HAL
open science

Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux.

Elise Wiederkehr, Simon Dufour, Hervé Piégay

To cite this version:

Elise Wiederkehr, Simon Dufour, Hervé Piégay. Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux.. 2008. hal-00828825

HAL Id: hal-00828825

https://hal.science/hal-00828825v1

Submitted on 4 Jun 2013

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.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux. Synthèse des connaissances et extraction d'indicateurs.

Rapport final

Fiche action recherche valorisation n°A 6.

E. Wiederkehr, S. Dufour et H. Piégay
Avril 2008

Rappel des objectifs :

L'objectif visé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau est d'atteindre, d'ici 2015, le **bon état écologique de tous les milieux aquatiques naturels**. Ce dernier s'évalue à partir de la biologie, qui résulte en partie des conditions physico-chimiques et hydromorphologiques des masses d'eau.

Afin d'atteindre ce bon état, il est donc essentiel de connaître et de comprendre les paramètres influençant la dynamique fluviale pour pouvoir, par la suite, intervenir efficacement sur les habitats. Il semble donc nécessaire de faire un **état des lieux des conditions hydromorphologiques** du territoire. D'où la nécessité de mettre en place des outils permettant de **renseigner les indicateurs de qualité physique des milieux aquatiques.**

Les progrès techniques qui ont été faits ces dernières années dans le domaine de la télédétection laissent entrevoir des pistes prometteuses. De fait, l'utilisation de la télédétection dans le cadre d'un travail de caractérisation physique d'un réseau hydrographique peut paraître être une solution adéquate à plusieurs échelles :

- A l'échelle locale, les progrès faits, ces dernières années, en matière de résolutions spatiale et spectrale permettent d'accéder à une information de haute qualité en limitant la collecte de données in situ.
- De plus, l'automatisation des méthodes d'extraction des informations permet une homogénéisation des résultats sur l'ensemble du réseau.
- Enfin, les sources de données disponibles sont nombreuses, variées et permettent de caractériser l'ensemble du territoire national (ex. : couverture des orthophotographies IGN).

Dans le cadre de la convention de recherche qui lie la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône - http://www.graie.org/zabr/) et l'agence de l'eau RMC, nous avons lancé une action de réflexion sur **l'utilisation de l'imagerie pour la caractérisation des cours d'eau du bassin du Rhône**. L'objectif est notamment de définir le type d'images le plus adapté à la question de la caractérisation physique à l'échelle du bassin.

Ce rapport comprend deux parties :

- Une **synthèse bibliographique** concernant les techniques d'imagerie pour la caractérisation des milieux fluviaux : différents types de capteurs/plateformes, caractéristiques des images (résolution, coût…), exemples d'application…
- Une étude de faisabilité relative à l'« **utilisation opérationnelle de l'imagerie pour la caractérisation physique des cours d'eau** » : Comment choisir un couple capteurs / plateformes (avantages, inconvénients…) ? Quels types d'indicateurs peuvent être extraits des images ?

SOMMAIRE DU RAPPORT

TECHNIQUES D'IMAGERIE : NOTIONS DE BASE ET EXEMPLES ILLUSTRES _____ 1

Partie 1 - Quelques notions de télédétection _____ 2

1. Quelques principes _____ 2
2. Les caractéristiques d'une image _____ 6
3. Extraction d'informations à partir des images _____ 16
4. Vers de nouveaux enjeux techniques _____ 18

Partie 2 - Quelques exemples d'applications de la télédétection dans l'étude des systèmes fluviaux _____ 19

Partie 3 - Liste non exhaustive des capteurs et vecteurs employés en télédétection fluviale _____ 21

QUESTIONS PRELIMINAIRES A L'UTILISATION DE L'IMAGERIE POUR LA CARACTERISATION PHYSIQUE A L'ECHELLE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE _____ 31

Partie 1 - Quels couples capteur / plateforme choisir ? _____ 32

Partie 2 - Images et SIG _____ 34

Partie 3 - Quels indicateurs peuvent être extraits des images ? _____ 37

1. Construction d'indicateurs _____ 37
2. Exemples d'indicateurs _____ 41

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES _____ 43

SIGLES

ASC	Agence Spatiale Canadienne
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AWiFS	Advanced Wide Field Sensor
C	Bande C: gamme de fréquence de 8 à 4GHz - longueurs d'onde de 3,75 à 7,5 cm
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales (France)
ESA	Agence Spatiale Européenne
ETM	Enhance Thematic Mapper
H	Polarisation horizontale
HH	Emission et réception horizontale
HRG	Haute Résolution Géométrique
HRS	Haute Résolution Stéréoscopique
HRV	Haute Résolution Visible
HRVIR	Haute Résolution Visible et InfraRouge
HV	Emission horizontale et réception verticale
ISA	Indian Spatial Agency
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
L	Bande L: gamme de fréquence de 2 à 1GHz - longueurs d'onde de 15 à 30 cm
LISS	Linear Imaging Self-Scanner
Mono.	Monospectral
MS	Multispectral
MSS	Multispectral Scanner
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)
Pan	Panchromatique
ROS	Radar à Ouverture Synthétique
SOP	Sensor optic
TM	Thematic Mapper
V	Polarisation verticale
VGT	Végétation
VH	Emission verticale et réception horizontale
VV	Emission et réception verticale
XS	Multispectral

TECHNIQUES D'IMAGERIE : NOTIONS DE BASE ET EXEMPLES ILLUSTRES

Partie 1 - Quelques notions de télédétection _____ 2

1. Quelques principes _____ 2
2. Les caractéristiques d'une image _____ 6
3. Extraction d'informations à partir des images _____ 16
4. Vers de nouveaux enjeux techniques _____ 18

Partie 2 - Quelques exemples d'applications de la télédétection dans l'étude des systèmes fluviaux _____ 19

Partie 3 - Liste non exhaustive des capteurs et vecteurs employés en télédétection fluviale _____ 21

Partie 1 - Quelques notions de télédétection

Dans cette partie, les principes de la télédétection seront abordés, ainsi que les différentes caractéristiques afférentes aux images, et ce dans le but de souligner les éléments ayant une influence dans le choix des données à acquérir afin de caractériser l'état physique des cours d'eau.

1. QUELQUES PRINCIPES

Selon le J.O du 11 décembre 1980, la **télédétection** correspond à *« 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 »* (Thomas, 2007). Il s'agit d'une technique, où l'acquisition d'images permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre.

Le procédé, qui est ainsi utilisé, consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique, REM, émis ou réfléchi, par tout objet de la surface de la Terre (Figure 1).

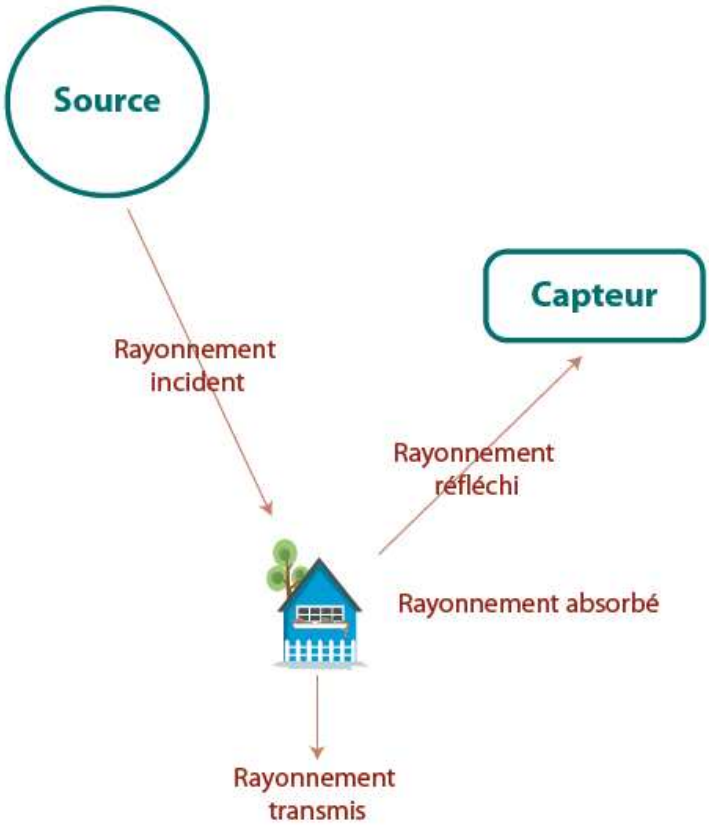

Figure 1 : Absorption, réflexion, transmission (d'après Bonn et Rochon, 1992)

La répartition des fréquences des rayonnements électromagnétiques des plus hautes aux plus basses fréquences est symbolisée par le **spectre électromagnétique** (Figure 2) (Chaponnière, 2004). Suivant le domaine spectral que l'on considère, le capteur enregistrera une énergie émise, réfléchie ou bien rétrodiffusée.

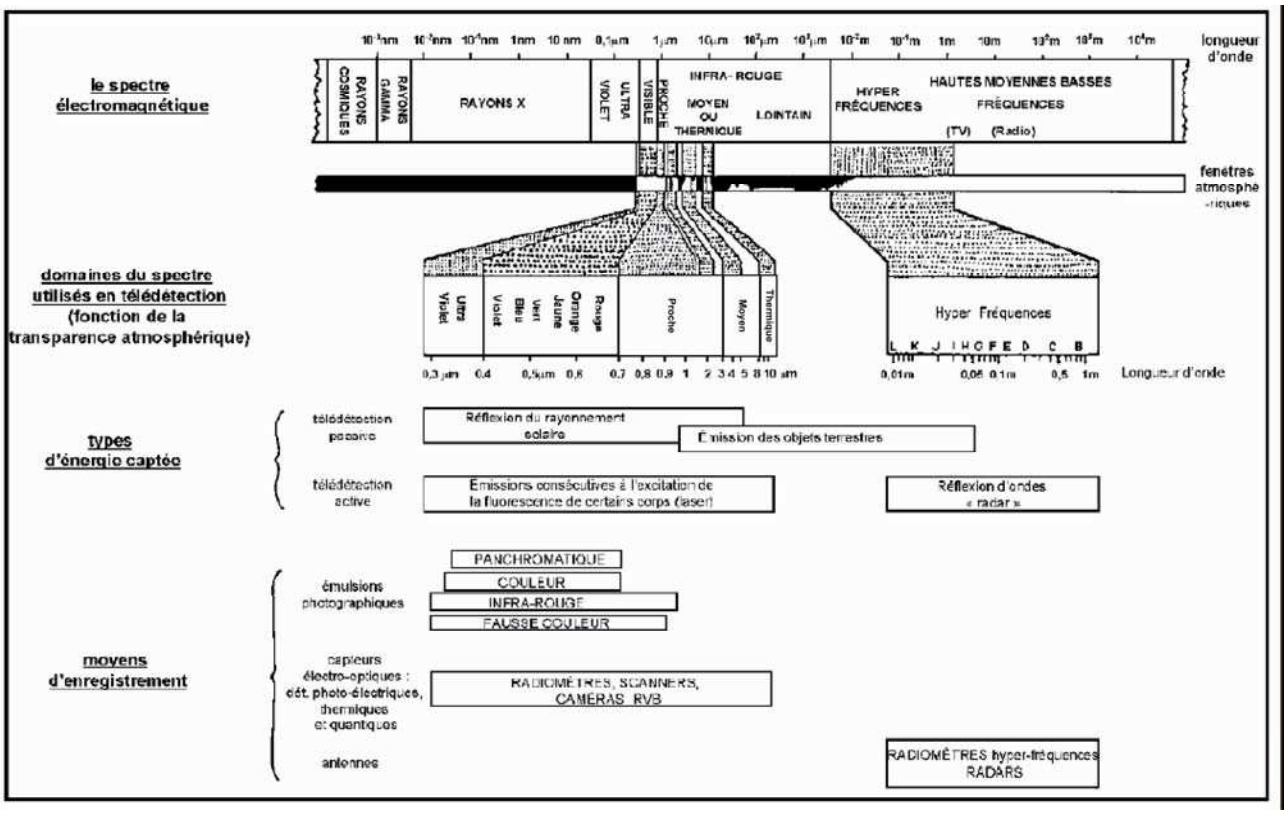

Figure 2 : Le spectre électromagnétique et son utilisation en télédétection (modifié d'après Chaponnière, 2004)

1.1. Les capteurs

L'acquisition de l'image se fait au moyen d'un **capteur**. Il s'agit d'un appareil qui détecte les rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis avant de les convertir en une valeur numérique qui peut être enregistrée et traitée. On distingue deux types de capteurs.

- D'une part, les **capteurs passifs**. Ils mesurent les rayonnements réfléchis ou retransmis par un objet illuminé par une **source** d'énergie **naturelle**, comme le soleil (Figure 3B). On parle alors de télédétection passive.
- D'autre part, les **capteurs actifs** (Figure 3A), qui **produisent** eux-mêmes **leur propre énergie**. Le capteur mesure le rayonnement d'origine artificielle réfléchi par une cible (Robin, 1995). On parle de télédétection active.

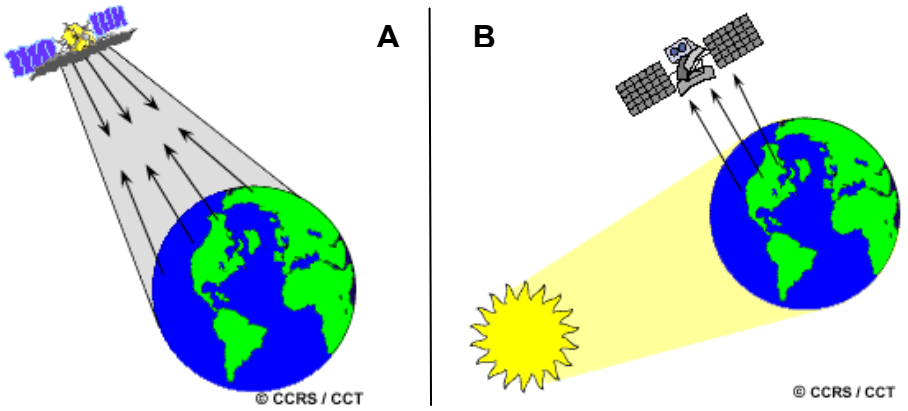

Figure 3 : Illustration de la télédétection active (A) et passive (B) (Source : Ressources Naturelles du Canada)

Télédétection passive

Les **capteurs passifs** détectent l'énergie naturelle réfléchie par un objet dans la partie du spectre électromagnétique allant de l'ultra-violet à l'infrarouge (Figure 2) (Robin, 1995 ; Desjardins, 2000). En général, l'émetteur principal est le soleil (Girard & Girard, 2004). Les capteurs pouvant être utilisés sont des **appareils photographiques**, des **caméras** ou des **radiomètres** imageurs à systèmes à balayage optique ou mécanique ou à systèmes à barrette détecteurs (Desjardins, 2000).

Télédétection active

Les **capteurs actifs**, radars ou lasers, quant à eux illuminent les objets avec leur propre source de rayonnement, enregistrent « l'écho » et produisent ainsi des **images**. Cependant, il s'agit essentiellement d'une reconstitution de la forme des objets (2 dimensions, 3 dimensions), ils servent donc à produire des modèles numériques de terrain ou de surface. Notons également que ces capteurs peuvent être couplés avec des capteurs optiques (passifs) afin de restituer non seulement la forme mais également l'occupation du sol. Parmi ce type de capteurs, on trouve notamment :

- Le **radar** (Radio Detecting And Ranging) à synthèse d'ouverture (RSO)[1], qui est le système émetteur-récepteur le plus couramment employé. L'objet est donc illuminé par des rayonnements à micro-ondes et non pas par de la lumière. Ce type de capteur dispose d'une petite antenne qui transmet un signal relativement large, on le retrouve sur des satellites comme Radarsat ou ERS.
- Le **lidar** (Light Detection And Ranging) qui permet de faire, notamment, des relevés topographiques. Le résultat est composé de points spatialement référencés en trois dimensions, ce qui permet d'identifier des objets tel que le chenal, les ponts, la végétation (Figure 4). On l'installe sur des avions ou des hélicoptères (Desjardins, 2000). Ce qui le différencie du radar est le domaine spectral (visible, ultraviolet et infrarouge) dans lequel il travaille, le lidar utilise la lumière au lieu des ondes radio.

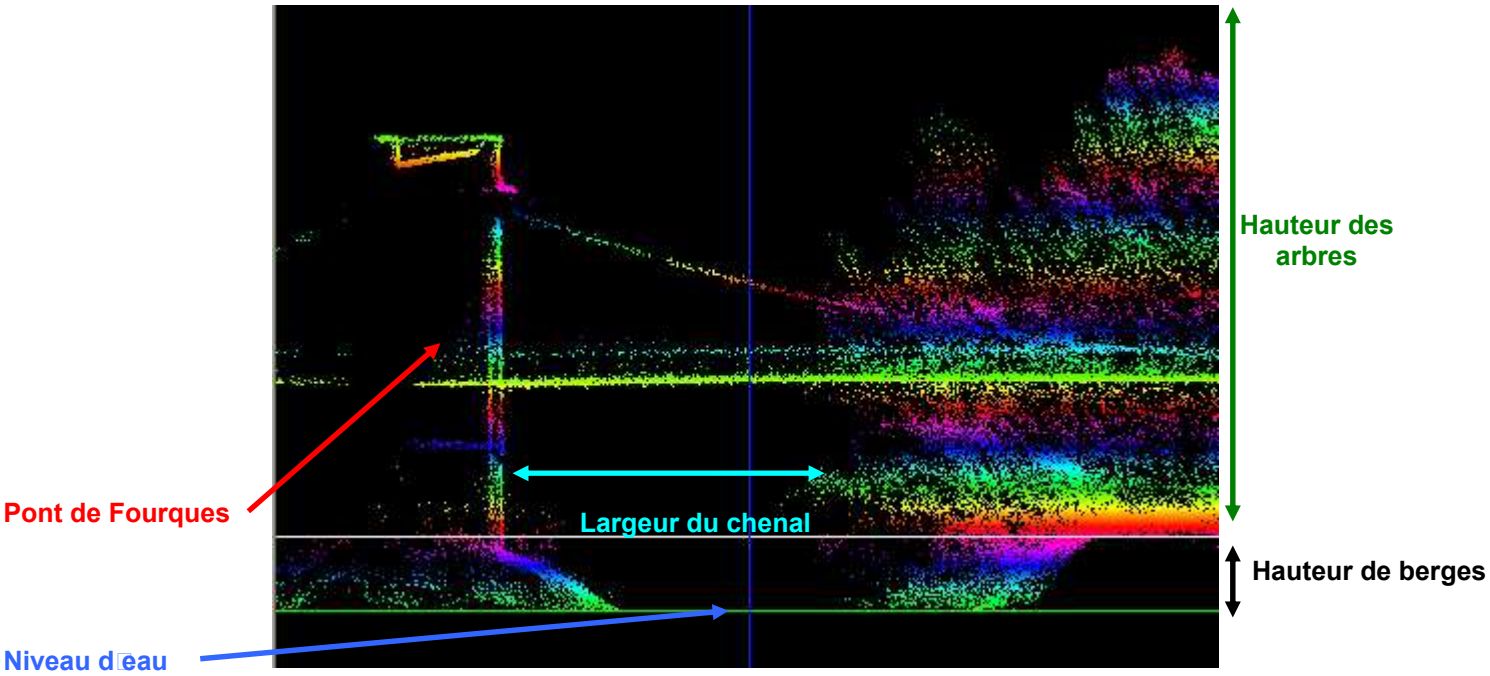

Figure 4 : Pont de Fourques – Petit Rhône, image lidar (Wiederkehr, 2006)

[1] En anglais, Synthetic Aperture Radar (SAR)

- Les **lasers** (Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation) ou les **fluoromètres**, sont d'autres systèmes utilisés en télédétection active (Girard & Girard, 2004).

Le point fort de la télédétection active réside dans la possibilité d'acquérir des données la nuit ainsi que sous couverture nuageuse. Ceci s'explique par le fait que les capteurs actifs produisent eux-mêmes leurs sources d'illumination.

1.2. Les vecteurs

Le dispositif permettant de placer un capteur dans l'espace et d'observer la cible à distance est le **vecteur**, appelé également **plateforme**. On en différencie plusieurs types en fonction de la distance qui les sépare du sol (Girard & Girard, 2004) (Figure 5). Par exemple :

- A quelques mètres du sol
  - Grues
  - mâts.téléscopiques
- Entre une dizaine de m et une centaine de km
  - Cerf-volant
  - Drone (20 à 300m)
  - ULM (100 à 3500m)
  - Ballons captifs troposphériques (300 à 3000m)
  - Hélicoptères, avion
- Entre une dizaine et une centaine de km
  - Ballons stratosphériques (30 à 40km)
- Entre 200 et 40 000km
  - Satellites habités ou non

Un même vecteur peut accueillir plusieurs types de capteurs. Le choix d'une image se fera donc souvent en fonction d'un **couple capteur / vecteur**.

Figure 5 : Représentation de différents vecteurs

2. LES CARACTERISTIQUES D'UNE IMAGE

Dans la mesure où il existe différents types d'images (Landsat, orthophotographie…), il convient de s'attacher à comprendre les spécificités de chacun d'eux. Afin de savoir ce que chaque type peut apporter et de choisir entre les différentes combinaisons vecteur / capteur, il faut notamment prendre en compte trois caractéristiques : la **résolution spectrale,** la **résolution spatiale** et la **résolution temporelle**.

2.1. La résolution spectrale

La **résolution spectrale** correspond à l'aptitude du capteur à distinguer des rayonnements électromagnétiques de fréquences différentes. Etant donné que les objets n'absorbent pas tous la même partie du rayonnement solaire, le spectre du rayonnement réfléchi sera **différent en fonction de chaque objet**. En effet, chaque objet réagit différemment au rayon incident et la **signature spectrale** d'un objet correspond à l'allure du spectre électromagnétique ainsi réfléchi (Figure 6). Elle permet de déterminer certaines propriétés des objets. Ainsi, certains capteurs produiront des images à partir desquelles il sera plus aisé de distinguer certains objets (eau, végétation…). A chaque couleur correspond une longueur d'onde et par conséquent une fréquence précise. Elle est la seule information en télédétection qui est captée directement. Il s'agit d'un code d'identification qui est propre à chaque objet, comme « une empreinte digitale » (Desjardins, 2000). Elle dépend de différents paramètres comme l'élévation solaire, l'angle de visée et la précision spectrale et spatiale du capteur mais également de paramètres propres à l'objet comme la forme, la taille ou la texture. C'est grâce à la modification du signal en fonction de la nature de l'objet que son identification à distance est possible (Robin, 1995). Par exemple, pour la végétation les valeurs du rayonnement sont faibles dans le rouge mais élevées dans l'infrarouge alors que celles de l'eau sont à la fois faible dans le rouge et dans l'infrarouge. Les signatures spectrales des objets observés couramment en bord de cours d'eau peuvent, notamment, se classer en **trois grandes catégories : l'eau, la végétation et les surfaces minérales** (Figure 6).

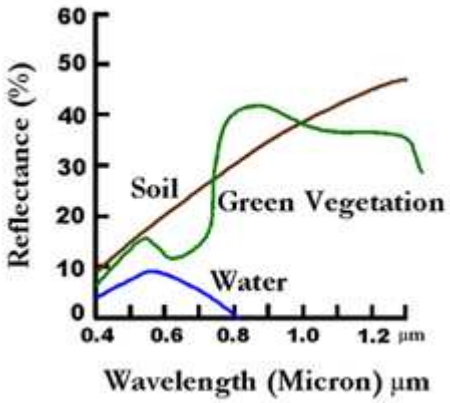

Figure 6 : Signature spectrale sur la surface de la Terre

En vert la végétation (bonne discrimination au-delà de 0.8µm), en bleu l'eau (bonne discrimination entre 0.5 et 0.6µm) et en marron le sol (discrimination croissante avec la longueur d'onde)

Source : http://landsat.usgs.gov/

La **signature spectrale** permet de distinguer trois types d'images (Figure 7 et 8) :

- Les **images panchromatiques**, que l'on obtient à partir de l'enregistrement dans le domaine du visible (0.4-0.7µm). Acquises dans **un seul canal**, les images sont **en noir et blanc**. La résolution spectrale étant plus faible, ce type d'image donne généralement une résolution spatiale importante.
- Les **images multispectrales**, qui s'obtiennent grâce à l'enregistrement simultané de trois à huit **bandes spectrales** mais qui ne sont pas obligatoirement adjacentes. Les ortho-photographies fournies par l'IGN sont des images multispectrales possédant trois canaux dans le domaine du visible (bleu, vert et rouge).
- Les **images hyperspectrales** s'obtiennent à partir de capteurs, dont la capacité d'enregistrement est de **plus de 200 bandes spectrales** dans la portion du visible, du proche InfraRouge et de l'IR moyen du spectre électromagnétique. Elles sont beaucoup **plus étroites** (quelques nm) et souvent contigües. Ce sont donc des images présentant une information détaillée avec une signature spectrale beaucoup plus fine. L'imagerie hyperspectrale, technique également appelée **spectroscopie imageante**, offre une identification plus précise des objets que celles reposant sur des capteurs à larges bandes.

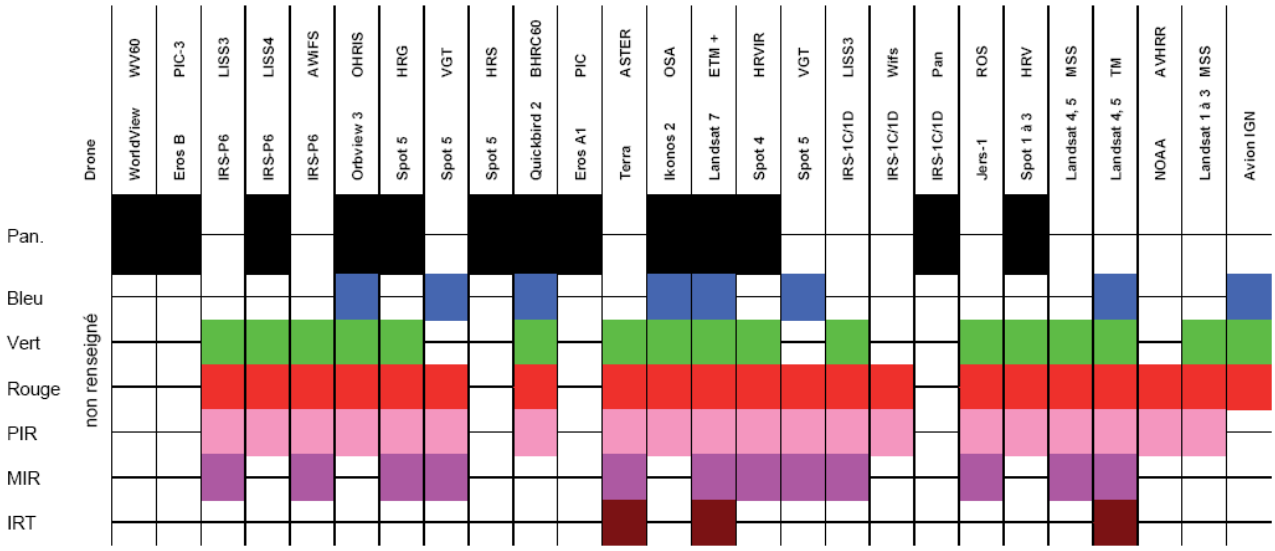

Figure 7 : Représentation des bandes spectrales de différents capteurs optiques

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

Il faut privilégier des capteurs permettant une bonne discrimination de chacun des **objets d'études (eau, végétation, sédiment)**. D'où l'importance de connaître les signatures spectrales de chacun des capteurs.
Les ondes des satellites radars (ENVISAT, ERS,) sont absorbées par l'eau. Il n'est pas possible d'en tirer une quelconque information sur la caractérisation du chenal en eau (ex. : profondeur, substrat, taux de matière en suspension). Il semble donc préférable de privilégier des **capteurs optiques** (télédétection passive) pour la suite de l'étude.

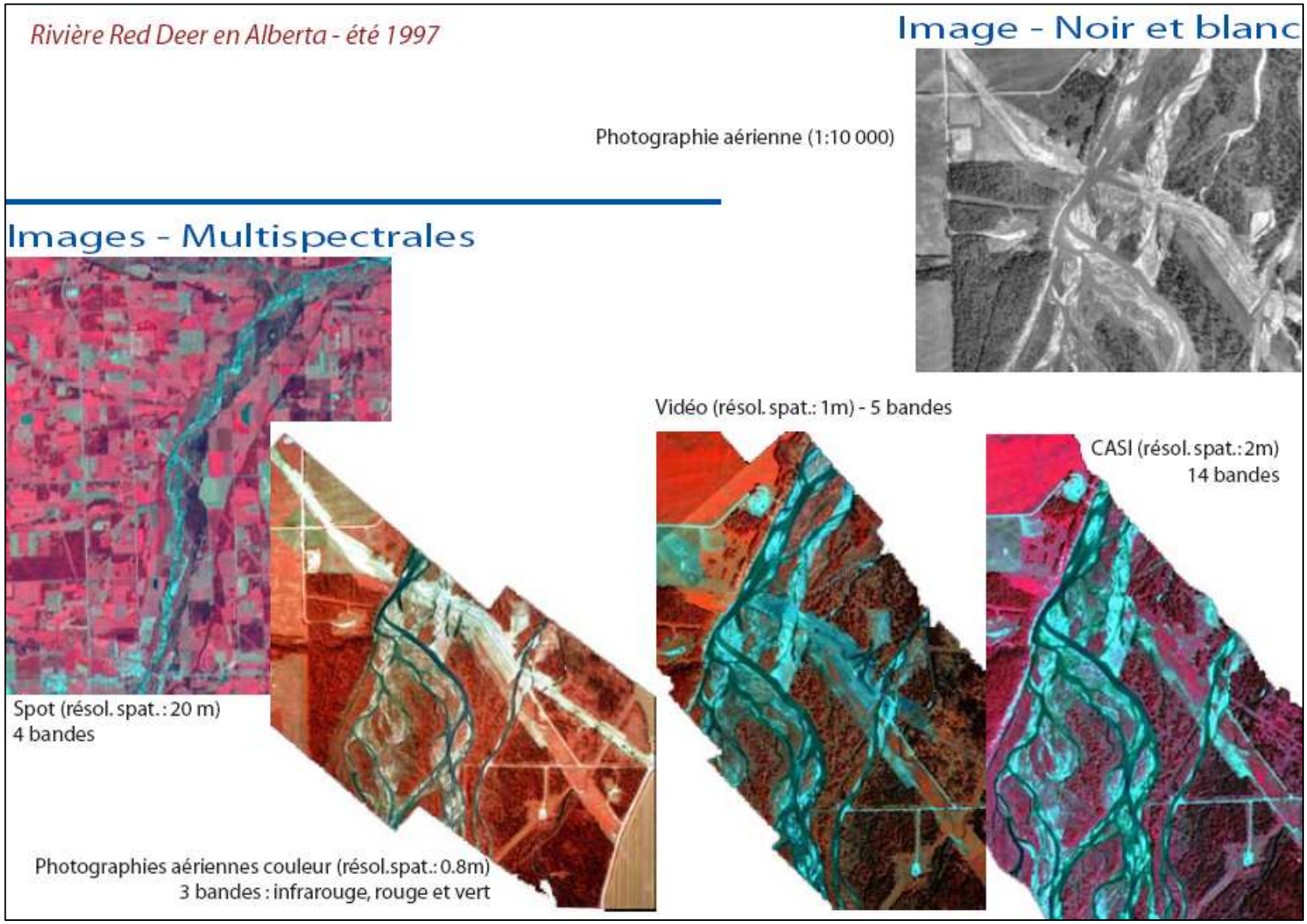

Figure 8 : Rivière Red Deer – images de différentes résolutions spectrales (Source : http://www.ccrs.nrcan.gc.ca)

2.2. La résolution spatiale

La **résolution spatiale** correspond à la **taille du plus petit objet perceptible dans une image** (Figure 9). Il s'agit du pixel, qui est la plus petite surface homogène constitutive d'une image numérique (Robin, 1995). Généralement la résolution spatiale est exprimée en m.

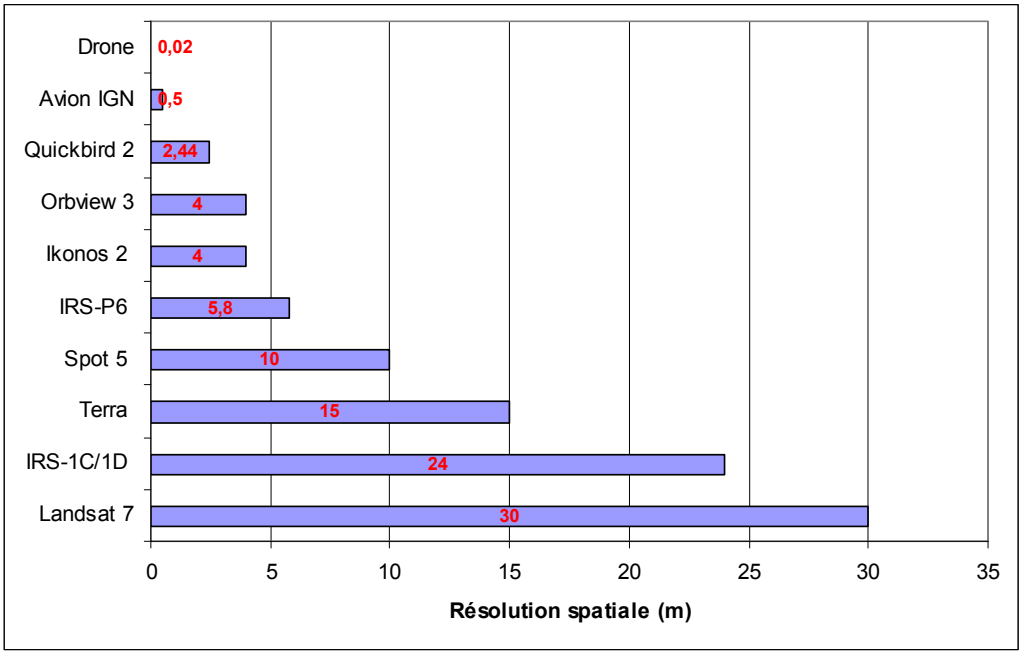

Figure 9 : Résolution spatiale de différents capteurs multispectraux dans le visible (résolution < à 30 m)

La lecture des différents travaux réalisés à ce sujet montre que la notion de haute ou très haute résolution reste encore assez floue. La haute résolution des années 1990 est à l'heure actuelle largement dépassée. Il n'est donc pas toujours évident de savoir à quelle échelle correspond le terme employé. Dans la suite de ce rapport, les termes de haute, très haute et extrêmement haute résolution seront définis comme ci-dessous, en se basant sur les travaux de Puissant (2003) et après modification (Tableau 1).

Tableau 1 : Niveau de résolution des différents capteurs (D'après Puissant A. (2003))

		Résolution spatiale (m)
EHR	Extrêmement Haute Résolution	< 0.1
THR	Très Haute Résolution	0.1-5
HR	Haute Résolution	6-30
MR	Moyenne Résolution	31-100
BR	Basse Résolution	>100

Le théorème de Nyquist-Shannon fixe que *« le pas minimal utilisable doit être inférieur ou égal à la demi-longueur du plus petit tronçon qui participe à la formation du contour du polygone »* (Bel Hadj Ali, 2001). Ce qui signifie que pour être détectable un **objet doit faire au minimum deux fois la taille du pixel**, soit du plus petit objet perceptible sur l'image. Par exemple, pour une image Ikonos 2 en panchromatique dont la résolution spatiale est de 1 m, les objets pouvant être discriminés doivent faire au minimum 2 m (soit 4 m² en surface). Le **seuil de détection de l'objet** est donc de **4 pixels minimum**. Le

seuil d'identification permettant de caractériser l'objet est quant à lui beaucoup plus élevé. Il faut prévoir 3 fois plus de pixels que pour la détection, soit un minimum de **12 pixels** (IFEN, 2005) voire 28 pixels selon certains auteurs (Robin, 1995).

La précision de la mesure, ou valeur de la résolution spatiale, (Figure 10) doit être adaptée à la thématique et à la taille des objets étudiés (Robin, 1995 ; Desjardins, 2000). Il s'agit d'un critère essentiel dans le choix du capteur. Par exemple, la détermination du lit majeur d'une rivière de taille moyenne (rang 4 à 6) peut généralement se faire à une échelle décamétrique, mais la mesure de la migration des formes fluviales nécessite une résolution métrique et l'identification de faciès granulométriques une résolution spatiale encore plus fine. De même, concernant la végétation, le niveau d'organisation biologique étudié est très sensible à la résolution spatiale des images. Pour une résolution faible, il est possible de faire la distinction entre des unités physionomiques (unités herbacée, pionnière, mature…) (Girel, 1986), alors qu'avec une résolution plus élevée, la discrimination entre espèce, au moins arborée, sera possible.

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

Suivant les objets étudiés et les indicateurs que l'on souhaite extraire, le degré de précision de l'information requis sera différent. Bien évidemment un niveau de résolution élevé, et tendant vers le **submétrique**, se traduit par une bonne qualité des mesures. Si l'on souhaite aborder tous les cours d'eau et pas seulement les plus grands, il convient donc d'orienter notre choix vers des capteurs de haute, très haute et extrêmement haute résolution, soit une **résolution toujours inférieure à 30m**.

Figure 10 : Saint Denis de la Réunion – images de différentes résolutions spatiales (Source : www.bondy.ird.fr)

2.3. La résolution temporelle

La **résolution temporelle** se définit par la **fréquence d'acquisition** d'un vecteur d'une image au-dessus d'une zone donnée. C'est la faculté d'un capteur à fournir des informations espacées dans le temps permettant de rendre compte d'un changement géographique (Robin, 1995). Elle dépend notamment de la largeur de la fauchée (largeur de la scène) d'acquisition. La fréquence de passage de la plateforme au-dessus d'une zone donnée doit être adaptée à l'objectif de l'étude et notamment aux caractéristiques de changement de l'objet étudié. Certains capteurs, notamment les satellites, permettent d'obtenir plusieurs images par an et ainsi d'observer la variabilité intra-annuelle des objets alors que d'autres images, comme les images aériennes produites par l'IGN, ne présentent qu'une fréquence d'environ une fois tous les 5 ans. Il faut ajouter à la fréquence des passages, **l'ancienneté des acquisitions et les conditions d'archivage**. En effet, pour réaliser une analyse historique à moyen terme, les photographies aériennes permettent de remonter jusqu'aux années 1930-1940, dates des premières missions alors que les premières images satellitales datent seulement des années 1970.

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

La **résolution temporelle** fait référence au laps de temps écoulé entre deux images. La répétitivité des images que l'on choisit dépend de l'utilisation que l'on souhaite en faire. Certaines applications, telle que le suivi d'une crue, nécessitent des images prises avec une fréquence élevée. Dans le cas de la caractérisation d'un réseau hydrographique, la répétitivité des acquisitions a peut-être moins d'importance. Si l'objectif est la caractérisation **de l'état physique du réseau à un instant t** et sa **réévaluation périodique**, une résolution temporelle de 5 à 10 ans peut être suffisante.

2.4. D'autres critères à prendre en compte ?

Naturellement le **coût** des images est un critère non négligeable. Il dépend principalement de la zone à couvrir, et donc de la **taille de la scène** et de la **résolution spatiale** des images (Figure 11). Certaines images satellites (Spot, Landsat,) couvrent des surfaces de plusieurs milliers de km². Pour celles-ci le coût par km² est faible. Cependant, pour un gestionnaire qui travaille à l'échelle d'un tronçon de quelques kilomètres de long, l'acquisition d'une scène présentant bien souvent une surface minimale (ex. : 60 km par 60 km pour Ikonos 2) représente un coût élevé alors que celle-ci couvre des zones sans intérêt. De plus, ces images présentent généralement des résolutions spatiales relativement faibles. En revanche, à l'échelle du bassin versant, le rapport surface couverte / prix des images à large scène est un paramètre important pour déterminer l'image la mieux adaptée au terrain d'étude (Figure 12).

Le calcul du coût d'une image peut s'avérer compliqué dans la mesure où les scènes commercialisées présentent bien souvent des tailles minimales. Afin de comparer les différents couples vecteur / capteur, nous avons calculé le coût d'une image en fonction de la surface nécessaire à l'étude. c'est ainsi que, dans le domaine de la très haute résolution spatiale (< à 5 m), les photographies aériennes, commercialisées par l'IGN présentent l'un des coûts les plus faibles pour les tronçons de 1 x 1 km ou de 1 x 10 km (Figure 13**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** A et B), mais pour caractériser un tronçon plus

long (de 1 x 100 km) avec une résolution spatiale quasi-identique les images Ikonos ou Quickbird sont moins onéreuses (Figure 13 C).

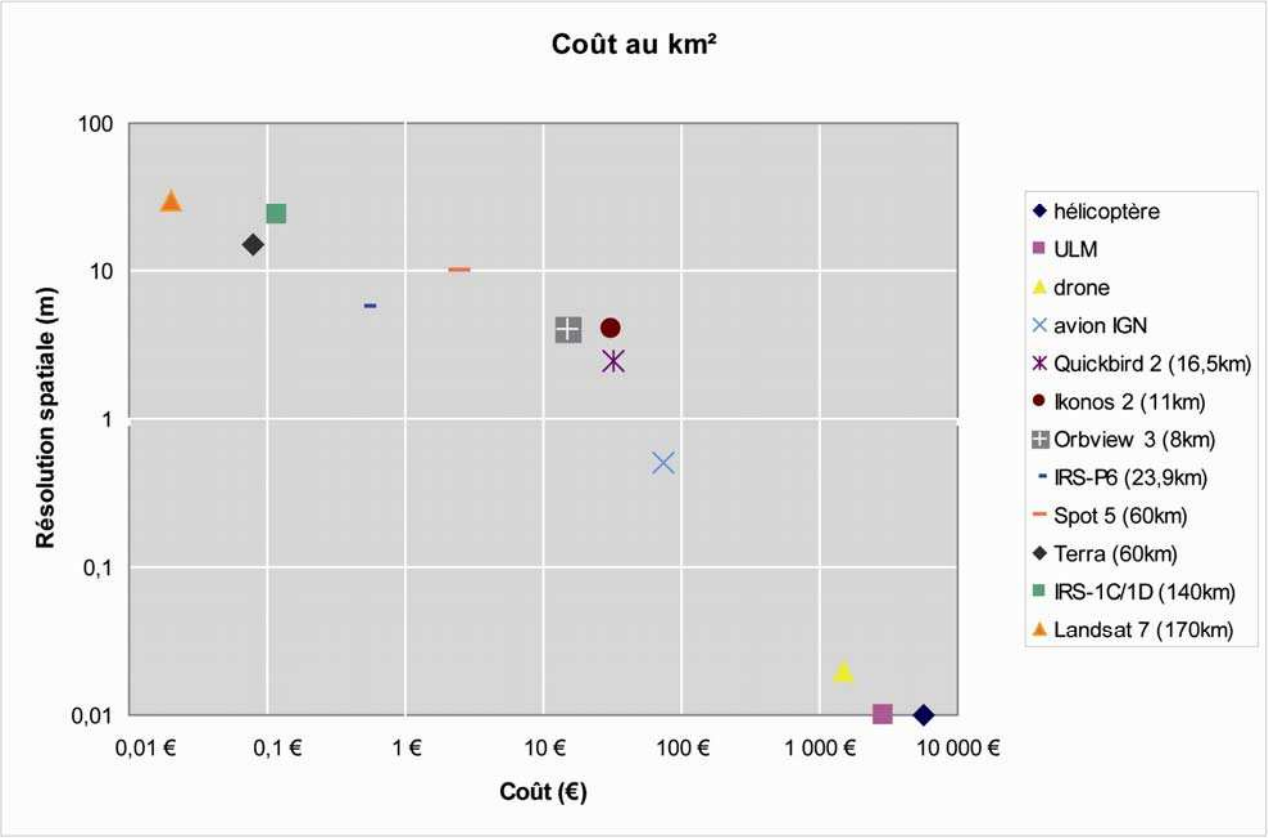

Figure 11 : Lien entre le coût d'une image par km² et sa résolution spatiale.

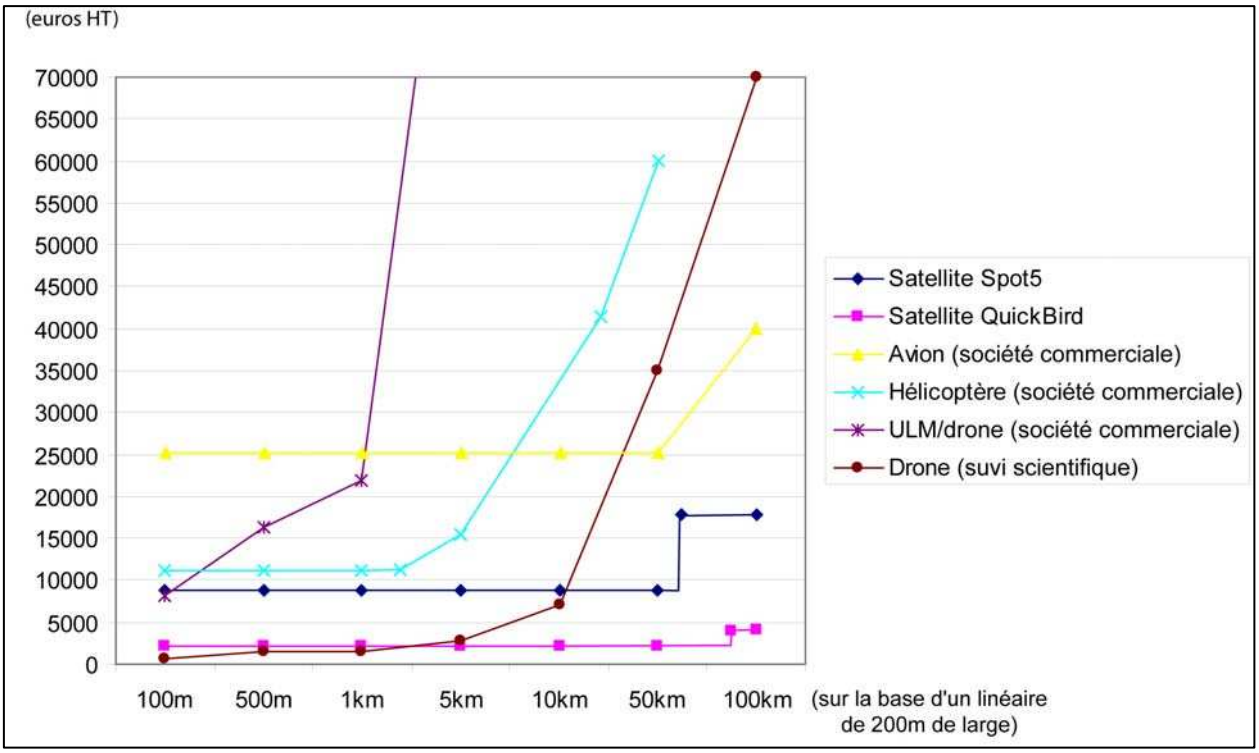

Figure 12 : Lien entre la taille du tronçon et le coût (d'après Lejot, 2008)

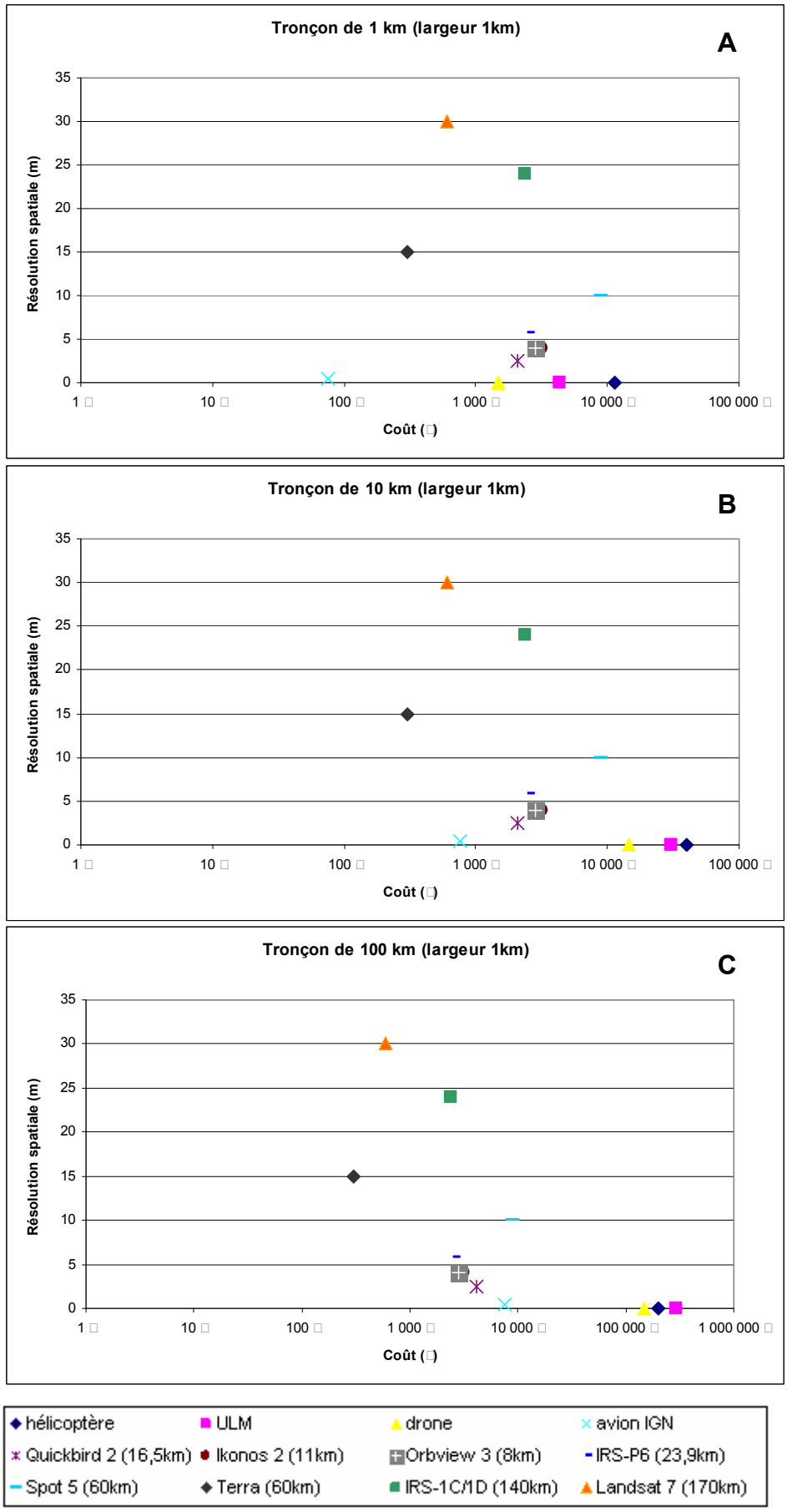

Figure 13 : Lien entre le coût d'une image d'une taille de 1 km* x1 km (A), de 1 km*x 10 km (B), de 1 km*x 100 km et sa résolution spatiale.

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

Le coût des images doit également être intégré comme critère de sélection. Deux paramètres vont influencer ce coût : la résolution spatiale désirée et l'échelle de travail. A l'échelle locale, les photographies aériennes représentent souvent un bon compromis entre résolution spatiale et coût mais il peut être judicieux, compte tenu des propriétés spectrales ou spatiales de certains supports, d'acquérir d'autres images dont le coût par km² reste faible sur de petites superficies. Par exemple, il est possible d'installer sur certains vecteurs, comme l'ULM, des capteurs à infrarouge. A l'échelle du bassin du Rhône, l'utilisation d'images satellites est plus abordable sur le plan financier mais ce choix implique également une résolution spatiale plus grossière.

3. EXTRACTION D'INFORMATIONS A PARTIR DES IMAGES

Les images brutes contiennent une certaine quantité d'information. L'extraction de ces informations peut se faire manuellement par digitalisation des objets visibles ou par extraction automatique à partir de certains logiciels d'analyse d'image.

Si la digitalisation manuelle assure un bon contrôle de l'extraction, elle est cependant soumise à un fort biais opérateur. De plus, l'extraction automatique des données offre l'avantage de pouvoir combiner un grand nombre d'informations qu'un photo-interprète n'est pas capable de synthétiser lui-même. L'extraction automatique améliore également significativement le temps de traitements des données (Robin, 1995).

Marcus et Fonstad (2007) distinguent essentiellement trois approches pour la caractérisation des rivières par télédétection : les analyses statistiques des données spectrales, les approches spatiales / texturales, la photogrammétrie :

1. Analyses statistiques des données spectrales

Les traitements statistiques par **classification** ou **régression** sont fréquemment utilisés pour la caractérisation des cours d'eau. Pour ces deux types de traitements, la calibration et la validation des relations doivent se faire par **comparaison avec des données de terrain** (Marcus et Fonstad 2007).

La **classification** permet l'identification de **« zones spectralement » similaires** sur une image. La signature spectrale des objets est extraite à partir de secteurs tests connus. Lorsqu'un lien est établi entre les objets et leur signature, les pixels de l'ensemble de l'image sont classés. Par exemple, Bisson et al (1982) se sont servis de la classification supervisée pour discriminer des unités aquatiques dont les signatures spectrales sont différentes. Cette méthode a également été utilisée dans la reconnaissance spatiale des formes et habitats intra-chenal par de nombreux auteurs (Legleiter et al, 2002 ; Marcus, 2002, Whited et al, 2002, Marcus et al, 2003 ; Gilvear et al 2004).

La **régression** est principalement utilisée pour extraire des « données ratio-niveau », comme la profondeur (Winterbottom et Gilvear 97 ; Whited et al 2002 ; Marcus et al 2003 ; Lorang et al 2005 ; Lejot et al 2007) la turbidité, ou encore la densité de végétation à partir d'un lien établi non plus entre la signature spectrale et la nature d'un objet mais entre sa signature spectrale et une variable le caractérisant mesurée in situ. .

2. Approches spatiale et texturale

Les photographies aériennes sont souvent utilisées pour cartographier les paramètres fluviaux car elles offrent une bonne résolution spatiale. Cependant, elles sont assez limitées sur le plan des informations spectrales. Pour améliorer les possibilités d'extraction de l'information, des techniques alternatives ont été développées en se basant sur les caractéristiques géométriques et texturales des objets et l'organisation spatiale des pixels (Marcus et Fonstad, 2007). En effet, la **structure spatiale** des pixels de l'image peut fournir des données quantitatives issues de traitement géostatistique (semi-variance) ou textural comme la taille des galets d'un banc émergé (Carbonneau et al 2003 ; 2004 ; 2005a ; 2006, Verdu & al, 2005). De même, les **mesures texturales** peuvent servir à la caractérisation des turbulences de surface, mais c'est un domaine encore peu exploité. Cette approche, dite « orientée-objet » a déjà été en partie testée sur les

corridors alluviaux par Perez Correa (2004), au moyen du logiciel eCognition de Definiens. Son application sur les ortho-photographies permet, après une phase d'apprentissage, une différenciation efficace des objets présents sur l'image.

3. Photogrammétrie

Il s'agit d'une **technique de mesures**, permettant d'obtenir la verticale d'un objet et de fait les fluctuations altimétriques d'une surface donnée. Si à partir d'une seule image, il est possible d'obtenir uniquement des informations en deux dimensions, l'utilisation d'images stéréoscopiques (avec un recouvrement des images entre-elles) permet de restituer la dimension **verticale** et donc la topographie d'un site. Grâce à des algorithmes de réfraction / correction, il est également possible d'appliquer cette méthode sous l'eau, c'est-à-dire de restituer la bathymétrie d'un chenal (Butler et al, 2002, Westaway et al, 2000, 2001, 2003). Pour obtenir ces grandeurs, diverses informations concernant le vecteur (altitude, géométrie relative par rapport au terrain) et le capteur (taille de la caméra et de l'image) sont nécessaires. Cette technique permet donc la caractérisation de la rivière dans un espace à trois dimensions (x, y, z) **sur de petites surfaces** (Lejot et al., 2007).

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

A l'échelle d'un grand réseau hydrographique, il est nécessaire d'utiliser des procédures automatiques d'extraction des objets. Celles-ci sont essentiellement fondées sur des méthodes de classification pour les images satellites. Le développement récent d'approches orientées objet permet également d'utiliser l'approche spatiale et texturale sur les ortho-photographies et de palier partiellement leur défaut, la faible résolution spectrale.

4. VERS DE NOUVEAUX ENJEUX TECHNIQUES

Pendant longtemps, l'emploi de la télédétection n'était possible que sur de grands cours d'eau. Pour ceux de plus petites tailles, la résolution des images satellites était bien souvent insuffisante. Mais l'arrivée de nouveaux satellites de résolution submétrique, comme Ikonos, Quickbird 2, voire même WorldView, a changé la donne. Auparavant, seules les photographies aériennes offraient une résolution décimétrique. Maintenant il est possible avec ces nouveaux satellites de différencier les unités fluviales ou même d'étudier les surfaces exondées.

Des études en cours, sur la restauration physique et le suivi morphologique des rivières ont pour objectif, notamment de progresser en termes de précision et de fréquence d'observation. Pour atteindre ces objectifs, de nouveaux vecteurs sont testés, comme le drone ou l'hélicoptère. Leurs utilisations offrent une meilleure flexibilité d'utilisation, que ce soit en termes de surface couverte que de fréquence d'acquisition. Il est possible de faire des survols à dates rapprochées permettant ainsi le suivi d'événements épisodiques majeurs comme les crues. La résolution des capteurs embarqués sur ces « nouvelles » plateformes permet la mise en place de MNT centimétrique ou décimétrique.

Partie 2 - Quelques exemples d'applications de la télédétection dans l'étude des systèmes fluviaux

Le tableau 2 fait état de différents travaux ayant eu recours à de la télédétection.

Tableau 2 : Liste non-exhaustive des applications de la télédétection en géomorphologie fluviale

Référence	Site d'études	Sujets d'études	Type d'images - échelle/taille pixel
bande active			
Nykanen et al., 1998	Rivière Tanana (Alaska-USA)	morphologie d'une tresse	SAR
Lane et al., 2000	*Non renseigné*	lit de rivière	Photographies numériques 1 :30000
Winterbottom, 2000	Rivière Tummel, Ecosse	érosion de berge et changement du chenal en plan	Photographies aériennes 1:10000 1:12000
Igouzal et al., 2003	Rivière Sebou, Maroc	morphologie d'une rivière à méandre	Photographies aériennes 1:20000
Eykens, 2007	Cours d'eau français, américain et italien	largeur moyenne, érosion relative	Photographies aériennes 1:20000 1:25000
Slater, 2007	Rivières en tresses - bassin RMC, France	surface en eau, migration latérale, unités physionomiques du corridor fluvial	Ortho-photographies
surfaces émergées			
Lane et al., 2003	Waimakariri, Nouvelle-Zélande	bancs exondés de rivières en tresses	Photogrammétrie numérique ➔ Modèle Numérique d'Elévation (résolution : 1 m)
Carbonneau, 2005	*Non renseigné*	restitution des faciès granulométriques des bancs	Images numériques résolution 10 cm
Verdu et al., 2005	Isabena River, Espagne.		Images numériques 1 :1000 ; 1 :40
Lejot, 2007	Haut Rhône, France	végétation des bancs	Images drone
surfaces immergées			
Mertès et al., 1993	Amazone	concentration de MES	Landsat
Rainey et al., 2000	Rivière Ribble, Angleterre	pourcentage d'argile, de limon et de sable	Airborne thematic mapper data, 2m pixel size
Brasington et al., 2003	Ecosse	bathymétrie d'eau peu profonde	Photographies numériques
Marcus et al., 2003	Région de Yellowstone		Images hyperspectrales (128 bandes) résolution 1m
Westaway et al., 2003	Waimakariri River		Photogrammétrie numérique

Chaponnière, 2004	Rivière de la Durance, France	bathymétrie	Images drone
Lejot, 2007	Haut Rhône, France	bathymétrie, nature du fond	Images drone
surfaces inondées			
Muller, 1997	Vallée de la Garonne, France	discrimination de la plaine inondable	Landsat TM (30m de résolution)
Miranda et al., 1998	Amazonie	inondation d'une plaine inondable	Donnée SAR (JERS-1)
Bates and De Roo, 2000	Rivière Meuse, Pays Bas	cartographie de l'expansion des crues/inondations plaines alluviales	SAR
Mariko et al., 2003	Delta intérieur du Niger	surfaces inondées	NOAA/AVHRR
Raclot, 2003	Rivière l'Hérault, France	niveaux d'eau en plaine inondée	Photographies aériennes 1:18000
érosion/dépôt			
Gomez et al., 1995, 1997	Rivière Mississippi, USA	impact d'une crue sur les dépôts sédimentaires	Landsat TM et photographie aérienne
Smith and Aldorf, 1998	Rivière Ob, Sibérie	érosion et dépôt en plaine inondable	SAR
végétation			
Marston et al., 1995	Rivière de l'Ain, France	végétation riparienne	Photographies aériennes (1945-1991)
Muller, 1997	Garonne	différenciation des clones de peuplier	Images SPOT
Bryant and Gilvear, 1999	Rivière Tummel, Ecosse	changement de la végétation riveraine	Imagerie multispectrale aéroportée (1m de résolution)
Dufour, 2005	Rivière de l'Arve et de l'Ain	évolution paysagère	Photographies aériennes 1:15000 1:25000 1:30000
Lassettre et al. 2007	Rivière de l'Ain, France	bois morts	Photographies hélicoptères obliques et aériennes verticales
occupation du sol			
Perez Correa, 2004	Rivières la Lez et l'Ain, France	occupation du sol (végétation, culture,)	Spot, orthophotos (0,5m), photographies aériennes (2m)
Slater, 2007	Rivières en tresses - bassin RMC, France	occupation du sol (endiguements, installation humaines)	Ortho-photographies
autres			
Puestow et al., 2001	*Non renseigné*	caractérisation des habitats aquatiques	Image multispectrale CASI

Partie 3 - Liste non exhaustive des capteurs et vecteurs employés en télédétection fluviale

Résolution de différents couples capteur / plateformes

		Résolution temporelle	Résolution spectrale								Résolution spatiale				
				Optique (en µm)											
					XS (multispectral)										
					Visible			InfraRouge							
		Fréquence de passage	Radar	Pan ou mono.	B	V	R	PIR	MIR	IRT	EHR <0,1m	THR 0,1-5m	HR 6-30m	MR 31-100m	BR >100m
Drone		-		X		X					X				
Hélicoptère		-	*non renseigné*								X				
ULM		-				X		X			X				
Avion IGN		tous les 5 ans				X						X			
WorldView	WV60	*non renseigné*		X								X			
Eros B	PIC-3	*non renseigné*		X								X			
IRS-P6 (Resourcesat 1)	LISS3	24 jours (Pan et MX 5 à 24 jours)				X	X	X	X				X		
	LISS4			mono.		X	X	X					X		
	AWIFS					X	X	X	X					X	
Orbview 3	OHRIS	3 jours		X		X		X				X			
Spot 5	HRG	3 à 26 jours		X		X	X	X	X			X	X		
	VGT	1 fois/jour			X		X	X	X						X
	HRS	3 à 26 jours		X									X		
Envisat	ROS	35	X										X	X	X
Quickbird 2	BHRC60	1 à 3,5 jours		X		X		X				X			
Eros A1	PIC	1,8 à 4 jours		X								X			
Terra	ASTER	16 jours				X	X	X	X	X			X	X	
Ikonos 2	OSA	3 jours à 1m; 1,5 jours à 1,5m		X		X		X				X			
Landsat 7	ETM +	16 jours		X		X		X	X	X			X	X	X
Spot 4	HRVIR	3 à 26 jours		X		X	X	X	X				X		
	VGT	1 fois/jour			X		X	X	X						X
Radarsat 1, 2	ROS	1: 16 jours; 2: 24 jours	X										X	X	
IRS-1C/1D	LISS3	24 jours (Pan 5 à 24 jours)				X	X	X	X				X		
	Wifs						X	X							X
	Pan			X									X		
Jers-1	ROS	44 jours	X			X	X	X	X				X		
ERS 1, 2	ROS	35	X										X		
Spot 1 à 3	HRV	3 à 26 jours		X		X	X	X					X		
Landsat 4, 5	MSS	16 jours				X	X	X	X					X	
	TM					X		X	X	X			X		X
NOAA	AVHRR	2fois/jour					X	X							X
Landsat 1 à 3	MSS	18 jours				X	X	X						X	

EHR: Extrême Haute Résolution; THR: Très Haute Résolution; HR: Haute Résolution; MR: Moyenne Résolution; BR: Basse Résolution

Satellites
Caractéristiques génerales

	Plateforme							Capteur		
	Pays	**Date de lancement**	**Fin de vie**	**Altitude**	**Inclinaison**	**Période de révolution**	**Orbite**	**Nom**	**Type**	**Stéréoscopie**
WorldView	Etats-Unis	sept-07	-	496,00 km	*non renseigné*	94,60 min	Héliosynchrone	WV60	*non renseigné*	*non renseigné*
Eros B	Israël	avr-06	-	500,00 km	97,70°	94,70 min	Héliosynchrone	PIC-3	*non renseigné*	*non renseigné*
IRS-P6 (Resourcesat 1)	Inde	oct-03	-	817,00 km	98,70°	101,35 min	Héliosynchrone polaire	LISS3	Radiomètre à balayage	oui (+/- 26° d'inclinaison)
								LISS4		oui (+/- 26° d'inclinaison)
								AWiFS		-
Orbview 3	Etats-Unis	juin-03	-	470,00 km	97,30°	92,50 min	Héliosynchrone	OHRIS	*non renseigné*	-
Spot 5	France	mai-02	-	822,00 km	98,70°	101,40 min	Héliosynchrone	HRG	Radiomètre à barrettes	oui (2 modes: +/- 27° d'inclinaison en visée oblique et visée avant arrière)
								VGT		-
								HRS		oui
Envisat	Europe	mars-02	-	800,00 km	98,60°	100,60 min	Héliosynchrone	ROS	Capteur actif à barrettes	-
Quickbird 2	Etats-Unis	oct-01	-	450,00 km	97,20°	93,50 min	Héliosynchrone	BHRC60	Radiomètre à barrettes	oui
Eros A1	Israël	déc-00	-	480,00 km	97,30°	94,60 min	Héliosynchrone polaire	PIC	Radiomètre à barrettes	oui
Terra	Etats-Unis	déc-99	-	705,00 km	98,20°	98,88 min	Héliosynchrone polaire	ASTER	Radiomètres à barrettes	oui (bandes 3 et 3B)
Ikonos 2	Etats-Unis	sept-99	-	681,00 km	98,10°	98,00 min	Héliosynchrone polaire	OSA	Radiomètre à barrettes	oui (+/- 26° d'inclinaison)

Satellites
Caractéristiques génerales

	Plateforme							Capteur		
	Pays	**Date de lancement**	**Fin de vie**	**Altitude**	**Inclinaison**	**Période de révolution**	**Orbite**	**Nom**	**Type**	**Stéréoscopie**
Landsat 7	Etats-Unis	avr-99	-	705,00 km	98,20°	99,00 min	Héliosynchrone polaire	ETM +	Radiomètre à balayage	-
Spot 4	France	mars-98	-	822,00 km	98,70°	101,40 min	Héliosynchrone	HRVIR	Radiomètre à barrettes	oui (+/- 27° d'inclinaison)
								VGT		-
Radarsat 1, 2	Canada	1: 1995; 2: déc-2007	-	798,00 km	98,60°	100,70 min	Héliosynchrone polaire	ROS	Capteur actif à barrettes	oui (visée à droite pour 1 et à droite et à gauche pour 1 et 2)
IRS-1C/IRS-1D	Inde	IRS-1C: 1995; IRS-D: 1997	-	817,00 km	98,69°	101,20 min	Héliosynchrone polaire	LISS3	Radiomètre à balayage	-
								Wifs	*non renseigné*	*non renseigné*
								Pan	*non renseigné*	-
Jers-1	Japon	févr-92	oct-98	568,00 km	97,70°	96,00 min	Héliosynchrone polaire	ROS	Capteur actif à barrettes	oui (bandes 3 et 4)
ERS 1, 2	Europe	1: 1991; 2: 1995	1: mars 2000	785,00 km	98,52°	100,00 min	Héliosynchrone polaire	ROS	Capteur actif à barrettes	-
Spot 1 à 3	France	1: févr-86; 2: janv-90; 3: sept-93	1: 2003; 3: 1996	822,00 km	98,70°	101,40 min	Héliosynchrone	HRV	Radiomètre à barrettes	oui (+/- 30° d'inclinaison)
Landsat 4, 5	Etats-Unis	4: 1982; 5: 1986	4: 1986; 5: 1995 (MSS)	705,00 km	98,20°	99,00 min	Héliosynchrone polaire	MSS	Radiomètre à balayage	-
								TM	Radiomètre à balayage	-
NOAA	Etats-Unis	depuis 1979	*non renseigné*	833,00 km	98,90°	102,00 min	Héliosynchrone polaire	AVHRR	Radiomètre à balayage	-
Landsat 1 à 3	Etats-Unis	1: 1972; 2: 1975; 3: 1978	1: 1978; 2: 1982; 3: 1983	917,00 km	99,20°	103,00 min	Héliosynchrone polaire	MSS	Radiomètre à balayage	-

Satellites - optique
Résolution spectrale

		Pan ou mono. (en µm)	Multispectral (en µm)															
			Visible			InfraRouge												
			B	V	R	PIR	MIR							TIR				
WorldView	WV60	0,40-0,90																
Eros B	PIC-3	0,50-0,90																
IRS-P6 (Resourcesat 1)	LISS3			1 0,52-0,59	2 0,62-0,68	3 0,77-0,86	4 1,55-1,70											
	LISS4	0,62-0,68 (mono.)		1 0,52-0,59	2 0,62-0,68	3 0,77-0,86												
	AWiFS			1 0,52-0,59	2 0,62-0,68	3 0,77-0,86	4 1,55-1,70											
Orbview 3	OHRIS	0,45-0,90	1 0,45-0,52	2 0,52-0,60	3 0,62-0,69	4 0,76-0,90												
Spot 5	HRG	0,48-0,71		1 0,50-0,59	2 0,61-0,68	3 0,78-0,89	4 1,58-1,75											
	VGT		0 0,45-0,52		2 0,61-0,68	3 0,78-0,89	4 1,58-1,75											
	HRS	0,49-0,69																
Quickbird 2	BHRC60	0,45-0,90	1 0,45-0,52	2 0,52-0,60	3 0,63-0,69	4 0,76-0,90												
Eros A1	PIC	0,50-0,90																
Terra	ASTER			1 0,52-0,60	2 0,63-0,69	3 0,78-0,86	3B 0,78-0,90	4 1,60-1,70	5 2,145-2,185	6 2,185-2,225	7 2,235-2,285	8 2,295-2,365	9 2,36-2,43	10 8,125-8,475	11 8,475-8,825	12 8,925-9,275	13 10,25-10,95	14 10,95-11,65
Ikonos 2	OSA	0,45-0,90	1 0,45-0,52	2 0,52-0,60	3 0,63-0,69	4 0,76-0,85												

Satellites - optique
Résolution spatiale

		Panchromatique	Multispectral
WorldView	WV60	0,5	
Eros B	PIC-3	0,7	
IRS-P6 (Resourcesat 1)	LISS3		23,5
	LISS4	5,8	5,8
	AWiFS		56
Orbview 3	OHRIS	1	4
Spot 5	HRG	2,5-5	B1/B2/B3:10 - B4:20
	VGT		1000
	HRS	10	
Quickbird 2	BHRC60	0,61	2,44
Eros A1	PIC	1,8	
Terra	ASTER		1,2,3B: 15; 4 à 9: 30; 10 à 14: 90
Ikonos 2	OSA	1	4
Landsat 7	ETM +	15	30; B6: 120
Spot 4	HRVIR	10	20
	VGT		1000
IRS-1C/1D	LISS3		24
	Wifs		188
	Pan	5,8	
Jers-1	ROS		18
Spot 1 à 3	HRV	10	20
Landsat 4, 5	MSS		80
	TM		30; B6: 120
NOAA	AVHRR		1100
Landsat 1 à 3	MSS		80

Satellites - radar

Résolutions spectrale et spatiale

		Résolution spatiale (m)	Résolution spectrale		
Envisat	**ROS**	Variable: 30 à 150	5,300 GHz	C 5,66 cm	HH HV VH et VV
Radarsat 1, 2	**ROS**	Variable: 10; 25; 50 et 3 pour n°2	5,300 GHz	C 5,66 cm	1 et 2: HH; 2: HV, VH et VV
Jers-1	**ROS**	18	1,275 GHz	L 23,00 cm	HH
ERS-1, 2	**ROS**	30	5,300 GHz	C 5,66 cm	VV

Photographies aériennes et cartes

Photographies aériennes

		Date	Altitude	Capteurs	Résolution spatiale (m)	Résolution temporelle (jour/an)	Domaine spectrale	Taille de la scène (km²)	Prix d'une scène (euro)	Mode stéréoscopique
Drone	-	-	*non renseigné*	*non renseigné*	0,2	180	Visible et panchromatique	0,17	500	*non renseigné*
Hélicoptère	-	-	*non renseigné*	*non renseigné*	0,1	*non renseigné*	*non renseigné*	2 km * 500 m	5700 (HT)	*non renseigné*
ULM	-	-	*non renseigné*	*non renseigné*	0,05 et 0,10	*non renseigné*	Visible et PIR	0,75	Visible : à partir de 2175 et PIR : à partir de 1087,5	*non renseigné*
Avion (IGN) - ortho-photographies	France	depuis 1921 (service géographique de l'armée)	8,8 km (en pratique mais variable)	argentique (f:152mm)	0,5 (1:2000 et 1:65000 selon les séries)	Variable avant 2000 / Depuis 2000, tous les 5 ans (du 15/05 au 15/09)	N et B jusqu'en 1960	Support papier: variable	75	oui
		1939 à 1952 pour la 1ère couverture complète du territoire		postérieur à 2000 CCD Kodak (f: 152mm)			Couleur	Ortho photo: 1*1 la dalle		

Images numériques géoréférencées

	Résolution au sol (m)	Dimension minimale	Prix (euro)	Remarques
Cartes Scan 25	2,5	10km*10km	150 (la dalle)	Produit raster issu des fichiers numériques des cartes IGN à l'échelle du 1:25 000
		France entière	182500	

Tarifs de différents capteurs

			Données			Données archivées		
			Surface minimum d'achat (km²)	Prix (€/km²)	Prix par image commandée (€)	Surface minimum d'achat (km²)	Prix (€/km²)	Prix par image commandée (€)
Drone			*non renseigné*	1 470,59	0,00			
Eros B	PIC-3	Pan	49	21,00	1 029,00	49	14,70	720,30
IRS-P6	LISS4	Pan ou XS	4 900	0,51	2 500,00		0,00	0,00
Orbview 3	OHRIS	Pan	192	14,70	2 822,40	64	7,35	470,40
		Pan (Stereo)	192	49,98	9 596,16	64	24,99	1 599,36
		XS	192	14,70	2 822,40	64	7,35	470,40
Spot 5	HRG	Pan	3 600	1,72	6 200,00	3 600	1,50	5 400,00
			1 600	3,03	4 850,00	1 600	2,53	4 050,00
			900	3,89	3 500,00	900	3,00	2 700,00
			400	7,10	2 840,00	400	5,10	2 040,00
		Couleurs	3 600	2,47	8 900,00	3 600	2,25	8 100,00
Quickbird 2	BHRC 60	Pan ou XS	64	30,87	1 975,68	25	23,52	588,00
		3 ou 4 bandes	64	32,34	2 069,76	25	24,99	624,75
		Bundle (Pan et	64	36,75	2 352,00	25	29,40	735,00
Eros A1	PIC	Pan	196	11,25	2 205,00	196	6,83	1 337,70
Terra	ASTER		3 600	0,08	300,00	3 600	0,02	75,00
Ikonos 2	OSA	Pan ou XS	100	29,40	2 940,00	49	23,52	1 152,48
		Couleurs	100	31,61	3 160,50	49	24,99	1 224,51
		Bundle (Pan et	100	33,81	3 381,00	49	26,46	1 296,54
Landsat 7	ETM+		31 622	0,02	475,00			
IRS-1C/1D	Pan	Pan	4 900	0,46	2 250,00			
			529	1,42	750,00			
	LISS3	XS	19 600	0,12	2 400,00			
			4 900	0,31	1 500,00			

Satellites

Accès aux données

	Date	Page web	Choix de la donnée
Eros B	*non renseigné*	http://www.scanex.com/en/data/default.asp?submenu=eros&id=delivery	*non renseigné*
IRS-P6	mai-07	www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf	Standard data products
Orbview 3	janv.-06	www.geoeye.com/whitepapers_pdfs/OV-3_Catalog.pdf	Obview Basic Enhanced
Spot 5	juil.-06	www.spotimage.fr/automne_modules_files/standard/public/p335_ba582c667a21f3b7d1108ad9773629fdListe_Prix__2007Fr.pdf	Spot scene - image standard
Quickbird 2	mai-07	www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf	Image library / Standard tasking
Eros A1	*non renseigné*	http://www.scanex.com/en/data/default.asp?submenu=eros&id=delivery	*non renseigné*
Terra	mai-07	www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf	New tasking Package - Archive Level IA, IB et 2
Ikonos 2	août-05	http://www.euspaceimaging.com/sime.asp?page=products	Georectified products
Landsat 7	mai-07	www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf	Basic Set - standard
IRS-1C/1D	mai-07	www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf	Standard data products

Satellites
Divers renseignements

		Taille de la fauchée (km)	Programmable	Initiateur	Adresse internet initiateur	Adresse internet fournisseur principal
WorldView	WV60	*non renseigné*	*non renseigné*	*non renseigné*	*non renseigné*	www.digitalglobe.com
Eros B	PIC-3	16*16	*non renseigné*	*non renseigné*	*non renseigné*	
IRS-P6 (Resourcesat 1)	LISS3	140	*non renseigné*	ISA	www.isro.gov.in	www.eurimage.com
	LISS4	70 (mono.) 23,9 (XS)				
	AWiFS	740				
Orbview 3	OHRIS	8*8	*non renseigné*	GEOEYE	www.geoeye.com	www.orbimage.com
Spot 5	HRG	60*60	oui	CNES	www.cnes.fr	www.spotimage.fr
	VGT	2000*2000				
	HRS	60*120				
Envisat	ROS	*non renseigné*	oui	ESA	www.esa.int/esaCP/France.html	www.spotimage.fr
Quickbird 2	BHRC60	16,5*16,5	*non renseigné*	*non renseigné*	*non renseigné*	www.eurimage.com
Eros A1	PIC	12,5*12,5	*non renseigné*	*non renseigné*	*non renseigné*	www.iptsat.com
Terra	ASTER	60	*non renseigné*	NASA et JAXA	www.nasa.gov / www.jaxa.jp	www.eurimage.com
Ikonos 2	OSA	11*11	*non renseigné*	GEOEYE	www.geoeye.com	www.euspaceimaging.com
Landsat 7	ETM +	185*170	*non renseigné*	NASA et EOSAT	www.nasa.gov	www.eurimage.com
Spot 4	HRVIR	60*60	oui	CNES	www.cnes.fr	www.spotimage.fr
	VGT	2000*2000				
Radarsat 1, 2	ROS	45 à 500	oui	ASC	www.space.gc.ca	www.eurimage.com
IRS-1C/1D	LISS3	142-148	*non renseigné*	ISA	www.isro.gov.in	www.eurimage.com
	Wifs	804				
	Pan	70*70				
Jers-1	ROS	75*75	*non renseigné*	JAXA	www.jaxa.jp	www.eurimage.com
ERS 1, 2	ROS	*non renseigné*	oui	ESA	www.esa.int/esaCP/France.html	www.spotimage.fr
Spot 1 à 3	HRV	60*60	oui	CNES	www.cnes.fr	www.spotimage.fr
Landsat 4, 5	MSS	185*170	*non renseigné*	NASA et EOSAT	www.nasa.gov	www.eurimage.com
	TM					
NOAA	AVHRR	*non renseigné*	*non renseigné*	*non renseigné*	*non renseigné*	www.eurimage.com
Landsat 1 à 3	MSS	*non renseigné*	*non renseigné*	NASA et EOSAT	www.nasa.gov	www.eurimage.com

QUESTIONS PRELIMINAIRES A L'UTILISATION DE L'IMAGERIE POUR LA CARACTERISATION PHYSIQUE A L'ECHELLE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Partie 1 - Quels couples capteur / plateforme choisir ? _____ 32

Partie 2 - Images et SIG _____ 34

Partie 3 - Quels indicateurs peuvent être extraits des images ? _____ 37

1. Construction d'indicateurs _____ 37
2. Exemples d'indicateurs _____ 41

La caractérisation de l'état physique des corridors alluviaux soulève deux questions préliminaires. Selon l'objectif fixé, il convient, dans un premier temps, de trouver la **meilleure combinaison capteur / vecteur** puis, dans un second temps, de choisir les **variables** et les **indicateurs** les plus appropriés.

Partie 1 - Quels couples capteur / plateforme choisir ?

L'analyse bibliographique sur l'utilisation de l'imagerie pour l'étude des milieux fluviaux réalisée précédemment illustre la diversité des images disponibles et la nécessité d'un choix approprié selon la thématique. Dans cette partie, nous proposons d'utiliser 6 critères pour faciliter le choix d'un type d'image ou d'un couple capteur / vecteur :

- la **résolution spatiale** de l'image conditionne l'identification des objets selon leur taille.
- les **caractéristiques spectrales** : elles jouent un rôle déterminant sur la discrimination des différentes classes d'occupation des sols (eau, végétation, sédiments,). L'existence de nombreux canaux favorise généralement la différenciation d'un nombre élevé de classes (ex. : différents habitats forestiers).
- la **répétitivité temporelle** des images : ce paramètre contrôle la fréquence d'acquisition des différents paramètres étudiés. Une fréquence intra-annuelle permet un suivi de la variabilité saisonnière de certains paramètres. Une analyse multi-date peut permettre de bien discriminer certains paramètres (feuillus / résineux par exemple sur des acquisitions hivernales et estivales pour identifier des unités différentes phénologiquement).
- l'**ancienneté** de la base de données. Ce critère est important dans le cas où la caractérisation intègre une approche diachronique de l'objet étudié.
- la disponibilité des images et leur **homogénéité** sur la zone d'étude. La présence d'artefacts sur certaines images peut les rendre inutilisables, il convient donc de s'assurer que la qualité de l'information est identique et bonne sur l'ensemble de la zone d'étude.
- le **coût** d'acquisition des images.

Pour chacun de ces critères nous avons distingué deux ou trois groupes d'images en fonction du niveau d'information fournie et du coût des acquisitions (Tableau 3). Le niveau A correspond aux conditions les plus favorables : information de bonne qualité, forte capacité à discriminer des objets, faible coût, fréquence de passage élevée, données anciennes accessibles. Pour chaque niveau est également indiqué le type d'image ou de couple capteur / vecteur qui permet d'atteindre ce niveau. Afin de trouver le meilleur **compromis sur l'ensemble des critères**, un récapitulatif a été dressé dans le Tableau 4 concernant les images Drone, les orthophotographies, les images satellitales haute résolution (HR), et les images très haute résolution et extrêmement haute résolution (THR et EHR).

Le croisement des critères confirme l'intérêt des **ortho-photographies** de l'IGN qui fournissent une source d'informations homogènes sur tout le bassin (Perez Correa, 2004). En effet, à l'échelle du réseau hydrographique les images Drone et les images satellitales THR et EHR s'avèrent trop coûteuses et n'offrent pas la possibilité d'une analyse diachronique à moyen terme. Les images satellitales HR présentent un niveau de résolution spatiale souvent trop limitée, notamment pour caractériser les cours d'eau de faible

dimension, de rang inférieur à 4. Les deux principales limites des ortho-photographies sont la faible fréquence des prises de vues et l'absence d'informations dans le canal infrarouge.

Tableau 3 : Présentation des différents facteurs déterminant le choix d'un couple capteur / plateforme ou d'un type d'image

Critère		Classes*		Couple capteur / plateforme ou type d'image
Résolution spatiale				
		surface objet	largeur pixel	
	A	< 0,04 m²	< 0,1 m	Drone, hélicoptère
	B	0,04 - 100 m²	0,1-5 m	ortho-photographies IGN; satellites optiques THR et EHR
	C	> 100 m²	> 5 m	satellites optiques HR
Résolution spectrale *(remarque : le choix dépend des objets que l'on souhaite caractériser)*				
		radars		satellites radars
	A	optique-infrarouge		satellites optique infrarouge (Terra, Spot 5)
	B	optique-visible		ortho-photographies IGN; satellites optique visible
Temporalité				
Fréquence	A	intra-annuelle		satellites / drone
	B	pluriannuelle		orthophotographies IGN
Ancienneté	A	> 50 ans		ortho-photographies IGN
	B	10 - 30 ans		Landsat, Spot 4
	C	< 10 ans		drone / autres satellites
Homogénéité de la zone couverte				
	A	Très bonne		ortho-photographies IGN
	B	bonne		Drone (variation de la luminosité entre les clichés)
	C	incertaine		satellites optiques
Coût				
tronçon 1*1km	A	faible (<100□)		ortho-photographies IGN
	B	moyen (100-1000□)		satellites Terra et Landsat
	C	élevé (>1000□)		drone / autres satellites
tronçon 1*10km	A	faible (<1000□)		satellites Terra et Landsat / ortho-photographies IGN
	B	moyen (1000-10000□)		autres satellites
	C	élevé (>10000□)		drone
tronçon 1*100km	A	faible (<1000□)		satellites Terra et Landsat
	B	moyen (1000-10000□)		autres satellites / ortho-photographies IGN
	C	élevé (>10000□)		drone

** A : bon ; B : moyen ; C : médiocre*

Tableau 4 : Présentation des niveaux de satisfaction

	Résolution spatiale	Résolution spectrale	Temporalité		Homogénéité	Coût		
			Fréquence	Ancienneté		Tronçon 1*1km	Tronçon 1*10km	Tronçon 1*100km
Drone	A	A/B	A	C	B	C	C	C
Ortho-photographies	B	B	B	A	A	A	A	B
Satellites optiques THR / EHR	B	A/B	A	C	C	B/C	B/C	B/C
Satellites optiques HR	C	A	A	B	C	C	A	A

A : bon ; B : moyen ; C : médiocre

Partie 2 - Images et SIG

L'utilisation des données images pour caractériser un réseau hydrographique peut s'avérer d'autant plus intéressante si les informations obtenues sont combinées avec des données déjà vectorisées (ex. : BD Topo®) dans un Système d'Information Géographique.

La base de données BD Topo® est la description métrique 3D du territoire et de ses infrastructures (http://www.ign.fr/rubrique.asp?rbr_id=1621&lng_id=FR). Elle contient également des informations en termes d'occupation du sol (réseau hydrographique, réseau ferré). Cette base de données offre l'avantage d'être une source de données déjà interprétées et uniforme sur l'ensemble du territoire. Son utilisation évite donc la phase d'extraction de l'information à partir des images brutes. Cependant, cette caractéristique constitue également un inconvénient (Tableau 5). L'absence d'accès à l'image d'origine rend en effet relativement opaque les choix retenus lors de l'interprétation des photographies et la configuration de certains objets ne correspond pas toujours à la dernière date de mise à jour. Certaines des données utiles à la caractérisation des cours d'eau peuvent être représentées sur la base de critères non décidés par l'utilisateur. Par exemple, dans le cas de la largeur du chenal, celle-ci n'est plus représentée en-dessous de 7,5 m que par un trait simple ne donnant pas d'information sur la largeur du chenal. La Figure 14 montre que, dans la BD Topo, cette largeur du chenal est représentée réellement sur moins de 30% du réseau hydrographique de façon continue. De plus, certains départements ne sont pas couverts et certains niveaux d'informations ne sont pas accessibles (ex. : nature de la végétation = pionnière, herbacée, forêts matures…) ou alors de façon partielle (ex. : présence des bancs de galets). Enfin, l'utilisation de la BD Topo ne permet pas les comparaisons diachroniques sur la base des mêmes traitements mais elle reste un complément d'informations aux images.

Tableau 5: Présentation des avantages et inconvénients de la BD Topo® par rapport aux images

Avantages	Inconvénients
Interprétation	
- Déjà faite = gain de temps	- Pas d'accès à l'information brute - Non maîtrise de l'interprétation : manque des informations (végétation, galets) choix arbitraire de la représentation des données (par exemple, largeur des chenaux < à 7,5m (Figure 15**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**))
Homogénéité	
- Données vectorisées et uniformes sur l'ensemble du territoire	
Temporalité	
	- Ancienneté de l'information inexistante

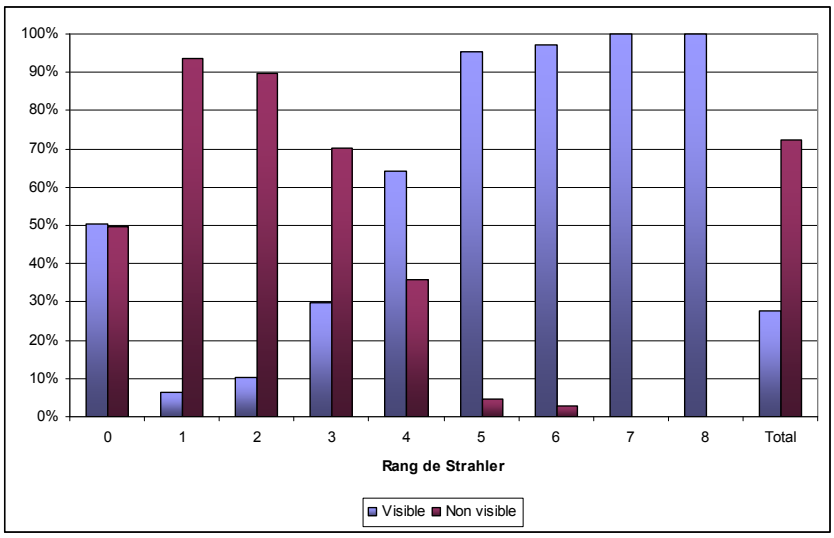

Figure 14 : Pourcentage du réseau hydrographique du bassin versant du Rhône pour lequel la largeur du chenal est une information disponible au sein de la BD Topo.
Représenté en fonction de la taille du cours d'eau (ordre de Strahler ; 0 : rang non défini)

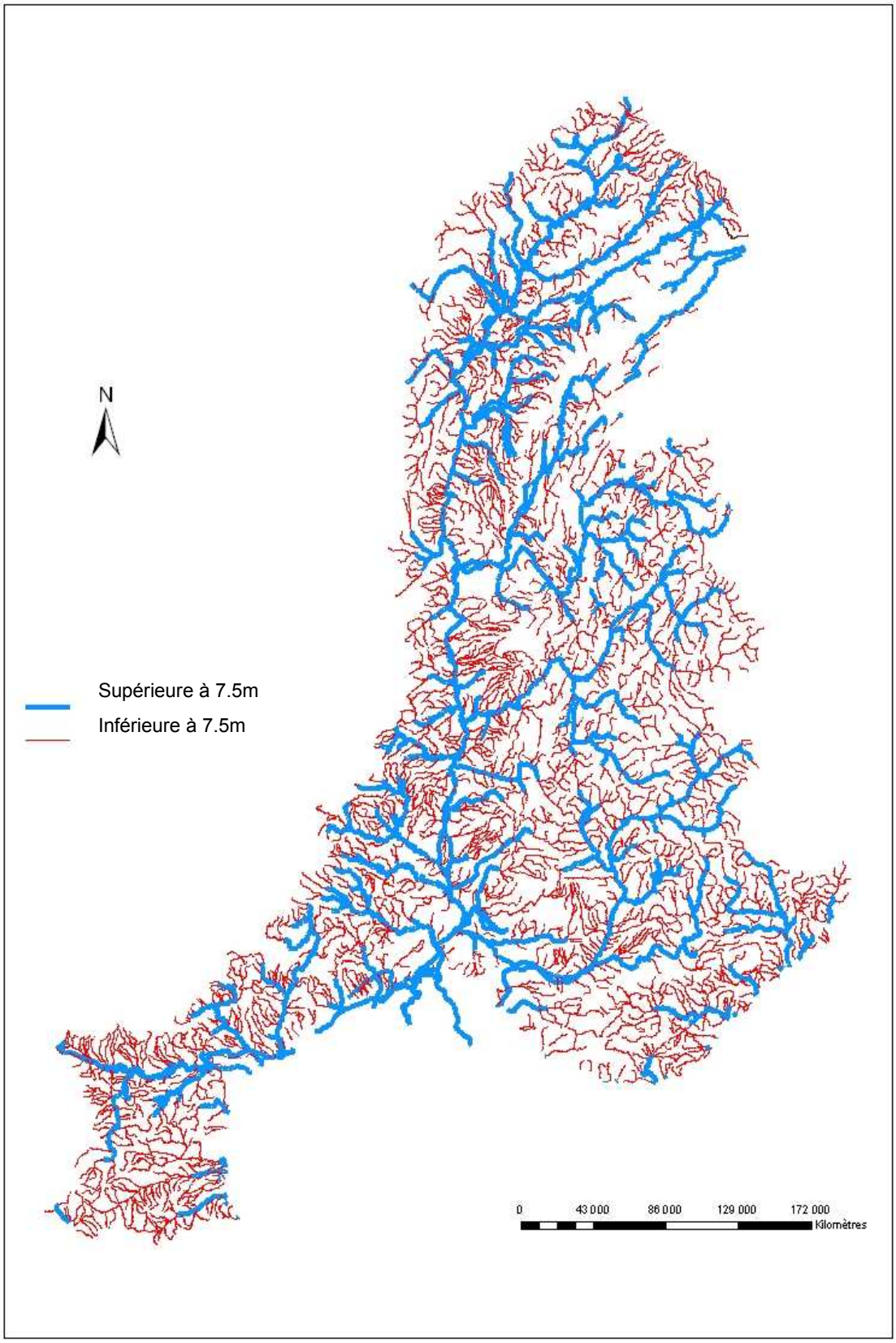

Figure 15 : Réseau hydrographique du district Rhône Méditerranée dont la largeur est supérieure à 7.5 m (Source : IGN-BD Topo). Remarque : Aucun indicateur, par exemple, de la géométrie de la bande active ne pourra être renseigné sur les cours d'eau de faible taille (en rouge)

Partie 3 - Quels indicateurs peuvent être extraits des images ?

1. CONSTRUCTION D'INDICATEURS

Une fois que le type d'image a été sélectionné, il faut construire les indicateurs qui permettent de répondre à la question posée. Un **indicateur** est *un paramètre ou une combinaison de paramètres qui indique un état ou une évolution utilisés pour établir un diagnostic et mettre en place une politique d'actions planifiée à l'échelle d'un territoire ou pour réaliser un suivi permettant de mesurer l'efficacité d'actions* (Figure 16). Le choix d'un indicateur est évidemment basé sur le (ou les) objectif(s) de départ. Dans notre cas il s'agit de caractériser l'état physique du réseau à un instant t et observer son évolution dans le temps. Pour cela, il convient de suivre le protocole de construction d'un indicateur suivant :

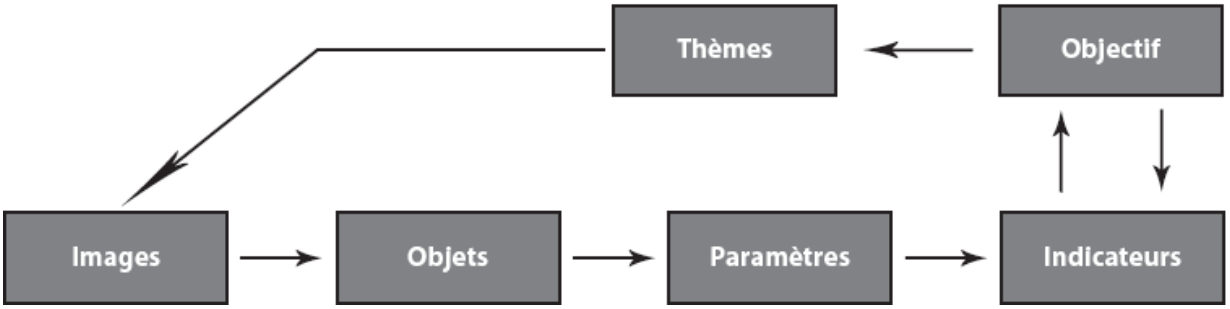

Figure 16 : Présentation de la démarche de création d'indicateurs

Etape 1 : Extraction des objets élémentaires

A partir de l'image, il est possible d'extraire des objets : éléments liquides, éléments biologiques, éléments minéraux, éléments anthropiques du paysage. Ces objets élémentaires peuvent prendre trois formes distinctes : ponctuelle, surfacique ou linéaire. Notons que la qualité d'identification de certains objets n'est pas la même dans l'espace et dans le temps (effet des saisons, effets des débits). En fonction de la date à laquelle est prise le cliché, il ne sera pas toujours aussi évident d'en extraire toutes les informations théoriquement disponibles (Tableau 6). Dans la partie amont du réseau, une faible largeur du chenal devient un facteur limitant pour extraire cet objet et donc pour renseigner tous les indicateurs qui en découlent. Le même problème est rencontré lorsque la canopée dense masque le chenal. De même, les informations liées aux bancs de galets, comme leur granulométrie ou leur taille, ne pourront pas être obtenues dans la partie aval du réseau où la géométrie du chenal se traduit souvent par l'absence de bancs émergés visibles.

Tableau 6 : Exemples de conditions nécessaires à une bonne identification des objets

Objet	Conditions
Bancs de galets non végétalisés Chenal en eau	Extension variable en fonction du débit et de la canopée de la végétation riveraine
Ouvrages longitudinaux (digues)	Ne doivent pas être recouverts de végétation
Ouvrages transversaux (épis, barrages, seuil)	Inférieur au débit à plein bord pour les petits ouvrages
Type de fond (végétation aquatique, sédiments,)	Clarté de l'eau au moment de l'acquisition
Végétation (espèces végétales, mature, pionnière) Zones humanisées (habitats, cultures, industries)	Tenir compte des périodes phénologiques

Etape 2 : Constitution d'une bibliothèque de paramètres

A partir des objets identifiés, il est possible de dresser une liste de paramètres quantitatifs et qualitatifs potentiellement accessibles (ex. : largeur du chenal, surface des bancs de galets, nature de la végétation) (Tableau 7). Ces paramètres peuvent être utilisés pour aborder plusieurs thèmes : morphologie, habitats écologiques, anthropisation Cependant, il existe plusieurs niveaux d'information et de complexité de ces variables : nature des objets élémentaires, variables d'agrégations spatiales ou variables temporelles.

Etape 2a : Caractérisation des objets élémentaires

Les objets identifiés peuvent êtres caractérisés à partir de leur radiométrie ou de paramètres géométriques et texturaux. Cette étape permet de préciser la nature des objets (ex. : peupleraie, prairie) ou de quantifier un paramètre localement (ex. : taux de MES, granulométrie des sédiments émergés)

Etape 2b : Construction de paramètres par agrégation spatiale

Dans ce cas, la variable est renseignée par la combinaison soit de plusieurs variables soit de plusieurs objets à une échelle spatiale plus vaste (ex. : densité, diversité paysagère, nombre de chenaux, paramètres moyens comme la largeur, la profondeur, l'indice de sinuosité ou le nombre de ponts par kilomètre de cours d'eau).

Etape 2c : Construction de paramètres temporels par agrégation d'états

Lorsque plusieurs états temporels sont disponibles, il est possible de combiner ces états pour obtenir des variables dynamiques : taux d'érosion des berges, taux de rétraction de la bande active, turn-over des habitats, évolution surfacique de tel ou tel habitat

Tableau 7 : Exemple de paramètres pouvant être extraits de l'imagerie (liste non-exhaustive)

Identification des objets élémentaires (points, lignes, surfaces)

Paysage riverain			Objets anthropiques		Relief
Eau	Sédiments	Végétation	Occupation du sol	Aménagements	
chenal en eau, type de fond (végétation aquatique, sédiments…)	bancs de galets non végétalisés	végétation (espèces végétales, unités physionomiques)	habitats, cultures, industries, extraction de granulats…	ouvrages longitudinaux (digues), ouvrages transversaux (barrages, seuil)	vallée

Paramètres renseignés

largeur moyenne de la bande active [1]	nature des sédiments	nature des unités, des espèces	surface de zones agricoles	présence d'aménagements	longueur de la vallée°
nombre de chenaux en eau[1]	tailles des particules (D50, D90)	surface des habitats	surface de zones habitées	densité des aménagements[1]	pente de la vallée°
longueur cumulée des chenaux	surface des bancs	stress hydrique	surface de cultures	longueur endiguée[1]	présence de terrasses°
amplitude d'un méandre	indices granulométriques (Skewness, Kurtosis…)	densité de végétation[1]	nature des cultures		
profondeur du chenal		diversité paysagère[1]	développement de l'urbanisation[2]		
concentration en MES		biomasse			
érosion des berges[2]		taille des individus			
rétraction de la bande active[2]		turn-over des habitats[2]			
pente du lit°		évolution surfacique des habitats[2]			
nature du fond					
nature de l'écoulement (turbulence) [1]					
faciès[1]					

[1] obtenu par agrégation spatiale [2] obtenu par combinaison d'états

° traitement par photogrammétrie

Etape 3 : Construction de l'indicateur

Enfin, à partir de la bibliothèque de paramètres (qui peut être complétée si besoin) et l'objectif fixé en termes d'indications, un indicateur est élaboré. Généralement, il est possible de distinguer les **indicateurs d'état ou de structure spatiale** des **indicateurs d'évolution**. Le tableau 8 présente des exemples de différents indicateurs pouvant servir à la caractérisation des corridors alluviaux. Certains indicateurs sont déjà largement utilisés, comme ceux concernant le style fluvial qui, pour certains ont été développés dès les années 1950. D'autres indicateurs sont à affiner, voire à créer, comme ceux faisant référence à l'anthropisation du système : à partir de quelles limites peut-on considérer que les aménagements ont un impact important sur la continuité du réseau ? Existe-t-il une densité limite d'aménagements au-delà de laquelle l'impact est irréversible ?

Tableau 8 : Liste d'indicateurs pouvant être extraits à partir de l'imagerie (liste non-exhaustive)

Thèmes	Indicateurs	Sens possibles	
Anthropique	sols anthropisés (%)	Elevé	➔ pression forte sur la naturalité du corridor fluvial
Ecologie / Anthropique	indice de fragmentation	Fort	➔ corridor discontinu fragmenté par les pressions humaines
Ecologie	végétation mature (%)	Fort	➔ pas de renouvellement des habitats; système vieillissant
Ecologie / Morphologie	digues	Présence	➔ déconnexion lit mineur / lit majeur
Ecologie / Morphologie	ouvrages longitudinaux	Forte densité	➔ réduction de l'espace de mobilité
Morphologie	bancs de galets (surface)	Elevée	➔ stockage sédimentaire
Morphologie / Anthropique	barrages, réservoirs	Présence	➔ piégeage des sédiments, écrêter des crues à l'aval
Morphologie / Anthropique	digues	Présence	➔ modification de la dynamique latérale
Morphologie / Anthropique	extraction en lit mineur	Présence	➔ transport solide perturbé, érosion régressive et progressive
Morphologie	indice de sinuosité	Is<1,05	➔ style fluvial rectiligne
		1,05<Is<1,50	➔ style fluvial sinueux
		Is>1,50	➔ style fluvial méandriforme
Morphologie	indice de tressage	Fort	➔ tressage actif
Morphologie / Anthropique	ouvrages transversaux	Présence	➔ modification des flux (continuité amont/aval)
Morphologie	végétation pionnière (%)	Elevé	➔ secteur dynamique

2. EXEMPLES D'INDICATEURS

A partir d'exemples simples, il s'agit d'illustrer des **indicateurs potentiels** permettant de caractériser le réseau hydrographique en fonction d'une question précise.

***Question 1.* Quels sont les secteurs déficitaires en sédiments à la suite de pressions anthropiques ?**

Pour répondre à cette question, il est possible de coupler deux approches :

1 - la localisation des ouvrages à l'origine de l'impact (extraction de granulats, barrages et réservoirs associés). L'indicateur est la présence d'ouvrages interrompant le transit sédimentaire, indicateur potentiel d'un déficit.

2 - le pourcentage de disparition des bancs à l'aval de ces ouvrages observé sur un ensemble de segments donnés à partir d'une comparaison de différents états temporels (Définir la longueur des segments et la période de temps étudiés)

***Question 2.* Quels sont les tronçons qui sont instables latéralement ?**

Deux approches sont envisageables, la première est grossière mais facile à mettre en œuvre et repose sur la **proportion de végétation pionnière** au sein du corridor naturel bordant le cours d'eau (obtenue par reconnaissance d'objets et agrégation spatiale). La seconde nécessite de disposer de deux états afin de calculer la **superficie érodée** entre deux dates (Figure 17).

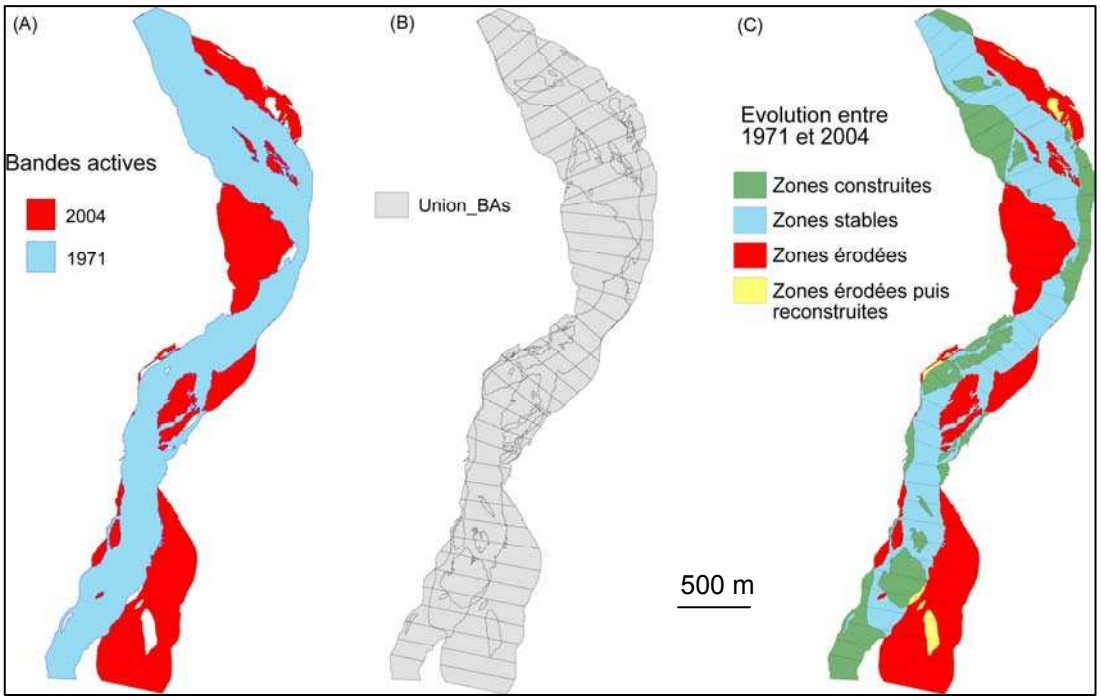

Figure 17 : Exemples du Buech

***Question 3.* Quelles sont les tronçons où la variabilité des faciès d'écoulement (habitat) est la plus élevée ?**

Cette question peut être abordée au moyen d'une approche hiérarchisée. Celle-ci consiste à extraire l'information à une échelle aussi fine que possible (par exemple par le biais d'une segmentation du cours d'eau à 10 ou 50 m). Ensuite, cette donnée est utilisée afin de dégager des tronçons géomorphologiques homogènes au sein desquels l'indicateur est renseigné. Dans le cas des faciès d'écoulement, il est possible d'extraire à partir du chenal en eau des informations comme la **largeur du lit mouillé et la variabilité radiométrique des pixels** sur la base d'une segmentation à 10 m. La variabilité de faciès est obtenue à partir de ces indicateurs couplés avec la **géométrie en plan du chenal** (sinuosité / présence de bancs). Notons que cette caractérisation sera probablement confrontée aux problèmes suivants : débits non uniformes entre les photographies ; variabilité de la réponse de l'indicateur en fonction des hauteurs d'eau et variabilité des conditions de prise du cliché.

***Question 4.* Identifier les secteurs en fonction de la continuité du corridor végétal riverain**

A partir d'un corridor naturel extrait par analyse d'images en distinguant la rive gauche de la rive droite plusieurs indicateurs peuvent être renseignés, par exemple la **densité de discontinuité** par km de cours d'eau, en comptant le nombre de fois où le corridor végétal est interrompu sur le linéaire fluvial.

A partir d'un corridor naturel extrait par analyse d'images, l'absence de zone tampon peut être également mise en évidence en utilisant, par exemple, la **distance minimale entre la bande active et l'espace anthropisé le plus proche**. Comme pour la question des faciès, cette donnée peut être obtenue par segment de 10 m puis ensuite **réagrégée** afin d'obtenir des tronçons homogènes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bates HD, DeRose RC. (1999). Digital elevation models as a tool for monitoring and measuring gully erosion. JAG 1(2), p. 91-101.

Bel Hadj Ali A. (2001). Qualité géométrique des entités géographiques surfaciques. Application à l'appariement et définition d'une typologie des écarts géométriques, Thèse de doctorat en sciences de l'information géographique, Université de Marne-La-Vallée, 210 p.

Bisson PA, Nielson JL, Palason RA, Grove LE. (1982). A system of naming habitat types in small streams, with examples of habitat utilization by salmonids during low stream-flow. In Acquisition and Utilization of Aquatic Habitat Inventory Information, Proceedings American Fisheries Society, Portland, OR, Amrantrout NB (ed.), p. 62-73.

Bonn F. & Rochon G. (1992). Précis de télédétection, Volume 1, Principes et méthodes. PUQ/AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.

Brasington J, Langham J, Rumsby B. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. Geomorphology 53, p. 299-316 .

Bryant R and Gilvear DJ. (1999). Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing,river Tay. Scotland 23, p. 1-15.

Butler JB, Lane SN, Chandler JH, Porfiri K. (2002). Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments. Photogrammetric Record 17(99), p. 419-439.

Butler JB, Lane SN, Chandler JH. (2001). Characterization of the structure of river-bed gravels using two-dimensional fractal analysis. Mathematical Geology 33(3), p. 301-330.

Carbonneau PE, Bergeron NE, Lane SN. (2005). Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. Water Resources Research 41(11): Article No. W11426.

Carbonneau PE, Lane SN, Bergeron NE. (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(14), p. 2837-2854.

Carbonneau PE, Lane SN, Bergeron NE. (2004). Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery. Water Resources Research 40(7): Article No. W07202.

Carbonneau PE, Lane SN, Bergeron NE. (2006). Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. Earth Surface Processes and Landforms 31(11), p. 1413-1423.

Carbonneau PE. (2005). The threshold effect of image resolution on image-based automated grain size mapping in fluvial environments. Earth Surface Processes and Landforms 30, p. 1687-1693

Chaponnière P. (2004). Télédétection et bathymétrie des rivières : application à la Durance. Mémoire non publié, ENSG/CEMAGREF

Desjardins R. (2000). La télédétection : perspective analytique Paris, ESTEM, 226 p.

Dufour S. (2005). Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines. Exemples de différents hydrosystèmes rhodaniens. Thèse non publiée: 243.

Eykens C. (2007). La régionalisation de l'érosion latérale et ses facteurs discriminants. Mémoire de Master 1, Université Lyon 2, 68 p.

Gilvear DJ, Davids C, Tyler AN. (2004). The use of remotely sensed data to detect hydromorphology; River Tumme, Scotland. River Research and Applications 20(7), p. 795-811.

Girard M.C & Girard C.M. (2004). Traitement des données de télédétection, Paris Dunod, 529 p.

Muller E. (1997). Mapping riparian vegetation along rivers : old concepts and new methods. Aquatic botany, 58, p. 411-437.

Girel J. (1986). Télédétection et cartographie à grande échelle de la végétation alluviale : exemple de la basse plaine de l'Ain. Dans P. Ozenda, Documents de Cartographie Écologique, XXIX, p. 45-74.

Gomez B, Phillips JD, Milligan FJ, Janes LA. (1997). FloodPlain sedimentation andsensitivity: summer 1993 flood, Upper Mississipi river valley. Earth Surface Processes and Landforms 22, p. 923-936.

Igouzal et al. (2003) Reconstitution de la morphologie d'une rivière à méandres par l'utilisation de la photogrammétrie numérique : exemple du Sébou, MAROC. Bulletin SFPT n° 171 (2003-3).

Institut Français de l'Environnement - Office Nationale de la Chasse et de la faune sauvage. (2005). Application de la télédétection à l'étude des zones humides : identification des prairies, des roselières, des peupleraies et des gravières. Document technique. 134 p.

Lane SN, James TD, Crowell MD. (2000). Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. Photogrammetric Record 16, p. 793-821.

Lane SN, Westaway RM, Hicks DM. (2003). Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel bed, braided river using synoptic remote sensing. Earth Surface Processes and Landforms 28, p. 249-271.

Legleiter CJ, Marcus WA, Lawrence R. (2002). Effects of sensor resolution on mapping in-stream habitats. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 68(8), p. 801-807.

Lejot J. (2008). Suivi des formes fluviales par télédétection à très haute résolution. Application aux programmes de restauration de la basse vallée de l'Ain et du Haut-Rhône (Chautagne). Thèse de Géographie, Université Lyon 2. 257 p.

Lejot J, Delacourt C, Piégay H, Fournier T, Trémélo ML, Alleman P. (2007). Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. Earth Surface Processes and Landforms 32(11), p. 1705-1725.

Lorang MS, Whited DC, Hauer FR, Kimball JS, Stanford JA. (2005). Using airborne multispectral imagery to evaluate geomorphic work across floodplains of gravel-bed rivers. Ecological Applications 15(4), p. 1209-1222.

Marcus AW, Legleither CJ, Aspinall RJ, Boardman JW, Crabtree R. (2003). High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in moutain streams. Geomorphology 55, p. 363-380.

Marcus WA. (2002). Mapping of stream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery. Journal of Geographical Systems 4(1), p. 113-126.

Marcus et Fonstad (2007). Optical remote mapping of rivers at sub-meter resolutions and watershed extents. Earth Surfaces Processes and landforms.

Mariko A., Mahé G., et Servat E. (2003). Les surfaces inondées dans le delta intérieur du fleuve Niger au Mali par NOAA/AVHRR. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, 172, p. 61-68.

Marston RA, Girel J, Pautou G, Piégay H, Bravard JP, Arneson C. (1995). Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. Geomorphology 13, p. 121-131.

Mertes LAK, Smith MO, Adams JB. (1993). Estimating suspend sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. Remote Sensing of the Environment 43, p. 281-301.

Miranda FP, Fonseca LEN, Carr JR. (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, p. 549-556.

Mobley CD, Sundman LK. (2001). Hydrolight 4.2 user's guide. Redmon, WA: Sequoia Scientific.

Nykanen et al. (1998). Study of spatial scaling in braided river patterns using synthetic aperture radar imagery. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 34, NO. 7, PAGES, p. 1795-1807.

Perez Correa M. (2004). Développement d'une méthode de cartographie de l'occupation du sol le long des cours d'eau à partir de données de télédétection. Mémoire de Mastère spécialisé de la Conférence des Grandes écoles, 44 p.

Piégay H, Darby SA, Mosselmann E, Surian N. (2005). The erodible corridor concept: applicability and limitations for river management. River Research and Applications 21, p. 773-789.

Puestow TM, Simms EL, Simms A, Butler K. (2001). Mapping of salmon habitat parameters using airborne imagery and digital ancillary data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 67(3), p. 309-317.

Puissant A. (2003). Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain, Thèse de doctorat en géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France, 349 p. + annexes.

Raclot (2003). Télédetection des niveaux d'eau en plaine inondée, démarche spatiale guidée par le fonctionnement hydraulique. Bulletin SFPT n° 172 (2003-4).

Rainey MP, Tyler AN, Bryant RG, Gilvear DJ, McDonald P. (2000). The influence of surface and interstitial moisture on the spectral characteristics of inter-tidal sediments; implications for airborne image acquisition and processing. International Journal of Remote Sensing 21, p. 3025-3038.

Robin M. (1995). La télédétection. Paris, Nathan, 318 p.

Slater L. (2007). Caractérisation des rivières en tresses françaises. Mémoire de Master 1. ENS Lettres et Sciences Humaines, 57 p.

Thomas M. (2007). Apport de la télédétection dans la compréhension de la dynamique des rivières en tresses. Mémoire de Master 2, Université de Rennes, 53 p.

Verdu JM, Batalla Ramon J, Martinez-Casasnovas JA. (2005). High-resolution grain size characterisation of gravel bars using imagery analysis and geo-statistics. Geomorphology 72, p. 73-93.

Westaway RM, Lane SN, Hicks DM. (2000). Development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow gravel-bed rivers. Earth Surface Processes and Landforms 25(2), p. 200-226.

Westaway RM, Lane SN, Hicks DM. (2001). Airborne remote sensing of clear water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 67(11), p. 1271-1281.

Westaway RM, Lane SN, Hicks DM. (2003). Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. International Journal of Remote-Sensing 24(4), p. 795-815.

Whited D, Stanford JA, Kimball JS. (2002). Application of airborne multispectral digital imagery to quantify riverine habitats at different base flows. River Research and Applications 18(6), p. 583-594.

Wiederkehr E. (2006). Evolution de la mobilité des berges du Petit Rhône à une échelle pluri-décennale. Mémoire de Master 2, Université de Provence, 50 p.

Winterbottom SJ, Gilvear DJ. (1997). Quantification of channel-bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography. Regulated Rivers: Research and Management 13(6), p. 489-499.

Winterbottom SJ, Gilvear DJ. (2000). A GIS-Based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated river Tummel, Scotland Regulated rivers. Research & Management 16, p. 127-140.