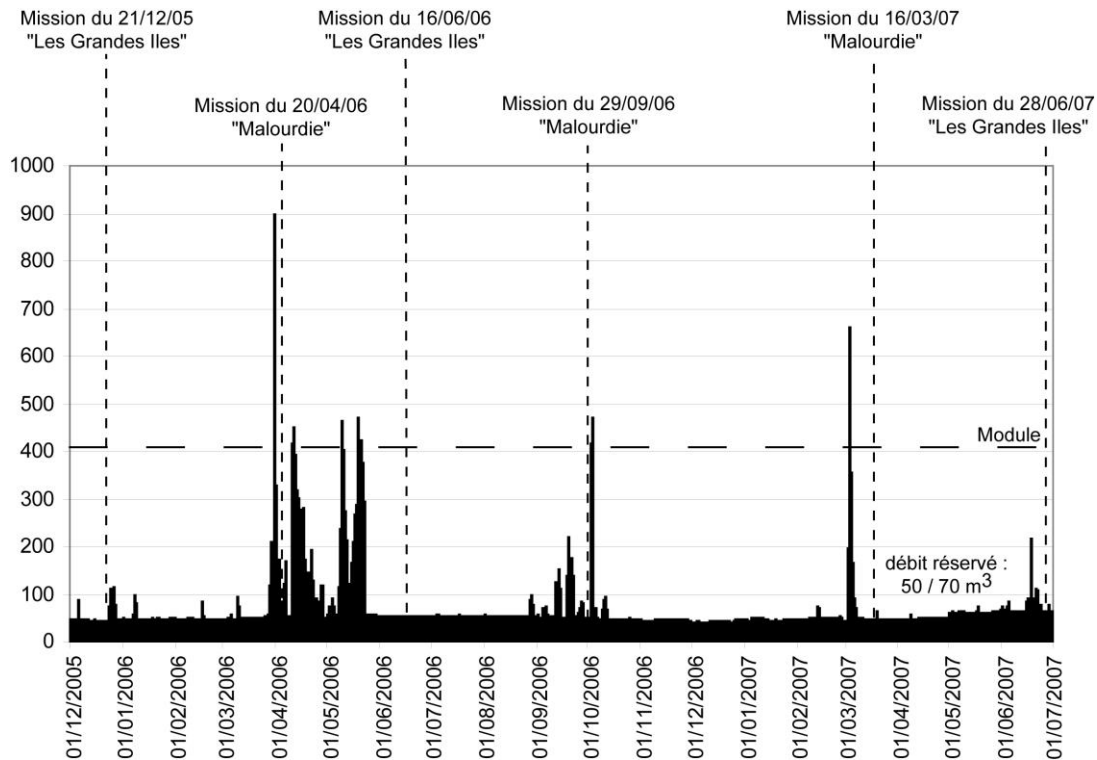


Figure 4-28. Hydrogramme des débits entre le 01/12/2005 et le 30/09/2006 (station hydrométrique du barrage de Motz, source : CNR)

Le module correspond à un débit de 401 m³/s. Il se manifeste 3 à 4 jours par an. Le débit seuil de mise en mouvement des matériaux sur le tronçon considéré a été évalué à 980 m³/s (Klingeman *et al.*, 1994). Pendant la période d'observation (fig. 4-28), six crues supérieures au module ont été enregistrées : le 31 mars 2006 (899 m³/s), le 10 et 11 avril 2006 (410 et 450 m³/s) le 9 et 10 mai 2006 (405 et 466 m³/s), le 19 et 21 mai 2006 (471 et 422 m³/s), le 2 et 3 octobre 2006 (418 et 470 m³/s), et le 3 mars 2007 (661 m³/s). Ainsi, aucune crue majeure ne s'est produite durant la période.

1.2. Entretien du banc de galets « les Grandes Iles »

Le secteur des Grandes Iles fait partie des sites entretenus par la CNR et dont les objectifs de gestion ont été expliqués précédemment. Il est localisé entre le Vieux Rhône et le canal d'amenée. Ce site conserve encore quelques traits hydro-morphologiques de son passé de rivière en tresses avec un chenal actif correspondant au Vieux Rhône, un bras secondaire et un bras transversal (entre le Vieux Rhône et le bras secondaire fig. 4-29, page 195). Klingeman *et al.* (1994) parlent d'un tronçon à tressage résiduel. Ces bras sont soumis à de forts processus de sédimentation entraînant leur déconnexion progressive du chenal principal. Ainsi, ils ont déjà fait l'objet d'opérations de curage en 1996. Cependant, dès 1998, le bras transversal a de nouveau été déconnecté du Vieux Rhône. Des travaux de déblais réalisés en 2003 ont permis de remettre en eau ces deux axes afin de maintenir les capacités d'écoulement des eaux du tronçon. Suite à l'enfoncement du talweg, deux seuils

ont également été construits sur le Vieux Rhône (1997-1998) afin de retrouver le profil d'origine (CNR, 2000a).

Parallèlement à ces travaux, le banc, qui se trouve entre le Vieux Rhône et le bras transversal, fait l'objet d'un programme d'entretien annuel. Il s'agit d'opérations d'essartage qui ont pour objectif de limiter la colonisation végétale, notamment de plantes invasives à rhizomes, et de rendre la charge remobilisable lors d'évènements hydrologiques significatifs. Ces opérations sont réalisées par des engins de génie civil (bulldozer) équipés de deux griffes et d'une lame (rasette) permettant d'arracher la végétation et les systèmes racinaires et de remanier la couche superficielle de galets. Le banc est remodelé de telle sorte que le relief soit plus accentué en tête de banc (face aux écoulements) pour favoriser la reprise et le transport des matériaux.

Ces travaux sont réalisés pendant la période automnale afin de profiter de conditions hydrologiques favorables en dehors de la période végétative pour limiter la dispersion des rhizomes. Ce dernier point est devenu, depuis quelques années, un enjeu majeur dans la gestion de ces espaces alluviaux.

Plusieurs espèces exotiques invasives prolifèrent, en effet, sur le corridor alluvial de Chautagne. Dans l'avant projet global portant sur la réhabilitation des deux bras, établi par la CNR (CNR, 2000b), un descriptif du milieu avant restauration avait été mené. En 2000, seule l'ambrosie apparaissait dans la rubrique « plantes envahissantes ». Les principales espèces présentes sont, aujourd'hui, l'ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia* L), l'Impatiens de l'Himalaya (*Impatiens glandulifera*), *Solidago* sp, l'arbre à papillons (*B.davidii*) et la renouée du Japon (*Reynoutria* sp). C'est sur cette dernière espèce que portera le suivi de la végétation.

La renouée du Japon est l'une des espèces herbacées les plus productives au monde (jusqu'à 13 tonnes/ha pour l'appareil végétatif, 16 tonnes/ha pour l'appareil racinaire, AREME, 2003). Elle prolifère et constitue une réelle nuisance dans les milieux perturbés par les activités humaines ou sur les marges fluviales perpétuellement remaniées par les crues. Son extension peut menacer des espèces à valeur patrimoniale liées aux cours d'eau et perturber la régénération naturelle des forêts alluviales (CNR, 2000b).

La figure 4-29 présente le périmètre de suivi correspondant aux limites du banc actuel. L'orthophoto de 2001 donne un état des lieux avant restauration avec un chenal transversal totalement atterri et un banc de galets colonisé par la végétation. Les photographies prises *in situ* (fig. 4-29ac) donnent un aperçu du résultat après une opération d'essartage (décembre 2005). Le banc est totalement mis à nu. Le tracé bien visible des sillons provoqués par le passage des griffes montre l'impact de l'opération sur le site traité. Les photographies (fig. 4-29bd) présentent le site 6 mois après essartage. Malgré la lourde opération réalisée, la revégétalisation spontanée du banc semble avoir été significative.

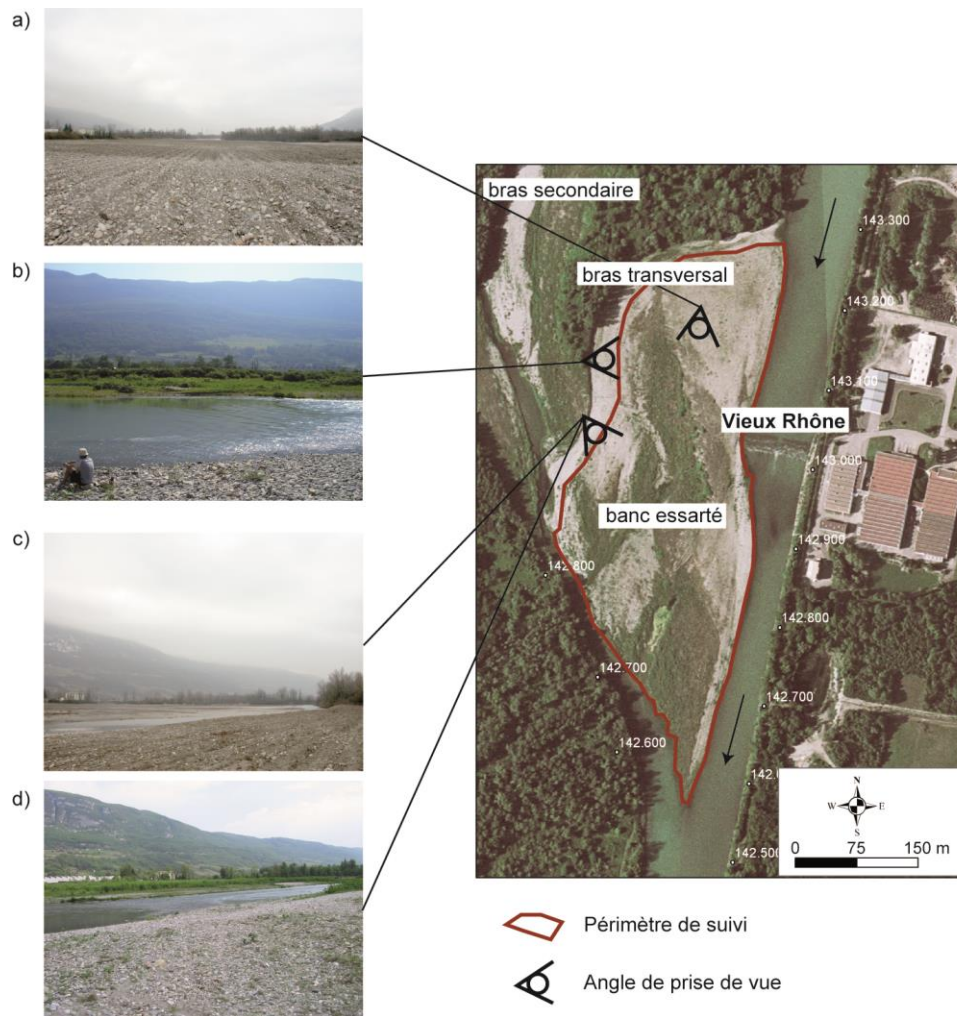


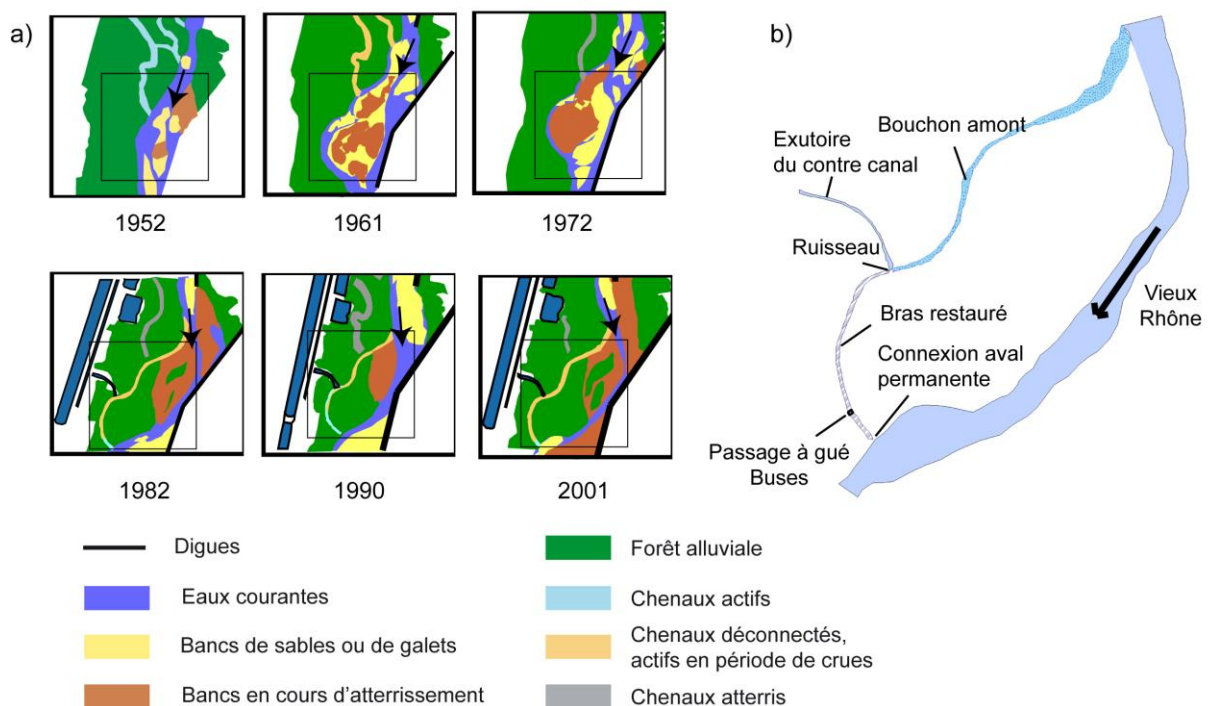
Figure 4-29. Présentation du périmètre de suivi « les Grandes Iles » (Orthophoto IGN 2001). a) vue d'ensemble du banc juste après essartage (photo décembre 2005), b) état du banc pendant la période estivale (photo juillet 2006), c) partie aval du banc de galets juste après essartage (photo décembre 2005), d) partie aval du banc de galets pendant la période estivale (photo juillet 2006) (clichés personnels)

1.3. Restauration de la lône de la Malourdie

Les travaux de restauration qui ont été engagés sur la lône de la Malourdie font partie d'un dispositif plus large de réhabilitation des zones humides du Haut-Rhône dans le cadre du Programme de réhabilitation hydraulique et écologique du Rhône. Les objectifs affichés ont été de conserver et d'accroître la diversité biologique d'un milieu déjà fortement remanié et de limiter les processus d'eutrophisation afin d'augmenter la durée de vie de la lône. Cette réhabilitation, au-delà des enjeux environnementaux, vise à renforcer la biodiversité du site par une intégration écologique et paysagère optimale.

La lône de la Malourdie est un ancien bras de méandre du Vieux Rhône. Sa formation date des années 1960, avec la création d'un banc de convexité qui va rapidement s'atterrir (fig. 4-30a, Levrat, 2005). Au cours des années 1970, la concentration des

écoulements en rive gauche, le long de la digue de Serrières, va entraîner la déconnexion des bras latéraux et leur comblement progressif. Le pédoncule du méandre va se végétaliser pour devenir une île (zone actuellement comprise entre la lône et le vieux Rhône). La construction du R.C.C. de Chautagne en 1981 a accéléré le processus de déconnexion par la diminution des débits entrant dans le Vieux Rhône (débit réservé entre 10 et 20 m³/s jusqu'en juillet 2004). Cette diminution des débits s'est accompagnée d'un abaissement de la nappe phréatique, aggravant le déficit en eau de la lône. Progressivement, le chenal s'est atterri entre 1982 et 2001 pour n'être alimenté qu'en période de crue. Seul l'exutoire du contre-canal (créé pour évacuer les infiltrations du canal d'amenée) et la partie aval du bras mort présentaient un plan d'eau pérenne avant restauration (fig. 4-30b).



La réhabilitation de la lône de la Malourdie s'est traduite par des travaux de génie civil et de végétalisation (fig. 4-31). L'augmentation des débits réservés, de 10 à 50 m³ pour la saison hivernale et de 20 à 70 m³ pour la saison estivale, est intervenue après la fin des travaux. La première phase de restauration a débuté en 2003 par le décapage des berges et le curage du chenal. La deuxième phase a concerné la revégétalisation du site (courant de l'année 2004). L'objectif était de rétablir des espèces végétales en situation précaire, de reconstituer une formation arbustive (principalement des pousses de Saule) et une bande d'hélophytes. Des semis composés d'espèces mésophiles ou méso-hydrophiles ont également été plantés pour concurrencer l'installation d'espèces envahissantes (renouée du Japon, Ambroisie).



Figure 4-31. Périmètre de suivi de la lône de la Malourdie (Orthophoto IGN 2001). a) chenal avant curage (photo CNR, 2000), b) chenal restauré (photo de février 2005, cliché personnel), c) connexion aval avant les travaux de déblais (photo CNR, 2000), d) connexion aval restaurée (photo février 2005, cliché personnel)

Les travaux de réhabilitation ont permis une remise en eau complète de la lône. Un seuil a été construit dans la partie aval pour faciliter l'accès des engins d'entretien à la rive gauche de la lône, ce passage étant busé pour maintenir les conditions hydrologiques en basses eaux. Les buses sont actuellement bouchées au $\frac{3}{4}$ par les limons. Le plan d'eau est alimenté en continu par l'amont grâce à l'exutoire du contre-canal et par des remontées d'eau provenant de la connexion aval (fig. 4-30b). Lors de fortes crues (débit de connexion supérieur à $740 \text{ m}^3/\text{s}$, Michalkova et Piégay, 2006), le bouchon amont est à nouveau parcouru par des écoulements issus du Vieux Rhône qui transforme la lône en bras secondaire. La fréquence des connexions amont a été estimée à 1 journée par an (Michalkova et Piégay, 2006).

2. Description des suivis

2.1. Les paramètres de suivi

Comme pour le suivi de la recharge sédimentaire sur l'Ain, des paramètres physiques ont été définis afin d'évaluer les opérations engagées sur le Rhône. La topographie et la végétation sont les deux champs thématiques qui ont été retenus dans le cadre de nos investigations. Les paramètres pris en compte ont été :

- la planimétrie des surfaces végétales terrestres et aquatiques à l'échelle du banc et de la lône,
- l'altimétrie du chenal à partir de modèles bathymétriques (développés dans la partie 3) et l'altimétrie du banc par mesures DGPS.

Ces paramètres permettent ainsi de déterminer deux indicateurs de suivis :

- le premier, écologique, correspond au taux de couverture végétal terrestre (banc des Grandes Iles) et aquatique (lône de la Malourdie) afin d'aborder les dynamiques de végétalisation (colonisation, eutrophisation),
- le second, géomorphologique, correspond aux variations topographiques. Il a pour but, à partir de MNT et de cartes bathymétriques inter-date, de quantifier les masses sédimentaires et d'évaluer leur mobilité (engraissement / incision du banc et atterrissement / incision de la lône).

Ces indicateurs nous permettront d'évaluer les changements écologiques et morphologiques post-restauration de la lône de la Malourdie et de suivre l'effet des actions pré et post-entretiens par essartage du banc de galets des Grandes Iles. L'objectif est de pouvoir prédire la période pendant laquelle des actions qui ont été engagées auront des effets bénéfiques.

2.2. Les protocoles de suivi

2.2.1. Site « les Grandes Iles »

L'ensemble des missions présentées dans ce chapitre (survol drone et relevés topographiques) a été synthétisé dans le tableau 4-5. Trois missions ont ainsi été effectuées :

- la mission du 21 décembre 2005 correspond à un état topographique initial post-entretien (opération d'essartage réalisée durant l'automne 2005),
- la mission du 16 juin 2006 correspond à un état de la végétation (fig. 4.32a) et de la topographie à « n+1 »,
- la mission du 28 juin 2007 correspond à un second état « n+1 » de la végétation (fig. 4.32b) (état post-entretien de l'opération d'essartage réalisé durant l'automne 2006) et à un état topographique à « n+2 ».

Tableau 4-5. Planning des suivis et des travaux et caractéristiques des missions réalisées sur le site « les Grandes îles »

Planning	Etat initial topographie		
	Etat initial végétation et topographie n+1		
Travaux	Etat végétation n+1 et topographie n+2		
	Essartage	Essartage	
	Mission du 21/12/05	Mission du 16/06/06	Mission du 28/06/07
Nombre d'images retenues	-	5	3
Nombre de balises	-	160	58
Résolution mosaïque (cm / pixel)	-	11	10
Mesures topographiques	234	230	343
Débit (m ³ /s)*	45	55	56

(*) Données CNR

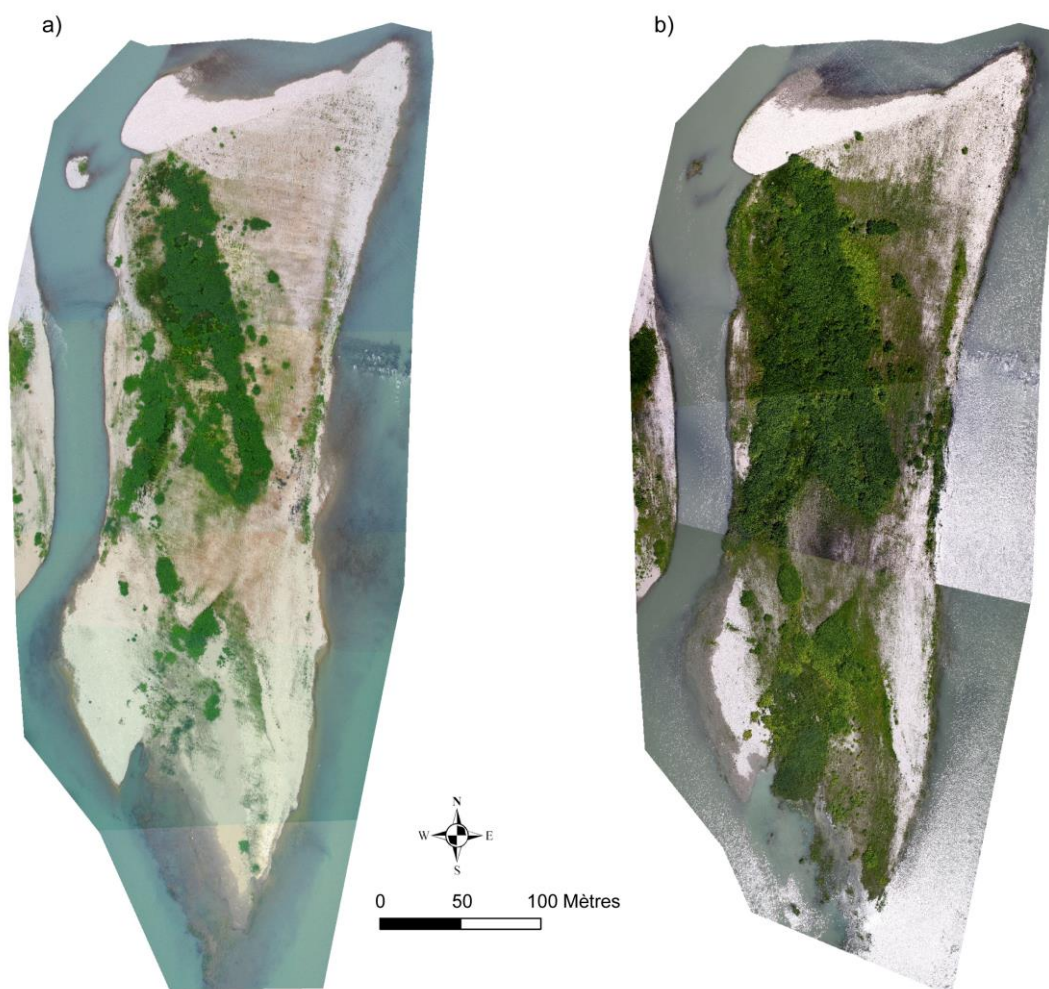


Figure 4-32. Mosaïque drone du site « les Grandes îles », a) mission du 16/06/2006 (débit : 55 m³/s), b) mission du 28/06/2007 (débit : 56 m³/s)

2.2.2. Site de la Malourdie

Le suivi de la lône de la Malourdie repose également sur trois états. Le tableau 4-6 résume les différentes caractéristiques des missions réalisées. Ces missions ont permis d'établir un référentiel visuel de l'état de la lône à deux moments de l'année (printemps et été) afin de répondre aux objectifs qui ont été fixés précédemment :

- au printemps (missions du 20 avril 2006 et 16 mars 2007) (fig. 33ac), dans le but de visualiser le fond du chenal avant le développement de la végétation aquatique et riparienne afin de restituer la topographie à partir des modèles bathymétriques développés dans la partie 3,
- en fin d'été (mission du 29 septembre 2006) (fig. 4-33b), pour cartographier la couverture de la végétation aquatique.

Tableau 4-6. Planning des suivis et des travaux et caractéristiques des missions réalisées sur le site de la Malourdie

Planning		Etat initial bathymétrie et végétation		
		Etat végétation n+1		Etat bathymétrie n+1 et végétation n+2
Travaux		restauration (2003-2004)		
		Mission du 20/04/06	Mission du 29/09/06	Mission du 16/03/07
Relevés bathymétriques	Nombre d'images retenues	8	7	4
	Nombre de balises	50	54	31
	Résolution mosaïque (cm / pixel)	4	28	11
	Débit mosaïque (m ³ /s)*	146	52	48
	Date - nombre de points	26/04/06 - 127	-	26/04/2007 - 81
	Débit (m ³ /s)*	86	-	50

(*) Données CNR

Les mosaïques produites (Grandes Iles et Malourdie) sont constituées d'images répondant aux contraintes d'exploitation présentées dans la partie 3. La préparation des sites survolés par le drone et la rectification des images acquises ont été effectuées selon le protocole de balisage et les traitements présentés également dans la partie 3. Pour chacun des deux sites, les mesures *in situ* ont été recalées à partir de points topographiques de référence : pour le site « les Grandes Iles », pk 143.000 ; pour celui de la Malourdie, pk 140.500 (« pk » raccordés au réseau NGF).

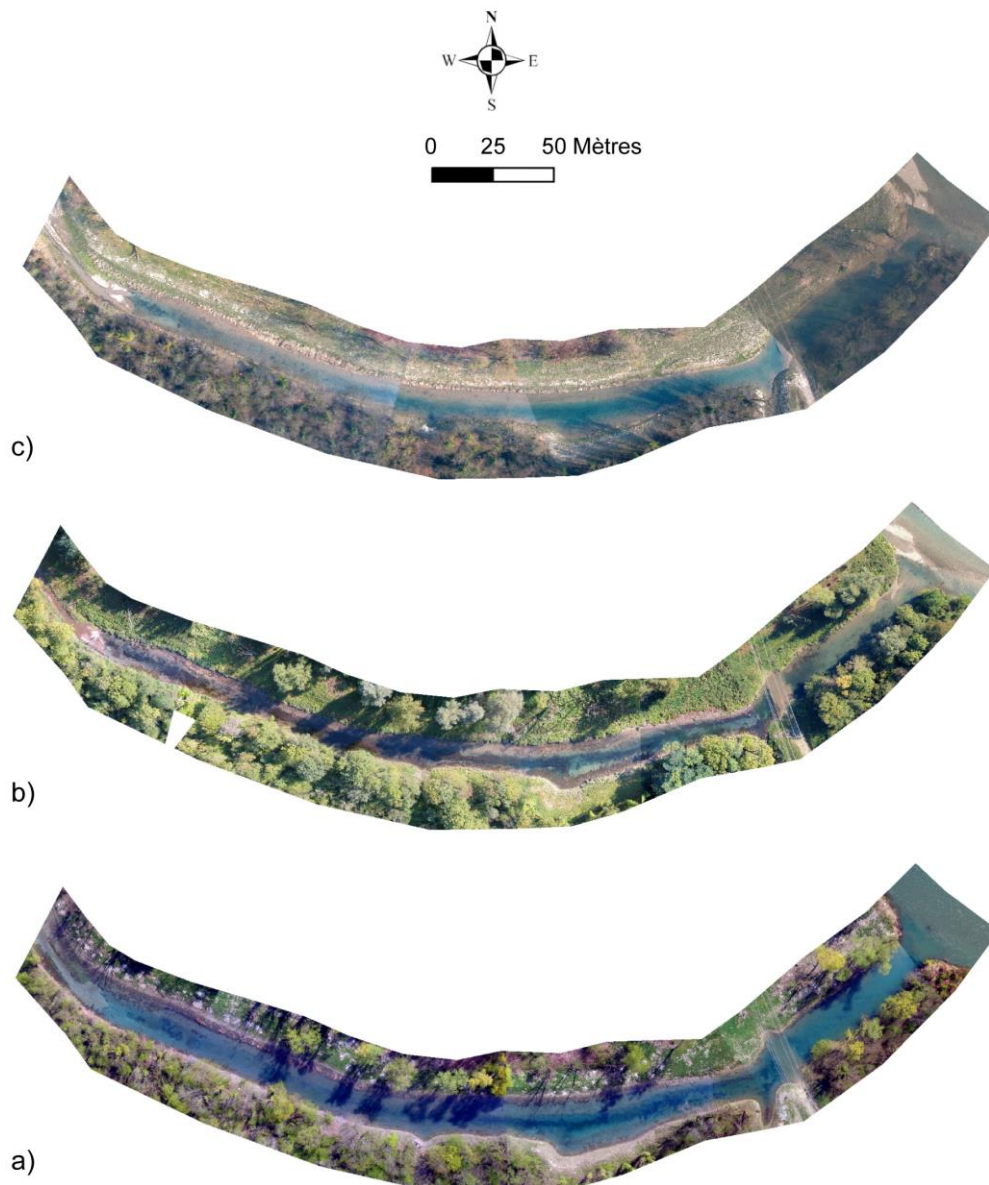


Figure 4-33. Mosaïque drone de la lône de la Malourdie, a) mission du 20/04/2006 – débit : 146 m³/s, b) mission du 29/09/2006 – débit : 52 m³/s, c) mission du 16/03/2007 – débit : 48 m³/s

3. Impacts des opérations d'essartage sur le site « les Grandes Iles »

Les opérations d'essartage réalisées annuellement affectent les sites traités. L'objectif de ce suivi est ainsi de mieux caractériser ces changements et de proposer éventuellement une modification des pratiques pour les rendre plus efficaces :

- quel est ainsi l'effet de l'essartage sur la végétation ?
- cet essartement a-t-il des effets variables sur la couverture végétale en fonction de la position altimétrique ?

- cet essartage favorise-t-il une remise en mouvement des sédiments et donc des changements topographiques significatifs ?

Afin de répondre à ces questions, des suivis de la couverture végétale et de la topographie ont été réalisés et leurs résultats comparés.

3.1. Méthode d'ajustement de la ligne d'eau

Les campagnes de mesures topographiques ont été réalisées à différents débits (tab. 4-5, page 199). Afin de pouvoir comparer les résultats, une ligne d'eau de référence a été définie pour les trois missions. Elle correspond au débit de 55 m³/s de la mission du 16 juin 2006. Les lignes d'eau des autres missions ont été rapportées à la ligne d'eau de ce débit de référence afin d'obtenir une même surface de comparaison pour une même pente de 0,21 % (fig. 4-34). Le tableau de la figure 4-36d (page 205) synthétise les résultats volumétriques restitués à partir des MNT corrigés. Les volumes initiaux de galets ont été conservés pour estimer la perte des volumes non corrigés correspondant à un niveau d'eau plus bas.

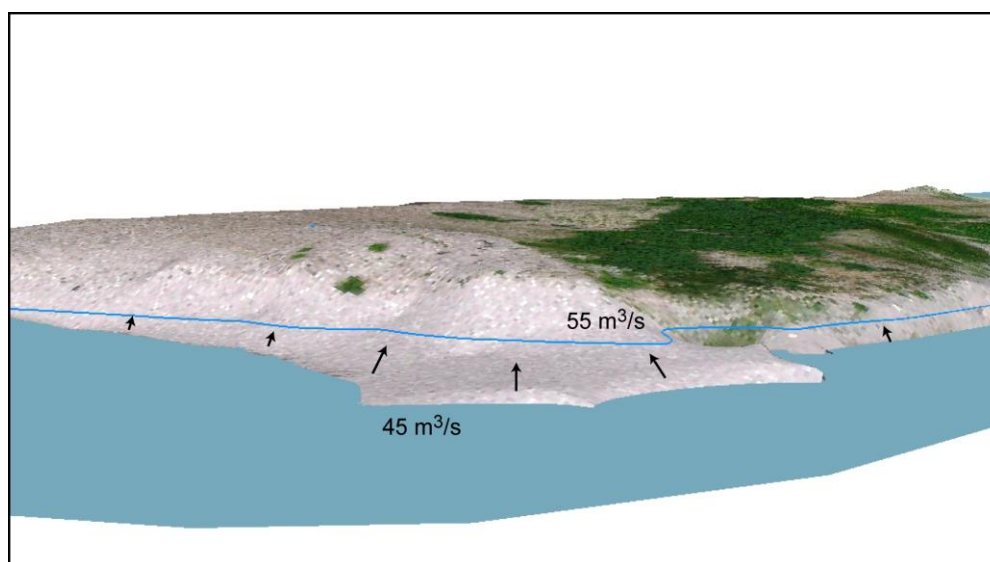
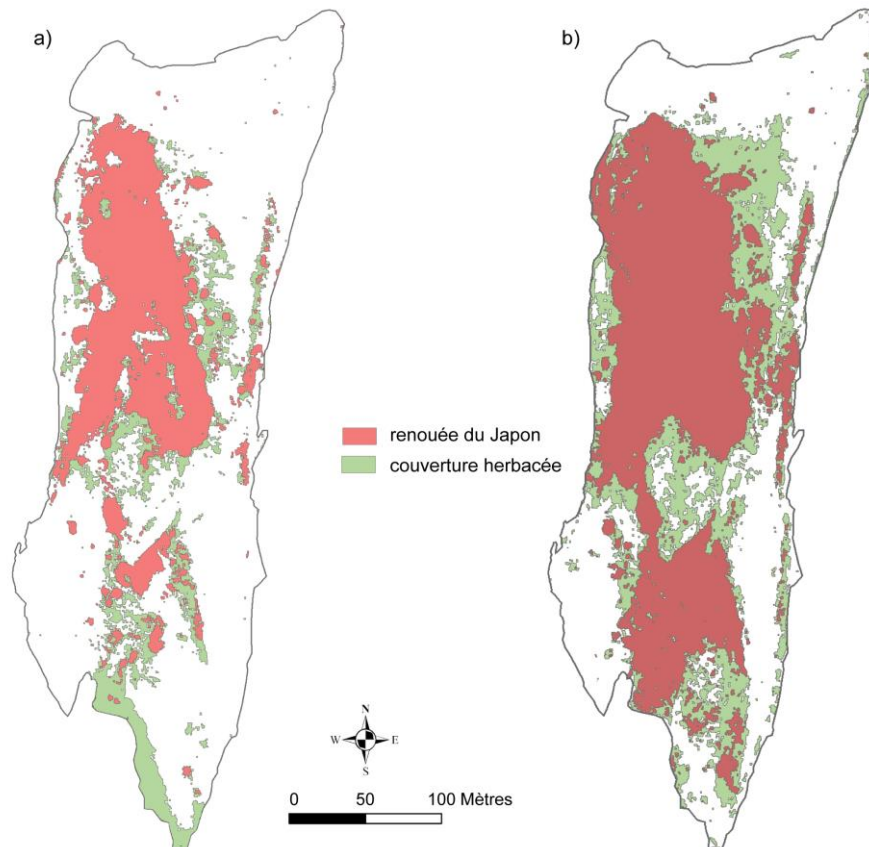


Figure 4-34. Ajustement des lignes d'eau

3.2. Caractérisation des changements de végétation par imagerie

Afin d'évaluer l'impact de l'entretien sur la prolifération des espèces invasives et plus particulièrement de la renouée du Japon, deux vols drone ont été effectués en juin 2006 et en juin 2007 pour établir une cartographie de la couverture végétale (tab. 4-5, page 199). La caractérisation de la végétation terrestre à partir de traitements d'image par classification pixel à pixel et orientée objet a été abordée dans la partie 3. Les comparaisons ont également été réalisées pour un même débit de référence (55 m³/s). Les résultats obtenus à l'échelle du banc sont présentés sur la figure 4-35.



	Mission du 16/06/06		Mission du 28/06/07	
	Superficie (m ²)	Taux de colonisation (%)	Superficie (m ²)	Taux de colonisation (%)
Renouée du Japon	15336	23	27190	40
Couverture herbacée	7359	11	13511	20
Banc de galets	67653	100	67653	100

Figure 4-35. Carte de la végétation terrestre pour un débit de référence de 139 m³/s, a) mission du 16/06/2006, b) mission du 28/06/2007

Trois classes ont été réalisées sur les cartes de végétation : la zone occupée par la renouée du Japon, une seconde zone à couverture herbacée regroupant différentes espèces (*Equisetum arvense* L., *Melilotus albus* Medik., *Populus nigra* L., *Salix* sp., *Polygonum lapathifolium* L., *Saponaria officinalis* L., *Chenopodium album* L., *Ambrosia artemisiifolia* L) et la zone non végétalisée. A partir de ces résultats, plusieurs observations ont pu être réalisées :

- l'agencement spatial des deux entités végétales est très homogène avec pour la renouée du Japon une localisation dans la partie amont et médiane du banc et pour la couverture herbacée une localisation préférentiellement en queue de banc (fig. 4-35a),
- la renouée présente une même implantation malgré sa destruction totale entre les deux dates. En effet, la comparaison des zones de repousse est identique (fig. 4-35ab),
- en revanche, la taille des taches végétales a augmenté sur la mission de 2007. Nous pouvons identifier trois taches de renouée (fig. 4-35b) : une

première, massive sur la partie haute du banc, une seconde, de moindre taille qui apparaît sur la partie la plus à l'aval et une troisième, plus linéaire qui s'étend également vers l'aval. Entre les deux dates, la superficie couverte par la renouée du Japon a doublé. Son taux d'occupation était ainsi de 40% en 2007 contre 23 % en 2006. La couverture herbacée progresse avec la même proportion mais par sur les mêmes espaces (20 % en 2007 contre 11 % en 2006).

L'absence de crues majeures durant la période de suivi n'a pas permis une remobilisation des sédiments et implicitement un déracinement de la végétation de banc. Cependant, les précédentes observations ont apporté des éléments nouveaux de réflexion sur la validité de l'opération d'entretien et de son mode opératoire concernant l'éradication de la renouée du Japon. Ces différents points seront discutés dans le chapitre C-5.

3.3. Evolution topographique du banc de galets

A partir des trois missions topographiques (tab. 4-5, page 199) et des MNT produits (fig. 4-36), un premier bilan de l'évolution inter-annuelle des volumes sédimentaires a pu être établi. Plusieurs observations peuvent être présentées :

- au cours de la période 2005 / 2006, une faible diminution de la masse sédimentaire du banc a été constatée (-2607 m³ soit 4,5 %) (fig. 4-36d). L'absence de crue majeure durant la période n'a pas permis de reprise sédimentaire. Durant cette période, seules quatre crues ont dépassé le module,
- au cours de la période 2006 / 2007, le volume sédimentaire du banc est resté à peu près constant, n'enregistrant qu'une très faible diminution estimée à 899 m³ soit 1 % du total. Durant cette période, seule une crue a dépassé le module.

Le bilan des trois missions topographiques ne représente donc qu'une perte de 5 % par rapport à la masse totale du banc.

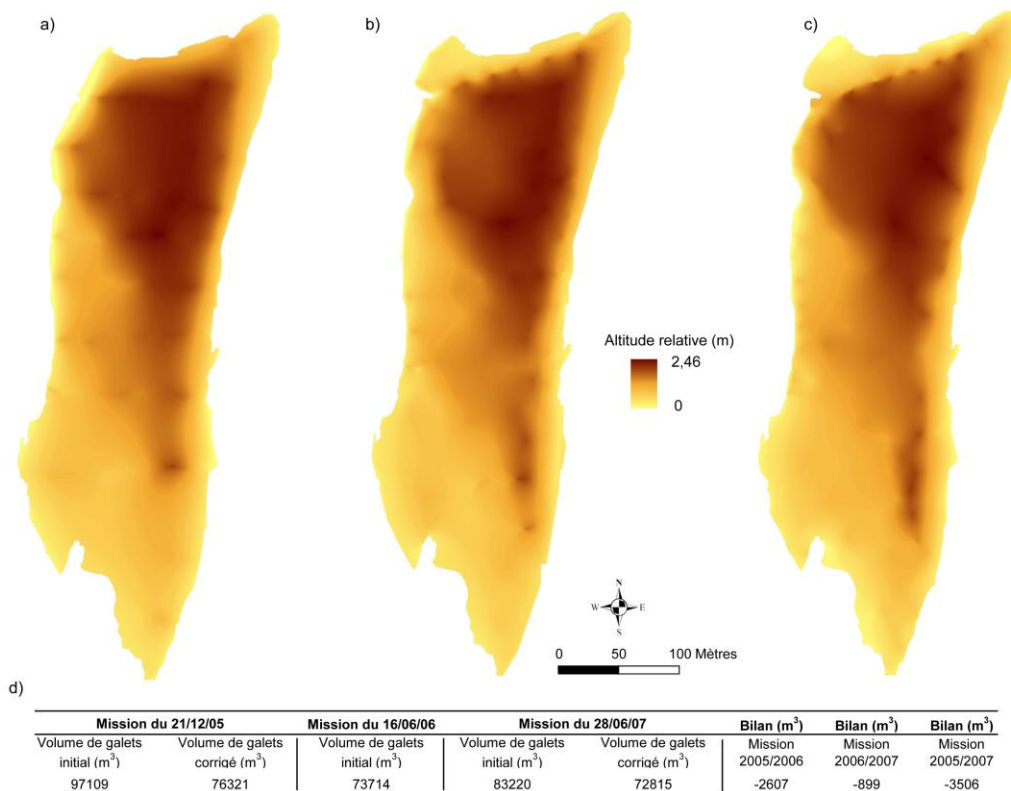


Figure 4-36. MNT et volumes sédimentaires stockés au dessus de la ligne d'eau correspondant à un même débit et une même pente de référence, a) mission du 21/12/2005, b) mission du 16/06/2007, c) mission du 28/06/2007, d) bilan des volumes

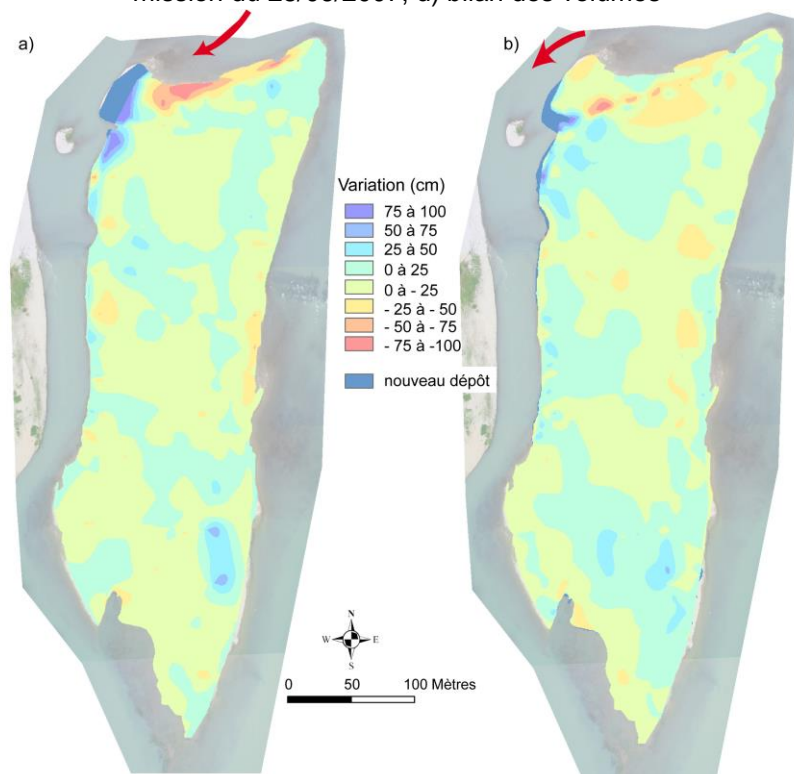


Figure 4-37. Carte des amplitudes topographiques pour un même débit et une même pente de référence. Comparaison des missions a) du 21/12/2005 et du 16/06/2006, b) du 16/06/2006 et du 28/06/2007

Afin d'estimer la mobilité intra-banc des sédiments, deux comparaisons ont été réalisées entre les périodes considérées (2005 / 2006 et 2006 / 2007) (fig. 4-37). Les résultats révèlent que les modifications topographiques ont été principalement localisées en tête de banc (fig. 4-37). Ce secteur est sous l'influence directe des écoulements provenant à la fois du Vieux Rhône et du chenal transversal. Pour la période 2005 / 2006, ces modifications se sont traduites par un transfert des sédiments formant une excroissance dans l'axe des écoulements du bras transversal (secteur bleu foncé, fig. 4-37a) et par la création d'un front d'érosion en lieu et place de cette zone de transfert. Sur la période suivante (2006 / 2007), l'exhaussement, constaté précédemment, a progradé dans le bras transversal prolongeant le dépôt créé sur la période précédente (fig. 4-37b). Le reste du banc n'a pas subi de modification topographique majeure.

Les faibles amplitudes topographiques constatées sur la période de suivi 2005 / 2007 valident l'estimation des volumes sédimentaires précédemment réalisées.

Lorsque nous associons les couvertures végétales (fig. 4-35, page 203) aux restitutions topographiques produites (fig. 4-36), plusieurs observations peuvent être menées (fig. 4-38) :

- l'agencement spatial de la renouée du Japon révèle que cette dernière privilégie les points topographiquement hauts comme premier lieu d'installation,
- après avoir colonisé les points hauts du banc en 2006, la renouée progresse vers la ligne d'eau, en 2007, comme l'illustre le déplacement de la valeur médiane de cette dernière vers les points topographiquement plus bas.

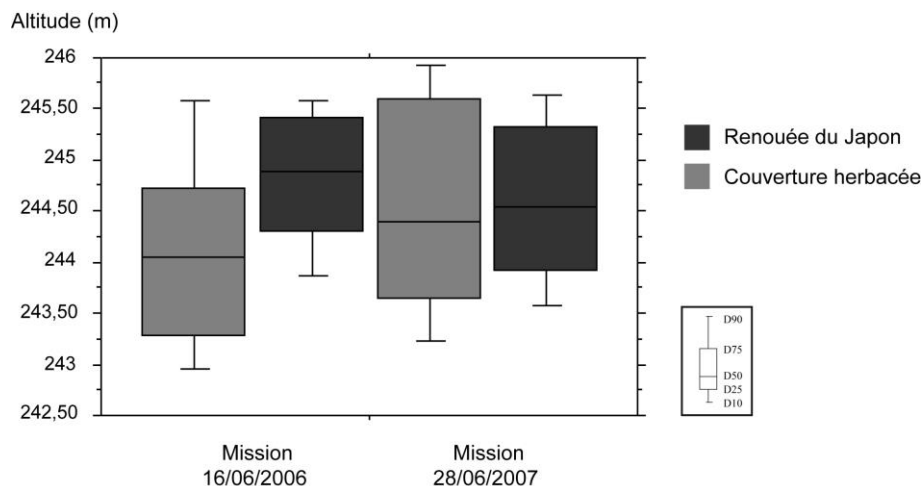


Figure 4-38. Variation altimétrique des unités végétales établies sur le banc de galets des Grandes Iles. Mission du 16/06/2006 : renouée du Japon n = 636 (densité : 0,2 pts/m²), unité basse n = 820 (densité : 0,33 pts/m²), p < 0,0001. Mission du 28/06/2007 : renouée du Japon n = 1093 (densité : 0,2 pts/m²), unité basse n = 848 (densité : 0,25 pts/m²), p < 0,0001

4. Suivi morphologique de la lône de la Malourdie

La restauration de la lône de la Malourdie en 2003 et l'augmentation des débits du Vieux Rhône en 2004 ont modifié les conditions d'alimentation de la lône et, par conséquent, les paramètres hydrologiques, morphologiques et biotiques qui la caractérisent.

Afin d'évaluer l'impact de ces modifications sur le fonctionnement de la lône, deux indicateurs de suivi ont été retenus et présentés dans le paragraphe C-2.1 :

- Quelle est l'évolution morphologique du chenal (exhaussement ou bien incision) ?
- Comment se répartit la végétation aquatique ? Et existe-il des variations saisonnières et inter-annuelles ?

La végétation aquatique n'est pas distribuée de manière aléatoire dans le plan d'eau et dépend des fréquences de connexion, des processus d'eutrophisation et de l'existence ou non d'apports phréatiques (Bornette et Rivoire, 2007). La connaissance de sa répartition spatiale permet d'évaluer la dynamique de l'écosystème de la lône et, par conséquent, sa durée de vie.

4.1. Calage méthodologique

Afin d'analyser l'évolution topographique du chenal restauré, deux restitutions bathymétriques (2006 / 2007) (fig. 4-39) ont été produites à partir des modèles développés dans la partie 3. Pour établir une comparaison cohérente entre les deux missions concernées, des ajustements ont été opérés :

- Ajustement planimétrique. La superficie du plan d'eau de la mission du 20 avril 2006 (débit : 146 m³/s) a été ramenée à celle du 16 mars 2007 (débit : 48 m³/s) (même principe que pour le paragraphe C-3.1),
- Agrégation des ombres communes. Les survols drone n'ayant pas été effectués à la même heure de la journée, l'emprise des ombres portées diffère d'une restitution à l'autre. Un masque commun a donc été appliqué aux deux cartes bathymétriques. Il représente 20 % du total des surfaces communes aux deux missions,
- Ajustement altimétrique. Le débit correspondant aux mesures bathymétriques du 26 avril 2006 (86 m³/s) a été rapporté au débit de référence des mesures bathymétriques réalisées le 26 avril 2007 (50 m³/s) selon le même principe que celui décrit dans le paragraphe C-3.1. La correction altimétrique a été déterminée à partir de relevés piézométriques réalisés dans le cadre du suivi sédimentaire des lônes du Haut-Rhône (Michalkova et Piégay, 2006) et à partir d'une loi « hauteur / débit » produite par la CNR. L'analyse de la courbe hauteur / débit a permis de déterminer une correction de 12,6 cm entre les deux débits. Celle-ci a été appliquée au modèle bathymétrique de la mission du 20 avril 2006.

4.2. Evolution de la topographie du chenal

Une fois les différentes corrections planimétriques et altimétriques prises en compte, une carte des variations altimétriques (fig. 4-40) issues de la différence des deux restitutions bathymétriques réalisées (fig. 4-39) a été produite.

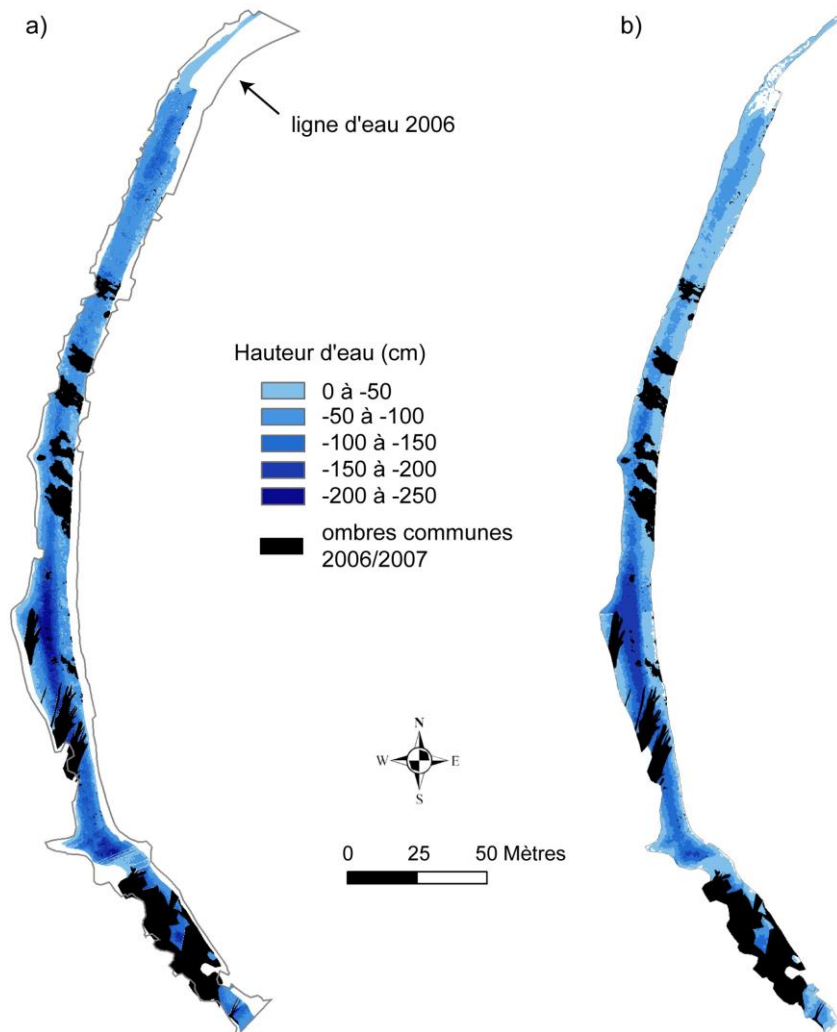


Figure 4-39. Restitution bathymétrique de la lône de la Malourdie pour un débit de référence de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, a) mission du 20/04/2006, b) mission du 16/03/2007

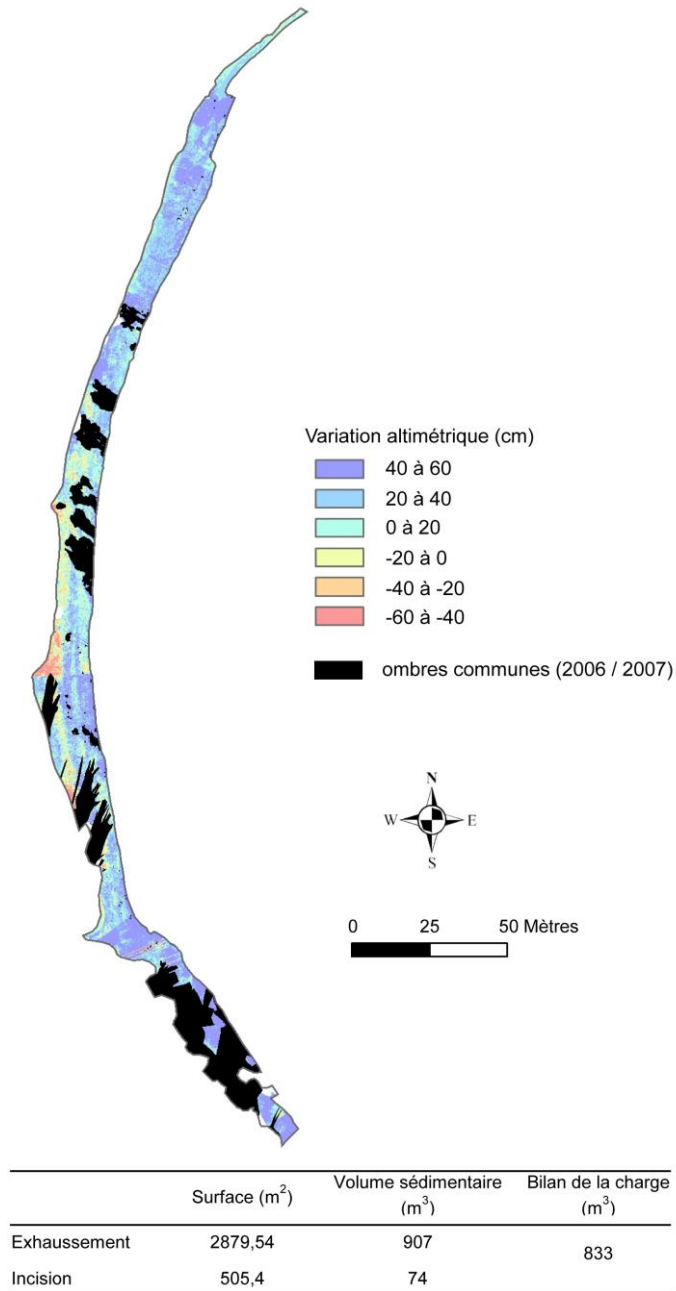


Figure 4-40. Carte des variations altimétriques de la lône de la Malourdie entre avril 2006 et mars 2007 et bilan des volumes sédimentaires

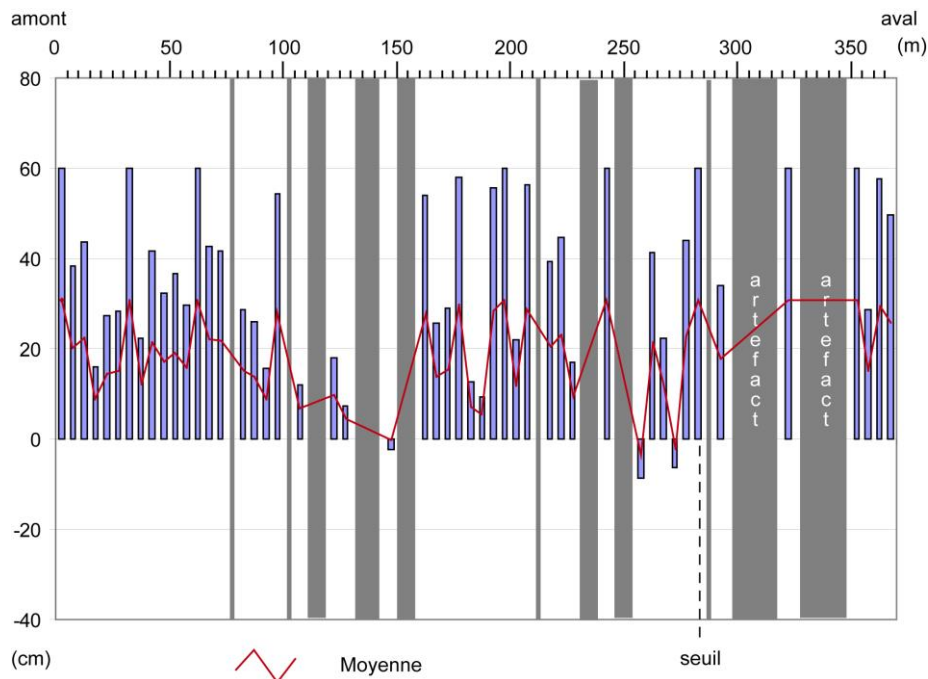


Figure 4-41. Variation longitudinale des différences d'altitudes (par rapport au talweg) des changements topographiques enregistrés par le fond de la lône entre avril 2006 et mars 2007

L'analyse de la carte des variations topographiques et des variations longitudinales d'altitudes met en évidence plusieurs points :

- une sédimentation généralisée est observée sur l'ensemble du chenal. Tous les secteurs du bras mort (amont, médian et aval) ont été touchés par ce processus. Le graphique (fig. 4-41) confirme cette tendance,
- de faibles superficies incisées sont localisées dans la partie médiane de la lône (rive droite), principalement au point d'inflexion du chenal (fig. 4-40). Plusieurs hypothèses peuvent être formulées concernant leur présence : i) la lône étant alimentée en permanence par l'exutoire du contre canal, les écoulements sont permanents (fig. 4-30, page 196) et peuvent favoriser l'instabilité des berges au point d'inflexion du chenal, ii) la zone d'incision la plus marquée (jusqu'à 60 cm) étant proche d'une jonction de deux images, les modèles bathymétriques peuvent être à l'origine de la surestimation des valeurs d'érosion. Les relevés topographiques réalisés sur le terrain ne peuvent confirmer ou infirmer ces deux hypothèses car ils ne sont pas localisés sur les superficies incisées.

Les volumes calculés à partir de la carte des variations altimétriques (tableau de la figure 4-40) mettent en évidence un bilan sédimentaire positif de 833 m³, ce qui représente une sédimentation annuelle uniforme d'environ 25 cm. D'après ces observations, le chenal de la Malourdie présente donc une dynamique d'atterrissement avec des processus de sédimentation relativement important. Ce constat est confirmé par plusieurs points de contrôle *in situ*.

4.3. Evolution de la couverture végétale aquatique

Les processus de végétalisation du chenal ont été étudié à l'échelle saisonnière à partir de deux missions drone réalisées en 2006 (fig. 4-42ab) et l'échelle interannuelle à partir de deux missions drone réalisées en 2006 et 2007 (fig. 4-42ac). Les espèces présentes n'ont pas pu être identifiées car la lône de la Malourdie n'a pas fait l'objet de relevé de végétation aquatique (Bornette et Rivoire, 2007). D'après les observations réalisées *in situ*, il s'agit d'espèces algales en fond de chenal et d'hélophytes (de type *Carex*) sur les berges.

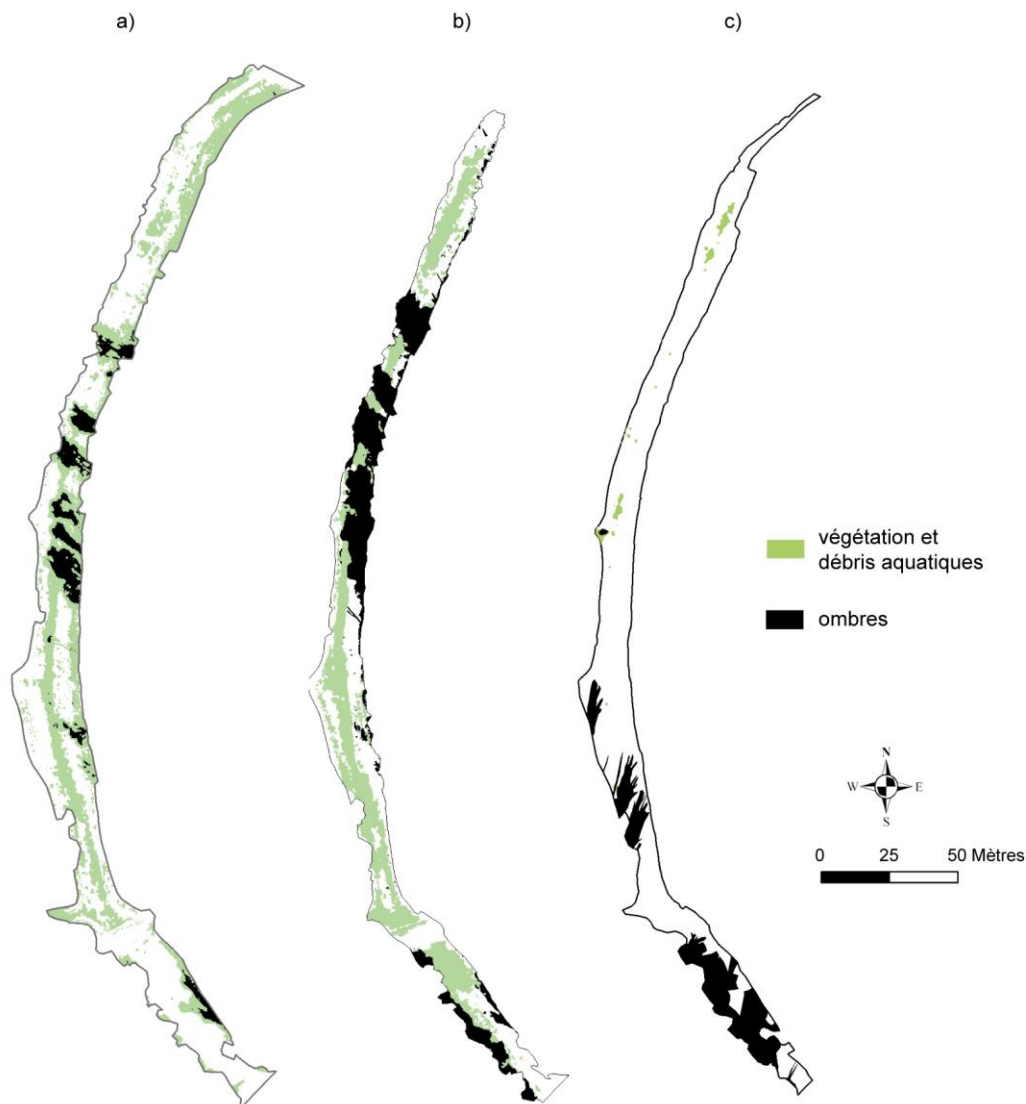


Figure 4-42. Cartes de la couverture végétale aquatique, a) mission du 20/04/2006 (débit : 146 m³/s), b) mission du 29/09/2006 (débit : 52 m³/s), c) mission du 16/03/2007 (débit : 48 m³/s)

Un calage surfacique du plan d'eau et des ombres portées a également été réalisé afin d'aboutir à un masque commun (fig. 4-43).

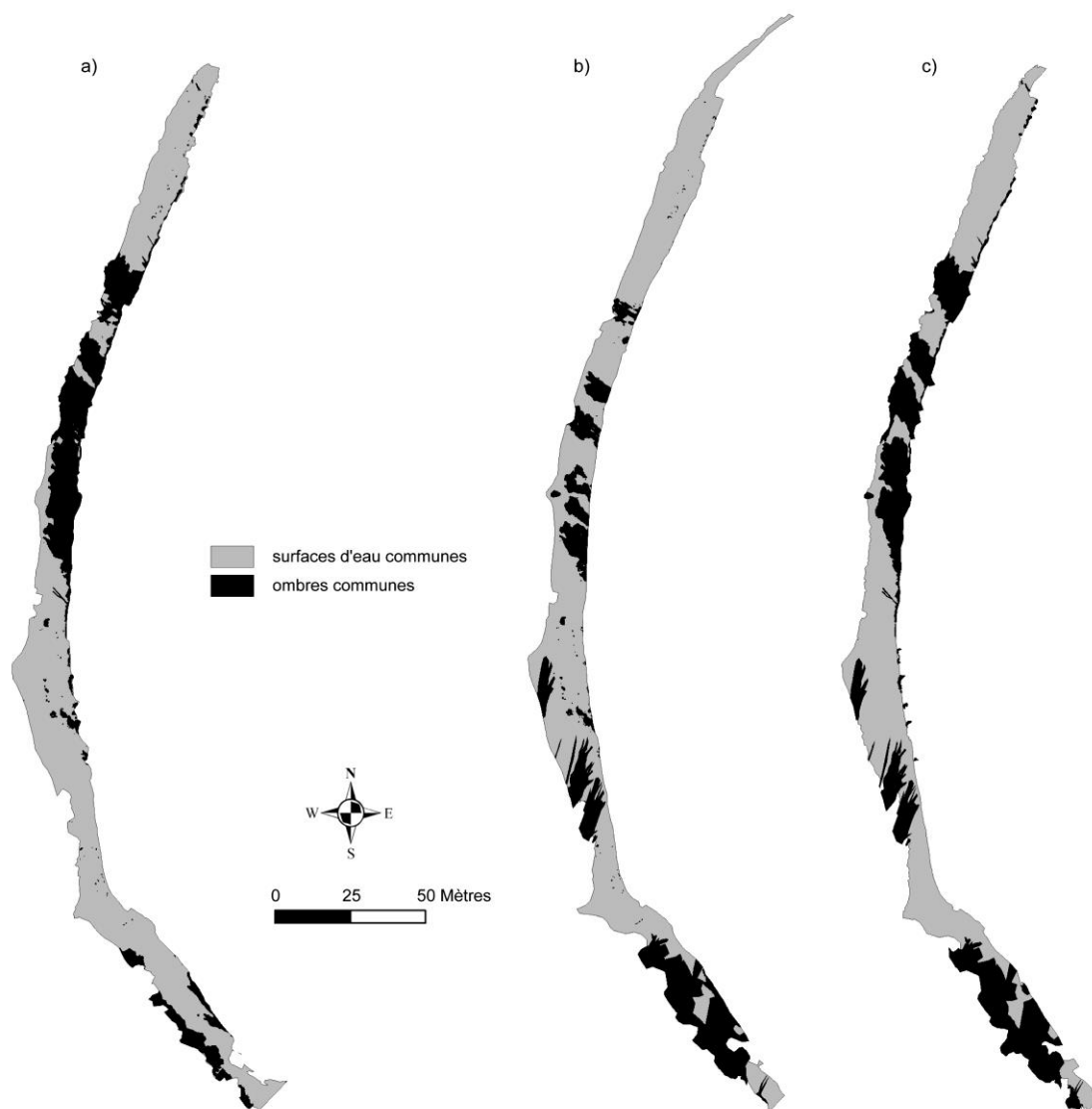


Figure 4-43. Masques de comparaison pour une même surface d'ombres, a) missions du 20/04/2006 et du 29/09/2006 pour un débit de référence de $52 \text{ m}^3/\text{s}$, b) missions du 20/04/2006 et mission du 16/03/2007 pour un débit de référence de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, c) missions du 29/09/2006 et mission du 16/03/2007 pour un débit de référence de $48 \text{ m}^3/\text{s}$

Le comportement saisonnier de la végétation aquatique a pu être analysé à partir des missions effectuées en 2006, car elles correspondent à deux stades différents de l'activité végétale (avril : début de l'activité végétale et septembre : fin de l'activité végétale). Les résultats cartographiques et statistiques (tab. 4-7, page 214) mettent en lumière deux principaux éléments :

- la végétation aquatique a progressé de 61 % entre les deux dates avec 19 % d'occupation végétale lors de la mission du mois d'avril et 31 % d'occupation végétale lors de celle de septembre (tab. 4-7a),
- la végétation aquatique se concentre essentiellement en milieu de chenal, puis progresse vers les berges au cours de l'année (fig. 4-42ab).

L'interprétation de ces observations doit être mesurée, car seuls 45 % de la superficie végétale a été retenu pour la mission du 20 avril 2006 (différence entre superficie initiale et superficie corrigée) (tab. 4-7a). Le niveau d'eau élevé englobait un fort pourcentage de végétation héliophyte (débit à 146 m³/s).

Une comparaison a ensuite été réalisée entre les couples de missions du 20 avril 2006 et du 16 mars 2007, correspondant à un contexte « inter-annuel » (tab. 4-7b) :

- la superficie végétale aquatique (-94 %) varie fortement entre les deux dates, passant de 891 m² à 56 m² en seulement un mois,
- la très faible couverture végétale observée sur la mission de mars 2007, avec 56 m² (1,26 % d'occupation du plan d'eau de référence), indique une disparition totale de la végétation aquatique pendant la période hivernale.

Pour cette comparaison, le taux de couverture végétale exploitable est plus significatif que précédemment (50 et 89 %).

Le troisième couple analysé (missions du 29 septembre 2006 et du 16 mars 2007) correspond à un contexte saisonnier malgré un enregistrement sur deux années (tab. 4-7c).

- le taux d'occupation de la végétation aquatique entre les deux dates (-96 %) traduit le début et la fin de l'activité végétale,
- la disparition totale de la végétation aquatique pendant la période hivernale (0,9 % d'occupation du plan d'eau de référence) confirme l'observation réalisée à partir des missions d'avril 2006 et de mars 2007.

Comme pour la comparaison précédente, le taux de couverture végétale exploitable est significatif (79 et 63 %, tab. 4-7c).

Tableau 4-7. Couverture aquatique observée (surfaces initiales et corrigées) pour un débit de référence de 50 m³/s et une même surface d'ombres, a) missions du 20/04/2006 et du 29/09/2006, b) mission du 20/04/06 et du 16/03/07, c) mission du 29/09/06 et du 16/03/07

a)

	Mission du 20/04/06				Mission du 29/09/06			
	Superficie initiale (m ²)	Superficie corrigée (m ²)	Taux de végétation exploitable (%)	Taux d'occupation (%)	Superficie initiale (m ²)	Superficie corrigée (m ²)	Taux de végétation exploitable (%)	Taux d'occupation (%)
Couverture végétale	1787	797	45	19	1329	1304	98	31
Bilan des superficies inter-date (%)	61							

b)

	Mission du 20/04/06				Mission du 16/03/07			
	Superficie initiale (m ²)	Superficie corrigée (m ²)	Taux de végétation exploitable (%)	Taux d'occupation (%)	Superficie initiale (m ²)	Superficie corrigée (m ²)	Taux de végétation exploitable (%)	Taux d'occupation (%)
Couverture végétale	1787	891	50	28	63	56	89	1,26
Bilan des superficies inter-date (%)	-94							

c)

	Mission du 29/09/06				Mission du 16/03/07			
	Superficie initiale (m ²)	Superficie corrigée (m ²)	Taux de végétation exploitable (%)	Taux d'occupation (%)	Superficie initiale (m ²)	Superficie corrigée (m ²)	Taux de végétation exploitable (%)	Taux d'occupation (%)
Couverture végétale	1329	1048	79	40	63	40	63	0,9
Bilan des superficies inter-date (%)	-96							

En associant les cartes bathymétriques aux couvertures végétales des missions du 20 avril 2006 et du 16 mars 2007 (pas de restitution bathymétrique pour la mission du 29 septembre 2007), nous observons que le début de l'activité végétale aquatique se fait principalement sur les profondeurs moyennes (fig. 4-44) avec une médiane correspondant à 80 cm. Lorsque l'activité végétale s'amplifie, le processus de colonisation glisse vers des profondeurs plus importantes pour occuper ensuite tous les niveaux topographiques du chenal (fig. 4-44).

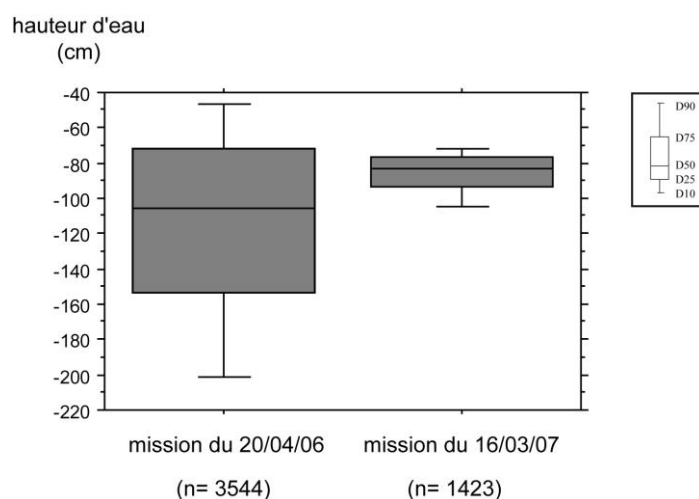


Figure 4-44. Répartition de la végétation aquatique en fonction des hauteurs d'eau ($p < 0,0001$)

Malgré le manque de missions inter-annuelles à date fixe, le suivi de la végétation révèle principalement une dynamique saisonnière. Les trois états montrent que le taux de couverture végétale aquatique fluctue énormément au cours d'une année. Il disparaît totalement durant la période hivernale.

5. Synthèse et discussion

5.1. Bilan des opérations d'entretien et de restauration

Les survols drone et l'application des traitements développés ont permis d'établir un premier diagnostic des opérations réalisées sur le Haut-Rhône dont les objectifs sont de faciliter les écoulements et la reprise des sédiments, de lutter contre les espèces invasives et d'améliorer le fonctionnement général des annexes fluviales.

5.1.1. Des actions d'entretien à ajuster

Le suivi des opérations annuelles d'essartage engagées par la CNR a démontré l'importance d'acquérir des états de référence aériens à échelle fine. La prise en compte de deux indicateurs de suivi (les variations topographiques et le taux de couverture végétale) a permis d'appréhender l'impact et l'efficacité de ces actions sur le milieu.

Les trois états topographiques effectués ont révélé que la morphologie du banc a peu été modifiée au cours de la période de suivi. Seule la partie amont, correspondant à la tête du banc, a subi un déplacement de charge vers le chenal transversal. La quantification des volumes a démontré que le banc s'était peu dégraissé (5 % de perte de charge entre décembre 2005 et juin 2007). Les matériaux n'ont donc pu être remobilisés. Ce constat doit être mesuré, car durant la période de suivi, il n'y a pas eu de forte crue (maximum enregistré à 899 m³/s pour un débit seuil de mise en mouvement estimé à 980 m³/s, Klingeman *et al.*, 1994).

Le suivi de la végétation par imagerie drone a permis de réaliser plusieurs constats :

- les mises à nu du banc par essartage n'ont pas limité la recolonisation végétale, bien au contraire. Le taux de couverture a atteint 44 % de la surface totale lors du premier relevé et 60 % lors du second (8 mois après essartage pour les deux états) soit une progression de 14 %,
- le remaniement du site a profité aux espèces rudérales, mais surtout aux espèces invasives telles que la renouée du Japon. En effet, sur les 44 % de couverture végétale enregistrée en 2006, 23 % est occupée par cette dernière. Ce chiffre atteint 40 % en 2007, soit un doublement de la superficie occupée,
- l'identification des deux unités végétales dominantes (peuplement mono-spécifique de renouée et couverture herbacée) révèle une même structure

spatiale d'un état à l'autre. Ce constat soulève donc un doute sur l'efficacité de l'essartage et plus précisément sur ses modalités d'application.

Ainsi, le bilan des actions d'entretien du site « les Grandes Iles », pour la période de suivi, permet de souligner plusieurs tendances. L'absence de crues majeures, énoncée précédemment explique que les volumes sédimentaires en place n'ont pas beaucoup bougé. Un suivi complémentaire de la topographie serait donc nécessaire pour affiner l'impact de l'entretien sur la sensibilité du banc à la remobilisation. Cet état de stabilité a pu être amplifié par la colonisation végétale du banc, qui favorise la fixation des matériaux. Malgré les actions d'entretien engagées, ce suivi a mis en évidence la forte prolifération de la renouée du Japon qui occupe l'espace aux dépens des autres espèces endogènes. Ce dernier point démontre que les modalités d'essartage appliquées sur le banc de galets ne sont pas adaptées aux objectifs préalablement fixés qui sont de limiter les surfaces de banc végétalisées pour favoriser les champs d'expansion de crues et combattre les espèces exotiques.

5.1.2. Une restauration qui reste à évaluer

Le suivi post-restauration de la lône de la Malourdie, réalisé par imagerie drone, est fondé sur des modèles bathymétriques empiriques et des traitements par classification radiométrique afin de retranscrire deux évolutions : la sédimentation et la dynamique végétale aquatique.

L'analyse des deux états bathymétriques a permis de démontrer que le chenal est en cours de comblement malgré les faibles crues enregistrées durant la période de suivi et malgré l'absence de données dans les zones d'ombre. Une moyenne de 25 cm de sédimentation a été calculée entre avril 2006 et mars 2007. Des mesures de terrain réalisées lors de précédentes campagnes topographiques par Michalkova et Piégay, (2007) ont révélé une sédimentation de 11 cm entre février 2006 et octobre 2006 et 5 cm entre cette dernière date et octobre 2007, (fig. 4-45). La comparaison des résultats souligne ainsi une surestimation de l'épaisseur moyenne des sédiments produits par les modèles. Malgré tout, ces derniers confirment la même tendance. De plus, Michalkova et Piégay, (2007) démontrent un ralentissement du processus de sédimentation (fig. 4-45).

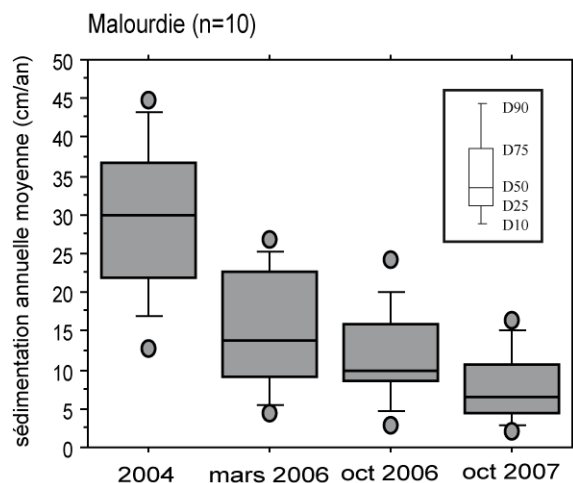


Figure 4-45. Sédimentation de la lône de la Malourdie à partir d'observations de terrain (Michalkova et Piégay, 2007)

La comparaison des superficies des couvertures végétales aquatiques calculées à partir des différentes missions doit être menée avec prudence, car la période de suivi ne porte que sur une seule année (d'avril 2006 à mars 2007) et le manque de points de comparaison à date fixe limite l'interprétation inter-annuelle des résultats.

Nous pouvons cependant établir plusieurs constats sur la période considérée. Les analyses surfaciques ont démontré une forte variabilité saisonnière de la couverture végétale avec une progression très rapide en début d'année (augmentation de la superficie de 94 % entre mars et avril) qui se poursuit jusqu'au maximum de la période végétale (augmentation de la superficie de 61 % entre avril et septembre) pour ensuite disparaître totalement pendant la période hivernale (environ 1 % de taux d'occupation au mois de mars).

Actuellement, le nombre d'états est très insuffisant pour comprendre ce qui résulte de l'effet saisonnier et de l'effet inter-annuel. Ainsi, plusieurs questions restent en suspens : l'exploitation végétale entre mars et avril est-elle habituelle ou exceptionnelle ? Le taux d'occupation observée en septembre 2006 est-il lui même particulier à cette année là ou bien est-il toujours le même d'une année à l'autre ?

5.2. Quelques préconisations pour améliorer les suivis actuels

Les constats réalisés précédemment démontrent que le protocole d'essartage appliqué sur les bancs de galets du Vieux Rhône est à améliorer et que les conditions de suivi de la lône restaurée sont à poursuivre afin de pouvoir enregistrer des données lors d'évènements hydrologiques significatifs. L'utilisation des images drone et les traitements mis en place dans le cadre de ce travail de recherche ont démontré leur intérêt et leur limite pour le suivi de certains indicateurs morphologiques. Dans cette perspective, plusieurs préconisations peuvent être formulées :

- *Concernant l'essartage des bancs de galets*

La période de suivi topographique n'a pas révélé de changements morphologiques importants, faute d'évènement hydrologique conséquent. Ainsi, les résultats obtenus n'étant pas suffisants, le suivi de la topographie doit être complété.

Les moyens techniques à utiliser dépendent de l'échelle spatiale à considérer. Ainsi, la technique de mesure par DGPS s'est révélée adaptée à l'échelle du site et permet d'optimiser efficacement le rapport coût / bénéfice. A cette échelle, la photogrammétrie par drone ne permet pas actuellement de satisfaire à ces exigences (Lejot *et al.*, 2007). Cependant, d'autres plates-formes radio-télécommandées sont en cours de validation (Delacourt *et al.*, 2007).

A l'échelle d'un tronçon de plusieurs dizaines de kilomètres, la technologie DGPS n'est plus adaptée et doit être remplacée par le système Lidar. Sous réserve d'un coût encore très élevé, le Lidar permet d'optimiser le rapport précision / temps pour produire des états topographiques à grande échelle. La généralisation de son application dans le cadre de projets de gestion des corridors alluviaux déjà menés sur la Loire moyenne (Ramirez, 2003), sur la River Dee en Angleterre (Jones *et al.*, 2007) ou actuellement en cours (programmation de missions Lidar sur l'ensemble de la plaine alluviale du Rhône et sur la basse vallée de l'Ain) valide cette option.

Le suivi topographique est à réaliser annuellement après chaque opération d'entretien. Un complément topographique peut être envisagé en fonction des régimes de crue. Un suivi prolongé du site « les Grandes Iles » sur une période de 3 ans permettrait d'enrichir les données déjà acquises et d'affiner l'impact des opérations d'essartage sur la mobilité sédimentaire. Cette période de suivi complémentaire devrait être suffisante pour permettre l'enregistrement d'une crue morphogène ($Q_{1,5}$).

L'identification des taches de végétation à l'échelle des sites étudiés (banc) ne peut être appréhendée qu'à partir de supports à Très Haute Résolution (centimétrique). Les fréquences d'acquisition jouent également un rôle prépondérant car les survols doivent couvrir au minimum les deux périodes annuelles d'activité végétale. L'imagerie drone est ainsi la seule à regrouper à la fois ce niveau de résolution et de fréquence de passage. Son utilisation, dans le cadre des programmes de suivi de restauration engagés ou bien dans d'autres programmes d'études à mener, est ainsi à encourager. Cependant, d'autres supports sont également à considérer tels que les satellites Quick-Bird, Ikonos, Orbview 5 et Spot 5 (cf. tab. 2.3, Partie 1). Pour ces derniers, le mode multi-spectral (avec différentes gammes de longueurs d'onde et notamment celles de l'infrarouge) permet une meilleure caractérisation des surfaces végétales palliant ainsi leur faible résolution par rapport à l'imagerie drone.

L'interrogation soulevée sur l'efficacité de l'essartage et, plus précisément, sur ses modalités d'application, reste à lever. Compte tenu des connaissances actuelles, il semble difficile d'éradiquer la renouée du Japon. Les solutions mécaniques ne sont considérées

comme satisfaisantes que si elles sont suivies de la reconstitution de peuplements forestiers et de ripisylves (noisetiers, fusains, saules, aulnes, frênes...) (AREME, 2003). En effet, il a été démontré que seule la plantation dense de ligneux combinée à un arrachage manuel de la renouée une fois par mois sur des zones expérimentales à Besançon et Villette-les Arbois, dans le Jura (AREME, 2003), permet de retrouver, au bout de 3 ans, l'état originel du site avant colonisation. Afin de savoir si les actions d'essartage actuelles ne favorisent pas l'expansion de la renouée du Japon, la préconisation envisagée serait d'établir un suivi expérimental sur deux bancs tests. Deux niveaux d'intervention seraient alors appliqués sur chacun des bancs :

- un essartage à l'échelle du banc afin que la totalité de la végétation soit détruite et que l'intégralité des galets soit mis à nu (action actuellement en vigueur),
- un essartage ciblé pour que seules les zones infectées par la renouée soient traitées. L'hypothèse avancée est que l'essartage provoque une dispersion des graines contaminant ainsi les secteurs non affectés.

Ces deux degrés d'intervention couplés à une couverture aérienne (un référentiel image) permettra, par comparaison, d'affiner les modalités de gestion des entretiens appliqués.

○ *Concernant la restauration des lônes*

Le suivi des zones humides par imagerie est dépendant de la résolution des supports utilisés. Comme il s'agit le plus souvent de chenaux de quelques dizaines de mètres de large (15 m en moyenne pour Malourdie) et souvent bordés d'une ripisylve pouvant parfois couvrir le plan d'eau lui-même (exemple des lônes de Brégnier-Cordon sur le Haut-Rhône), aucun des supports actuellement disponibles ne permet de caractériser tout un bras mort (entre 0,64 et 2,4 m de résolution pour Quick-Bird, en mode panchromatique et multi-spectral). Ainsi, l'outil drone est sous doute actuellement une des rares plates-formes à partir desquelles il est possible d'obtenir un suivi acceptable de la couverture végétale si la canopée n'est pas trop couvrante, tout en permettant, par ailleurs, la réalisation d'états bathymétriques.

Cependant, l'exploitation des modèles bathymétriques est difficile (mode multi-photos, ombres portées), ce qui conduit à préconiser une approche plus classique des restitutions topographiques dans le cadre de programmes de suivi (Levrat, 2005 ; Michalkova et Piégay, 2006, 2007). Malgré tout, cette approche classique doit être couplée à un référentiel image des sites suivis. Outre l'intérêt visuel, il permet de remettre les mesures topographiques dans le contexte hydrologique, morphologique et écologique de leur réalisation.

Conclusion générale

- 1. L'apport méthodologique des images THR pour l'étude des cours d'eau**
- 2. La restitution des unités fonctionnelles du système fluvial : une approche en 2D et en 3D**
- 3. L'évaluation des programmes de restauration**
- 4. Les perspectives scientifiques**

Les travaux et les réflexions développés dans le cadre de cette thèse avaient un double objectif : d'une part, explorer les potentialités de l'imagerie aérienne à très haute résolution pour caractériser les formes fluviales et d'autre part, suivre leur évolution et proposer de nouveaux indicateurs de suivi des opérations de restauration fluviale, sachant que ces supports se multiplient et permettent d'étudier des cours d'eau de plus petite taille, plus nombreux à l'échelle du réseau hydrographique.

Pour cela, nous avons été amenés à élaborer des protocoles de terrain et d'acquisition pour exploiter les images drone. A partir des différents traitements que nous avons appliqués, les résultats produits ont permis de cerner les avantages et les limites de cette technique. Nous avons pu également tester la robustesse des protocoles et méthodes de restitution développés dans le cadre de projets de restauration sur la basse vallée de l'Ain et sur le Haut-Rhône en Chautagne. Au terme de l'analyse, les réponses apportées permettent de formuler quelques conclusions susceptibles de lever certaines des interrogations posées par les gestionnaires sur les choix à opérer pour réhabiliter les cours d'eau dégradés et leurs annexes fluviales. Les buts que nous nous étions fixés initialement étaient :

- mettre en place un protocole d'acquisition à partir des images drone qui soit facilement reproductible,
- estimer les potentialités des images quant à la restitution de certaines unités du corridor fluvial, notamment la caractérisation de la végétation alluviale, la granulométrie et la topographie des bancs de galets, ainsi que la bathymétrie des chenaux et des bras morts,
- établir des suivis multi-temporels pour évaluer l'efficacité d'opérations de restauration et d'entretien, et notamment évaluer l'effet des recharges sédimentaires sur la géométrie du chenal, estimer les conditions de végétalisation aquatique et les niveaux d'eau d'une lône restaurée, et évaluer l'évolution topographique et la colonisation d'un banc de galets entretenu par essartage.

1. L'apport méthodologique des images THR pour l'étude des cours d'eau

L'analyse bibliographique révèle que l'imagerie aérienne et satellite a depuis longtemps été utilisée pour caractériser les formes fluviales et leur évolution au cours du temps. Les avantages et les limites de cette technologie ont ainsi déjà été mis en évidence par plusieurs auteurs (Chandler, 1999 ; Lane, 2000 ; Gilvear et Bryant, 2003 ; Ferguson, 2007). Nous avons également pu constater que les études ainsi réalisées ont principalement porté sur les rivières de grande taille et leur bassin versant, car jusqu'à présent, les capacités de résolution des images satellites optiques n'étaient pas suffisantes (Muller, 1993 ; Smith, 1997 ; Gomez *et al.*, 1997 ; Mertès *et al.*, 1993 ; Miranda *et al.*, 1998 ; Zhang, 2004 ; Hamilton, 2007 ; Gupta et Liew, 2007 ; Takagi *et al.*, 2007). La mise en place de nouveaux satellites à résolution submétrique est en train de changer cette situation (QuickBird, Ikonos). L'analyse de la littérature a démontré que c'est principalement les photographies aériennes qui ont été exploitées pour l'étude des formes fluviales car elles disposent d'une résolution adaptée et constituent une base de données historique importante (Downward *et al.*, 1994 ; Marston *et al.*, 1995 ; Gilvear *et al.*, 1995 ; Gurnell, 1997 ; Gomez *et al.*, 1997 ; Bryant et Gilvear, 1999 ; Citterio et Piégay, 2000 ; Lane *et al.*, 2000 ; Winterbottom et Gilvear, 2000 ; Puestow *et al.*, 2001 ; Liébault *et al.*, 2003 ; Perrez Corra, 2004 ; Dufour, 2005 ; Piégay *et al.*, 2005 ; Lassetre *et al.*, 2007).

Profitant des nouvelles avancées technologiques, portant à la fois sur les vecteurs et les capteurs embarqués, de récents travaux ont pu explorer des échelles spatiales de plus en plus fines (Westway *et al.*, 2003 ; Lane *et al.*, 2003 ; Chaponnière, 2004 ; Gilvear *et al.*, 2004) allant jusqu'à l'échelle des galets (Carbonneau *et al.*, 2006). L'approche retenue pour réaliser cette thèse s'inscrit pleinement dans le cadre de ces travaux. Le choix de la technologie drone est directement lié à ce besoin d'accroître les résolutions spatiales et les fréquences temporelles.

L'analyse que nous avons effectuée à partir des nombreuses images acquises lors des différentes missions permet de démontrer que le drone a de réelles capacités à fournir des précisions centimétriques pouvant couvrir toutes les gammes de résolution nécessaires à l'échelle spatiale des objets abordés (de 1 à 20 cm).

Malgré les limitations de vol liées aux conditions météorologiques, et plus particulièrement aux conditions aérologiques et pluviométriques, le drone s'est avéré être facilement mobilisable pour répondre aux événements hydrologiques et être opérationnel dans le cadre de programmes de suivi.

En revanche, l'exploitation des images drone nécessite une préparation terrain fastidieuse pour la mise en place de balises et pour leur géoréférencement, ce qui nécessite de mobiliser plusieurs personnes. Les contraintes de ce protocole pèsent sur l'efficacité de la technologie drone. Ce dernier point a été discuté et des solutions d'amélioration ont été proposées comme l'acquisition de points de contrôle identifiés par photo-interprétation une fois le vol effectué, ou bien la réutilisation des points acquis lors de précédents vols dans le cadre du suivi d'un même site.

2. La restitution spatiale des unités fonctionnelles du système fluvial : une approche en 2D et en 3D

La restitution spatiale des unités fonctionnelles du système fluvial est indispensable pour étudier les interactions qui existent entre la végétation (terrestre et aquatique), la granulométrie et la topographie (immergée ou exondée). Pour cela, nous avons fait appel à des opérations plus ou moins automatisées de traitement ou d'analyse d'image qui ont conduit au développement d'algorithmes en l'absence de procédures intégrées aux logiciels du marché. Quelle que soit la méthode utilisée, une validation *in situ* est toujours nécessaire pour calibrer les traitements. Afin d'exploiter au maximum les avantages liés à la résolution des images drone, nous avons exploré deux domaines d'application : la 2D (végétation et granulométrie des sédiments) et la 3D (topographie émergée et immergée).

Les tests menés sur la caractérisation de la végétation (terrestre et aquatique) révèlent que le choix d'une technique de classification dépend du potentiel de séparabilité des classes qui doivent être identifiées. Dans un contexte de faciès très imbriqués ou de formes complexes, la méthode par classification orientée objet donne les meilleurs résultats confirmant ceux de précédents travaux (Lennartz, 2004 ; Reddy, 2004). Elle permet en effet une séparation plus satisfaisante des classes grâce à une hiérarchisation par segmentation. Nous avons pu cependant constater que les classifications pixels à pixels sont très efficaces lorsque les objets à classer comportent des variations radiométriques marquées.

Dans le but d'étudier la répartition spatiale des sédiments, la restitution de la granulométrie des bancs de galets a été appréhendée par semi-variance 2D. De précédents travaux ont mis en évidence l'intérêt de cette approche (Carbonneau *et al.*, 2004 ; Carbonneau, 2005). Les tests que nous avons effectués à partir de missions réalisées à deux altitudes différentes ont révélé l'existence d'une forte relation entre la taille des objets étudiés et la résolution des supports utilisés à partir de différents paramètres d'ajustements (résolution, portée directionnelle, taille de la fenêtre et canaux de l'image).

Malgré des coefficients de corrélation semblables à ceux présentés dans de précédentes études (Carbonneau *et al.*, 2004 ; Verdu *et al.*, 2005), l'agencement granulométrique illustré par la représentation cartographique de la taille médiane des sédiments d'un banc ne fait pas apparaître de structure spatiale cohérente, comme la présence d'un gradient morphologique corrélé entre les D_{50} prédits et les différents niveaux topographiques explorés (toit du banc, pied de banc). Des améliorations méthodologiques ont été envisagées. Elles correspondent d'une part à une densification du nombre de points de calage terrain afin d'augmenter la robustesse des modèles et d'autre part à l'acquisition d'images ayant une gamme de résolutions plus étendues que celles déjà testées (inférieures à 3 cm/pixel et supérieures à 10 cm/pixel).

Une restitution en 3D des surfaces émergées par photogrammétrie a révélé les limites de la technologie drone. La reproductibilité d'images basées sur des paramètres de vol prédéfinis (taux de recouvrement fixe, altitude constante, vol rectiligne) est impossible. Le

seul argument pouvant justifier une telle approche est la très haute résolution des images acquises. En effet, sur les deux couples stéréoscopiques exploitables, la précision altimétrique des MNT produits a atteint une moyenne de 5 et de 20 cm. A cette échelle, nous avons pu retranscrire la microtopographie de bancs de galets ainsi que certains détails de la végétation terrestre, et notamment ceux d'un bois flotté (tronc et système racinaire).

Face aux problèmes rencontrés à partir des images testées, nous en avons conclu que le drone de la famille des Pixy n'est pas, en l'état, adapté à produire des restitutions par photogrammétrie permettant de couvrir un tronçon fluvial suffisamment important pour pouvoir répondre à des questions opérationnelles.

Une restitution en 3D de surfaces immergées a également été réalisée à partir de modèles bathymétriques empiriques. Les bathymétries qui ont été produites à partir des images drone ont une qualité comparables à celles acquises à partir d'autres vecteurs (Winterbottom et Gilvear, 1997 ; Brasington *et al.*, 2003 ; Westaway *et al.*, 2003 ; Marcus *et al.*, 2003 ; Chaponnière, 2004 ; Carbonneau *et al.*, 2006). Leur analyse a permis de formuler plusieurs observations : les coefficients de détermination sont très variables d'un modèle à l'autre (de 0,59 à 0,98). Cette variabilité est étroitement liée aux conditions physiques du milieu (ombres portées, évaporation, turbulence, turbidité), à la nature du *substratum* et au mode multi-photos (exposition lumineuse variable entre images) qui a un fort impact sur certains modèles produits. Ce constat a débouché sur la mise en place de modèles bathymétriques par substrat et par image.

L'analyse critique des traitements réalisés sur différents sites-test permet donc de formuler plusieurs préconisations afin de garantir des restitutions bathymétriques optimales. Ces préconisations portent sur les conditions météorologiques et hydrauliques et sur la stratégie d'échantillonnage des mesures de hauteur d'eau en fonction de la variété du *substratum* en place (sédiments grossiers ou fins, affleurements calcaires ou marneux, végétation algale de fond de chenal).

Ces types de restitution, difficiles à acquérir à une échelle fine, permettent d'appréhender la topographique du lit mineur, information primordiale pour comprendre les processus alluviaux, définir la qualité des habitats aquatiques et participer à l'amélioration des modèles hydrauliques.

3. L'évaluation des programmes de restauration

Durant les 20 dernières années, l'évaluation des opérations de restauration des zones humides a été essentiellement abordée sous un angle écologique (National Research Council, 1992 ; Henri et Amoros, 1995, 1996, 2001 ; Henri *et al.*, 2002 ; Amoros *et al.*, 2005 ; Bornette et Rivoire, 2007). Cette absence de données géomorphologiques a été également constatée dans le cas d'opérations de recharge artificielle de charge de fond. Celle-ci est encore une procédure expérimentale dont le bénéfice écologique est difficilement prévisible (Bunte, 2004).

Dans le cadre des programmes de restauration et d'entretien réalisés sur l'Ain et le Haut-Rhône (programme Life Nature Ain et Plan Décennal de Restauration Ecologique et Hydraulique du Rhône), l'étude qui a été menée à partir d'images drone a pour but d'identifier les changements morphologiques résultant de ces actions de recharge.

Le suivi par imagerie des sites de recharge et de leur tronçon aval sur l'Ain permet d'établir un diagnostic de l'efficacité des travaux engagés. Ainsi, nous avons observé, à partir des cartes bathymétriques produites, qu'une partie des 22500 m³ de sédiments réintroduits a été remobilisée pendant les crues (Q_{1,5}). A partir de la comparaison de ces mêmes cartes bathymétriques, nous avons pu estimer que la distance parcourue par les sédiments remobilisés s'étend de 230 m à 380 m. Ces valeurs sont ainsi proches de celles présentées par d'autres auteurs (Petit *et al.*, 1996 ; Merz *et al.*, 2006 ; Rollet, 2007). Nous avons également constaté que seuls les secteurs à proximité des sites de recharge ont été affectés par la réintroduction des sédiments. Le bénéfice de ces actions à l'échelle de la basse vallée a donc une portée spatiale très limitée. Seule une réintroduction annuelle récurrente permettrait de ralentir significativement le déficit actuel.

L'application de l'imagerie drone sur le Haut-Rhône nous a permis d'établir un premier diagnostic des opérations de restauration et d'entretien. Plusieurs tendances ont pu être soulignées.

La lône restaurée est en cours d'atterrissement, ce processus a été mis en évidence par les restitutions bathymétriques et confirmé par de précédentes campagnes de mesures topographiques. A partir des cartes de végétation aquatique produites, seule une colonisation saisonnière a pu être observée dans le plan d'eau. Des survols complémentaires permettraient d'analyser le processus de colonisation d'une année à l'autre.

Le suivi des masses sédimentaires du site des Grandes Iles a révélé une très faible modification de la topographie du banc, probablement en raison de l'absence de crues majeures durant la période de suivi. Nous pouvons également supposer que cette stabilité a pu être amplifiée par la colonisation végétale du banc. En effet, les cartes d'occupation végétale produites à partir des images drone ont mis en évidence la forte prolifération de la renouée du Japon aux dépens des autres espèces endogènes. Nous avons pu constater un doublement des surfaces couvertes. Ce constat démontre que les modalités d'essartage appliquées sur le banc de galets ne permettent pas, en l'état, de limiter les surfaces végétalisées.

Les investigations que nous avons menées sur l'Ain et la Chautagne, devaient permettre d'évaluer le bénéfice de ces actions de restauration afin de mieux identifier le temps nécessaire aux ajustements et les conditions-seuils au-delà desquelles les bénéfices écologiques sont observés et d'engager une réflexion sur la définition d'indicateurs de suivi. Le tableau 5-1 présente les indicateurs qui ont pu être définis à partir des paramètres de suivi extraits des images drone ainsi que les questions qui ont été formulées au début de ce travail et celles auxquelles nous avons pu répondre.

Tableau 5-1. Synthèses des questions soulevées dans le cadre des suivis, des indicateurs produits et des paramètres extraits à partir des images drone

Questions initialement posées	Questions auxquelles nous avons pu répondre	Processus évalués	Secteurs concernés	Indicateurs	Paramètres
Quelles sont les conséquences morphologiques de la réintroduction artificielle de sédiments dans le chenal ?	Quel est l'impact de la recharge sur les <i>substratum</i> rocheux de fond de chenal ?	Déficit sédimentaire	Chenal	Présence et évolution de dalles et d'affleurements rocheux	Superficie
	Quel est l'impact de la recharge sur la topographie du lit mouillé ?	Incision / exhaussement	Chenal	Evolution des hauteurs d'eau pour un même débit	Bathymétrie
	Quelles sont les distances parcourues par les sédiments ?	Mobilité sédimentaire	Chenal	Répartition des masses d'eau pour un même débit	Bathymétrie
	La recharge a-t-elle eu un impact sur la répartition des écoulements ?	Elargissement / rétraction	Chenal	Evolution de la largeur du chenal	Superficie
	La recharge a-t-elle occasionné la création de nouveaux bancs ?	Erosion / engraissement	Bancs de galets	Présence et évolution des bancs de galets	Superficie
Quelle est la durée de vie des îlons restaurés ?	Le chenal est-il en cours de comblement ?	Erosion / atterrissement	Bras mort	Evolution des hauteurs d'eau	Bathymétrie
Quelles sont les conditions d'habitat des îlons restaurés ?	Quelle est la dynamique saisonnière de la végétation aquatique ?	Colonisation végétale	Bras mort	Taux de recouvrement végétal aquatique	Superficie
Quel est l'impact des opérations d'essartage sur les bancs de galets ?	L'essartage favorise-t-il la remobilisation des sédiments ?	Erosion / engraissement	Bancs de galets	Topographie du banc	Epaisseur / largeur
	L'essartage limite-t-il la colonisation végétale ?	Colonisation végétale		Taux de recouvrement végétal terrestre	Superficie

4. Les perspectives scientifiques

Les nouvelles résolutions offertes par le drone, et plus généralement par les plates-formes radio-télécommandées, ouvrent de multiples champs d'exploration pour l'étude des formes fluviales et notamment leur évolution temporelle compte tenu de la flexibilité de ces plates-formes en matière d'acquisition. La richesse des acquisitions a laissé entrevoir la possibilité d'étudier d'autres objets que ceux abordés dans le cadre de cette thèse. Ainsi, plusieurs programmes de recherche engagés sur la Drôme ont été récemment lancés à partir des images acquises par le drone. C'est le cas d'études portant sur le suivi du bois morts (MacVicar *et al.*, en cours) et sur la caractérisation des forêt alluviales (Dunford *et al.*, en cours).

Les suivis opérationnels ont permis d'identifier un certain nombre d'indicateurs mis en avant précédemment. A titre d'exemple, Krausse et McBain (2003) ont listé les incertitudes hydro-morphologiques qui pouvaient être liées à une recharge sédimentaire en se basant sur le retour d'expérience de projets de restauration :

- Comment quantifier à court terme le volume de la recharge et comment estimer son comportement en fonction des faciès morphologiques du tronçon impacté (seuils, mouilles, affleurements rocheux) ? Plus généralement, comment choisir le site de recharge le plus approprié ?
- Quelle est la distance de transport des sédiments ?
- Quelle est la taille des particules à introduire ?
- Quels sont les outils les plus appropriés pour établir un suivi de la charge ?
- Sur quelle période les suivis doivent-ils être réalisés ?
- Quelles sont les techniques de recharge les plus appropriées ?

- Les simulations des modèles hydrauliques sont-elles suffisamment précises dans le cadre de préconisations de recharge ?

De nombreuses questions restent ainsi en suspend. Là encore les perspectives de recherche sont extrêmement vastes et couvrent plusieurs champs disciplinaires. Ainsi, l'objectif est de poursuivre et d'affiner les suivis en cours afin de lever certaines de ces interrogations. Ces suivis doivent être également appliqués sur d'autres sites de restauration pour confirmer les diagnostics établis et pour renforcer l'évaluation des indicateurs morphologiques déjà définis.

Dans cette optique, un nouveau projet de suivi d'une recharge sédimentaire à partir d'images drone sur le Rhin est en cours d'élaboration. Il permettra de renforcer les connaissances déjà acquises et d'éprouver les indicateurs morphologiques produits dans le cadre de notre travail.

Enfin la définition de nouveaux indicateurs pouvant être extraits à partir d'images aériennes ou satellites (Wiederkehr, thèse en cours) permettra d'accroître la connaissance des processus éco-morphologiques indispensable pour évaluer les potentialités de restauration des écosystèmes fluviaux et pour définir les modalités de leur restauration.

Références bibliographiques (334)

- Adams J. (1979). Gravel size analysis from photographs. *Journal of the Hydraulics Division*, 10 : 1247-1255.
- Adam P., Debais N., Malavoi J.R. (2008). *Manuel de restauration hydrologique des cours d'eau*. Agence de l'eau Seine Normandie, 64 p.
- Amoros C., Elger A., Dufour S., Grosprêtre L., Piégay H., Henry C. (2005). Flood scouring and groundwater supply in rehabilitated side-channels of the Rhône River, France. *Archiv Für Hydrobiologie Suppl.*, 15 (155) : 147-168.
- Amoros C. et Petts G.E. (1993). *Hydrosystèmes fluviaux*. Paris, Masson, 300 p.
- Amoros C., Roux A.L., Reygrobellet J.L., Bravard J.P., Pautou G. (1987). A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regulated Rivers : research & management*, 1 : 17-36.
- André S., Doledec S., Lamouroux N., Merigoux S., Olivier J.M. (2003). *Suivi Scientifique du Programme Decennal de Restauration Ecologique et Hydraulique du Rhône. Vieux Rhône et Lône de Chautagne : Caractérisation de l'état initial*, Rapport d'étude pour le compte de la Compagnie Nationale du Rhône, 95 p.
- Andrefouët S. (2002). Un bilan de la télédétection appliquée aux milieux coralliens. *Océanis*, 26 (3) : 311-349.
- Andrefouët S. et Roux L. (1998). Characterization of ecotones using membership degrees computed with a fuzzy classifier. *International journal of Remote Sensing*, 19 (16) : 3205-3211.
- Antonelli C. (2002). *Flux sédimentaires et morphogénèse récente dans le chenal du Rhône aval*. Thèse Université Aix-Marseille, 277 p.
- Aranuvachapun S. et Walling D.E. (1988). Landsat-MSS radiance as a measure of suspended sediment in the Lower Yellow River (Hwang Ho). *Remote Sensing of Environment*, 25 : 145-165.
- AREME (2003). *Plantes envahissantes de la région méditerranéenne*. Agence Méditerranéenne de l'Environnement - Région Languedoc-Roussillon, Agence Régionale pour l'Environnement Provence - Alpes - Côte d'Azur, 51 p.
- Arrighi L. (2004). *Stéréophotogrammétrie appliquée aux zones immergées pour la reconstitution de la topographie de lit de rivières : Application à la Durance*. Mémoire de DEA « Systèmes Spatiaux et Environnement », ENGEES, 94 p.
- ASCONIT (2006). *Etude bilan, évaluation et perspectives du contrat de rivière Drôme Haut Roubion n°2 et du SAGE Drôme - Phase 2 : Bilan technico-financier des actions menées sur les milieux aquatiques depuis 1998. Rapport d'étude pour le compte de la Communauté de Commune du Val de Drôme*, 98 p.
- Asseline J., De Noni G., Chaume R. (1999). Note sur la conception et l'utilisation d'un drone lent pour la télédétection rapprochée. *Photo Interprétation*, 37 : 3-9.
- Aubry P. et Piégay H. (2001). Pratique de l'analyse de l'autocorrélation spatiale en géomorphologie : définitions opératoires et tests. *Géographie Physique et Quaternaire*, 55 : 115-133.
- Baghdadi N., David A., Oliveros C., Gratiot N. (2004). Apport de l'imagerie spatiale optique et radar pour la cartographie des bancs de vase en Guyane française. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 75, 27-42.
- Bainbridge S. J. et Reichelt R.E. (1988). An assessment of ground truth methods for coral reef remote sensing data. *Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium 2*: 439-444.
- Baltsavias E.P. (1999). Airborne laser scanning : existing systems and firms and other resources. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54 : 164-198.
- Baratoux D., Delacourt C., Allemand P. (2001). High-resolution digital elevation models derived from Viking Orbiter images: Method and comparison with Mars Orbiter Laser Altimeter Data. *Journal of Geophysical Research*, 106 (E12) : 927-941.
- Baril D. (2000). Milieu aquatique - état initial et prévision d'impact dans les documents d'incidences. *Conseil supérieur de la pêche, collection mise au point*, 316 p.
- Barlaup B.T., Gabrielsen S.E., Skoglund H., Wiers T. (2006). *Addition of spawning gravel a means to restore spawning (Salmo salar L.), and anadromous and resident brown trout (Salmo trutta L.) in regulated rivers*. International Conference on Riverine Hydroecology: Advances in Research and Applications, 14th-18th August 2006, University of Stirling Scotland.
- Barnaud G. (1995). A l'interface de la pratique et de la théorie : l'écologie de la restauration. *Natures Sciences Sociétés*, 3 (hs), 36-50.
- Bates P.D. et De Roo A.P.J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1/2) : 54-77.
- Bazin P. et Barnaud G. (2002). Du suivi à l'évaluation : A la recherche d'indicateurs opérationnels en écologie de la restauration. *Revue d'écologie (Terre & Vie)*, supplément 9, 201-224.
- Bierwirth P.N., Lee T.J., Burne R.V. (1993). Shallow sea-floor reflectance and water depth derived by unmixing multispectral imagery. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 59(3) : 331-338.
- Birkett C. (1998). Contribution of the Topex NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands. *Water Resources Research*, 34 : 1223-1239.
- Blanc X., Pinteur F., Sanchis TH. (1989). Conséquences de l'enfoncement du lit de l'Arve sur les berges et les ouvrages ; bilan général des transports solides sur le cours d'eau. *La houille Blanche*, 3-4 : 226-230.
- Blott J.S. et Pye K. (2001). Gradstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1237-1248.
- Boldo D. (2003). *Fabrication de vraies ortho-images et correction des ombres*. Bulletin d'information de l'IGN, 74.

- Bornette G., Amoros C., Piégay H., Tachet J., Hein T. (1998). Ecological complexity of wetlands within a river landscape. *Biological conservation*, 85 : 35-45.
- Bornette G., Heiler G. (1994). Environmental and biological responses of former channels to river incision : a diachronic study on the upper Rhône river. *Regulated Rivers : research & management*, 9 : 79-92.
- Bornette G., Rivoire E. (2007). Analyse fonctionnelle des systèmes restaurés - Développement de modèles prédictifs utilisables en restauration fluviale. Rapport pour le compte de la Compagnie Nationale du Rhône, chapitre 3, 29p.
- Boyer M. Piégay H. (2003). Réhabilitation, restauration et entretien des ripisylves. In H. Piégay, G. Pautou, C. Ruffioni (eds), *Les forêts riveraines des cours d'eau : écologie, fonctions, gestion*, IDF, Paris : 39-413.
- Boyer M. (1998). La gestion des boisements de rivières. Fascicule 1 : Dynamique et fonction de la ripisylve. *Guide technique N°1 - SDAGE Bassin Rhône Méditerranée Corse*, 45 p.
- Brandt S.A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40 : 375-401.
- Brasington J., Langham J., Rumsby B. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53 : 299-316.
- Brasington J., Rumsby B.T., Mcvey R.A. (2000). Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25 : 973-990.
- Brasington J. et Smart R.M.A (2003). Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 : 231-247.
- Bravard J.P. (1981). *La Chautagne*. Institut des études rhodaniennes des universités de Lyon, 182 p.
- Bravard J.P. (1986). La basse vallée de l'Ain : dynamique fluviale appliquée à l'écologie. In : Roux A.L. (ed.), *Documents de cartographie Ecologiques, recherches interdisciplinaires sur les Ecosystèmes de la basse-plaine de l'Ain (France potentialités évolutives et gestion)*, 29: 17-43.
- Bravard J.P. (1985). *Le Haut Rhône français, dynamique naturelle et impacts des travaux d'aménagement d'un fleuve et de sa vallée*. Thèse d'Etat, Université Lyon 3, 800 p.
- Bravard J.P. (1987). *Le Rhône du Léman à Lyon*. La manufacture (ed), 452 p.
- Bravard J.P. (1991a). La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières. *La houille Blanche*, 7-8 : 515-521.
- Bravard J.P. (1991b). Où sont passées les rivières ? *Alpes Magazine*, 12 (Nov-Dec) : 85-91.
- Bravard J.P. (1994). *L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles*. Revue de Géographie de Lyon, 69 (1) : 5-10.
- Bravard J.P., Franc O., Landon N., Large J.L., Peiry J.L. (1990). *La basse vallée de l'Ain : étude géomorphologique*. Agence de l'eau RMC et conseil général de l'Ain, 113 p.
- Bravard J.P. et Gilvear D.J. (1993). Structure hydro-géomorphologique des hydrosystèmes. In : Amoros C. et Petts G.E. (eds), *Hydrosystèmes fluviaux*, Collection d'écologie, Masson, 83-103.
- Bravard J.P., Kondolf G.M., Piégay H. (1999). Environmental and societal effects of channel incision and remedial strategies. In S.E. Darby and A. Simon (ed.), *Incised river channel*, Wiley, Chichester : 303-341.
- Bravard J.P., Malavoi J.R., Amoros C. (1989). *L'Ain, ou la difficulté de gérer une rivière en cours de métamorphose*. Journée d'étude Rivières en crise : Saône, Ain, Durance, 17 mars, Lyon : 57-74.
- Bravard J.P. et Peiry J.L. (1993). La disparition du tressage fluviale dans les alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (19e-20e siècle). *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. Bd. 88 : 67-79.
- Bravard J.P. et Petit F. (2000). Les cours d'eau - Dynamique du système fluvial. Armand Collin (ed.), Paris, 222 p.
- Brock J.C., Wright C.W., Sallenger A.H., Krabill W.B., Swift R.N. (2002). Basis and methods of NASA Airborne Topographic Mapper lidar surveys for coastal studies. *Journal of Coastal Research*, 18(1) : 1-13.
- Brookes A. (1990). Restoration and enhancement of engineer river channels. *Regulated Rivers : research & management*, 6 : 45-56.
- Bryant R. et Gilvear D.J. (1999). Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing, river Tay, Scotland. *Geomorphology*, 29 : 307-321.
- Bunte K. (2004). *Gravel Mitigation and Augmentation below Hydroelectric Dams : A Geomorphological Perspective*. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Report submitted to the stream systems technology center, Fort Collins, CO, 234 p.
- Bunte K. et Abt S.R. (2001). *Sampling surface and subsurface particule-size distributions in wadable gravel and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring*, USDA-Rocky mountain research station, general technical report RMRS-GTR-74, 428 p.
- Burkham D.E. (1972). Channel changes of the Gila River in Safford Valley, Arizona (1846-1970). *USGS Professional Paper*, 655-G : 24 p.
- Butler J.B., Lane S.N., Chandler J.H. (1998). Assessment of DEM quality characterising surface roughness using close range digital photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Photogrammetric Record*, 22 : 271-291.
- Butler J.B., Lane S.N., Chandler J.H., Porfiri K. (2002). Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments. *Photogrammetric Record*, 17(99) : 419-439.
- Cairns J. (2000). Setting ecological restoration goals technical feasibility and scientific validity. *Ecological Engineering* 15 : 171-180.

- Carbonneau P.E. (2005). The threshold effect of image resolution on image-based automated grain size mapping in fluvial environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30 : 1687–1693.
- Carbonneau P.E., Lane, S.N., Bergeron, N. (2003). Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 2837-2854.
- Carbonneau P.E., Lane, S.N., Bergeron, N. (2004). Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery. *Water Resources Research*, 40 (7) : W07202. DOI:10.1029/2003WR002759.
- Carbonneau P.E., Lane S.N., Bergeron N. (2006). Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 : 1413–1423.
- Carré C. et Chartier M. (2002). La gestion d'une ressource renouvelable entre gestion durable et aménagement des nuisances, le cas des granulats alluvionnaires en Ile de France. *Annales de géographie* 626 : 406-418.
- Casson B. (2004). *Apports de l'imagerie optique haute résolution pour l'étude 3D de glissement de terrain*. Université Claude Bernard - Lyon1, 281 p.
- Casson B., Delacourt C., Allemand P. (2005). Contribution of multi-temporal remote sensing images to characterize landslide slip surface - Application to the "La Clapière" landslide (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5 : 425-437.
- Casson B., Baratoux D., Delacourt C., Allemand P. (2003). Seventeen years of the la clapiere landslide evolution analysed from ortho-rectified aerial photographs. *Engineering Geology*, 68 (1-2) : 123-139.
- CCT (2007). Centre Canadien de télédétection. http://cct.mcan.gc.ca/index_f.php
- Chandler J. (1999). Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(1) : 54-63.
- Chaponnière P. (2004). *Télédétection et bathymétrie des rivières : application à la Durance*. Mémoire de stage ENSG/CEMAGREF, 93 p.
- Chen Z., Chen D., Xu K., Zhao Y., Wei T., Chen J., Li L., Watanabe M. (2007). Acoustic Doppler current profiler surveys along the Yangtze River. *Geomorphology*, 85 : 155-165.
- Chondroyannis P. (1992). *Ubaye, la forêt reconstruite; le santier de la découverte de Rioux-Bourdoux*. Gardanne, Office Nationale des Forêts (ed.) Imprimerie Esmenjaud, 112 p.
- Church M. (1995). Geomorphic response to river flow regulation : case studies and time-scale. *Regulated Rivers : Resources Management*, 11 : 3-22.
- Citério A., Piégay H. (2000). L'atterrissement des bras morts de la basse vallée de l'Ain : dynamique récente et facteurs de contrôle. *Géomorphologie*, 2 : 87-105.
- Clairns J. (1991). The status of the theoretical and applied science of restoration ecology. *The Environmental Professional*, 13 : 186-194.
- CNR (2000a). Réhabilitation des îlons du Haut-Rhône - Avant projet global - Annexe 3 - Etude hydraulique.
- Rapport d'étude pour le compte du Syndicat Intercommunal de Protection des Berges et Bordures du Rhône en Savoie, 37 p.
- CNR (2000b). Réhabilitation des îlons du Haut Rhône, Avant projet global CNR, direction de l'ingénierie Rapport d'étude pour le compte du Syndicat du Haut Rhône.
- Collier M., Webb R.H., Schmidt J.C. (1996). *Dams and rivers, primer on the downstream effects of dams*. USGS circular 1126, 94 p.
- Connors R. W., Trivedi M.M., Harlow C.A. (1984). Segmentation of a high resolution urban scene using texture operators. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 25: 273-310.
- Constantine C.R. (2006). *Quantifying the connections between flow, bar deposition, and meander migration in large gravel-bed rivers*. Thèse de Doctorat, California University, 202 p.
- Corbane C. (2006). *Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale*. Thèse Université Montpellier 2, 252 p.
- CREN (2007). "BILAN DE L'ACTION C1 : travaux relatifs à l'amélioration du fonctionnement et de la qualité des îlons" Programme Life Nature, 12 p.
- De Joinville O., Ferrand B., Roux M. (2002). Levé laser aéroporté : état de l'art, traitement des données, évaluation et comparaison avec des corrélations d'images. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 166 (2) : 72-81.
- De Oliveira Campos, I., Mercier, F., Maheu, C., Cochonneau, G., Kosuth, P., Blitzkow, D., Cazenave, A. (2001). Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon basin. *Comptes Rendus de l'Académie, Paris* 333 : 633-643.
- Definiens (2006). User Guide, 249 p.
- Delacourt C, Allemand P, Berthier E, Raucoules D, Casson, B, Grandjean P, Pambrun C, Vareil E. (2007). Remote-sensing techniques for analysing landslides surface kinematics: a review. *Bulletin de la Société Géologie de France*, 178 : 89-100.
- Delahaye E. (2000). Les impacts physiques et sociétaux de l'aménagement et des grands travaux sur un espace fluvial : la basse Durance d'Orgon à Bonpas. *Géocarrefour*, 75 : 275-282.
- Diamond J. (1987). Reflections on goals and on the relationship between theory practice. In W.R. Jordan III., M.E. Gilpin & J.D. Aber (eds). *Restoration ecology. A synthetic approach to ecological research*. Cambridge, Cambridge University Press : 329-336.
- Doutriaux E. et Richard P. (2005). *Aménagement du Rhône et bilan sédimentaire*. Journée thématique de la ZABR, 2e journée thématique, 10 juin 2005, Parc des Expositions Valence, ZABR.
- Downs P.W. et Priestnall G. (2003). Modelling Catchment Processes in Kondolf G.M., Piégay H. (eds), *Tools in Fluvial Geomorphology*, Wiley, 205-230.
- Downward S.R., Gurnell A.M., Brookes A. (1994). A methodology for quantifying river channel planform change using GIS. In K. Kovard (ed) *Variability in Stream Erosion*

and *Sediment Transport*, Wallingford, International Association for the Hydrological Sciences : 449-456.

Doxaran D., Froidefond J.M., Lavender S., Castaing P. (2002). Spectral signature of highly turbid waters; application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 81 (1) : 149-161.

Dufour S. (2004). *Guide de gestion des forêts riveraines de cours d'eau*. ONF, Agence RMC, CNRS, Université Lyon3, 132 p.

Dufour S. (2005). *Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône)*. Thèse de Géographie, Université Lyon 3 : 244 p.

Dufour S., Piégay H., Landon N., Moulin B. (2005). Production, répartition et effets hydro-morphologiques du bois mort dans un petit cours d'eau français de moyenne montagne. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49 (3) : 391-409.

Dunford R., Gagnage M., Piégay H., Michel K. (en cours). Characterisation of mediterranean riparian forest: Potential and constraints of UAV technology. *International journal of remote sensing*.

Dupéret A., Kasser M., Bacon J.Y., Bernard M., Podaire A. (2004). Observation de la terre : les débuts difficiles mais prometteurs de la résolution sub-métrique optique. *Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 173/174 (1/2) : 3-15.

Dury G.H. (1969). Relation of morphometry to runoff frequency. In Chorley R.J. (ed.), *River Channel Changes*, Chichester, J. Wiley & Sons : 281-293.

Erskine W.D. (1997). *The real environmental costs of sand and soil mining on the Nepean River, NSW*. In S.J. Riley, W.D.

Erskine, S. Shreshta (eds.), proceedings of the conference on Science and Technology in the Environmental Management of the Hawkesbury-Nepean Catchment Geographical Society of New South Wales Conference, 14 : 29-35.

Fagot P., Gadiolet M., Magne M., Bravard J.P. (1989). Une étude dendrochronologique dans le lit majeur de l'Ain : la forêt alluviale comme descripteur d'une "métamorphose". *Revue Géographique de Lyon*, 64 : 213-223.

Ferguson R. (2007). Gravel-bed rivers at the scale reach. in : Habersack H., Piégay H., Rinaldi (ed), *Gravel Bed Rivers* 6, Elsevier, 33-60.

Finegan B. (1984). Forest succession. *Nature*, 312 : 109-114.

FIRSWG (2001). Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FIRSWG)(15 Federal agencies of the US gov't). GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN 3/PT.653.

Fonstad M.A., Marcus W.A. (2005). Remote sensing of stream depths with hydraulically assisted bathymetry (HAB) Models. *Geomorphology*, 72 : 320-339.

Forman R.T.T., Gordon M. (1986). *Landscape ecology*. John Wiley & Sons, 619 p.

Froidefond J.M., Castaing P., Jouanneau J.M., Prud'Homme R., Dinét A. (1993). Method for the

quantification of suspended sediments from AVHRR NOAA-11 satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 14 : 885-894.

Fruget J.F. (2003). Changements environnementaux, dérives écologiques et perspectives de restauration du Rhône français : bilan de 200 ans d'influences anthropiques. *VertigO – La revue en sciences de l'environnement*, 4 (3):1-17.

Fryer, J.G. (1983). A simple system for photogrammetric mapping in shallow water. *Photogrammetric Record*, 11 (62) : 203-208.

Galay V.J. (1983). Causes of river bed degradation. *Water Resources Research*, 19 (5) : 1057-1090.

Gautier E. (1994). Interférence des facteurs anthropiques et naturels dans le processus d'incision sur une rivière alpine - L'exemple du Buëch (Alpes du sud). *Revue de géographie de Lyon*, 69 : 57-62.

Gilvear D.J., Bryant R. (2003). Analysis of Aerial Photography and Other Remotely Sensed Data. In Kondolf G.M., Piégay H. (eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology* : 135-170.

Gilvear D.J. et Bravard J.P. (1993). Dynamique fluviale. In Amoros C. et Petts G.E. (eds), *Hydrosystèmes fluviaux*, Collection d'écologie, Masson : 61-81.

Gilvear D.J., Bryant R., Hardy T. (1999). Remote sensing of channel morphology and instream fluvial processes. *Progress in Environmental Science*, 1 : 257-284.

Gilvear D.J., Davids C., Tyler A.N. (2004). The use of remotely sensed data to detect channel hydromorphology, River Tummel, Scotland. *River Research and Applications*, 20 : 795-811.

Gilvear D.J., Waters T.M., Milner A.M. (1995). Image analysis of aerial photography to quantify changes in channel morphology and instream habitat following placer in interior Alaska. *Freshwater Biology*, 34 : 389-398.

Glenn N.F., Streutker D.R., Chadwick D.J., Thackray G.D., Dorsch S.J. (2006). Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73(1-2) : 131-148.

Gölz E. (1994). Bed degradation-Nature, causes countermeasures. *Water Science and Technology*, 29 : 325-333.

Gomez B., Phillips J.D., Milligan F.J. James L.A. (1997). Floodplain sedimentation and sensitivity: summer 1993 flood, Upper Mississippi river valley. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 : 923-936.

Gooch M.J., Chandler J.H. (2001). Failure prediction in automatically generated digital elevation models. *Computers and Geosciences*, 27 : 913-920.

Graham D.J., Rice S.P., Reid I. (2005). A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. *Water Resources Research*, 41 : W07020.1-W07020.12.

Guenther G.C., Cunningham A.G., LaRocque P.E., Reid D.J. (2000). *Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetric*. Proceeding. 20th EARSel Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea, June 16-17, Dresden, Germany, European Association of Remote Sensing Laboratories, 23 p.

- Gupta A., Liew S.C. (2007). Thé Mekong from satellite imagery: A quick look at a large river. *Geomorphology*, 85 : 259-274.
- Gurnell A.M. (1997). Channel change on the River Dee meanders, 1946-1992, from the analysis of air photographs. *Regulated Rivers Research and Management*, 13 : 13-26.
- Habersack H., Piégay H. (2007). River restoration in the Alps and their surroundings: past experience and future challenges. In *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*, Elsevier, 705-740.
- Ham D.G. (2005). Morphodynamics and sediment transport in a wandering gravel-bed channel: Fraser River. Thesis, University of British Columbia, 224 p.
- Hamilton S.K., Kelldorfer J., Lehner B., Tobler M. (2007). Remote sensing of floodplain geomorphology as a surrogate for biodiversity in a tropical river system (Madre de Dios, Peru). *Geomorphology*, 89 : 23-38.
- Haralick R.M. (1989). *Statistical and structural approaches to texture*. Proceedings of IEEE, 67 : 786-804.
- Haralick R.M., Shanmugan K., Dinstein I. (1973). *Textural features for image classification*. IEEE Transactions System Man and Cybernetics, 3(6) : 610-621.
- Henry C.P. et Amoros C. (1996). Restoration of riverine wetlands, III, Vegetation survey and monitoring optimization. *Ecological engineering*, 7 : 891-902.
- Henry C.P. et Amoros C. (2001). Efficacité et durabilité d'une opération de restauration : la lône de Rossillon à Bregnier-Cordon (1981-2003). *CREN* : 10-12.
- Henry C.P. et Amoros C. (1995). Restoration ecology of riverine wetlands: I. A scientific Base. *Environmental Management*, 19(6) : 891-902.
- Henry C.P., Amoros., Roset N. (2002). Restoration ecology of riverine wetlands: A 5 year-post-operation survey on the Rhône River, France. *Ecological Engineering*, 18 : 53-554.
- Henry J. B., Malet J.P., Maquaire O., Grussenmeyer P. (2002). The use of small-format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas : Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (12) : 1339-1350.
- Hey R.D. (1978). Determinant hydraulic geometry of river channels. *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, 104 : 869-885
- Hey R.D. (1988). Mathematical models of channel morphology. In Anderson M.G. (ed.), *Modelling Geomorphological Systems*, 99-125.
- Hicks D.M., Duncan M.J., Walsh J., Westaway R.M., Lane S.N. (2001). The braided Waimakariri River : new views of form and process from high-density topographic surveys and time-lapse imagery. In *Gravel Bed Rivers 2000* CD ROM, T. Nolan and C. Thorne (eds.).
- Hicks D.M., Duncan M.J., Walsh-J.M., Westaway R.M., Lane-S.N. (2002). New views of the morphodynamics of large braided rivers from high-resolution topographic surveys and time-lapse video. *IAHS-AISH-Publication*, 276 : 373-380.
- Higgit D.L. et Warburton J. (1999). Applications of differential GPS in upland fluvial geomorphology. *Geomorphology*, 29: 121-134.
- Hochberg E. et Atkinson M.J. (2000). Spectral discrimination of coral reef benthic communities. *Coral Reefs*, 19 : 164-171.
- Holasek R., Portigal F., Even D., Johnson P., Segawa M., Susner G., Hill C. (1998). *Coral and substrate mapping in Kanehoe Bay, Hawaii, using the Advanced Airborne Hyperspectral Imaging System (AAHIS)*. In: 5th Int. Conf. on remote Sensing for Marine and Coastal Environments, SanDiego, USA, 2 : 72-77.
- Hughes M.L., McDowell P.F., Marcus W.,A. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74 : 1-16.
- Ibbsenken H. et Schleyer R. (1986). Photo-sieving: a method for grain-size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11 : 59-77.
- Igouzal M. Maslouhi A., Schelstraete D., Chan J. (2003). Reconstitution de la morphologie d'une rivière à méandres par l'utilisation de la photogrammétrie numérique: Exemple du Sebou, Maroc. *Bulletin - Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 171 (3) : 16-21.
- IWWR (Interagency Workgroup on Wetland Restoration) (2001). An introduction to wetland restoration, creation and enhancement. Review Draft 5/01, EPA, NOAA, ACE, FWS, NRCS.
- Irish J.L., McClung, J.K., Lillycrop, W.J. (2000). Airborne lidar bathymetry: the SHOALS system. *Piann Bulletin*, 103 : 43-53.
- Jones A.F., Brewer P.A., Johnstone E., Macklin M.G. (2007). High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LIDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 : 1574-1592.
- Jordan W.R., Packard S. (1989). Just a few oddball species : restoration practice and ecological theory. In G.P. Buckley (ed.), *Biological habitat reconstruction*. Belhaven Press, London : 18-26.
- Keller E.A., Melhorn W.N. (1978). Rhythmic spacing and origin of pools and riffles. *Geological Society of America Bulletin*, 89 : 723-734.
- Kimball C. (2003). Alternative gravel placement methods. *US Bureau of Reclamation, Sacramento, California*, 17 p.
- Kinzel P.J., Nelson J.M., Wright C.W. (2006). Monitoring changes in the Platte River riparian corridor with serial LIDAR surveys. *USGS fact sheet 3063*, 4p.
- Klein J.P., Robach F., Vanderpoorten A., Trémolières M. (1995). Spatio-temporal aquatic vegetation patterns in former channels in relation to their isolation from the river Rhine (eastern France). *Acta Botanica Gallica*, 142 : 601-616.
- Klingeman P., Bravard J.P., Giuliani Y. (1994). Les impacts morphodynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation : le Rhône en Chautagne (France). *Revue de géographie de Lyon*, 69 : 73-89.
- Knighton D. (1984). *Fluvial Forms and Processes, a New Perspective*. Arnold (ed.), London, 383 p.

- Kohler F., Gillet F., Roulier C., Teuscher F. (2000). Dynamique de la végétation des zones alluviales : exploration de différentes méthodes pour le suivi. *Saussurea*, 31, 85-100.
- Kondolf G.M. (1995). Managing bedload sediment in regulated rivers : examples from California, USA. In *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology*, Costa J.E., Miller A.J., Potter K.W., Wilcock P.R. (eds), The American Geophysical Union : 165-176.
- Kondolf G.M. (1997). Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channel. *Environmental Management*, 21 (4) : 533-551.
- Kondolf G.M. (2000). Assessing salmonid spawning gravel quality. *Transaction of The American Fisheries society*, 129 : 262-281.
- Kondolf G.M. et Micheli E.M. (1995). Evaluating stream restoration projects. *Environmental Management*, 19 : 1-15.
- Kondolf G.M. et Piégay H. (2003). Problem Statement and Recent Practice. In G.M. Kondolf G.M. et H. Piégay (eds), *Tools in Fluvial Geomorphology*. Wiley, Chichester. 3-22.
- Kondolf G.M., Minear J.T., McBain S., Krause A., Falzone A., Lutrick E. (2005). *Gravel augmentation to improve salmonid habitat in rivers : general geomorphic considerations and experiences from Northern California*. San Francisco Estuary and Watershed Science, 38 p.
- Kosuth P., Blitzkow D., Cazenave A., Cochonneau G., de Oliveira E., Correa e Castro J., de Oliveira Campos I., Mercier F., Seyler F., Callède J. (en cours). Establishment of an altimetric reference network over Amazon Basin using Satellite Radar Altimetry (Topex Poseidon).
- Krauss K. et Waldhäusl P. (1998). Manuel de photogrammétrie. Editions Hermès Paris, 407 p.
- Kuhl D. (1992). Years of artificial grain feeding in the Rhine downstream the barrage Iffezheim. 5th international symposium on river sedimentation, Karlsruhe, Allemagne : 1121-1129.
- Lachat B. (1998). Conserver, aménager, revitaliser les cours d'eau avec une logique naturelle. *Annales de Limnologie*, 34 (2) : 227-241.
- Lafon V., Castaing P., Froidefond J.M., Lahet F. (2000). SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements. *Remote Sensing of Environment*, 81 (1) : 136-148.
- Landis J.R. et Koch G.G. (1977). A one-way components of variance model for categorical data. *Biometrics* 33 : 671-679.
- Landon N. (1999). *L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen, constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe, la Drôme*. Thèse de Doctorat, Université Sorbonne Paris IV, 560 p.
- Landon N. et Piégay H. (1994). L'incision des affluents méditerranéens du Rhône : la Drôme et l'Ardèche. *Revue de géographie de Lyon*, 1 : 63-72.
- Landon N., Piégay H. Bravard J.P. (1998). The Drôme River incision (France) : from assessment to management. *Landscape and Urban Planning*, 43 : 119-131.
- Lane S.N. (2000). The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 16 (96) : 937-961.
- Lane S.N. (2001). The measurement of gravel-bed river morphology. In: Mosley, P. (Ed.), *Gravel-bed Rivers V*, New Zealand Hydrological Society : 291-337.
- Lane S.N., Chandler J.H., Porfiri k. (2001). Monitoring river channel and flume surfaces with digital photogrammetry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (10), 871-877.
- Lane S.N. et Chandler J.H. (2003). The Generation of high quality topographic data for hydrology and geomorphology: New data sources, new applications and new problems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 (3) : 229-230.
- Lane S.N., James T.D., Crowell M.D. (2000). Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *Photogrammetric Record*, 16 : 793-821.
- Lane S.N., James T.D., Pritchard H., Saunders M. (2003a). Photogrammetric and laser altimetric reconstruction of water levels for extreme flood event analysis. *Photogrammetric Record*, 18 (104) : 293-307.
- Lane S.N., Westaway R.M., Hicks D.M. (2003b). Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 : 249-271.
- Lane, S.N., Richards K.S., Chandler J.H. (1993). Developments in photogrammetry, the geomorphological potential. *Progress in Physical Geography*, 17 : 306-328.
- Lassetre N, Piégay H, Dufour S, Rollet A.J. (2007). Temporal changes in wood distribution and frequency in a free meandering river. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI : 10.1002/esp.1605.
- Le Calvé J. (2002). Propriétés physiques du milieu marin. Un cours d'introduction à l'océanographie physique. <http://isitiv.univ-tln.fr/~lecalve/oceano/>, 40 p.
- Le Coz J., Chastan B., Védie F., Dramais G. (2007). Emplois de l'ADCP en rivière : une revue de synthèse. *La Houille Blanche*, 4 : 119-130.
- Le Floc'h E. et Aronson J. (1995). Ecologie de la restauration : définition de quelques concepts de base. *Natures, Sciences et Sociétés*, hors série : 29-35.
- Le Petit Robert (1993). Le nouveau petit Robert (ed.), Paris, 2551 p.
- Leckie D.G., Cloney E., Jay C., Paradine D. (2005). Automated Mapping of Stream Features with High-Resolution Multispectral Imagery: An Example of the Capabilities. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71 (2) : 145-155.
- Lee Z. (2001). Properties of the water column and bottom derived from Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data. *Journal of Geophysical Research*, 106 (C6) : 11639-11651.
- Lee Z.P., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S. (1999). Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Applied Optics*, 38 (18) : 3831-3843.
- Lee Z.P., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S. (1998). Hyperspectral remote sensing for shallow waters: I. A Semianalytical Model. *Applied Optics*, 37 (27) : 6329-6338.

- Legleiter C.J., Roberts D.A., Marcus W. A., Fonstad Mark M.A. (2004). Passive optical remote sensing of river channel morphology and in-stream habitat : Physical basis and feasibility. *Remote Sensing of Environment*, 93 : 493-510.
- Lejot J. (1999). *Apport du traitement d'images numériques à l'étude et à la modélisation des états de surface désertiques*. Mémoire de maîtrise, Université François Rabelais Tours, 150 p.
- 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. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 : 1705-1725.
- Lejot J. et Piégay H. (2006a). Suivi pluriannuel de l'évolution de la couverture topographique et bathymétrique des sites de recharge par imagerie aérienne (drone) et GPS Différentiel. *Etude pilote destinée à développer de nouveaux indicateurs pour le suivi des actions et réaliser des simulations par SIG d'évolution des sites restaurés (période 2005 – 2007)*, 60 p.
- Lejot J. et Piégay H. (2006b). *Suivi de plusieurs sites restaurés du tronçon court-circuité de Chautagne (Haut-Rhône) par imagerie aérienne (Drone) et technologie DGPS*. Rapport intermédiaire, 47 p.
- Lennartz S.P. et Congalton R.G. (2004). *Classifying and mapping forest cover types using Ikonos imagery in the northeastern United States*. Proceedings of the ASP R S, Annual Conference, Denver, USA, May, 23-28.
- Léopold L.B. (1970). An improved method for size distribution of stream bed gravel. *Water Resources Research*, 6 : 1357-1366.
- Léopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman (ed.), San Francisco, California, 522 p.
- Lévêque C. et Monolou J.C. (2001). *Biodiversité*. Dunod 248 p.
- Levrat J. (2005). *Etude de la dynamique sédimentaire d'un bras morts restauré : La lône de la Malourdie (Haut-Rhône). Réflexion et méthodes*. Mémoire de master recherche de géographie, Université Jean Moulin Lyon 3, 67 p.
- Lewis R.R. (1990). Wetlands restoration / creation / enhancement terminology : Suggestions for standardization. In J.A. Kusler and M.E. Kentula (eds.), *Wetland creation and restoration: The status of the science*. Island Press, Washington, DC : 417-422.
- Liébault F. (2003). *Les rivières torrentielle des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies)*. Thèse de géographie, Université Lyon 2, 357 p.
- Liébault F. et Piégay H. (2002). Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers and streams of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 : 425-444.
- Lillesand T.M. et Kiefer R.W. (1979). *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons (eds), New York, 624 p.
- Loubersac L., Burban P.Y., Lemaire O., Varet H., Chenon F. (1991). Integrated study of Aitutaki's lagoon (Cook Islands) using SPOT satellite data and in situ measurements : bathymetric modelling. *Geocarto international*, 6, 31-37.
- Lunt A.I et Bridge J.S. (2004). Evolution and deposits of a gravelly braid bar, Sagavanirktok River, Alaska. *Sedimentology*, 51 : 415-432.
- Lyon J.G. et Hutchinson W.S. (1995). Application of a radiometric model for evaluation of water depths and verification of results with airborne scanner data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68 (8): 161-166.
- Lyon J.G., Lunetta R.S., Williams D.C. (1992). Airborne multispectral scanner for evaluating bottom sediment types and water depths of the St. Marys River, Michigan. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 2 : 71-82.
- Lyzenga D.R. (1981). Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and LANDSAT data. *International Journal of Remote Sensing*, 2 : 71-82.
- Lyzenga D.R. (1985). Shallow-water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 6 : 115-125.
- Lyzenga, D.R. (1978). Passive remote-sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3) : 379-383.
- Maatouk F. (2004). Precise DEM extraction from drone images. *DESS TRISIG*, 50 p.
- MacVicar B.J., Delacourt C., Piégay H., Trémélo M.L. (en cours). Characterisation of in-channel wood from very high resolution imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Magdaleno Mas F. et Martinez Romero R. (2006). Aplicaciones de la teledetección laser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. *Ingeniería Civil*, 142 : 1-15.
- Malavoi J.R. (2006). Retour d'expérience d'opérations de restauration de cours d'eau et de leurs annexes, menées sur le bassin RMC. Rapport pour le compte de l'Agence de l'eau RMC, 133 p.
- Malavoi J.R. et Souchon Y. (1989). Méthodologie de description et quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux. Exemple d'une station de la Fillière (Haute-Savoie). *Revue de Géographie de Lyon*, 64 (4) : 252-259.
- Mandier P. (1989). Le relief de la moyenne vallée du Rhône au Tertiaire et au quaternaire, essai de synthèse paléogéographique. *BRGM*, 151, 3t, 654 p.
- Marcus A.W., Fonstad A.M. (2008). Optical remote mapping of rivers at sub-meter resolutions and watershed extents. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33 : 4-24.
- Marcus A.W., Legleiter C.J., Aspinall R.J., Boardman J.W., Crabtree R.L. (2003). High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams. *Geomorphology*, 55 : 363-380.
- Marcus A.W., Marston R.A., Colvard Jr., Robin D.G. (2002). Mapping the spatial and temporal distributions of woody debris in streams of the Greater Yellowstone Ecosystem, USA. *Geomorphology*, 44, 323-335.

- Maritoréna S. (1996). Remote sensing of the water attenuation in coral reefs : a case study in French Polynesia. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 155-166.
- Maritoréna S., Morel A., Gentili B. (1994). Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: Influence of water depth and albedo. *Limnology and Oceanography*, 39 (7) : 1689-1703.
- Marks K., Bates P. (2000). Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrological Processes*, 14 (11/12) : 2109-2122.
- Marston R.A., Girel J., Pautou G., Piégay H., Bravard JP, Arneson C. (1995). Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology*, 13 : 121-131.
- Martinez-Casasnovas J.A., Ramos M.C., Poesen J. (2004). Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology*, 58 : 305-321.
- Martinoty G. (2006). Effets radiométriques en milieu urbain à grande échelle et correction des ombres. *Bulletin d'informations de l'IGN*, 1 : 11-20.
- Melcher N.B., Costa J.E., Haeni F.P., Cheng R.T., Thurman E.M., Buursink M., Spicer K.R., Hayes E., Plant W.J., Keller W.C., Hayes K. (2002). River discharge measurements by using helicopter-mounted radar. *Geophysical Research Letters*, 29 (22), 2084 doi : 10.1029/2002GL015525
- Mertes L.A.K., Smith M.O., Adams J.B. (1993). Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon river wetlands from Landsat image. *Remote Sensing of the Environment*, 43 : 281-301.
- Merwade V.M., Maidment D.R., Goff J.A. (2006). Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. *Journal of Hydrology*, 331 : 731-741.
- Merz J.E., Gregory B.P., Wheaton .M. (2006). Sediment budget for Salmonid habitat rehabilitation in a regulated river. *Geomorphology*, 76 : 207-228.
- Michalkova M. et Piégay H. (2006). Restauration des tronçons Court-Circuités de Belley, de Chautagne et de Brégnier-Cordon. Rapport final du suivi de niveau 2. Thème traité : Sédimentation des îlônes. *Suivi scientifique du programme décennal de restauration Hydraulique et écologique du Rhône Rapport pour le compte de la Compagnie Nationale du Rhône*, 33 p.
- Michalkova M. et Piégay H. (2007). Sédimentation dans les îlônes. In Olivier J.M., Lamouroux N. *Suivi scientifique du programme décennal de restauration Hydraulique et écologique du Rhône - Un observatoire dynamique de l'état écologique du fleuve - Rapport d'étape 2007*, 16 p.
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S., McGlone, J.C. (2001). *Modern Photogrammetry*, Wiley, New York, 479 p.
- Millar D., Gerhard J., Hilldale R. (2005). *Using airborne LIDAR bathymetry to map shallow river environments*. Proceedings of the 14th Biennial Coastal Conference, New Orleans Louisiana, July 17 to 21.
- Millot G. (2003). Globalisation des moyens de bathymétrie en rivière et en milieu difficile. Mémoire INSA Strasbourg.
- Milton E.J., Gilvear D.J., Hooper I.D. (1995). Investigating river channel changes using remotely sensed data. In :
- Gurnell A., Petts G.E. (eds), *Changing River Channels*, Chichester, Wiley : 277-301.
- Miranda F.P., Fonseca L.E.N., Carr J.R. (1998). Semi-variogram textual classification of JERS-1 SAR data obtained over a flooded area of the Amazon rainforest. *International Journal of Remote Sensing*, 19 : 549-556.
- Mobley C.D. (1994). *Light and water : radiative transfer in natural waters*. Academic Press Inc., New York, 592 p.
- Mobley C.D. et Sundman L.K. (2001). *HydroLight 4,2 user's guide*. Redmon, WA: Sequoia Scientific.
- Moiroud C. et Zylberlat M. (2006). Les îlônes du Rhône : de l'entretien à la réhabilitation. *Zones Humides Infos*, 51-52 : 13-14.
- Montgomery D.R. et Buffington J.M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins *GSA Bulletin*, 109 (5) : 596-611.
- Mooradian G., Voelker M., Warren C., Holasek R. & Rhodes D. (1996). *Dual mode fluorescence imaging systems for applications in coral reef characterization*. In : 8th Int. Symp. Coral Reef, Panama City, Panama, Abstracts, 136 p.
- Muhar S., Jungwirth M., Unfer G., Wiesner C., Poppe M., Schmutz S., Habersack H. (2008). Restoring riverine landscapes: successes and deficits in the context of ecological integrity. In H. Habersack, H. Piégay, M. Rinaldi, P. Ergenzinger (eds.). *Gravel Bed Rivers Conference 6*, Elsevier, 779-807.
- Muller E., Decamps H., Dobson M. K. (1993). Contribution of space remote sensing to river studies. *Freshwater Biology*, 29 : 301-312.
- Muste M., Yu K., Spasojevic M. (2004). Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation* 15 (1) : 1-16.
- National Research Council (1992). *Restoration of aquatic ecosystems*. National Academic Press, Washington DC, 576 p.
- Olivier J.M., Lamouroux N., Malet E., Méricoux-Lhopital, Piégay H., Michalkova M. (2007). Suivi Scientifique du Programme Decennal de Restauration Ecologique et Hydraulique du Rhône. RCC de Chautagne, Belley et de Brégnier-Cordon. Rapport pour le compte de la Compagnie Nationale du Rhône, 115 p.
- Pagney P. (1988). *Climats et cours d'eau en France*. Masson, Paris, 248 p.
- Palmer M.A., Almer M.A., Bernhardt E.S., Allan J.D., Lake P.S., Alexander G., Brooks S., Carr J., Clayton S., Dahm C.N., Follstad, Shah J., Galat D.L., Loss S.G., Goodwin P., Hart D.D., Hasset B., Jenkinson R., Kondolf G.M., Lave R., Meyer J.L., O'Donnell T.K., Pagano L., Sudduth E. (2005). Standard for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 42 (2) : 208-217.
- Pardé M. (1931). L'Ain, étude hydrologique. *Bulletin de la Société des Naturalistes de l'Ain*. 45 : 45-79.
- Peiry J.L. (1988). *Dynamique des sédiments sur un cours d'eau intra-montagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie)*. Thèse de Géographie, Université Lyon 3, 378 p.
- Peiry J.L. et Bravard J.L. (1989). Evolution naturelle d'un remplissage sédimentaire intramontagnard et impacts des

aménagements contemporains : l'exemple de la vallée de l'Arve. *La houille Blanche*, 3-4 : 221-225.

Peiry J.L. et Marnezy A. (2000). Les barrages et réservoirs hydroélectriques des Alpes françaises et leurs impacts sur les cours d'eau. In : *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques ; gestion des excès et de la pénurie*, J.P. Bravard (ed.), Editions SEDES, Paris : 190-209.

Peiry J.L., Salvador P.G., Nouguier F. (1994). L'incision des rivières dans les Alpes françaises du nord: état de la question. *Revue de géographie de Lyon*, 69 (1) : 47-56.

Perrez Corraera M. (2004). *Classification orientée objet d'images à très haute résolution spatiale : application à la cartographie de l'occupation des sols le long des cours d'eau*. Master SILAT, Université de Montpellier, 43 p.

Persat H., Bravard J.P., Olivier J.M. (1995). *Stream and riparian management of large braided mid-European rivers, and consequences for fish*. In N.B. Armantrout (ed.), Condition of the World's Aquatic Habitats. Proceedings of the World Fisheries Congress, Athens, May 1992, Theme 1. Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New-Delhi : 139-169.

Petit F. et Daxhelet C. (1989). Détermination du débit à pleins bords et de sa récurrence dans différentes rivières de moyenne et haute Belgique. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 25 : 69-84.

Petit F., Poinard D., Bravard J.P. (1996). Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France. *Catena*, 26 : 209-226.

Petts G.E. (1980). Long-term consequences of upstream impoundment. *Environmental conservation*, 7 : 325-332.

Philpot, W.D. (1989). Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. *Applied Optics*, 28 : 1569-1579.

Piégay H. (1995). *Dynamiques et gestion de la ripisylve de 5 cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône (l'Ain, l'Ardèche, le Giffre, l'Ouvèze et l'Ubaye), XIXe - Xxe Siècles*. Thèse de Géographie et d'Aménagement, Université Paris IV – Sorbonne, 529 p.

Piégay H. et Stroffek S. (2000). *La gestion physique des rivières dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : des extrêmes... au milieu*. In Bravard J.P. (ed.) Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie : 247-274.

Piégay H., Barge O., Bravard J.P., Landon N., Peiry J.L. (1996). *Comment délimiter l'Espace de Liberté des Rivières ?* Congrès de la Société Hydrotechnique de France, 24 ème journées de l'Hydraulique, septembre 1996, 10 p.

Piégay H., Darby S.A., Mosselman E., Surian N. (2005). The erodible corridor concept : applicability and limitations for river management. *River Research and Applications*, 21 : 773-789.

Piégay H., Landon N., Saulnier (2000). Etude géomorphologique de la basse rivière d'Ain : proposition pour une gestion physique équilibrée des lits mineurs et majeurs. Rapport final, commission locale de l'eau du SAGE "Basse Vallée de l'Ain", 86 p.

Piégay H. et Peiry J.L. (1997). Long profile evolution of a mountain stream in relation to gravel load management: exemple of the middle Giffre river (French Alps). *Environmental management*, 21 (6) : 909-920.

Poinard D. (1992). *Effets des aménagements fluviaux sur les débits liquides et solides. L'exemple du Rhône dans les plaines de Miribel-Jonage et de Donzère Mondragon*. Thèse de Géographie et Aménagement, Université Lyon 3, 501 p.

Poole G.C., Stanford J.A., Frissell C. A., Running S.W. (2002). Three-dimensional mapping of geometric controls on flood-plain hydrology and connectivity from aerial photos. *Geomorphology*, 48 : 329-347.

Puech C. (2000). *Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*. Habilitation à diriger des recherches, INPG Grenoble, 105 p.

Puestow T.M., Simms E.L., Simm A., and Butler K. (2001). Mapping of salmon habitat parameters using airborne imagery and digital ancillary data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67 : 309-317.

Pyle C.J., Chandler J.H., Richards K.S. (1997). Digital photogrammetric monitoring of river bank erosion. *Photogrammetric Record* 15 : 753-764.

Raclot D., Puech C., Mathys N., Roux B., Jacome A., Asselime J., Bailly J-S. (2005). Photographies aériennes prises par drone et Modèle Numérique de Terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de Draix. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1 : 7-20.

Rainey M.P., Tyler A.N., Bryant R.G., Gilvear D.J., McDonald P. (2000). The influence of surface and interstitial moisture on the spectral characteristics of intertidal sediments; implications for airborne image acquisition and processing. *International Journal of Remote Sensing*, 21 : 3025-3038.

Ramirez V. (2003). *Levée par laser aéroporté sur la Loire moyenne. Automatisation des processus de contrôle – Annexes*. Mémoire Ecole Supérieure des Géomètres Topographes, 80 p.

Reckendorfer W., Schmalfluss R., Baumgartner C., Habersack H., Hohensinner S., Jungwirth, Schiemer F. (2005). The integrated river engineering project for the free-flowing Danube in the Austrian alluvial zone national park : contradictory goals and mutual solutions. *Large Rivers*, 15(1-4) : 613-630.

Reddy S., Truax D., Kolstad E. (2004). *Comparing spectral and object based approaches for classification and transportation feature extraction from high resolution multispectral imagery*. Proceedings of the ASP R S, Annual Conference, Denver, USA, May : 23-28.

Rice S.P., Greenwood M.T., Joyce C.B. (2001). Macroinvertebrate community changes at coarse sediment recruitment points along two gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 37 (11) : 2793-2803.

Rinaldi M. et Simon A. (1998). Bed-level adjustments in the Arno River, central Italy. *Geomorphology*, 22 : 57-71.

Ritchie J.D. (1996). Airborne laser altimeters, remote sensing applications to hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 41 : 625-636.

Rival Magalie (2006). *Variabilité spatiale et temporelle de la sédimentation fine dans la lône de Table Ronde (Rhône)*. Mémoire de Master 1, Université Lumière Lyon 2, 88 p.

Roberts A.C.B., Anderson J.M. (1999). Shallow water bathymetry using integrated airborne multi-spectral remote

- sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (3) : 497-510.
- Robin M. (1995). *La télédétection*. Editions Nathan, 318 p.
- Rollet A.J. (2002). *Les effets du barrage d'Allement sur la granulométrie du lit de la basse rivière d'Ain*. Mémoire de maîtrise, Université Jean Moulin Lyon 3, 96 p.
- 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 Université Jean Moulin Lyon 3, 305 p.
- Rollet A.J., Piégay H., Citterio A. (2006). Impact des extractions de graviers dans le lit mineur sur la géométrie des zones aquatiques péri-fluviales du Doubs. *Géographie physique et quaternaire*, 60 (3).
- Rollet A.J., Piégay H., Lejot J., Citterio A., Dufour S. (2005). Expertise hydrogéomorphologique en vue du diagnostic fonctionnel des habitats, de la restauration du transit sédimentaire et des îlots. *Programme Life Nature Conservation des habitats créés par la dynamique de la rivière Ain*, 172 p.
- Rougier C. (2006). http://www.iro.umontreal.ca/~diff2730/cours/Cours1_IFT2730_2006_6.pdf.
- Roulier C., Teuscher F., Tognola M., Thielen R. (1999). Zones alluviales et revitalisation. *Génie Biologique*, 4 : 26-38.
- Roux A.L. (1986). Recherches interdisciplinaires sur les écosystème de la basse-plaine de l'Ain (France) : potentialités évolutives et gestion. *Documents de Cartographie Ecologique*, Grenoble, 166 p.
- Sandidge, J.C. et Holyer, R.J. (1998). Coastal bathymetry from hyperspectral observation of water radiance. *Remote Sensing of Environment*, 65 (3) : 341-352.
- Sandoz A., Chauvelon P., Pichaud M., Buckwell P. (2003). Estimation et suivi des superficies en eau par télédétection satellitale radar : résultats obtenus dans le delta du Rhone (France). *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 172 (4) : 69-75.
- Schiemer F. (1994). *Monitoring of floodplains: limnological indicators*. In G. Aubrecht, G. Dicks, C. Prentice (eds.), *Monitoring of ecological change in wetlands of Middle Europe*. Proceedings of an international workshop, October 1993. Linz, Austria. International Waterfowl and Wetlands Research Bureau publication number 30 : 95-107.
- Schumm S.A. (1977). *The Fluvial System*. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 338 p.
- Sear D.A., Kitts D., Millington C. (2006). *New forest LIFE-III monitoring report - The geomorphic and hydrological Response of new forest streams to river restoration*. School of Geography University of Southampton; 185 p.
- Sear D.A., Newson M.D., Thorne C.R. (2003). *Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology*. R&D Technical Report FD1914, Defra/Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme, 233 p.
- Shields F.D. (1995). Control to streambank erosion due to bed degradation with vegetation and structure. *Water Resources Bulletin*, 31 (3) : 475-489.
- SHR (Syndicat du Haut Rhône) (2002). *Projet de réhabilitation du Haut-Rhône - Retrouver un fleuve vif et courant avec une meilleure qualité des eaux, la préservation et la valorisation du patrimoine naturel. Programme décennal de restauration hydraulique et écologique du fleuve Rhône*, 24 p.
- Slater L. (2007). *Caractérisation des rivières en tresses françaises*. Mémoire de Master 1, ENS LSH, 57 p.
- Smet S., Michel R., Bollinger L. (2006). Uplift of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Measured from Differential Hyperspectral Imagery of Coastal Waters. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23 p.
- Smith L.C. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge : review. *Hydrological Processes*, 11 (10) : 1427-1439.
- Soubirane J., Delpont G., Baghdadi N. (2001). Apport de l'imagerie satellitaire optique et radar à la gestion de l'eau et de l'environnement en zone alluviale. Etude de la plaine et de la Garonne entre Toulouse et St Nicolas de la Grave (France). *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 162 (2) : 16-22.
- Souchon (2005). *Restauration physique des cours d'eau dans le Nord-Est de la France*. Conseil supérieur de la pêche - Protection des milieux aquatiques, 18 p.
- Spicer K. R. (1997). Measuring flood discharge in unstable channels using ground-penetrating radar. *Geology*, 25 : 423- 426.
- Stojic M., C. J. H., Chandler J.H., Ashmore P., Luce J. (1998). The assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64(5) : 387-395.
- Stumpf R. et Holderied K. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48 (1) : 547-556.
- Takagi T., Oguchi T., Matsumoto J., Grossman M.J., Sarker M.H., Matin M.A. (2007). Channel braiding and stability of the Brahmaputra River, Bangladesh, since 1967: GIS and remote sensing analyses. *Geomorphology*, 85 : 294-305.
- Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J.J., Perbos J., Deschamps P.Y. (1990). Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, 11 : 659-668.
- Toutin T. (2004). Photogrammétrie satellitale des capteurs de haute résolution : état de l'arts. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 175(3) : 57-68.
- Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R., Cushing C.E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of fisheries Sciences and Aquatic*, 37 : 130-137.
- Verdu J. M., Batalla R.J., Martinex-Casasnovas J.A. (2003). *Estimating grain size distributions of a gravel riverbed at reach scale from detailed aerial photos, geostatistics and digital image processing (Isabena River, Spain)*. Paper presented at the Braided Rivers Conference, Br. Geomorphol. Res. Group, London, April, Poster.
- Verdu J.M., Batalla R.J., Martinez-Casasnovas J.A. (2005). High-resolution grain size characterisation of gravel bars using imagery analysis and geo-statistics. *Geomorphology*, 72 : 73-93.

- Veyrat-Charvillon S. (2005). *Elaboration d'une méthode de prédiction du volume maximal d'une lave torrentielle. Géomorphologie torrentielle Topographie de terrain et Stéréophotogrammétrie sur photographies aériennes d'archives. Torrents du Manival, du Merdarêt et des Arches (Alpes-du-Nord, Isère, France)*. Thèse Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand 2, 353p.
- Veyrat-Charvillon S. et Memier M. (2006). Stereophotogrammetry of archive data and topographic approaches to debris flow torrent measurement: calculation of channel sediment states and partial sediment budget for Manival Torrent (Isère, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 : 201-219.
- Vinod Kumar K., Palit A., Bhan S.K. (1997). Cover bathymetric mapping in Rupnarayan-Hooghly confluence using Indian remote sensing satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 18 : 2269-2270.
- Walker J.P. et Willgoose G.R. (1999). On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research*, 35 (7), 2259-2268.
- Westaway R.M., Lane, S.N., Hicks D.M. (2001). Remote sensing of clear-water, gravel-bed rivers using digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67 (11) :1271-1281.
- Westaway R.M., Lane S.N., Hicks D.M. (2000). The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25 : 209-226.
- Westaway R.M., Lane S.N., Hicks D.M. (2003). Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. *International Journal Remote Sensing*, 24 (4) : 795-815.
- Whited D., Standford J.A., Kimball J.S. (2002). Application of airborne multispectral digital imagery to quantify riverine habitats at different base flows. *River Research and Applications*, 18 : 583-594.
- Wiberg P.L. et Smith J.D. (1987). Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*, 23 : 1471-1480.
- Wiederkehr E. (thèse en cours). Caractérisation physique du réseau hydrographique du bassin du Rhône à partir de photographies aériennes et de données vectorisées de l'IGN.
- Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H. (2008). Action A14 Apport des techniques d'imagerie pour l'étude des réseaux hydrographiques. Synthèse des connaissances et évaluation d'indicateurs de caractérisation. *Rapport pour le compte de l'Agence de l'Eau RMC*, 46 p.
- Williams G.P. et Wolman M.G. (1984). *Downstream effects of dams on alluvial rivers*. USGS circular 781, 48 p.
- Williams G.P. et Wolman M.G. (1954). A method of sampling coarse bed-material. *American Geophysical Union*, 35 : 951-956.
- Winterbottom S.J. et Gilvear D.J. (1997). Quantification of Channel Bed Morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography. *Regulated rivers : research & management*, 13 : 489-499.
- Winterbottom S.J. et Gilvear D.J. (2000). A GIS-Based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated river Tummel, Scotland. *Regulated rivers : research & management*, 16 : 127-140.
- Wolf, R.P. et Dewitt, B.A. (2000). *Element of photogrammetry with application in GIS*. 3rd ed. McGraw-Hill, Columbus, 608 p.
- Wolman M.G. (1954). A method of sampling coarse river bed material. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35 : 951-956.
- Wolman M.G. (1967). Two problems involving river channels and their background observations. *Northwest. Univ. Stud. Geogr.*, 14 : 67-107.
- Woodcock C.E. et Strahler A.H. (1987). The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 21 : 311-332.
- Wright A., Marcus W.M., Aspinal R. (2000). Evaluation of multi-spectral imagery as a tool for mapping stream morphology. *Geomorphology*, 33 : 107-120.
- Xia L. (1993). A united model for quantitative remote sensing of suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 14 : 2665-2676.
- Yilmaz H.M. (2007). The effect of interpolation methods in surface definition: an experimental study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 1346-1361.
- Zedler J.B., Weller M.W. (1990). Overview and future directions. In J.A. Kusler & M.E. Kentula (Eds). *Wetland creation and restoration : the status of the science*. Island Press, Washington, DC., 405-413.
- Zhang j., Kaiqin X., Watanaba M., Yonghui Y., Xiuwan C. (2004). Estimation of river discharge from non-trapezoidal open channel using QuickBird-2 satellite imagery. *Hydrological sciences journal*, 49(2) : 247-260.
- Zhang M. (2000). A method for continuous extraction of multispectrally classified urban rivers. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 66(8) : 991-999.
- Zhang M., Carder K.L., Muller-Karger F.E., Lee Z.P. & Goldhof D.B. (1999). Noise reduction and atmospheric correction for coastal applications of Landsat Thematic Mapper imagery". *Remote Sensing of Environment*, 70 : 167-180.

Liste des figures

Partie 1.

Figure 1-1. Schéma conceptuel du déroulement d'un projet de restauration.....	20
Figure 1-2. Echelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales (d'après Knighton, 1984).....	24
Figure 1-3. Schématisation conceptuel de l'extraction d'indicateurs à partir d'images (modifié d'après Wiederkerhr <i>et al.</i> , 2008).....	28
Figure 1-4. Techniques de restauration par recharge sédimentaire, a) recharge sédimentaire par génie civil sur l'Ain (cliché : CREN), b) recharge à partir de barges à claper sur le Rhin (cliché de Kondolf).....	29
Figure 1-5. Techniques de restauration par remise en eau de bras atterris, a) curage d'un bras atterri par génie civil sur le Rhône en Chautagne (clichés : CNR), d) curage d'une lône par dragage sur le Rhône en Chautagne (cliché : CNR).....	30

Partie 2.

Figure 2-1. Le spectre électromagnétique et son utilisation en télédétection (modifié d'après Chaponnière, 2004).....	35
Figure 2-2. Evolution du coefficient d'atténuation en fonction de la longueur d'onde pour une eau claire et une eau trouble riche en matières organiques ou en suspension (d'après Le Calvé, 2002).....	37
Figure 2-3. Signatures spectrales d'un environnement fluvial basées sur une image aérienne de la rivière Teme, Angleterre (d'après Milton <i>et al.</i> , 1995).....	37
Figure 2-4. Schéma des principaux paramètres affectant le signal mesuré par le capteur.....	38
Figure 2-5. Impact d'une ombre portée sur les valeurs radiométriques d'une image aérienne (20 avril 2006) (Profils radiométriques à partir des 3 canaux RVB).....	39
Figure 2-6. Impact du phénomène d'évaporation sur les valeurs radiométriques d'une image aérienne (19 juillet 2005) (Profils radiométriques à partir des 3 canaux RVB).....	39
Figure 2-7. Impact de la turbulence sur les valeurs radiométriques d'une image aérienne. (20 juillet 2005) (Profils radiométriques à partir des 3 canaux RVB).....	40
Figure 2-8. Impact de la turbidité sur les valeurs radiométriques, a) image aérienne d'une lône du Haut-Rhône (20 avril 2006) (profils radiométriques à partir des 3 canaux RVB), b) image satellite QuickBird de l'Ain (22 novembre 2006) (profil radiométrique et hauteurs d'eau observées).....	42
Figure 2-9. Synthèse des substrats du lit mineur (modifié d'après Sear <i>et al.</i> , 2003).....	43
Figure 2-10. Impact de l'imbrication des faciès sur les valeurs radiométriques. Imbrication de galets (surfaces claires) et de concrétion algale (surfaces sombres) (profil radiométrique des 3 canaux RVB).....	44
Figure 2-11. Impact de l'imbrication de faciès sur les valeurs radiométriques : affleurements calcaires, végétation algale et substrat graveleux (profil radiométrique des 3 canaux R,V,B).....	44

Figure 2-12. Principe de l'algorithme ISODATA (d'après Lillesand et Kiefer 1979), a) identification de 5 classes, b) 1 ^{ère} classification intra-classe et interclasse, c) classification des pixels répondant aux critères définis.....	48
Figure 2-13. a) image aérienne d'un banc de galets du Haut-Rhône, b) carte des principales unités de végétation issues d'une classification non supervisée pixel à pixel.....	48
Figure 2-14. Identification de 3 classes représentant différents faciès de fond de chenal. A chacune de ces classes correspond une signature radiométrique produite par les régions d'apprentissage échantillonnées sur un plan d'eau.....	50
Figure 2-15. Algorithme du parallélépipède (Lillesand et Kiefer 1979).....	50
Figure 2-16. a) image aérienne d'un bras mort, b) cartographie des faciès de fond de chenal issue d'une classification supervisée pixel à pixel.....	51
Figure 2-17. Matrice de confusion. Les colonnes correspondent aux données de la classification, les lignes correspondent aux régions d'apprentissage, les chiffres en diagonale (cellules grises) dénombrent les pixels correctement classés et leur pourcentage associé.....	51
Figure 2-18. Principe d'une analyse orientée objet, a) les méthodes de segmentation, b) hiérarchisation des objets de l'image (d'après Definiens, 2006).....	52
Figure 2-19. a) image aérienne d'un banc de galets végétalisé du Haut-Rhône, b) Carte des unités végétales et segmentation issue d'une classification orientée-objet.....	53
Figure. 2-20. Test de séparabilité sur deux canaux à partir d'images aériennes. Localisation de la radiométrie des faciès : a) sur une îlône, b) et c) sur un banc de galets.....	54
Figure 2-21. Système de référence « image / sol », a) caractéristiques géométriques du couple stéréoscopique, b) système de rotation des caméras (modifié d'après Krauss et Waldhäusl, 1998 ; Casson, 2004).....	63
Figure 2-22. Calcul de la position approchée, dans le repère sol de deux points images homologues (modifié d'après Casson, 2004).....	65
Figure 2-23. Exemple d'un pic de corrélation produit par la translation de deux images.....	65
Figure 2-24. Les limites spatiales et temporelles des techniques de restitution morphologique (d'après Ferguson, 2007).....	70
Figure 2-25. Implication de la résolution des images aériennes et satellites pour la caractérisation d'un secteur fonctionnel (d'après Downs et Priestnall, 2003).....	73

Partie 3.

Figure 3-1. Le drone Pixy et ses caractéristiques techniques.....	79
Figure 3-2. Rampe de lancement drone « tri-tube » et son installation in-situ.....	80
Figure 3-3. Sensibilité spectrale d'un appareil photo numérique, a) capteur CMOS Canon EOS 10D, b) capteur EOS 350D sans filtre.....	81
Figure 3-4. Le cockpit du drone composé du poste de pilotage, du système de visualisation en temps réel et de la réception des paramètres de vol sur pocket PC.....	81

Figure 3-5. Exemples d'images drone portant sur différents milieux et faciès fluviaux (alt. : altitude de la prise de vue, rés : résolution en cm / pixel).....	82
Figure 3-6. Nombre mensuel de journées présentant un vent supérieur à 20 km/h (vitesse instantanée maximum journalière) (période 2000 – 2005), station d'Ambérieu-en-Bugey.....	85
Figure 3-7. Nombre mensuel de journées présentant un vent supérieur à 20 km/h (vitesse instantanée maximum journalière) (période 2001 – 2004), station de Belley....	85
Figure 3-8. Nombre mensuel de journées présentant des précipitations (moyenne journalière) (période 2001-2006), station d'Ambérieu-en-Bugey.....	87
Figure 3-9. Nombre mensuel de journées présentant des précipitations (moyenne journalière) (période 2001-2006), station de Belley.....	87
Figure 3-10. Cumul mensuel de journées présentant à la fois du vent supérieur à 20 km/h et des précipitations (moyenne journalière) (période 2001 / 2005), station d'Ambérieu-en-Bugey.....	88
Figure 3-11. Cumul mensuel de journées présentant à la fois du vent supérieur à 20 km/h et des précipitations (moyenne journalière) (période 2001 / 2004), station de Belley.....	88
Figure 3-12. Effet des polynômes sur les images rectifiées. a) polynôme d'ordre 1, b) polynôme d'ordre 2, c) polynôme d'ordre 3 - (image drone).....	94
Figure 3-13. Effet de la localisation des balises sur les polynômes de transformation. a) polynôme d'ordre 1, b) polynôme d'ordre 2, c) polynôme d'ordre 3 – (image drone).....	94
Figure 3-14. Mosaiques d'images drone. a) la lône du Planet, b) le tronçon de Gévrieux.....	95
Figure 3-15. Schéma synthétique de la répartition des balises en fonction des surfaces à restituer...	96
Figure 3-16. Propriétés radiométriques des balises, a) sur couverture végétale, b) sur galets.....	97
Figure 3-17. a) localisation des placettes granulométriques échantillonnées sur la mosaïque drone du 18/06/2004 (n=6), b) localisation des placettes granulométriques échantillonnées sur la mosaïque drone du 26/10/2005 (n=15), c) caractéristiques des deux missions.....	105
Figure 3-18. Influence des canaux et de la portée sur le coefficient de détermination R^2 (rapport entre le D50 mesuré et le D50 observé) (mission 18/06/2004).....	108
Figure 3-19. Influence des canaux et de la portée sur le coefficient de détermination R^2 (rapport entre le D50 mesuré et le D50 observé) (mission 26/10/2005).....	108
Figure 3-20. Mission du 18/06/2004, a) relation entre semi-variance et D50 observés, b) modèle granulométrique, c) cartographie des D50 prédits (classification de Wentworth).....	110
Figure 3-21. Mission du 26/10/2005, a) relation entre semi-variance et D50 observés, b) modèle granulométrique, c) cartographie de la granulométrie des D50 prédits.....	112
Figure 3-22. Tests réalisés à partir de mesures granulométriques du D90 (mission du 26/10/2006), a) Influence de la taille de la portée sur le R^2 , b) modèle granulométrique.....	113

Figure 3-23. Test photogrammétrique réalisé sur le banc de Gévrieux (mission du 21/07/2004), a) couple stéréoscopique, b) mosaïque drone du banc, c) langue de progression de galets à restituer, d) MNT e) carte des précisions altimétriques, f) profil topographique de la langue de progression issu du MNT et essai d'une restitution en 3D.....	116
Figure 3-24. Banc de galets de Luc-en-Diois (mission du 29/01/2004), a) mosaïque drone, b) couple stéréoscopique, c) MNT, d) carte des précisions altimétriques, e) représentation 3D.....	118
Figure 3-25. a) photographie oblique du tronc, b) orthophotographie, c) transect du tronc, d) transect du système racinaire.....	119
Figure 3-26. Tests des méthodes d'interpolation pour la restitution d'un MNT sur un banc du Haut Rhône (site « les Grandes Iles »).....	122
Figure 3-27. Impact des variations lumineuses sur les valeurs radiométriques de deux images communes.....	123
Figure 3-28. Traitements des histogrammes, a) principe de l'étirement dynamique, b) principe de l'ajustement dynamique (d'après Rougier, 2006).....	125
Figure 3-29. Fenêtre de convolution et extraction d'une valeur médiane par canal.....	126
Figure 3-30. Mosaïques drone et localisation des hauteurs d'eau observées, a) lône du Planet (03/02/2004), b) lône de la Malourdie (20/04/2006), c) tronçon Varambon / Priay (19,20,21/07/2005) (tronçon comprenant les secteurs Carronnières et Bellegarde).....	128
Figure 3-31. Analyse des valeurs radiométriques par substrat et par image, a) lône du Planet, b) tronçon Varambon / Priay, c) lône de la Malourdie (année 2006).....	130
Figure 3-32. Analyse des valeurs radiométriques par substrat et par image, a) tronçon des Carronnières b) tronçon de Bellegarde, c) lône de la Malourdie (année 2007).....	131
Figure 3-33. Modèles bathymétriques globaux et optimisés, a) lône du Planet, b) tronçon Varambon / Priay, b') résidus du modèle global ordonnés par heure d'acquisition.....	133
Figure 3-34. Modèles bathymétriques globaux et optimisés, a) lône de la Malourdie (année 2006), b) tronçon des Carronnières, c) tronçon de Bellegarde, d) lône de la Malourdie (année 2007).....	134
Figure 3-35. Cartes bathymétriques et cartes des résidus des modèles, a) tronçon Varambon / Priay, b) lône du Planet.....	136
Figure 3-36. Schéma synthétisant la chaîne de traitements mise en place pour la restitution bathymétrique avec trois approches : (1) le modèle global, (2) le modèle par image, (3) le modèle par substrat.....	139
Figure 3-37. Résidus du modèle global du tronçon Varambon / Priay en fonction de l'orientation des images (n = 29) selon les axes de vol.....	149

Partie 4.

Figure 4-1. Localisation des sites de suivi, a) la basse vallée de l'Ain, b) la Chautagne (Haut Rhône).....	153
Figure 4-2. Hydrogramme de la station de Point d'Ain, période du 30 octobre au 14 novembre 2007 (source : Banque Hydro).....	155
Figure 4-3. Photographies aériennes de l'Ain en 2000 (IGN), a) tronçon linéaire, secteur de Varambon, b) tronçon à méandre, secteur de Gévrieux.....	157
Figure 4-4. Impact des évolutions récentes du système fluvial, a) déstabilisation des piles de pont de Priay, b) exhumation de blocs calcaires au droit de Bellegarde, c) pavage du chenal et disparition des bancs de galets sur le tronçon de Varambon (clichés A.J. Rollet et personnel).....	157
Figure 4-5. Variation longitudinale des D50 de têtes de bancs obtenus en 2002 par extraction semi-automatique et valeurs de pente issues des profils en travers de 2004 (source des profils : Cemagref, modifié d'après Rollet 2007).....	158
Figure 4-6. Le Rhône en 1760 d'après la carte géométrique au 1/30000 ^e (d'après Bravard, 1981).....	161
Figure 4-7. L'aménagement hydroélectrique du Rhône court-circuité, a) aménagement « classique » d'un tronçon court-circuité du Rhône, b) barrage de retenue de Motz sur le vieux Rhône court-circuité, c) usine hydroélectrique de Chautagne avec en arrière plan le canal d'aménagé et en premier plan le canal de fuite (clichés CNR et personnel).....	162
Figure 4-8. Changement du profil transversal du Rhône à la suite des différents travaux de rectification de son cours, a) profil avant les endiguements, b) profil un siècle après les premiers endiguements Girardon ; profil après l'aménagement CNR (Persat <i>et al.</i> , 1995 dans Fruget, 2003).....	163
Figure 4-9. Secteurs de suivi de l'Ain, a) vue oblique du secteur de suivi, b) périmètre de la zone de suivi (source : orthophoto 2000 IGN).....	166
Figure 4-10. Sites des îlons restaurés et périmètres de recharge. a) secteur des Carronières, b) secteur de Bellegarde (source : orthophotographie 2000 IGN).....	167
Figure 4-11. Recharge sédimentaire sur le site de Bellegarde, a) dépôt de la charge, b) épandage des graviers (photographies : CREN 2007).....	167
Figure 4-12. Hydrogramme correspondant à la période des suivis et planning des travaux de recharge sédimentaire sur Carronières et Bellegarde avec identification des périodes de débits supérieurs à 100 m ³ /s (moyenne journalière, station de Pont d'Ain – Source : Banque Hydro).....	168
Figure 4-13. Secteur de recharge amont (Bell1) / aval (Bell2) et localisation des chemins d'accès ayant servi au transport des sédiments, site de Bellegarde (mission du 22/02/2006 – débit 93 m ³ /s).....	171
Figure 4-14. Principe de la correction planimétrique appliquée sur le site des Carronières pour comparer les lignes d'eau à partir d'un débit de référence.....	172
Figure 4-15. Cartes de la bande active des Carronières, a) mission drone du 19/07/2005 (débit : 18 m ³ /s), b) mission drone du 04/05/2006 (33 m ³ /s).....	174

Figure 4-16. Site des Carronnières entre juillet 2005 et mai 2006 (comparaison pour un même débit de référence de 18 m ³ /s), a) superficie des bancs de galets, b) superficie des affleurements.....	175
Figure 4-17. Carte de la bande active du secteur de recharge amont, site de Bellegarde, a) mission drone du 19 et 20/07/2005 (18 m ³ /s), b) mission drone du 03/05/2006 (16 m ³ /s).....	176
Figure 4-18. Carte de la bande active du secteur de recharge aval, site de Bellegarde, a) mission drone du 19,20/07/2005 (18 m ³ /s), b) mission drone du 03/05/2006 (16 m ³ /s).....	177
Figure 4-19. Site de Bellegarde entre juillet 2005 et juin 2006 (respectivement 18 m ³ /s pour 2005 et 16 m ³ /s pour 2006, a) superficie des bancs de galets, b) superficie des affleurements.....	178
Figure 4-20. Principe d'une correction altimétrique à partir d'une carte des variations topographiques produite à partir de 2 états bathymétriques.....	180
Figure 4-21. Cartes bathymétriques, a) mission du 19 juillet 2005 (avec un débit de 18 m ³ /s), b) mission du 04 mai 2006 (avec un débit de 16,5 m ³ /s).....	182
Figure 4-22. Carte des amplitudes topographiques entre juillet 2005 et mai 2006 et bilan du stock sédimentaire sur la période considérée (mosaïque en arrière plan : mission 2006).....	183
Figure 4-23. Variation longitudinale des différences d'altitudes entre les topographies de juillet 2005 et mai 2006 (pour un même débit).....	183
Figure 4-24. Cartes bathymétriques du secteur de Bellegarde, a) mission des 19 et 20 juillet 2005 (18 m ³ /s), b) mission du 30 juin 2006 (débit : 16,5 m ³ /s).....	185
Figure 4-25. Carte des amplitudes bathymétriques du tronçon amont entre juillet 2005 et juin 2006.....	186
Figure 4-26. Carte des amplitudes bathymétriques du tronçon aval entre juillet 2005 et juin 2006 et bilan des stocks sédimentaires <i>in situ</i> des secteurs de recharge amont / aval.....	186
Figure 4-27. Variation longitudinale des différences d'altitudes entre les topographies de juillet 2005 et juin 2006 (pour un même débit).....	187
Figure 4-28. Hydrogramme des débits entre le 01/12/2005 et le 30/09/2006 (station hydrométrique du barrage de Motz, source : CNR).....	193
Figure 4-29. Présentation du périmètre de suivi « les Grandes Iles » (Orthophoto IGN 2001). a) vue d'ensemble du banc juste après essartage (photo décembre 2005), b) état du banc pendant la période estivale (photo juillet 2006), c) partie aval du banc de galets juste après essartage (photo décembre 2005), d) partie aval du banc de galets pendant la période estivale (photo juillet 2006) (clichés personnels).....	195
Figure 4-30. Site de la Malourdie. a) Evolution du site de 1952 à 2001, b) Configuration hydro-morphologique actuelle (modifié d'après Levrat, 2005).....	196
Figure 4-31. Périmètre de suivi de la lône de la Malourdie (Orthophoto IGN 2001). a) Chenal avant curage (photo CNR, 2000), b) chenal restauré (photo de février 2005, cliché personnel), c) connexion aval avant les travaux	

de déblais (photo CNR, 2000), d) connexion aval restaurée (photo février 2005, cliché personnel).....	197
Figure 4-32. Mosaïque drone du site « les Grandes Iles », a) mission du 16/06/2006 (débit : 55 m ³ /s), b) mission du 28/06/2007 (débit : 56 m ³ /s).....	199
Figure 4-33. Mosaïque drone de la lône de la Malourdie, a) mission du 20/04/2006 – débit : 146 m ³ /s, b) mission du 29/09/2006 – débit : 52 m ³ /s, c) mission du 16/03/2007 – débit : 48 m ³ /s.....	201
Figure 4-34. Ajustement des lignes d'eau.....	202
Figure 4-35. Carte de la végétation terrestre pour un débit de référence de 139 m ³ /s, a) mission du 16/06/2006, b) mission du 28/06/2007.....	203
Figure 4-36. MNT et volumes sédimentaires stockés au dessus de la ligne d'eau correspondant à un même débit et une même pente de référence, a) mission du 21/12/2005, b) mission du 16/06/2007, c) mission du 28/06/2007, d) Bilan des volumes.....	205
Figure 4-37. Carte des amplitudes topographiques pour un même débit et une même pente de référence. Comparaison des missions a) du 21/12/2005 et du 16/06/2006, b) du 16/06/2006 et du 28/06/2007.....	205
Figure 4-38. Variation altimétrique des unités végétales établies sur le banc de galets des Grandes Iles. Mission du 16/06/2006 : renouée du Japon n = 636 (densité : 0,2 pts/m ²), unité basse n = 820 (densité : 0,33 pts/m ²), p < 0,0001. Mission du 28/06/2007 : renouée du Japon n = 1093 (densité : 0,2 pts/m ²), unité basse n = 848 (densité : 0,25 pts/m ²), p < 0,0001.....	206
Figure 4-39. Restitution bathymétrique de la lône de la Malourdie pour un débit de référence de 50 m ³ /s, a) mission du 20/04/2006, b) du mission 16/03/2007.....	208
Figure 4-40. Carte des variations altimétriques de la lône de la Malourdie entre avril 2006 et mars 2007 et bilan des volumes sédimentaires.....	209
Figure 4-41. Variation longitudinale des différences d'altitudes (par rapport au talweg) des changements topographiques enregistrés par le fond de la lône entre avril 2006 et mars 2007.....	210
Figure 4-42. Cartes de la couverture végétale aquatique, a) mission du 20/04/2006 (débit : 146 m ³ /s), b) mission du 29/09/2006 (débit : 52 m ³ /s), c) mission du 16/03/2007 (débit : 48 m ³ /s).....	211
Figure 4-43. Masques de comparaison pour une même surface d'ombres, a) missions du 20/04/2006 et du 29/09/2006 pour un débit de référence de 52 m ³ /s, b) missions du 20/04/2006 et mission du 16/03/2007 pour un débit de référence de 48 m ³ /s, c) missions du 29/09/2006 et mission du 16/03/2007 pour un débit de référence de 48 m ³ /s.....	212
Figure 4-44. Répartition de la végétation aquatique en fonction des hauteurs d'eau (p < 0,0001)....	214
Figure 4-45. Sédimentation de la lône de la Malourdie à partir d'observations de terrain (Michalkova et Piégay, 2007).....	217

Liste des tableaux

Partie 1.

Tableau 1-1. Indicateurs et paramètres utilisés pour le suivi scientifique du programme décennal écologique et hydraulique du Haut-Rhône (modifié d'après Olivier <i>et al.</i> , 2007).....	26
--	----

Partie 2.

Tableau 2-1. Synthèse des résultats obtenus à partir de la matrice de cooccurrence et de la semi-variance pour différentes tailles de fenêtres (pas bidimensionnel) (d'après Carbonneau <i>et al.</i> , 2004).....	59
Tableau 2-2 : Tableau de synthèse des satellites optiques.....	71
Tableau 2-3 : Tableau de synthèse des vecteurs optiques HR.....	72

Partie 3.

Tableau 3-1. Caractéristiques des missions drone.....	83
Tableau 3-2. Tableau comparant la technologie Pixy et un échantillon de plates-formes produisant des images à haute résolution.....	89
Tableau 3-3. Coût minimal en euros par vecteur en fonction de la superficie effective de l'étude (en grisé : vecteur présentant la meilleure rentabilité par superficie couverte).....	91
Tableau 3-4. Rapport entre la capacité de résolution de l'imagerie drone et le choix de la taille des balises (test effectué avec le capteur CANON PowerShot G5 - focale 35 mm).....	98
Tableau 3-5. Nombre d'images des missions réalisées dans le cadre d'une approche photogrammétrique.....	98
Tableau 3-6. Critères de sélection des images pour une application photogrammétrique.....	100
Tableau 3-7. Nombre d'images acquises sur chacun des sites étudiés dans le cadre de survols de plan d'eau.....	101
Tableau 3-8. Nombre d'images exploitables pour l'étude des milieux aquatiques.....	103
Tableau 3-9. Mesures granulométriques sur le banc de galets de Gévrioux (missions du 18/06/2004 et du 26/10/2005).....	106
Tableau 3-10. Paramètres externes issus de l'étape de minimisation (Gévrioux : mission du 21/07/2004 ; Luc en Diois : mission du 29/01/2004).....	120
Tableau 3-11. Estimation des erreurs de localisation entre les points mesurés <i>in situ</i> (balises) et les points calculés pour les deux sites tests.....	121
Tableau 3-12. Caractéristiques des missions au cours desquelles les modèles bathymétriques ont été testés.....	127
Tableau 3-13. Synthèse des résultats des traitements bathymétriques réalisés sur les images produites lors des différentes missions.....	137

Tableau 3-14. Synthèse des propriétés des missions et des résultats des modèles Granulométriques.....	143
Tableau 3-15. Exemples de travaux ayant permis d'élaborer des modèles bathymétriques.....	147
Tableau 3-16. Estimation du nombre de transects nécessaire en fonction de la longueur du tronçon à survoler.....	149

Partie 4.

Tableau 4-1. Caractéristiques hydrologiques des tronçons étudiés (sources : banque HYDRO, CNR, 2000a ; Bravard, 1981, 1994).....	154
Tableau 4-2. Caractéristiques des différentes missions réalisées sur les deux sites de l'Ain.....	170
Tableau 4-3. Bilan du bénéfice des actions sur les sites de recharge et leur tronçon aval.....	190
Tableau 4-4. Caractéristiques des tronçons aval.....	191
Tableau 4-5. Planning des suivis et des travaux et caractéristiques des missions réalisées sur le site « les Grandes îles ».....	199
Tableau 4-6. Planning des suivis et des travaux et caractéristiques des missions réalisées sur le site de la Malourdie.....	200
Tableau 4-7. Couverture aquatique observée surfaces initiales et corrigées pour un débit de référence de 50 m ³ /s et une même surface d'ombres, a) missions du 20/04/2006 et du 29/09/2006, b) mission 20/04/06 et du 16/03/07, c) mission du 29/09/06 et du 16/03/07.....	214

Conclusion générale

Tableau 5-1. Synthèses des questions soulevées dans le cadre des suivis, des indicateurs produits et des paramètres extraits à partir des images drone.....	226
--	-----

Annexe 1. Algorithme pour l'application d'un modèle granulométrique par semi-variance 2D et pour la création d'une carte des D50

```

*****
Définition des variables d'entrée
*****
- image = mosaïque à traiter
- pt_granulo = placettes granulométriques mesurées in situ
- masque = taille de la zone d'échantillonnage
- px = porté de la fenêtre en X
- py = porté de la fenêtre en Y

*****
Lecture des mesures bathymétriques et de la mosaïque
*****
Image = [canal R, canal V, canal B]
Pt_granulo = ptx, pty, D50

- lecture des coordonnées géographiques vers les coordonnées pixels
Image (Lambert2) = ximage, yimage, ptx, pty, pas image x1, pas image y1, x1, y1

Surface en eau = 0

*****
Calcul de la semi-variance et tests des canaux
*****
For N = 0, pt_granulo do begin
  for j = yimage - masque, yimage1 + masque - q do begin
    for l = ximage1[N]-masque, ximage1[N]+masque-px do begin
      - Pour le canal R
      Semi-variance R = (image R [i+p,j+q] - image R [i,j])2
      - Pour canal G
      Semi-variance G = (image G [i+p,j+q] - image G [i,j])2
      - Pour canal B
      Semi-variance B = (image B [i+p,j+q] - image B [i,j])2
    endfor
  endfor
  semi-variance R,G,B = (masque-p)*(masque-q)
endfor

*****
Régression entre les semi-variances et les D50 mesurés
*****
- Calcul des coefficients de l'équation de régression par canal
Coeff. R, G, B = regression (semi-variance R, G, B, D50, CONSTANTE)
- Calcul des coefficients de l'équation de régression pour les 3 canaux
Coeff. (RGB) = regression (semi-variance RGB, D50, CONSTANTE)
- Calculer des coefficients de l'équation de régression par couple de canal
Coeff. (RG) = regression (semi-variance RG, D50, CONSTANTE)
Coeff. (RB) = regression (semi-variance RB, D50, CONSTANTE)
Coeff. (GB) = regression (semi-variance GB, D50, CONSTANTE)

- Calcule des D50 estimés et du R2 en fonction des canaux testés
for l = 0, pt_granulo do begin
  Y [i] = CONSTANTE + Coeff. (RGB) * semivarianceR[i] + Coeff. (RGB) * semivarianceG[i] +
  semivarianceB[i]
endfor

*****
Application du modèle sur l'image
*****
A[n] = tableau image x
B[m] = tableau image y
For m = masque, ximage - masque do begin
  for n = masque, yimage - masque do begin
    for j = B [m] - masque, B [m] + masque - q do begin
      for l = A [n] - masque, A [n] + masque - p do begin
        semi-variance RGB = semi-variance (image [i+p,j+q] - image[i,j])2
      endfor
    endfor
    carte [n,m] = semi-variance RGB / (2 * (masque - p) * (masque - q))
    image_brute [n,m] = CONSTANTE + (coeff. RGB * carto [n,m])
  endfor

- Enregistrement de la carte
Image_tiff = Image D50, image_brute

END

```

Annexe 2. Algorithme de localisation et d'extraction automatique des valeurs radiométriques des mesures des hauteurs d'eau à partir d'une mosaïque

```
*****
Définition des variables d'entrée
*****
- image = mosaïque à traiter
- pt_bathy = mesures bathymétriques [x, y, z]
- p = taille de la fenêtre de convolution

*****
Lecture des mesures bathymétriques et de la mosaïque
*****
Image = [canal R, canal V, canal B]
Pt_bathy = ptx, pty, ptz

- lecture des coordonnées géographiques vers les coordonnées pixels
Image (Lambert2) = ximage, yimage, ptx, pty, pas image x1, pas image y1, x1, y1

Berges = 0

For l=0, pt_bathy do begin
  - Détection des limites du chenal
  if ximage1[l] < 0 and ximage > image and yimage ge 0 and yimage1> imageR then begin
    Mediane canal R = median (image canal R (P))
    Mediane canal V = median (image canal V (P))
    Mediane canal B = median (image canal B (P))

    - Elimination des points en bord de berge
    if Mediane canal RVB eq 255 then Médiane = 0
  endif
endif
endfor

*****
Résultats
*****
- Localisation des points de mesures sur l'image
- Création d'un tableau .txt
C1 = médiane canal R
C2 = médiane canal V
C3 = médiane canal B

end
```

Annexe 3. Algorithme de détection d'une image de référence pour l'ajustement des valeurs radiométriques

```
*****
Définition des variables d'entrée
*****
- images drone rectifiées à traiter

For i=image1, image N do begin

    *****
    Séparation des trois canaux RVB
    *****

    Valeur des pixels canal Rouge
    Valeur des pixels canal Vert
    Valeur des pixels canal Bleu

    *****
    Traitement des histogrammes pour chaque canal
    *****

    - Identification de la valeur maximale (pic de l'histogramme)
    A = max (histogramme (canal R))
    B = max (histogramme (canal V))
    C = max (histogramme (canal B))
    Création d'un tableau des valeurs : [id, canal R, canal V, canal B]
    ABC = moyenne (A, B, C)

    - Identification des bornes min et max de l'histogramme
    Lecture du tableau des valeurs : [D = min(id)], [E = min(id)]

endfor

*****
Résultat (sélection de l'image ayant un pic maximal
et un intervalle min, max le plus grand)
*****
Print, image sélectionnée
Print, 'affichage ABC
Print, D, E

end
```

Table des matières

Remerciements.....	4
Sommaire.....	6
Résumé.....	7
Abstract.....	8

Partie 1. Contexte scientifique **9**

A. Le suivi des formes fluviales.....	11
1. Un enjeu actuel.....	11
2. Un hydrosystème profondément bouleversé.....	12
2.1. La modification anthropique des bassins versants.....	13
2.2. L'installation de digues et de barrages.....	14
2.3. L'extraction de matériaux.....	15
2.4. Les conséquences écologiques et économiques.....	15
3. Des cours d'eau à restaurer.....	15
3.1. Définition d'une restauration.....	15
3.2. Une réglementation récente.....	17
3.3. Comment restaurer ?.....	18
4. Du suivi à l'évaluation.....	19
4.1. Le dispositif.....	19
4.2. Le projet de restauration.....	20
4.3. Le planning de réalisation.....	22

B. Les contraintes de suivi des lits fluviaux et des habitats Associés.....	23
1. Les paramètres de suivi : entre échelle spatiale et fréquence d'échantillonnage...	23
2. L'évaluation : à la recherche d'indicateurs opérationnels.....	25
3. L'imagerie : une réponse aux contraintes de suivi des formes fluviales.....	27
4. Exemples de restauration à évaluer.....	28
4.1. La recharge artificielle.....	28
4.2. La remise en eau des annexes fluviales.....	29

Partie 2. Méthodes de restitution des formes fluviales **31**

A. Apports de la télédétection.....	33
1. La géodésie.....	33
2. L'imagerie de télédétection.....	34
2.1. Principes.....	34
2.2. Interaction entre un rayonnement et un cours d'eau.....	35
2.2.1. Les conditions atmosphériques.....	35

2.2.2. Les propriétés de réflectance de la colonne d'eau.....	36
2.2.3. L'émissivité du sol.....	37
2.3. Les paramètres affectant le signal mesuré.....	38
2.3.1. Ombres portées.....	38
2.3.2. Evaporation.....	39
2.3.3. Turbulence.....	40
2.3.4. Turbidité.....	41
2.3.5. Hétérogénéité de fond de chenal.....	43
B. Les techniques de télédétection active.....	44
1. Restitution des surfaces émergées.....	44
2. Restitution de la bathymétrie.....	45
C. Les techniques de télédétection passive.....	46
1. Restitution des états de surface.....	47
1.1. Détermination d'unités spatiales homogènes.....	47
1.1.1. Approche pixel à pixel.....	47
1.1.1.1. Classification non supervisée.....	47
1.1.1.2. Classification supervisée.....	48
1.1.2. Approche orientée objet.....	51
1.1.3. Synthèse.....	53
1.2. Mesure de la granulométrie des bancs de galets.....	55
1.2.1. Principes.....	55
1.2.2. Méthodes d'échantillonnage manuel.....	55
1.2.3. Méthodes d'échantillonnage automatique.....	56
1.2.3.1. A l'échelle de la parcelle.....	56
1.2.3.2. A l'échelle du banc.....	57
1.2.4. L'auto-corrélation spatiale.....	57
1.2.4.1. La matrice de co-occurrence.....	57
1.2.4.2. La semi-variance.....	58
2. Restitution topographique.....	60
2.1. Les surfaces émergées par photogrammétrie.....	60
2.1.1. Etat de l'art.....	61
2.1.2. Principes de la photogrammétrie.....	61
2.1.3. Les sources d'erreur.....	61
2.1.4. L'orientation interne et externe des caméras.....	62
2.1.5. Corrélation des images stéréoscopiques.....	65
2.1.6. Restitution et précision de la topographie.....	66
2.2. Les surfaces immergées.....	67
2.2.1. Etat de l'art.....	67
2.2.2. Les modèles bathymétriques physiques.....	67
2.2.3. Les modèles bathymétriques empiriques.....	67

D. Paramètres clefs des restitutions des processus fluviaux par télédétection.....	69
1. Le contexte général.....	69
1.1. L'imagerie satellite.....	69
1.2. L'imagerie aérienne.....	69
2. Résolution spatiale.....	73
3. Fréquence de passage.....	74
4. Avènement de nouvelles plates-formes radio télécommandées.....	75

Partie 3. L'acquisition et la restitution des formes fluviales par imagerie à très haute résolution **77**

A. Mise en œuvre du drone Pixy.....	79
1. Présentation de la plate-forme.....	79
2. Potentialités et limites de la technologie.....	83
2.1. Résolution spatiale et fréquence d'acquisition.....	84
2.2. Les contraintes météorologiques.....	84
2.2.1. Conditions aérologiques.....	84
2.2.2. Conditions pluviométriques.....	86
2.2.3. Bilan.....	87
3. Positionnement du drone parmi les autres vecteurs aériens et spatiaux.....	88
4. Les protocoles développés.....	91
4.1. La rectification des images.....	91
4.1.1. Les algorithmes de transformation.....	92
4.1.2. La stratégie d'échantillonnage des points de contrôle.....	95
4.2. Le géoréférencement des points de contrôle.....	96
4.3. La préparation des sites d'étude.....	96
4.4. Acquisition des images pour des applications photogrammétriques.....	98
4.4.1. Les contraintes d'exploitation.....	98
4.4.1.1. Le nombre et la répartition spatiale des balises.....	99
4.4.1.2. Le taux de recouvrement.....	99
4.4.2. Bilan des acquisitions répondant aux contraintes d'exploitation.....	100
4.4.2.1. L'analyse des couples stéréoscopiques.....	100
4.4.2.2. L'analyse des couples stéréoscopiques à l'échelle des bancs de galets.....	100
4.5. Acquisition des images en milieu aquatique.....	101
4.5.1. Les contraintes d'exploitation.....	101
4.5.1.1. Le nombre de balises.....	101
4.5.1.2. Le cadrage.....	101
4.5.1.3. Le filé.....	102
4.5.2. Bilan des acquisitions répondant aux contraintes d'exploitation.....	102

B. Restitution des états de surfaces en 2D : la granulométrie des bancs de galets.....	104
1. Calibrage du modèle par semi-variance 2D.....	104
1.1. <i>Les mesures granulométriques de terrain.....</i>	104
1.2. <i>Les paramètres d'ajustements du modèle.....</i>	106
1.2.1. <i>La résolution.....</i>	106
1.2.2. <i>La taille de la fenêtre.....</i>	107
1.2.3. <i>La portée.....</i>	107
1.2.4. <i>Les canaux.....</i>	109
2. Restitution des faciès granulométriques.....	109
2.1. <i>Survol à basse altitude.....</i>	109
2.2. <i>Survol à altitude moyenne.....</i>	111
2.3. <i>Impact des résolutions sur les modèles.....</i>	112
2.4. <i>Interprétation des cartes granulométriques.....</i>	113
C. Restitution des états de surfaces en 3D.....	115
1. La restitution de la topographie émergée.....	115
1.1. <i>Les micro-formes fluviales.....</i>	115
1.1.1. <i>Essai d'une restitution topographique du banc de Gévrieux (Ain).....</i>	115
1.1.2. <i>Essai d'une restitution topographique du banc de Luc-en-Diois (Drôme).....</i>	117
1.2. <i>Interprétation des résultats.....</i>	119
1.3. <i>Le DGPS : technique de substitution.....</i>	121
2. La restitution de la bathymétrie.....	123
2.1. <i>Travaux préparatoires.....</i>	123
2.1.1. <i>Le mode multi-photos.....</i>	123
2.1.2. <i>Calibration des mesures de hauteur d'eau.....</i>	125
2.2. <i>Impacts du signal lumineux sur les modèles bathymétriques empiriques.....</i>	127
2.2.1. <i>Réponses des valeurs radiométriques sur les hauteurs d'eau.....</i>	129
2.2.2. <i>Conséquences sur les modèles.....</i>	132
2.3. <i>Trois approches à considérer.....</i>	138
D. Synthèse et discussion.....	140
1. L'outil drone : une solution miracle ?.....	140
2. Le modèle granulométrique 2D : entre paramètres d'ajustement et résolution des images.....	141
2.1. <i>Réponse des paramètres d'ajustements.....</i>	142
2.2. <i>Limites et perspectives des restitutions granulométriques par imagerie aérienne.....</i>	143
3. Les contraintes de restitution par photogrammétrie.....	144
3.1. <i>Le couple stéréoscopique : une configuration difficile à obtenir.....</i>	144
3.2. <i>Les améliorations technologiques.....</i>	145
4. La sensibilité des modèles bathymétriques.....	146
4.1. <i>Les paramètres clefs.....</i>	146
4.2. <i>Préconisations d'utilisation.....</i>	148

4.3. Une perspective d'amélioration.....	149
--	-----

Partie 4. Application de l'imagerie à très haute résolution pour le suivi des formes fluviales dans le cadre de programmes de restauration : basse vallée de l'Ain et Chautagne 151

A. Cadre géographique..... 153

1. La basse vallée de l'Ain..... 154

1.1. Présentation générale..... 154

1.2. L'ajustement récent d'un cours d'eau..... 155

1.2.1. Historique d'une métamorphose fluviale..... 155

1.2.2. Evolution récente (post 1945)..... 156

1.2.3. L'effet des barrages..... 158

1.3. Un programme de recharge expérimental..... 159

2. La Chautagne (Haut-Rhône)..... 160

2.1. Le Rhône court-circuité de Chautagne..... 160

2.1.1. La maîtrise d'un fleuve..... 160

2.2.2. La mise en valeur du Rhône..... 163

B. Evolution de l'impact de la recharge sédimentaire sur les faciès alluviaux à partir d'images THR : exemple de la basse vallée de l'Ain.....165

1. Caractéristiques du périmètre de suivi et des sites de recharge sédimentaire..... 165

1.1. Le périmètre de suivi..... 165

1.2. Les sites de recharge : « Carronnières » et « Bellegarde »..... 166

1.2.1. Une recharge équivalente au déficit annuel..... 166

1.2.2. Modalités des opérations de recharge..... 167

1.2.3. Calendrier des travaux et conditions hydrologiques..... 168

2. Indicateurs de suivi de la recharge..... 169

2.1. Les paramètres observés..... 169

2.2. Le protocole de suivi..... 169

2.3. Etat de référence post-travaux..... 170

3. Effets topographiques de la recharge sédimentaire dans le chenal..... 172

3.1. Evolution des surfaces de bancs au sein de la bande active..... 172

3.1.1. Ajustement de la hauteur d'eau à un débit de référence..... 172

3.1.2. Comportement morphologique du site de recharge des Carronnières..... 173

3.1.3. Réponse du tronçon aval des Carronnières..... 175

3.1.4. Comportement morphologique du site de recharge de Bellegarde..... 176

3.1.5. Réponse du tronçon aval de Bellegarde..... 178

3.2. Evolution de la topographie du chenal..... 179

3.2.1. Ajustement de la hauteur d'eau à un débit de référence..... 179

3.2.2. Comportement morphologique du site de recharge des Carronnières..... 180

3.2.3. Réponse du tronçon aval des Carronnières..... 184

3.2.4. Comportement morphologique du site de recharge de Bellegarde.....	184
3.2.5. Réponse du tronçon aval de Bellegarde.....	187
4. Synthèse des opérations de recharge.....	188
4.1. Bilan du site des Carronnières.....	188
4.2. Bilan du site de Bellegarde.....	189
4.3. Bilan d'un programme expérimental.....	189
C. Evaluation des actions d'entretien et de restauration à partir d'images THR : exemple du RCC de Chautagne	192
1. Caractéristiques des sites.....	192
1.1. Conditions hydrologiques pendant la période d'étude.....	192
1.2. Entretien du banc de galets « les Grandes Iles ».....	193
1.3. Restauration de la lône de la Malourdie.....	195
2. Description des suivis.....	198
2.1. Les paramètres de suivi.....	198
2.2. Les protocoles de suivi.....	198
2.2.1. Site « les Grandes Iles ».....	198
2.2.2. Site de la Malourdie.....	200
3. Impacts des opérations d'essartages sur le site « les Grandes Iles ».....	201
3.1. Méthode d'ajustement de la ligne d'eau.....	202
3.2. Caractérisation des changements de végétation par imagerie.....	202
3.3. Evolution topographique du banc de galets.....	204
4. Suivi morphologique de la lône de la Malourdie.....	207
4.1. Calage méthodologique.....	207
4.2. Evolution de la topographie du chenal.....	208
4.3. Evolution de la couverture végétale aquatique.....	211
5. Synthèse et discussion.....	215
5.1. Bilan des opérations d'entretien et de restauration.....	215
5.1.1. Des actions d'entretien à ajuster.....	215
5.1.2. Une restauration qui reste à évaluer.....	216
5.2. Quelques préconisations pour améliorer les suivis actuels.....	217
Conclusion générale.....	220
1. L'apport méthodologique des images THR pour l'étude des cours d'eau.....	222
2. La restitution spatiale des unités fonctionnelles du système fluvial : une approche en 2D et en 3D.....	223
3. L'évaluation des programmes de restauration.....	225
4. Les perspectives scientifiques.....	226
Références bibliographiques.....	228
Liste des figures.....	239

Liste des tableaux.....	246
Annexe 1. Algorithme pour l'application d'un modèle granulométrique par semi-variance 2D et pour la création d'une carte des D50.....	248
Annexe 2. Algorithme de localisation et d'extraction automatique des valeurs radiométriques des mesures des hauteurs d'eau à partir d'une mosaïque.....	249
Annexe 3. Algorithme de détection d'une image de référence pour l'ajustement des valeurs radiométriques.....	250
Table des matières.....	251