

Utilisation de la télédétection pour la caractérisation des corridors fluviaux : exemples d'applications et enjeux actuels

Characterisation of alluvial plains by remote sensing: cases studies and current stakes

Jérôme Lejot^{**}, Hervé Piégay^{*}, Peter David. Hunter^{***}, Bertrand Moulin^{*}, Mathieu Gagnage^{*}

Résumé

Les progrès techniques réalisés ces dernières années en télédétection laissent entrevoir des pistes prometteuses dans le domaine fluvial et notamment dans l'étude des petits et moyens cours d'eau. Les capteurs ont en effet une meilleure résolution permettant d'étudier des chenaux de plus petite taille ; les vecteurs se diversifient et la répétitivité des acquisitions est également une évolution importante permettant de suivre des changements qui peuvent se manifester sur des pas de temps intra-annuels. Les données satellitaires sont par ailleurs complétées par des acquisitions aéroportées permettant d'aborder ces phénomènes non plus seulement à l'échelle locale mais à l'échelle de réseaux hydrographiques de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres comme l'illustrent les campagnes nationales de l'IGN ou bien le récent développement de compagnies privées proposant des prestations aériennes multi-échelles. Ces acquisitions peuvent être planifiées dans un cadre pluri-annuel comme dans le cas des missions de l'IGN ou bien s'inscrire dans des actions plus ponctuelles, reposant alors sur des plates-formes plus flexibles (hélicoptère, ULM, drone). L'objectif de cette contribution est ainsi d'illustrer ces évolutions et ces enjeux à partir d'une série de travaux et d'exemples concrets s'appuyant à la fois sur des données satellitaires (SPOT, Landsat, QuickBird) mais aussi aéroportées (drone) et abordant différentes échelles spatiales et temporelles, qu'il s'agisse de tronçons fluviaux de plusieurs dizaines de kilomètres ou de sections plus courtes sur lesquels l'impact des activités humaines a été diagnostiqué.

Mots clés : formes fluviales, forêt alluviale, télédétection, images satellites, images aériennes, suivis multi-temporels

Abstract

Recent progress in remote sensing is promising significant advances in fluvial sciences particularly in the study of small and medium rivers. Indeed, sensor resolutions are improving markedly thus allowing for narrower channels to be imaged and acquisition frequencies for airborne methods have also improved thus allowing for multi-annual surveys. Furthermore, satellite data can now be complemented by catchment scale high resolution airborne orthorectified imagery often collected by national agencies such as the IGN. Data acquisition can now be planned on a multi-annual basis and acquired from a range of platforms such as standard survey aircraft, helicopters, ultralight aircraft or unmanned aerial vehicles (UAVs). The aim of this paper is to illustrate progress in this field with a series of examples. Using both satellite data (SPOT, Landsat and QuickBird) and UAV data, the paper will examine a range of temporal and spatial scales from river reaches exceeding ten kilometres to smaller reaches where human impacts have been diagnosed

Key words: fluvial forms, alluvial forest, remote sensing, satellite images, aerial images, multi-temporal monitoring

Abridged English version

Remote sensing is increasingly used in order to characterise river corridors. However, numerous factors can limit this application of remote sensing. The spatial resolution of the sensors must be adapted to the detection of river and flood plain features (e.g. channel, bars, wetlands and riparian forests). Furthermore, the temporal acquisition rate of data must be capable of sampling rapid change, sometimes on the order of a few hours post-flood. As a result of these limitations, satellite remote sensing has only been applied to large rivers and their catchments (Muller *et al.* 1993, Smith 1997). In recent years, new satellite data has begun to offer data on metric (e.g. SPOT 5) and sub-metric scales (e.g. Ikonos-1999, QuickBird-2001 and Pleiade-2010). This new high resolution data is available and better suited to the characterisation of intra-fluvial landscapes. Despite this progress, few studies have applied satellite remote sensing to a detailed characterisation of fluvial forms owing to still insufficient spatial resolution.

Satellite remote sensing data can only be successful if certain threshold conditions are met. These threshold conditions insure that the remotes sensing data is of sufficient spatial and temporal resolution to adequately characterise the river and the surrounding floodplain. We present three examples.

First, we discuss the lower Ain valley. Landsat 7 TM data is used to examine the impact of a series of hydropower dams on the growth rates of riparian vegetation. Given the resolution of Landsat data it is not possible to detect individual forest units. However,

^{*} Université de Lyon - UMR 5600 CNRS. Plateforme de l'Ens de Lyon- 15, parvis René Descartes - BP 7000 - 69342 Lyon Cedex 07, France.

^{**} Unité de recherche Biologie des Ecosystèmes Aquatiques - CEMAGREF - 3, bis Quai Chauveau - CP 220 - 69336 Lyon Cedex 09 (jerome.lejot@cemagref.fr).

^{***} School of Biological & Environmental Sciences - University of Stirling - Stirling - FK8 1US - Scotland.

the threshold conditions can be met if we add additional data layers. In this case the Corine Biotopes layer was combined to an NDVI layer calculated from landsat data (fig. 1). This demonstrates an important downstream trend where incised, upstream, sectors are clearly distinct from the downstream, un-incised, sectors. Therefore, this data clearly localises the impact of the dam on vegetation health.

Second, we consider the spatial variability of woody debris in the catchment of the Isère river upstream of Grenoble. Our objective is to use SPOT 5 imagery in order to identify origin and retention points for the entire catchment. Supervised classification was used to segment the SPOT 5 image in three classes : open water, vegetated areas and exposed gravel bars (fig 2.) This result illustrates the downstream structures for each dominant class and allows us to identify two principal domains: an upstream, anabranching, domain with gravel bars and vegetated islands (fig 2A and 2C) and a single thread downstream domain (fig 2D and 2E). This structural difference provides a partial explanation to the spatial distribution of woody debris. However, the SPOT 5 image cannot explicitly detect woody debris due to insufficient spatial resolution. In order to offset this limitation, field surveys were conducted in order to localise woody debris. These field surveys confirm the presence of favorable conditions to the presence of woody debris (fig 2F)

Third, we consider the spatial and temporal distribution of conifers in the alluvial forest of the Drôme river. Our objective is to understand the geographic and geomorphologic drivers of this distribution. In order to assess antecedent structures, dendrochronological surveys were required. This ground work was planned using QuickBird satellite data which has sufficiently high resolution to identify mature individual tree crowns. A multispectral supervised classification has allowed for the production of a spatial distribution map of conifers along a 7 km river reach (fig 3).

When satellite data is unsuitable, airborne images can be used (fig 4 and 5). In general, small scale river surfaces are characterised with airborne data. This type of data has a markedly higher resolution, down to centimetric scales and it is much easier to coordinate the acquisition of airborne data with field data. Here we illustrate two key applications of high resolution airborne data: river depth and grain size mapping.

As a first case study, we discuss bathymetric measurements of the wetted surface of the Malourdie oxbow lake in the Haut Rhône valley. The images were acquired with a Pixy Unmanned Aerial System (UAS). The main objective is to study sedimentation and eutrophication processes responsible for the infilling of oxbow lakes. Using well established methods (Carbonneau *et al.*, 2006 ; Lejot *et al.*, 2007), we establish a statistical correlation between the brightness values of river pixels and actual depths measured in the field. A regression model ($R^2=0.89$ and $p<0.001$) was developed and has allowed for the production of bathymetric maps (fig 6A). Second, we show an example of grain size mapping. Once again we use high resolution imagery obtained from the Pixy UAS. This imagery shows well defined homogeneous grain size patches present on the exposed gravel bars (fig 7A). Following established methods (Carbonneau *et al.* 2004) a predictive relationship was developed in order to predict surface D_{50} . Validation of this model is shown in figure 7B the predicted vs observed relationship has an R^2 of 0.98 with $n=6$. In figure 7C, we can see the resulting grain size map.

Multitemporal data acquisitions have their own specific limitations which have resulted in very few studies. In the case of river environments, only UAS have the low deployment cost and required flexibility. For example, we discuss a study of morphological change following a sediment management program aiming to redress the reach scale sediment deficit resulting from the construction of dams. Over 22 000 m^3 were mechanically injected into the river. The example follows the progress of this sediment through a 5km reach. This reach contains two injection sites: Carronières (3660 m^3 injected) and Bellegarde (18800 m^3 injected). The bathymetry was measured with high resolution imagery acquired from a Pixy UAS before and 1 year after the injection (fig 9). This has allowed for a sediment budget of the reach to be established (table 2). These maps have also allowed us to measure that the distance travelled by the sediment is between 230m to 380m thus demonstrating the use of imagery for the evaluation of river management works.

Introduction

Compte tenu de ses capacités synoptiques et multi-temporelles, la télédétection est de plus en plus utilisée pour caractériser les formes fluviales, leur évolution au cours du temps et, dans certains cas, les flux de matières qui les régissent (Chandler, 1999 ; Gilvear et Bryant, 2003 ; Ferguson, 2007). L'imagerie permet aussi d'étudier les tâches paysagères qui composent le corridor végétal riverain et les pressions humaines qui les affectent. Les facteurs limitant l'utilisation de l'imagerie pour la caractérisation physique des cours d'eau et de leurs marges végétales sont nombreux compte tenu de la taille de ces objets, de leur caractère linéaire et des changements qui les affectent sur des pas de temps courts. C'est ainsi que la surface du plan d'eau et sa couleur peuvent varier rapidement au gré des conditions météorologiques et des fluctuations du débit. La végétation riveraine et aquatique enregistre également des fluctuations saisonnières. Le couvert de macrophytes observé sur un bras mort du Haut Rhône apparaît par exemple en mars et s'étend progressivement sur le plan d'eau tout au long du printemps alors que celui-ci est complètement ouvert en hiver (Lejot, 2008). La résolution spatiale des supports doit ainsi être adaptée à la taille des différentes unités qui composent le corridor fluvial (chenaux, bancs de galets, forêts alluviales, zones humides), et les plates-formes d'acquisition doivent être à même de couvrir un même site plusieurs fois dans l'année, voire parfois quelques heures ou quelques jours après qu'une crue se soit produite. Dans ce contexte, est-il envisageable d'utiliser des images satellites pour caractériser ces objets ? Sont-elles également utiles pour appréhender leur évolution temporelle ? Dans une première partie, nous présentons quelles sont les modalités d'utilisation et les potentialités pratiques des images satellites pour caractériser les entités du corridor fluvial en fonction des résolutions spatiales offertes. Compte tenu de certaines des limites posées par l'utilisation des images satellites pour cette caractérisation, les potentialités offertes par les photographies aériennes sont ensuite abordées à partir d'exemples illustratifs. Dans une seconde partie, nous abordons la question des suivis temporels à partir d'images satellites en montrant les limites actuelles de ces informations. Là encore, compte tenu des contraintes d'utilisation de ces données, certains travaux multi-temporels s'appuyant sur des photographies aériennes

sont ensuite présentés afin de montrer comment celles-ci complètent les sources satellites.

Caractérisation par imagerie des corridors fluviaux

Les études réalisées en géomorphologie fluviale à partir d'images satellites ont principalement été conduites sur des rivières de grande taille et leur bassin-versant (Muller *et al.*, 1993 ; Smith, 1997). C'est le cas de travaux engagés sur le Mississippi (Gomez *et al.*, 1997), sur l'Amazone (Mertes *et al.*, 1993 ; Miranda *et al.*, 1998, Martinez et Le Toan, 2007), sur le Yangtze (Zhang *et al.*, 2004 ; Hamilton *et al.*, 2007), sur le Mékong (Gupta et Liew, 2007) et sur le Brahmapoutre (Takagi *et al.*, 2007). Jusqu'à présent, la capacité de résolution des satellites n'était pas suffisante pour identifier des unités de plus petites tailles à l'intérieur d'un corridor fluvial, telles que les chenaux en eau (bras principaux et secondaires, bras morts) et leurs caractéristiques hydro-morphologiques (seuils, mouilles) ainsi que les caractéristiques des surfaces exondées (granularité des bancs, espèces ou groupements au sein du corridor riverain, embâcles de bois, blocs). Depuis quelques années, de nouveaux satellites à haute résolution (HR ; Toutin, 2004) produisant des images sup-métriques (*e.g.*, SPOT 5, dont la résolution atteint 2,5 m) et sub-métriques (*e.g.*, Ikonos-1999, QuickBird-2001 et Pleiade-2010, avec respectivement 1 m, 0,6 m et 0,7 m de résolution), sont disponibles pour caractériser les structures paysagères intra-fluviales. Malgré ces récents progrès, peu d'études de caractérisation des formes ont encore été conduites à partir d'images satellites.

Les conditions-seuils de détection des objets

La restitution des entités fluviales ou de leurs caractères surfaciques se heurte donc bien souvent à un niveau de résolution des images satellites qui est insuffisant. Celui-ci est implicitement lié à des seuils de détection et d'identification (Bel Hadj, 2001 ; IFEN et ONCFS, 2005). Sur la base du théorème de Nyquist-Schannon, ces auteurs soulignent qu'un minimum de 4 pixels est requis pour que la détection des objets soit satisfaisante et 4 fois plus pour qu'ils puissent être identifiables. Dans la pratique, ce rapport est beaucoup plus grand selon la complexité des formes à étudier. Ainsi, différentes « conditions-seuils » de détection peuvent être définies à partir desquelles l'analyse des entités fluviales peut aboutir. Afin d'illustrer cela, nous présentons une série d'exemples portant sur des problématiques fluviales différentes mais toutes abordées à travers l'utilisation d'images satellites (LandSat 7 TM, Spot 5 et QuickBird). Celles-ci doivent permettre de caractériser les unités fluviales qui composent les milieux abordés (eau, milieu riverain) mais également leur caractéristique en terme de couvert végétal (végétation alluviale, bois flotté, conifères).

Exemple 1 : la basse vallée de l'Ain. Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact d'une série de barrages (dont le plus à l'aval est le barrage d'Allemand ; fig. 1A) sur la croissance de la végétation rivulaire située sur le tronçon aval. Plus particulièrement, il s'agit de déterminer si en amont de Priay (fig. 1), l'incision du chenal, à laquelle sont associés un affaissement de la nappe et peut-être un stress hydrique des végétaux, a une incidence sur la croissance et l'état sanitaire des peuplements, qu'il s'agisse de frênes (*Fraxinus excelsior* L.) ou de peupliers (*Populus nigra*), dominants sur ce tronçon. L'étude a été réalisée à partir d'une image Landsat TM de 2001 ayant une résolution de 30 m. La basse vallée de l'Ain est caractérisée par un patron forestier très hétérogène avec dans sa partie amont la présence d'une multitude de *taches de végétation* de faibles superficies alors que la partie aval correspond à des entités forestières plus massives. Dans ce contexte, la résolution d'une image Landsat ne permet pas une détection rigoureuse des unités forestières concernées sur l'ensemble du tronçon. Les « conditions-seuils » d'identification ne sont pas atteintes dans la partie amont pour que ces unités puissent être cartographiées d'une façon exhaustive. En revanche, ces conditions sont remplies lorsque l'image satellite est couplée à une autre couche d'information telle que la couche *Corine Biotopes* (Dumas, 2004) réalisée à partir de relevés *in situ* et constituée de polygones (*taches* grisées ; fig. 1A). L'image Landsat disposant de canaux appartenant au domaine de l'infrarouge, il nous est ainsi possible de calculer un indice de végétation [NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)] basé sur le rapport des canaux rouge et proche infrarouge. Ainsi, pour chaque polygone de la couche *Corine Biotopes*, un indice de végétation a été calculé pour évaluer l'état de la biomasse celui pouvant être considéré comme un proxy du stress hydrique induit par les changements hydro-morphologiques le long du gradient amont/aval (Foody *et al.*, 2003). Le coefficient de variation de l'indice NDVI a été calculé par polygone et par image, afin de représenter longitudinalement cette information. La fig. 1B présente la situation de l'année 2001. Celle-ci révèle la présence d'une importante variation longitudinale de la valeur de l'indice calculé par chacun des polygones forestiers, les secteurs en amont de Priay (secteurs incisés) se distinguant assez clairement de ceux en aval (secteurs non incisés). Les valeurs décroissent rapidement de Priay à Neuville-sur-Ain localisé 15 km en amont et caractérisent ainsi bien le secteur connu comme étant incisé (Rollet, 2007). Un test de Mann-Whitney souligne ainsi que les valeurs de l'indice NDVI sont statistiquement plus faibles en moyenne à l'amont de Priay qu'à l'aval ($w = 12134$ et $p < 0,0001$). L'impact du barrage sur l'état sanitaire des milieux riverains est ainsi confirmé et la zone concernée par ce phénomène est également localisée. L'augmentation progressive de l'indice de l'amont vers l'aval semble montrer que le phénomène n'est pas uniforme mais tendrait à s'atténuer vers l'aval.

Exemple 2 : variabilité spatiale de la fréquence des bois morts dans le réseau hydrographique de l'Isère en amont de Grenoble. L'étude a été conduite à partir d'images Spot 5 (Moulin, 2005). L'objectif de cette étude est d'identifier, à

l'échelle du réseau hydrographique, l'origine et les conditions de rétention du bois mort, afin de mieux cibler les mécanismes et les secteurs de production et de stockage. Cette démarche a pour but de comprendre comment se répartissent les stocks de bois sur le *continuum* fluvial et quels sont les facteurs qui les contrôlent afin de proposer des actions d'entretien des cours d'eau qui soient mieux ciblées. Le choix du support s'est porté sur une image Spot 5 panchromatique ayant une résolution de 2,5 m et datant du 19 juillet 2002, dans le but de cartographier, l'espace intradigues. Une classification supervisée a été effectuée afin de restituer les trois compartiments clé du corridor : les zones en eau, les zones végétalisées et les bancs de galets (fig. 2). Comme ces différentes entités présentent des superficies supérieures à 1 ha pour les plus petites, la résolution de l'image Spot est tout à fait pertinente pour les identifier à partir de ce support. Les trois unités fluviales concernées ont ainsi pu être cartographiées (fig. 2). Ces premiers résultats permettent alors de mettre en lumière l'organisation longitudinale des entités fluviales dominant sur le tronçon considéré et notamment d'identifier les tronçons potentiellement favorables au piégeage des embâcles. Ainsi, deux principaux secteurs ont été localisés : 1) les 50 km amont correspondent à un secteur qui associe des bancs et des îles végétalisées. Parfaitement visibles sur les 3 premières restitutions (fig. 2 A à C), ce secteur présente une mosaïque fluviale complexe. Il est composé d'îlots boisés, de chenaux secondaires, de bancs de convexité et de bancs médians. Cette complexité structurale est favorable aux dépôts de bois morts. 2) Les 50 derniers kilomètres aval sont en revanche caractérisés par un chenal unique (fig. 2 D et E) où les bancs ou les îles végétalisées, qui sont les principaux obstacles à la migration des bois flottés, sont moins fréquents. De fait, cette différence structurale explique en grande partie la répartition des bois flottés sur ce *continuum* fluvial.

En revanche, ces mêmes images Spot ne peuvent pas être utilisées pour dénombrer les bois morts (troncs et embâcles) dans les secteurs révélés par le précédent traitement, comme étant potentiellement favorables. Malgré la haute résolution des images Spot 5, les « conditions/seuils » de détection et d'identification ne peuvent pas être atteintes. A.W. Marcus *et al.* (2003) avaient déjà montré que des images ayant au moins une résolution de 1m étaient nécessaires pour détecter des troncs isolés dans le lit d'un cours d'eau.. Pour palier cette insuffisance de résolution, des relevés *in situ* ont été réalisés afin de localiser les troncs et les embâcles. Dans ce but, le fond de vallée a été découpé en tronçons homogènes d'une longueur standardisée de 250 m afin de faire le lien entre la densité des dépôts de bois et la structure paysagère du corridor (eau, bancs de galets, végétation riveraine) caractérisée à partir des images. Les relevés sont présentés sous forme de fréquences cumulées du nombre de troncs et d'embâcles présents dans les tronçons homogènes (fig. 2F). L'observation des courbes confirme l'existence des deux secteurs favorables à la présence de bois et d'embâcles et précédemment identifiés sur les images SPOT. En effet, 80 % des troncs et 60 % des embâcles sont localisés sur les 50 premiers kilomètres amont, un secteur où alternent îles et bancs. Les 50 kilomètres aval concentrent peu de dépôts de bois morts, étant essentiellement composés d'îles perchées en bordure d'un chenal unique. Ces résultats soulignent que la restitution par classification couplée à des relevés *in situ* se révèle adaptée pour comprendre comment la structure paysagère du corridor fluvial contrôle la distribution des dépôts de bois morts.

Exemple 3 : répartition spatiale des conifères au sein de la forêt alluviale de la Drôme (à l'aval de Luc-en-Diois ; fig. 3). L'objectif est de comprendre quels sont les déterminants géographiques de cette répartition, en liaison avec l'histoire morphologique de la plaine, qui contrôlent les conditions stationnelles (profondeur de nappe et contexte sédimentaire). Pour y répondre, des mesures dendrométriques doivent être menées sur un échantillon d'individus. Afin de faciliter la réalisation de ces mesures *in situ*, un travail de repérage doit être réalisé pour orienter de façon pertinente les campagnes de terrain. Dans ces conditions, une fois encore l'imagerie satellite constitue une source d'information précieuse pour localiser efficacement les unités à étudier. Ce travail a été réalisé à partir d'une image satellite QuickBird dont la particularité est d'offrir une résolution sub-métrique (0,6 m en mode panchromatique et 2,5 m en mode couleur) permettant ainsi de cartographier des objets géographiques dont la taille correspond au houppier d'un individu mature. L'image exploitée a été acquise en hiver afin de faciliter la détection des conifères, ceux-ci se distinguant alors bien des feuillus en phase de dormance. C'est à partir du calcul de l'indice NDVI qu'une classification « orientée objet » a été réalisée. Cette technique plus récente que les classifications conventionnelles utilisées précédemment allie à la fois une analyse texturale (radiométrique) des pixels d'une image et une analyse structurale portant sur la forme des objets à caractériser. Dans une première étape, l'image QuickBird est segmentée pour identifier les objets géographiques et dans un second temps, le résultat de la segmentation est exploité afin de classer les valeurs radiométriques de ces objets. La résolution des canaux correspondant au rouge et à l'infrarouge n'étant que de 2,5 m - cette résolution n'est pas adaptée à la taille des unités végétales à restituer -, un ré-échantillonnage de l'image (fusion par opérateur bi-cubique) a été effectué à partir du canal panchromatique afin de bénéficier d'une résolution finale de 0,6 m. Le résultat de cette classification a permis de réaliser une carte de la répartition supposée des conifères sur un tronçon fluvial de 7 km (fig. 3). Ce résultat montre qu'il est possible de travailler à l'échelle des houppiers à partir d'une image satellite à résolution décimétrique. Des relevés de végétation devront alors être effectués afin de confronter les résultats obtenus.

A travers ces trois exemples, nous pouvons dresser un premier bilan des contraintes de résolution des images satellites pour caractériser différents objets géographiques au sein des corridors fluviaux :

- Les satellites à haute résolution permettent maintenant de caractériser la structure paysagère de cours d'eau de taille moyenne alors que les travaux n'avaient porté jusqu'à maintenant que sur des grands fleuves mais ils ne permettent pas tous de détecter des objets de petite taille comme le houppier des arbres ou les bois morts déposés sur les bancs, ou bien l'état de surface de certaines entités spatiales (granulométrie des bancs, caractéristique de l'écoulement, taux de recouvrement de la végétation arborée). Les exemples présentés mettent également en avant les démarches qui doivent être mises en œuvre pour essayer d'exploiter l'information disponible et de la compléter le cas échéant par des relevés

in situ, si l'on souhaite aller plus en avant dans l'étude fine des processus à étudier.

- Si les images satellites permettent principalement de rendre compte des méso-formes fluviales, leur utilisation pour caractériser des cours d'eau de rang moyen, voire les objets qui les composent, est encore rare car les satellites couvrant des résolutions appropriées sont beaucoup plus récents. La plupart des études réalisées actuellement exploitent préférentiellement les photographies aériennes car elles offrent des résolutions spatiales décimétriques à centimétriques (actuellement 0,5 m pour les photographies aériennes de l'IGN). A cette échelle, l'identification des entités du corridor fluvial telles que les unités de végétation (Marston *et al.*, 1995 ; Perrez Corraera, 2004 ; Dufour, 2005), les habitats aquatiques (Puestow *et al.*, 2001) ou encore les caractéristiques des écoulements (Lane *et al.*, 2000) est alors possible. La fig. 4 illustre ces propos à partir de deux exemples, celui d'un bras mort et celui d'un banc de galets représentés à travers trois résolutions différentes : inférieure à 0,05 m (image prise à partir du drone Pixy), 0,5 m (résolution IGN) et 1 m (résolution Ikonos en mode panchromatique). Certains objets géographiques, qu'il s'agisse d'un chenal (largeur : 14 m) ou bien d'un arbre riverain (houppier de 4 m de diamètre) peuvent être détectés et caractérisés à partir de campagnes aéroportées. A une échelle plus fine, comme celle correspondant aux galets, seule une résolution centimétrique peut répondre aux contraintes de détection qu'impose la taille de ces particules. La résolution submétrique qui est la meilleure résolution satellite aujourd'hui offerte ne permet pas de caractériser ces objets ou bien avec difficulté. Celle-ci offre néanmoins la possibilité d'appréhender des entités fluviales plus grossières telles qu'un chenal de plusieurs kilomètres ou bien un ensemble forestier dont la détection peut être utile pour un pré-échantillonnage. Présentant par ailleurs des canaux spécifiques (proche infrarouge, infrarouge thermique...), pas forcément disponibles lors d'acquisition aéroportées plus conventionnelles, ces satellites apportent des informations précieuses exploitables dès que des entités spatiales de taille suffisante peuvent être étudiées. Là encore, toute l'image n'a pas besoin d'être exploitée de manière standardisée et seules les entités de taille suffisante peuvent faire l'objet d'une analyse spécifique. Ainsi, l'avenir est sans doute à l'emboîtement de ces images de différentes résolutions. La possibilité d'acquérir un ensemble d'images à différentes altitudes peut permettre d'identifier les macro-formes au sein desquels, par échantillonnage, une caractérisation de leur état de surface ou une détection d'objets plus fins est alors possible. Afin d'atteindre ce niveau de précision, de nouvelles plates-formes ultra-légères radio-télécommandées, volant à très basse altitude (fig. 5) et produisant des images à très haute résolution (inférieure à 0,1 m) offrent dorénavant la possibilité de caractériser l'ensemble de ces entités. Evoluant à une altitude plus basse que les autres vecteurs, ces plateformes produisent tout naturellement des images à plus haute résolution (variables selon les capteurs embarqués). Ce qui est un avantage en termes de résolution (passage à très basse altitude) devient alors un inconvénient pour couvrir de grandes surfaces (un maximum de 5 km pour le drone Pixy) ou bien au prix d'une multiplication du nombre d'acquisitions. Mais cette contrainte est grandement pondérée par la flexibilité de ces appareils. En effet, rapidement mis en place sur site, ils peuvent ainsi suivre tout événement hydrologique brutal.

La caractérisation des objets

Au-delà de la détection des entités fluviales pour établir des cartes d'inventaire, les images sont également utilisées dans ce domaine pour les caractériser. Cela peut concerner la détection de la profondeur de l'eau ou encore la granulométrie des bancs. Au delà du problème de la résolution spatiale des images, se pose le problème du calibrage *in situ*. En effet, la démarche s'appuie sur des modèles physiques ou empiriques qui sont calibrés à partir de relevés *in situ*. Bien souvent, ces relevés doivent être réalisés au même moment que l'acquisition, sous peine de perdre la structure capturée par l'image. Une crue peut rapidement modifier ces états de surface : une augmentation ou une réduction du débit après l'acquisition ne permet plus de travailler qu'en relatif pour déterminer la profondeur d'eau. Pour cette raison, la caractérisation des états de surface se fait principalement à partir de photographies aériennes car on maîtrise les conditions d'acquisition et on peut mettre en œuvre de concert une campagne d'acquisition de données *in situ*. Deux exemples illustrent ces propos.

Exemple 1 : caractérisation de la bathymétrie d'un lit mouillé à partir d'une analyse de régression. Une relation statistique est ainsi recherchée entre la profondeur observée et la valeur radiométrique de la zone concernée. L'objectif est ainsi de pouvoir restituer une hauteur d'eau sur l'ensemble du chenal en eau, opération fastidieuse à réaliser à partir de relevés topographiques traditionnels. En supposant les conditions de l'atmosphère, de la masse d'eau et du fond du chenal, homogènes, le signal enregistré par le capteur n'est dépendant que de la hauteur d'eau à une longueur d'onde donnée. A travers celle-ci, le signal lumineux décroît suivant une loi exponentielle (Lyzenga, 1978). Ces conditions optimales rarement réunies obligent à calibrer les modèles en fonction des conditions de luminosité ou bien selon la nature du fond du lit. Des études ont déjà permis d'étalonner de tels modèles dans différents contextes fluviaux (Bryant et Gilvear, 1999 ; Carboneau *et al.*, 2006 ; Lejot *et al.*, 2007). L'exemple présenté porte sur la restitution bathymétrique du bras mort de la Malourdie, localisé en Chautagne (Haut Rhône) à partir d'images réalisées avec un drone Pixy. L'objectif est d'étudier ici les processus de sédimentation et d'eutrophisation qui sont à l'origine de l'atterrissement des bras morts. Il s'agit également d'établir un suivi de la restauration de ce bras qui a été curé. Le modèle bathymétrique a été créé à partir d'une mosaïque constituée de six images et portant sur 119 relevés de hauteur d'eau variant de 0 m à 2,4 m (fig. 6A). A partir des valeurs radiométriques de deux canaux (C1 : rouge ; C2 : vert) de la mosaïque, testés comme étant les plus significatifs, une régression multiple a pu être appliquée afin de prédire les hauteurs d'eau ($R^2 = 0,89$; $p < 0,0001$). L'équation obtenue est la suivante :

$$P = 216,43 \times \ln(C1) - 232,49 \times \ln(C2) - 153,84 \quad (1)$$

P correspondant à la profondeur (en centimètre), C1 et C2 aux valeurs radiométriques des canaux « rouge » et « vert » de la mosaïque. Le modèle de régression (1) est ensuite appliqué sur tous les pixels correspondant au chenal en eau. Le résultat de cette opération permet de créer une carte bathymétrique du bras étudié (fig. 6B).

Exemple 2 : restitution de la granulométrie de bancs de galets. Celle-ci a pour objectif d'analyser, par des procédures automatiques, l'état textural des surfaces afin de mieux comprendre les dynamiques morphologiques du chenal. L'analyse de la texture des objets permet de caractériser la granularité en tout point de l'image. Là encore, des études ont déjà permis de tester cette méthode dans le domaine fluvial (Verdu *et al.*, 2003 ; Carbonneau *et al.*, 2004). Le principe retenu repose sur le calcul de 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 d'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 en fonction d'un pas d'échantillonnage. Afin d'exploiter au mieux la trame d'une image numérique représentée par un repère en deux dimensions, il est nécessaire d'aborder la semi-variance sur deux axes. Cette approche bidimensionnelle est présentée à travers l'équation suivante :

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

où p et q correspondent aux pas d'échantillonnage 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 . Les tests ont été menés sur un banc localisé sur la basse vallée de l'Ain, au droit de Gévrieux. Les images ont également été acquises à partir d'un drone Pixy. Elles forment une mosaïque dont la résolution est de 3,4 cm. Plusieurs faciès granulométriques homogènes (*i.e.*, particules ayant la même gamme de tailles) sont identifiés à l'échelle du banc (fig. 7A). Sur chacun d'eux, une mesure de la médiane des particules est réalisée (échantillonnage basé sur la méthode de Wolman (Bunte et Abt, 2001). Les D_{50} mesurés varient de 1,7 cm à 6,8 cm. A partir de paramètres d'ajustement, une fenêtre d'extraction d'un pas de 3 x 3 pixels balayant l'image sur les axes x et y est produite. Ce pas correspond à un carré de 10 cm au sol, taille proche des D_{50} échantillonnés. Celle-ci permet le calcul de la semi-variance 2D. Cette valeur est ensuite comparée aux valeurs mesurées *in situ*. Appliquée à toutes les placettes mesurées, cette démarche permet d'étalonner un modèle de prédiction de la taille des particules (D_{50} observé / D_{50} prédit ; fig. 7B). Le modèle (fig. 7B) retranscrit parfaitement les D_{50} observés ($n = 6$; $R^2 = 0,98$) et ce, quelle que soit la taille des particules mesurées sur le terrain. A partir du modèle, une carte granulométrique a pu être produite (fig. 7C), révélant que les granulométries les plus grossières sont localisées au cœur du banc alors que les plus fines sont observées sur l'amont et les marges externes et internes. Defait, le gradient granulométrique que l'on attendrait sur une telle forme fluviale, la granulométrie s'affinant de l'amont vers l'aval au fur et à mesure que les courants les plus forts se déplacent sur la rive opposée, n'est pas observé ici.

Ces deux exemples qui s'appuient sur des images acquises par drone mettent en lumière l'intérêt de la très haute résolution (inférieure à 0,1 m) pour caractériser les entités au sein des corridors fluviaux. Ces différents exemples mettent également en évidence l'importance de pouvoir associer aux images des relevés de terrain pris au même moment afin d'extraire des paramètres plus fins que la seule localisation d'entités radiométriquement homogènes.

La dynamique temporelle des corridors fluviaux

Si la télédétection permet de restituer les taches paysagères des corridors fluviaux et leurs attributs, l'analyse de leur évolution temporelle est une autre perspective. L'approche multi-dates nécessite certaines conditions d'acquisition et présente ainsi des limites spécifiques. En effet, pour être comparées, ces acquisitions doivent être réalisées dans certains cas pour un même débit et lorsqu'il s'agit d'un évènement hydrologique brusque ou bien lorsque la description du phénomène impose d'établir un suivi à pas de temps court, le vecteur devra alors pouvoir effectuer des passages fréquents.

Avantages et limites de l'approche multi-temporelle par satellite dans les suivis

Certains satellites disposent d'archives permettant d'avoir des états antérieurs qui soient comparables. C'est notamment le cas des images Landsat (1972) et Spot (1986). Ce n'est que depuis le lancement de Spot en 1986 que des résolutions spatiales de 10 m à 20 m sont disponibles pour distinguer les grandes unités physiques des corridors fluviaux. Une étude a ainsi été réalisée sur la basse vallée du Doubs, un secteur reconnu pour son patrimoine naturel (ZNIEFF, ZII co, Réserves Naturelles Nationales, Natura 2000...) dont la valeur est menacée par différentes pressions humaines. Les aménagements des XIX^e et XX^e siècles ainsi que l'extraction de volumes importants de galets au cours des années 1970-1980 ont entraîné une modification radicale de la géométrie du lit qui s'exprime notamment par une incision du chenal et la déconnexion de la plaine alluviale. L'incision entraîne un assèchement des bras morts qui est perceptible sur

les images Spot (Rollet *et al.*, 2006). L'analyse de quatre images Spot 4 acquises durant la période 1986-1998 a permis de dresser un premier bilan des conséquences paysagères de l'incision du lit. Une comparaison de deux images acquises en 1986 et 1997 pour un même débit (300 m³/s) est présentée (fig. 8). Ainsi, en 1986, le chenal en eau au niveau des zones d'extraction (encadrés) est plus étendu que celui de 1997. A cette dernière date, les anciennes fosses d'extraction sont bien remblayées. De plus, le tronçon fluvial situé entre les deux sites d'exploitation apparaît majoritairement en eau sur l'image de 1997 alors qu'il comportait une surface de bancs de galets en 1986, ce qui témoigne d'un processus d'érosion régressive et progressive de ces matériaux, ceux-ci venant se déposer sous la forme d'un delta dans la fosse aval. Ces matériaux n'étant pas remplacés par la charge sédimentaire amont, celle-ci s'accumule dans la fosse la plus amont. Cet exemple démontre qu'il est possible d'effectuer des analyses diachroniques sur des corridors fluviaux somme toute de petite taille à partir d'images satellites. La contrainte hydrologique est malgré tout forte et il n'est pas toujours facile de trouver dans les archives des images qui soient véritablement comparables. Seules les archives Landsat sont dans ce domaine les plus riches mais la résolution de ces images limite leur exploitation aux grands cours d'eau. Cette contrainte hydrologique n'est pas la seule à prendre en compte. D'autres problèmes peuvent en effet être rencontrés. En fonction des conditions météorologiques ou de l'heure et de la saison d'acquisition, des ombres portées sont présentes et les conditions de luminosité diffèrent. Différentes contraintes liées à la temporalité des acquisitions en fonction d'un panel non exhaustif de plates-formes spatiales ou bien aériennes sont présentées (tab. 1). Grâce aux archives Spot et Landsat et dans une moindre mesure celles d'Ikonos, il est possible d'apprécier, par comparaison, des changements affectant les grandes entités fluviales. Les archives sont suffisamment abondantes pour pouvoir disposer de plusieurs scènes prises à la même saison ou pour un même débit, ce qui est un point critique, dans le domaine fluvial, que les archives photographiques de l'IGN ne peuvent pleinement satisfaire, compte tenu du pas de temps trop lâche entre deux acquisitions. En revanche, le satellite QuickBird ne permet pas l'acquisition d'une image correspondant à un débit donné, contrairement aux satellites Landsat et Spot. Aucune archive n'est disponible actuellement alors qu'il est l'un des plus performants en terme de résolution. Seules des missions programmées peuvent être commandées mais celles-ci sont déterminées au sein d'une fenêtre temporelle si grande que l'acquisition a toutes les chances de ne pas correspondre au débit souhaité. La souplesse d'utilisation du drone permet de travailler pour des débits qui peuvent être comparables si tant est que l'on puisse en disposer pour programmer les acquisitions. En revanche, les vols effectués à basse altitude conduisent à multiplier le nombre de clichés pour couvrir un tronçon fluvial donné. La mosaïque alors produite (même en quelques heures seulement) rend bien souvent compte d'une variation des conditions d'ensoleillement ou de la présence d'artefacts tels les ombres ou les nuages.

Malgré les contraintes indiquées, il est souvent utile de mettre en œuvre un programme d'acquisition multi-temporelle pour répondre à des besoins de suivi d'un événement hydrologique ou bien pour établir des états précis du corridor fluvial, comme dans le cas d'un suivi des actions de restauration. Là encore, dans le domaine fluvial, la programmation d'images satellites présente un certain nombre de contraintes quant aux conditions d'acquisition. Les images satellites ne peuvent pas être utilisées à l'échelle événementielle car les vecteurs actuels ne le permettent pas. Les couvertures aériennes IGN sont mises à jour tous les 5 ans, ce qui interdit tout suivi événementiel ou inter-annuel. Les fréquences de passage affichées par les fournisseurs d'images satellites (une moyenne de 3 jours pour le satellite QuickBird) laissent penser que de telles acquisitions sont possibles par satellite. Malheureusement, la programmation présente deux limites fondamentales : 1) le délai entre la date de la commande et la date effective de prise de vue qui est conditionné par les conditions météorologiques et notamment le taux de couverture nuageuse. A. Dupéret *et al.* (2004) considèrent qu'un satellite doit effectuer entre 6 et 10 passages pour fournir un état qui soit satisfaisant ; 2) la qualité de l'information attendue. Lorsque les conditions météorologiques sont remplies, l'acquisition est réalisée sans pour autant que l'information enregistrée puisse répondre aux conditions hydrologiques (débit, concentration de matières en suspension, etc.), édaphique (humidité du sol), ou bien atmosphérique (horaire non approprié par rapport à la position du soleil, induisant des ombres portées) qui sont exigées pour des comparaisons multi-temporelles. En raison de ces contraintes, très peu d'études comparatives ont vraiment été réalisées à pas de temps court. Seules des plates-formes légères (ULM, hélicoptère) voire ultra-légères (appareil radio-télécommandé) offrent les conditions suffisantes aujourd'hui de flexibilité (gage d'une fréquence élevée) et de faibles coûts d'exploitation pour de telles acquisitions.

Quelques apports de l'imagerie aérienne

L'utilisation de plateformes plus flexibles et volant à basse altitude apparaît judicieuse pour mener à bien des suivis qui nécessitent à la fois une haute résolution spatiale et une grande fréquence d'acquisition. A titre d'exemple, des acquisitions photographiques par drone ont été réalisées afin d'identifier les changements morphologiques résultant d'une opération de recharge sédimentaire sur la basse vallée de l'Ain (Lejot, 2008). Cette opération de restauration vise à limiter le déficit sédimentaire causé par la construction de barrages en amont. Plus de 22000 m³ de sédiments ont été réinjectés mécaniquement dans le lit mineur. La variation topographique du lit mouillé a fait l'objet d'un suivi par imagerie. L'état initial porte sur un tronçon de 5 km entre Varambon et Priay (fig. 1 et 9). Ce tronçon englobe deux sites de recharge sédimentaire (fig. 9), « Carronnières » (3660 m³ réinjectés), secteur le plus amont et « Bellegarde » (18800 m³ réinjectés). L'opération a été réalisée au cours de l'hiver 2005 - 2006. La longueur de ce linéaire a été choisie de manière à pouvoir suivre la mobilité des masses sédimentaires après réintroduction dans le chenal sur plusieurs années. Le protocole de suivi mis en place repose sur la restitution bathymétrique des tronçons concernés à partir d'images prises à basse altitude. Ces restitutions ont été réalisées à partir d'un modèle bathymétrique

de régression. Deux états ont été réalisés, l'un en juillet 2005 et le second en juin 2006 correspondant respectivement à un état bathymétrique avant recharge (état de référence) et un second, un an après. Durant cette période, deux crues morphogènes ont été enregistrées aux mois de mars et mai 2006 (respectivement 617 m³/s et 643 m³/s). Une carte des variations topographiques du lit de l'Ain a pu être réalisée (fig. 9). Les variations topographiques identifiées sur les deux sites de recharge ont permis de dresser un bilan des zones exhausées et incisées (tab. 2). Malgré une recharge de 3660 m³, le site des Carronnières présente un déficit sédimentaire de 2427 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 compenser le déficit sédimentaire du tronçon rechargé. Cependant, la carte des variations altimétriques met en lumière un banc sédimentaire médian progradant depuis le site de recharge sur une distance de 230 m vers l'aval (variation inférieure à 50 cm ; fig. 9B). Les 18800 m³ des sédiments réintroduits sur le site de Bellegarde ont quant à eux permis d'enregistrer un excédent sédimentaire de 7000 m³. Cet engraissement s'explique par l'existence d'un secteur moins incisé que le précédent, situé plus en aval et sur lequel des bancs de galets étaient déjà présents. Comme pour le site précédent, une accumulation sédimentaire progradante est identifiable sur ce périmètre de recharge (fig. 9A). La distance estimée de progression de la forme d'accumulation est de 380 m sur ce site. Ainsi, il a été observé, à partir des cartes des variations topographiques du fond du lit produites, qu'une partie des 22500 m³ de sédiments réintroduits a été remobilisée pendant les crues ($Q_{1,5}$). Ces cartes ont permis d'estimer que la distance parcourue par les sédiments remobilisés s'étendait donc de 230 m à 380 m. Ces valeurs sont proches de celle présentées par d'autres auteurs (Petit *et al.*, 1996 ; Merz *et al.*, 2006 ; Rollet, 2007). Par ailleurs, il a été 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 encore une portée spatiale limitée. Seule une réintroduction annuelle répétée permettrait d'atténuer significativement le déficit actuel. Le suivi par imagerie des sites de recharge et de leur tronçon aval a donc permis d'établir un diagnostic de l'efficacité des travaux engagés.

Conclusions

Les différents exemples développés ont permis d'établir un premier bilan de l'intérêt de l'utilisation des images satellites pour caractériser les cours d'eau de différentes tailles. Lorsque les conditions d'utilisation ne peuvent pas être remplies, des images aériennes peuvent dans certains cas être utiles. Plusieurs de ces conditions ont été listées afin de mettre en avant les avantages et les limites des images satellites. Ainsi, nous avons pu constater que la résolution des images devait être non seulement en adéquation avec la taille des entités fluviales à identifier mais également que les images devaient pouvoir être utilisées en complément de relevés de terrain, soit pour compléter des informations non disponibles en raison d'un seuil de résolution insuffisant (exemple de l'image Spot 5 sur l'Isère), soit pour contrôler la qualité des restitutions produites (exemple de l'image QuickBird sur la Drôme). Ces relevés de terrain permettent également de calibrer les modèles servant à caractériser les états de surface et c'est sans doute là que les difficultés sont les plus importantes, sachant que les contrôles de terrain doivent idéalement se faire au moment de l'acquisition. Les exemples traités ont montré que les conditions d'acquisition des images satellites ne permettent pas toujours d'utiliser ces supports pour caractériser les entités fluviales et leur dynamique temporelle. Les missions programmées ont des limites comme l'a montré l'exemple d'une acquisition QuickBird. Ainsi, les suivis d'événements hydrologiques ou bien de programmes de restauration sont principalement appréhendés à partir de plates-formes aériennes, plus souples à mettre en œuvre, tels que des drones. Malgré tout, les progrès faits ces dernières années en matière de résolution spatiale et spectrale permettront d'accroître le nombre d'études réalisées dans le domaine fluvial à partir d'images satellites.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier vivement Patrice Carbonneau pour la relecture attentive des textes en anglais et Bernard Lacaze et Anne Julia Rollet pour leur implication dans les travaux réalisés sur le Doubs. Nous souhaitons remercier également les relecteurs dont les remarques pertinentes ont permis d'améliorer le manuscrit initial.

Références

- Bel Hadj Ali A. (2001)** – *Qualité géométrique des entités géographiques surfaciques. Application à l'appariement et définition d'une typologie des écarts géométriques*. Thèse en sciences de l'information géographique, université de Marne-la-Vallée, 210 p.
- Bryant R., 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., Abt S.R. (2001)** – *Sampling surface and subsurface particle-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.
- 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, Article No. W07202, 11 p..
- 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.

- Chandler J. (1999)** – Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms* 24-1, 54-63.
- 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.
- Dumas S. (2004)** – *Les habitats forestiers de la basse vallée de l'Ain, étude et analyse*. Programme LIFE Nature « Conservation des habitats créés par la dynamique de la rivière d'Ain, ONF-CREN, , 36 p.
- 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.
- Ferguson R. (2007)** – Gravel-bed rivers at the scale reach. In Habersack H., Piégay H., Rinaldi (Eds.): *Gravel Bed Rivers 6*. Elsevier, Amsterdam, 33-60.
- Foody G.M., Boyd D.S., Cutler M.E.J. (2003)** – Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment* 85-4, 463-474.
- 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*. Wiley, London, 135-170.
- 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.
- Gupta A., Liew S.C. (2007)** – The Mekong from satellite imagery: A quick look at a large river. *Geomorphology* 85, 259-274.
- Hamilton S.K., Kellndorfer 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.
- IFEN, ONCFS (2005)** – *Application de la télédétection à l'étude des zones humides : identification des prairies, des roselières, des peupleraies et des graviers*. Document technique, IFEN, , 134 p.
http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/observatoires/ONZH/PDF/teledetection_zones_humides.pdf
- 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.
- Lejot J. (2008)** – *Suivi des formes fluviales par télédétection à très haute résolution. Application aux programmes de restauration de la basse vallée de l'Ain et du Haut Rhône (Chautagne)*. Thèse, université Lyon 2, 257 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.
- Lyzenga D.R. (1978)** – Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics* 17-3, 379-383.
- Marcus A.W., Legleiter C.J., Aspirall R.J., Boardman J.W., Crabtree R.L. (2003)** – High spatial resolution hyperspectral mapping of instream habitats, depths, and woody debris in mountain streams. *Geomorphology* 55, 1-4, 363-380.
- Marston R.A., Girel J., Pautou G., Piégay H., Bravard J.-P., Arneson C. (1995)** – Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology* 13, 121-131.
- Martinez J.M., Le Toan T. (2007)** – Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. *Remote Sensing of Environment* 108-3, 209-223.
- 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.
- Merz J.E., Gregory B.P., Wheaton M. (2006)** – Sediment budget for Salmonid habitat rehabilitation in a regulated river. *Geomorphology* 76, 207-228.
- 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.
- Moulin B. (2005)** – *Variabilité spatiale et temporelle du bois mort dans le réseau hydrographique de l'Isère à l'amont de Grenoble*. Thèse, université de Saint-Etienne, 450 p.
- Muller E., Decamps H., Dobson M.K. (1993)** – Contribution of space remote sensing to river studies. *Freshwater Biology* 29, 301-312.
- Perrez Correria 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.
- 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.
- Puestow T.M., Simms E.L., Simm A., Butler K. (2001)** – Mapping of salmon habitat parameters using airborne imagery and digital ancillary data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67, 309-317.
- 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 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 périfluviales du Doubs (France). *Géographie physique et Quaternaire* 60-3, 253-269.
- Smith L.C. (1997)** – Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge : review. *Hydrological Processes* 11-10, 1427-1439.
- 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.
- 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.
- Verdu J.M., Batalla R.J., Martinex-Cassasnovas 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 (unpublished).
- 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.

Article soumis le 7 avril 2010, accepté le 6 octobre 2010

Légende des figures

Fig. 1 – Cartographie des unités forestières de la basse vallée de l'Ain à partir de la couche d'information polygonale « *Corine Biotopes* » (A). Variation longitudinale de l'indice NDVI (coefficient de variation) calculée au sein des polygones « frênes et peupliers » sur une image de 2001 (B).

Fig. 1 – *Mapping of forest units of lower Ain river based on "Corine Biotopes" data set (A). NDVI longitudinal variation profile (coefficient of variation) calculated on ash and poplar data coverage on an 2001 image (B).*

Fig. 2 – Caractérisation des unités eau/banc/végétation par classification supervisée (A, B, C, D, E) et fréquence cumulée du nombre de troncs et d'embâcles à l'échelle de l'Isère entre Saint-Paul-sur-Isère et Grenoble à partir d'images Spot 5 du 19/07/2002 (F). 1 : zone en eau ; 2 : zone végétalisée ; 3 : banc de galets ; 4 : tronc 2002 ; 5 : embâcle 2002

Fig. 2 – *Characterisation of channel/gravel bar/vegetation units by supervised classification (A, B, C, D, E) and cumulated frequency per number of trunks and woody debris on the Isere river between Saint-Paul-sur-Isère and Grenoble based on SPOT images of 2002/19/07 (F).* 1 : water channel ; 2 : vegetation ; 3 : gravel bar ; 4 : trunc 2002 ; 5 : woody debris 2002

Fig. 3 – Répartition spatiale des conifères dans la plaine alluviale de la Drôme à l'aval immédiat de Luc-en-Diois par calcul de l'indice NDVI et par classification orientée objet à partir d'une image QuickBird datant du 07/12/2001. 1 : Conifères ; 2 : Bande active

Fig. 3 – *Conifer location in the alluvial plain of the Drôme River in downstream of Luc-en-Diois by NDVI processing and object-oriented classification based on a QuickBird image of 2001/07/12.* 1 : Conifer ; 2 : Active channel

Fig. 4 – Effet de la résolution des images aériennes (drone & IGN) et satellitaires (Ikonos) pour la caractérisation des formes fluviales. A) Bras mort de la Malourdie (Haut-Rhône), B) Banc de galets de Gévrieux (Ain)

Fig. 4 – *Effect of aerial images resolution (UAS & National Geographic Institute) and satellite (Ikonos) on characterisation of fluvial forms A) Former channel of Malourdie (Haut-Rhone), B) Gravel bar of Gévrieux (Ain river).*

Fig. 5 – Plates-formes ultra légères contrôlées à distance.

Fig. 5 – *Unmanned aerial systems.*

Fig. 6 – Restitution des hauteurs d'eau à partir d'un modèle bathymétrique empirique. A : Modèle (hauteur d'eau observée/hauteur d'eau prédite). B : Extrait de la carte bathymétrique de la lône de la Malourdie (Chautagne) à partir d'images acquises par drone le 20/4/2006.

Fig. 6 – *Water level restitution base on a bathymetric empirical model. A: Bathymetric model (observed water level/predicted water level). B: Bathymetric mapping of Malourdie former channel (Chautagne, France) produce by drone images of 2006/20/04.*

Fig. 7 – Restitution granulométrique du banc de Gévrieux à partir d'images drone acquises le 18/06/2004 avec une résolution de 3,4 cm (A), modèle granulométrique (B) et cartographie des D_{50} prédits (classification de Wentworth ; C).

Fig. 7 – *Grain-size mapping of Gévrieux gravel bar based on drone images with very high resolution (3.4 cm, 2004/18/06; A), grain-size model (B), and mapping of predicted D_{50} (Wentworth classification; C).*

Fig. 8 – Comparaison de deux images Spot du Doubs acquises pour un débit de 300 m³/s et zoom sur l'évolution des fosses d'extraction entre les deux dates. A : Etat de la bande active en 1986. B : Etat de la bande active en 1997.

Fig. 8 – *Comparison of two Spot images localised on Doubs river with same discharge (300 m³/s) and zoom on the evolution of extraction pit between two dates. A: Active channel in 1986. B: Active channel in 1997.*

Fig. 9 – Carte des variations topographiques de l'Ain observées sur les sites de recharge sédimentaire entre juillet 2005 et juin 2006.

Fig. 9 – *Bathymetric variation of the Ain River located on reintroduction sites between July 2005 and June 2006.*

Légende des tableaux

Tab. 1 – Les conditions d'acquisition des images satellites et aériennes requises en morphologie fluviale dans le cadre d'une analyse diachronique.

Tab. 1 – *Required conditions of use of aerial and satellite images in fluvial geomorphology for a diachronic study.*

Tab. 2 – Bilan des stocks sédimentaires des sites de recharge Carronnières et Gévrieux (basse vallée de l'Ain) et leurs tronçons aval.

Tab. 2 – *Sediment report of reload sites Carronnières and Gévrieux (low river Ain) and downstream reaches.*

Titre court

Utilisation de la télédétection pour la caractérisation des corridors fluviaux