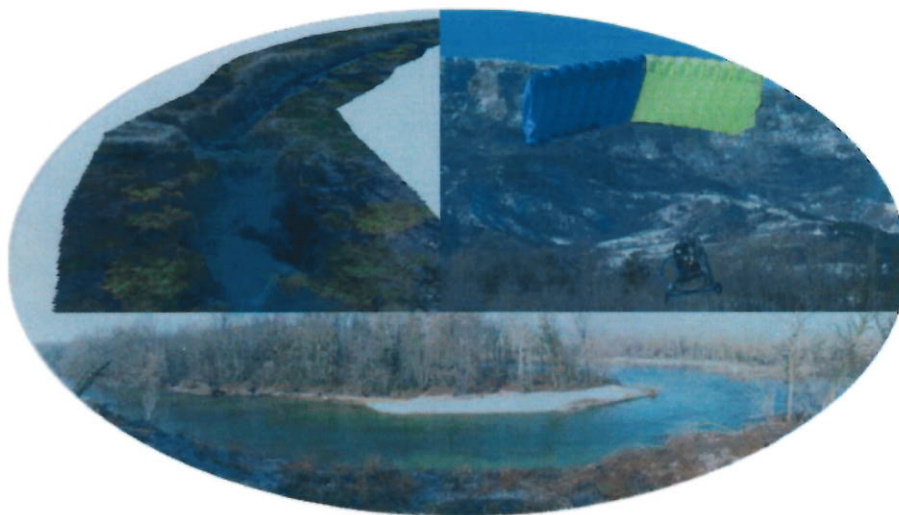


D 30061

## L'imagerie à Très Haute Résolution : introduction aux techniques et exemples d'utilisation pour l'étude des cours d'eau



*Jérôme Lejot, Hervé Piégay*

*Août 2008*

**ZABR**

L. CLOTTEZ DRA  
L. Bourdin DPP

### **Préambule :**

Ce guide a pour but d'apporter des éléments généraux d'information concernant l'acquisition et l'exploitation d'images à très haute résolution (1 à 10 cm) dans le cadre d'applications fluviales. Il présente un état actuel des recherches développées par l'UMR 5600 du CNRS dans ce domaine pour caractériser les formes fluviales et suivre leur évolution au cours du temps, notamment dans le cadre de l'évaluation de travaux d'aménagement ou de restauration.

### **Remerciements :**

Nous souhaitons remercier les personnes qui ont contribué à améliorer la qualité du document par leurs conseils, leurs suggestions et la mise à disposition des données : les membres du comité de pilotage, Laurent Bourdin (agence de l'eau RMC), Céline Thicoipe (SIVU basse vallée de l'Ain), Marc Zylberblat (CNR).

### **Références :**

Lejot J., Piégay H. (2006). Suivi de plusieurs sites restaurés du tronçon court-circuité de Chautagne (Haut Rhône) par imagerie aérienne (Drone) et technologie DGPS. ISIG - CNRS - UMR5600, rapport intermédiaire. 47p.

Lejot J., Piégay H. (2006). Suivi pluriannuel de l'évolution de la couverture topographique et bathymétrique des sites de recharge par imagerie aérienne (drone) et GPS Différentiel. Etude pilote destinée à développer de nouveaux indicateurs pour le suivi des actions et réaliser des simulations par SIG d'évolution des sites restaurés (période 2005 – 2007). ISIG - CNRS - UMR5600. 60p.

## **Introduction**

Des réflexions ont déjà été engagées sur l'utilisation d'images aériennes pour extraire des indicateurs morphologiques à l'échelle des zones humides (IFEN et ONCFS, 2005) ou bien d'un réseau hydrographique (Wiederkehr *et al.*, 2008). L'émergence de supports de prises de vue plus légers et plus souples d'utilisation ouvre, aujourd'hui, de nouveaux champs exploratoires dans l'étude des formes fluviales tout en complétant l'offre déjà existante. Ces nouvelles plates-formes aériennes permettent d'aborder des échelles spatiales et temporelles plus fines afin de mieux caractériser les processus fluviaux. Il s'agit également de pouvoir répondre aux attentes des gestionnaires en leur fournissant des états détaillés sur des pas de temps courts afin d'apprécier des changements d'occupation consécutifs à différentes opérations en rivières : recusement de lones, curage, réponse de la végétation à un essartement, progression de vagues sédimentaires, évolution d'embâcles, évolution des habitats piscicoles...

Dans une première partie, les propriétés et les techniques d'acquisition et de traitements des images à très haute résolution sont exposées. Les principaux vecteurs légers disponibles actuellement sur le marché sont présentés ainsi que les types de capteurs pouvant être embarqués, leur capacité de résolution, les paramètres affectant l'interprétation et l'analyse des images et leurs corrections.

Dans une seconde partie, des fiches thématiques portant sur les avancées actuelles en matière de restitution sont présentées à partir de différents exemples. Elles concernent la cartographie de la végétation terrestre et aquatique, la détermination de la granulométrie des bancs de galets, de la topographie et de la bathymétrie.

En dernière partie, un retour d'expérience portant sur le suivi d'un programme de restauration réalisé sur la basse vallée de l'Ain est exposé.

***Propriétés et techniques d'acquisitions et de traitements des  
images à très haute résolution***










## - Présentation des plateformes légères

La nécessité de caractériser des objets de petites tailles a conduit au développement d'une gamme de plates-formes légères voire « ultra-légères » issues de la famille des LARS (*Light Aerial Remote Sensing*). Celles-ci reposent, la plupart du temps, sur des technologies aéronautiques déjà connues mais dont l'utilisation et l'exploitation ont été repensées pour pouvoir produire des images à **très haute résolution (THR)**. Les solutions recherchées doivent répondre à différents paramètres d'exploitation qui sont :

- ❖ Des vols à basse altitude pour produire des images à THR.
- ❖ Des fréquences de passage élevées pour réaliser plusieurs suivis par an, voire par jour.
- ❖ Une souplesse d'utilisation permettant d'établir un état des lieux juste après un évènement (naturel ou non).

Une liste non exhaustive des technologies répondant à ces critères est présentée (fig. 1). Ce sont toutes des plates-formes contrôlées à distance (reliées par un câble ou radio-télécommandées).

- Figure 1-




					
Type :	Ballon hélium	Quadrator	Cerf-volant	Hélicoptère radio-télécommandé	Drone Pixy
Altitude de travail (m) :	[0-150]	[0-150]	[0-300]	[0-300]	[0-800]
Rayon d'action à partir d'un point de pilotage fixe (m) :	190	500	< 400	380	1800
Couverture optimale pour une application fluviale <sup>1</sup> (m) :	190	-	< 400	1500	5000
Coût <sup>2</sup> (euros)	-	-	-	700	700

(1) Emprise spatiale optimale par rapport aux coûts d'acquisition

(2) Coût minimum pour une résolution au sol de 5 cm (tarif 2008)

Lorsque les sites à survoler couvrent de grandes superficies (tronçon de rivière, bassin versant), les plates-formes ultra-légères ne peuvent pas être utilisées ou bien à des coûts prohibitifs. Au-delà de 5 km, le choix d'un vecteur léger conventionnel est plus adapté (fig. 2) (Lejot, 2008).

-Figure 2-

			
Type :	ULM	Hélicoptère	Avion
Altitude de travail (m) :	[100-3500]	[1000-2000]	[2000-4000]
Couverture optimale pour une application fluviale <sup>1</sup> (km) :	< 50	< 50	> 50
Coût <sup>2</sup> (euros)	8200	10700	25000

(1) Emprise spatiale optimale par rapport aux coûts d'acquisition

(2) Coût minimum pour une résolution au sol de 5 cm

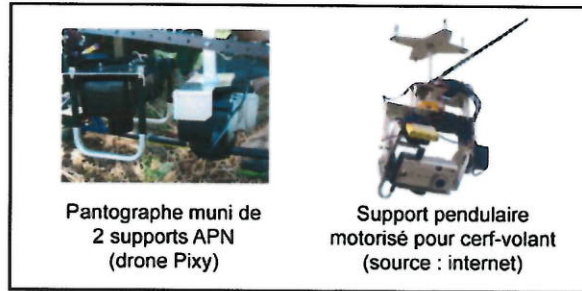
### La notion de Très Haute Résolution (THR)

Seules les images des plates-formes ayant des résolutions centimétriques (**inférieures à 10 cm**) sont considérées comme des images à THR (Toutin, 2004 ; Lejot, 2008). Les images spatiales des satellites les plus récents et les images aériennes de l'IGN correspondent, quant à elles, à des résolutions décimétriques assimilées aujourd'hui à de la haute résolution (HR).

### - Les capteurs et les résolutions

Autrefois réalisées à partir d'une émulsion argentique, les images aériennes sont aujourd'hui produites à partir de capteurs numériques. Embarqués sur les plates-formes légères, ces derniers correspondent de plus en plus à des appareils photos numériques (APN) « grand public » (fig. 3).

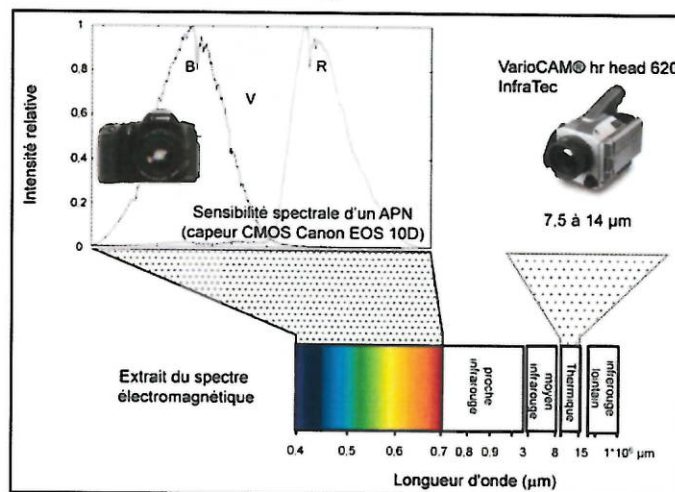
-Figure 3-



Les capteurs des APN peuvent atteindre aujourd'hui des résolutions de plusieurs dizaines de millions de pixels. Ils sont positionnés sur des pantographes munis de vérins afin d'assurer leur verticalité ou bien sur des supports motorisés. Ils sont parfois couplés à une plate-forme inertielle afin de contrôler les angles d'acquisition pour des applications photogrammétriques (cf. page 13).

Les APN génèrent des images couleurs correspondant au domaine des longueurs d'onde du visible (fig. 4). Certains de ces appareils, après mise en place d'un filtre, peuvent disposer d'un canal supplémentaire couvrant le domaine du proche infrarouge (fig. 4). Celui-ci est exploité principalement pour étudier et suivre la végétation. Grâce à leur miniaturisation, de nouveaux capteurs sensibles aux longueurs d'onde de l'infrarouge thermique peuvent dorénavant être embarqués sur des plates-formes ultra-légères. Comme pour le proche infrarouge, leur utilisation est particulièrement bien adaptée à l'étude et aux suivis de la végétation mais également à l'identification de la température des masses d'eau qui peuvent notamment nous renseigner quant à leur origine (arrivées phréatiques, eaux stagnantes sensibles à l'échauffement, etc.).

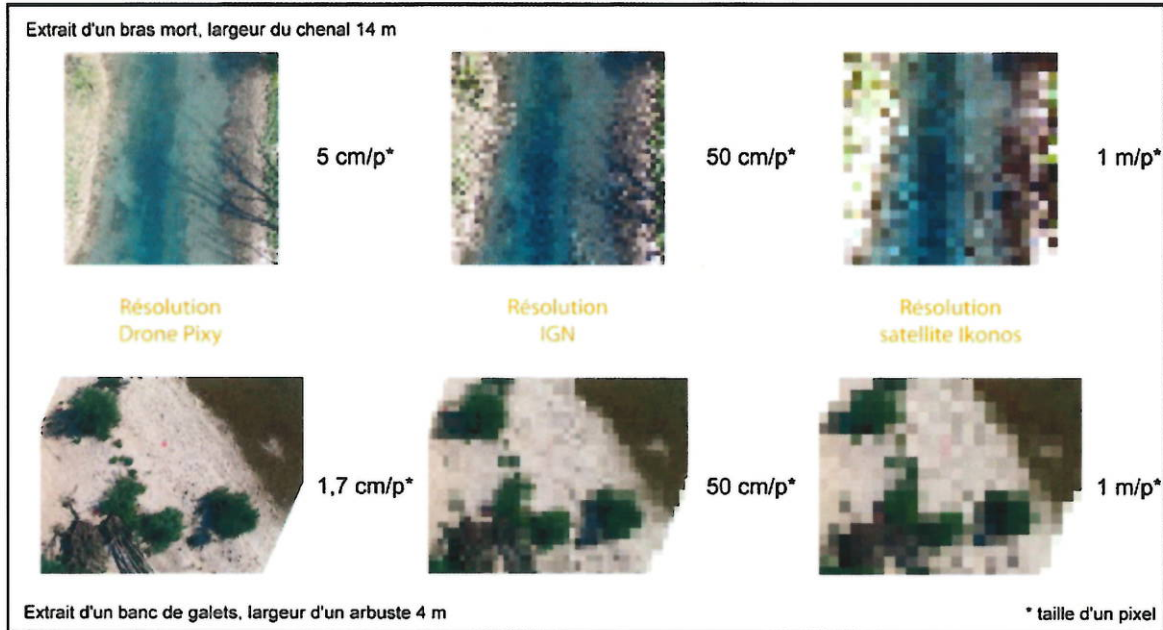
-Figure 4-





La résolution des images acquises par les APN doit être en adéquation avec les objets à étudier. L'extrait d'images optiques centrées sur un objet caractérisé par des résolutions différentes illustre ce propos (fig. 5).

-Figure 5-



**- Propriété d'une image**  
L'image est une matrice de valeurs radiométriques, dont le pas représente la résolution spatiale. Celle-ci définit la taille au sol d'une unité élémentaire de l'image : le pixel. L'analyse radiométrique d'une image correspond à la mesure de la signature spectrale des objets qui la composent. C'est une analyse qui permet de caractériser les propriétés physico-chimiques de l'objet présent dans le pixel étudié.

**- Relation entre taille d'un objet et taille d'un pixel**  
Le pixel doit avoir une taille beaucoup plus petite que l'objet géographique pour que celui-ci soit bien discernable sur l'image. De cet objet, un certain nombre d'informations vont être perçues (Robin, 1995) : la couleur de l'objet, son contraste par rapport à l'environnement, sa texture (l'agencement des pixels), sa taille, son orientation et sa forme. Pour pouvoir ainsi les discriminer, deux seuils sont à définir (IFEN et ONCFS, 2005) :

- *le seuil de détection*. Plusieurs pixels sont nécessaires pour détecter un objet. Sur la base du théorème de Nyquist-Schannon (Bel Hadj Ali, 2001), un minimum de quatre pixels doit être présent sur l'image pour détecter la présence d'un objet.
- *Le seuil d'identification*. L'identification d'un objet (sa nature) nécessite trois fois plus de pixels que sa détection soit 12 pixels au minimum. Le plus souvent, ce rapport est beaucoup plus grand selon les formes à étudier.

**- Retranscription des objets d'une image**  
En l'absence d'interactions atmosphériques, la représentation d'un objet est directement liée à la taille et aux pixels de celui-ci. Un certain nombre d'informations peut ainsi être perçu. Elles servent à détecter et à identifier l'objet. Six informations sont accessibles : la couleur de l'objet (ou son niveau de gris), son contraste par rapport aux objets qui l'environnent, sa texture ou l'organisation de ses pixels, sa taille, son orientation et sa forme (Robin, 1995).

Niveau de gris / couleur

Contraste

Texture

Taille

Orientation

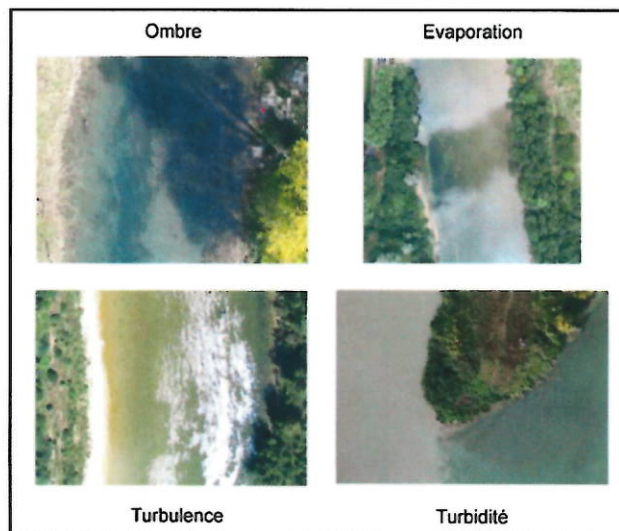
Forme

## - Des images bruitées

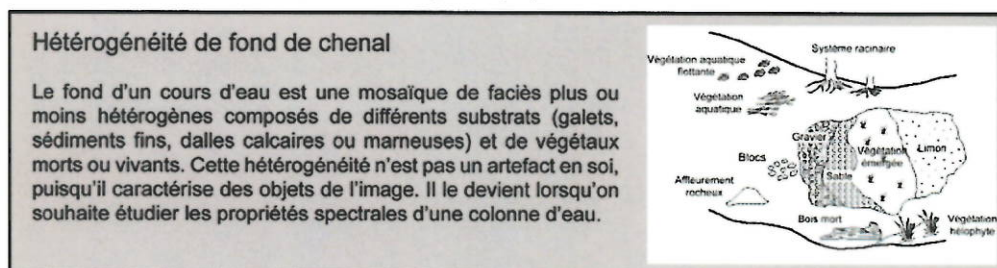
Le signal enregistré par les capteurs permet d'identifier différents objets mais ceux-ci ne peuvent pas être toujours extraits car le signal peut-être bruité, affecté par les différentes interfaces qu'il traverse notamment l'eau et l'atmosphère. De nombreux paramètres, appelés artefacts, engendrent une perturbation du signal qu'il faut pouvoir évaluer ou au mieux identifier. Dans le contexte d'un système fluvial, les paramètres qui affectent l'atmosphère, la colonne d'eau et le substrat (voir encadré) sont les suivants (fig. 6) :

- ❖ L'ombre. Les surfaces ombragées résultent de l'interposition d'un corps opaque entre elles et la source lumineuse (le soleil). Ce paramètre est très prégnant dans le domaine de la THR car de nombreux pixels de l'image peuvent être affectés. De plus, la position et la taille de ces zones varient en fonction de l'heure d'acquisition.
- ❖ L'évaporation. Créé par un écart important entre température de l'eau et température de l'air, ce phénomène est très localisé mais génère d'importantes distorsions.
- ❖ La turbulence. Ce phénomène se traduit sur les images par des zones saturées (réverbération), générées par l'irrégularité du plan d'eau et par l'angle de prise de vue.
- ❖ La turbidité. Elle désigne la quantité de matières en suspension (MES) présente dans l'eau. Elle génère une eau trouble qui atténue le signal lumineux traversant la colonne d'eau, au point de ne plus voir le fond.

-Figure 6-



Il est important de considérer ces bruits afin de définir judicieusement la période d'acquisition (condition d'ensoleillement, débit, état atmosphérique).





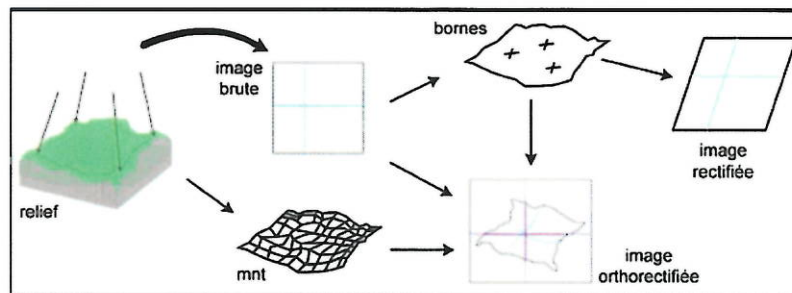
## - La correction des images

### Corrections géométriques

Chaque image aérienne a ses propres déformations géométriques dépendantes de l'altitude de vol et de l'orientation du capteur au moment de la prise de vue. La variabilité de ces paramètres durant le vol produit des distorsions entre images. Selon le traitement de celles-ci, différents niveaux de qualité sont identifiables (fig. 7) :

- ❖ L'image brute. Elle correspond au format de sortie du capteur.
- ❖ L'image rectifiée. Sa correction est réalisée à partir de points connus sur les zones survolées (balises mobiles, bornes IGN, ou tout autre point fixe dont les coordonnées planimétriques  $x,y$  sont connues).
- ❖ L'image orthorectifiée. La plus précise et donc la plus coûteuse, sa correction est basée sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT). L'image est corrigée en chaque point de celui-ci, en s'appuyant sur les coordonnées  $(x,y,z)$  de points de contrôle.

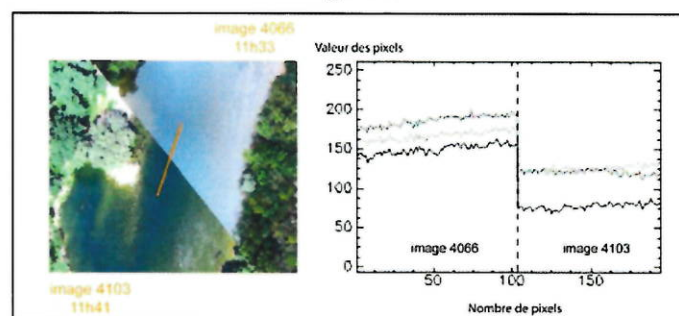
-Figure 7-



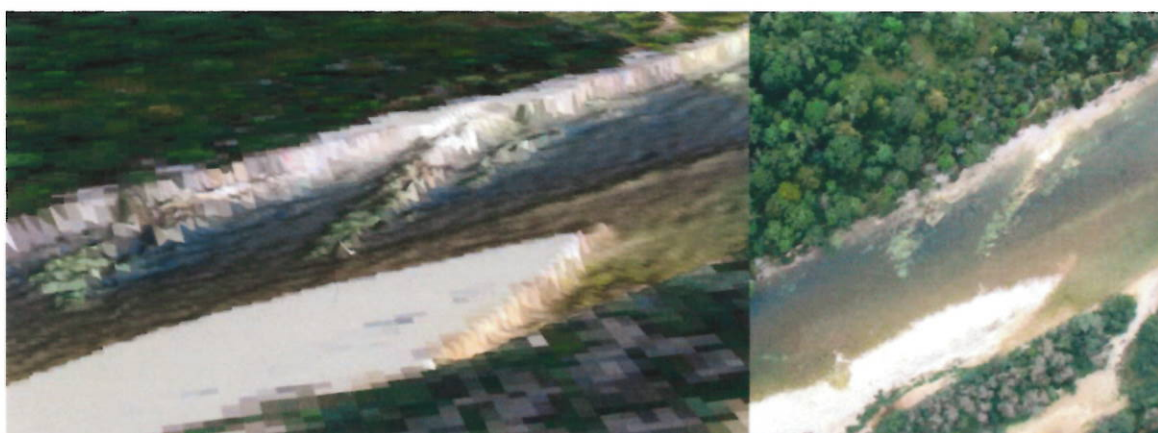
### Corrections radiométriques

Les images aériennes à THR ont pour caractéristique d'être acquises à basse altitude. Dans un contexte fluvial, l'emprise couverte ne permet pas d'obtenir en une seule prise le tronçon ou le cours d'eau étudié. Une succession d'images regroupées en une mosaïque est donc réalisée (seulement à partir d'images rectifiées ou orthorectifiées). La surface à couvrir nécessite donc de travailler en mode multi-photos. Le délai entre deux prises de vue peut être plus ou moins important selon les plateformes. Les conditions de luminosité peuvent ainsi fortement varier entre le premier et le dernier cliché comme l'illustre la figure 8 avec l'image n° 4066 enregistrée à 11h 33 et l'image n° 4103 enregistrée à 11 h 41. Afin de minimiser ce décalage de luminosité, des traitements correctifs sont appliqués (Lejot, 2008).

-Figure 8-



***Quelques exemples d'utilisation d'images à THR pour l'étude des cours d'eau***

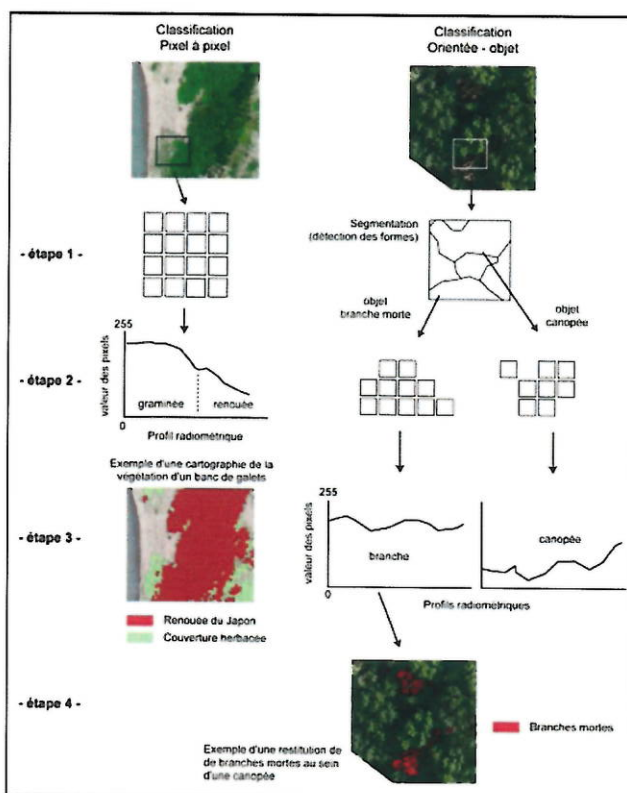


## - Cartographie de la végétation terrestre et aquatique

La cartographie de la végétation, qu'elle soit terrestre ou aquatique, peut être abordée à partir de différentes techniques de restitution. Parmi elles, l'approche par « classification » permet de répondre aux caractères hétérogènes des différentes espèces présentes sur le corridor fluvial et à la complexité de leur forme. Deux types de classification ont été abordés (fig. 9) :

- ❖ Classification pixel à pixel. Elle se fonde sur l'idée que chaque type élémentaire d'occupation du sol a une réponse spectrale qui lui est propre (voir p. 7). Cette réponse peut être identifiée par l'attribution d'une classe à chaque pixel de l'image suivant sa signature spectrale.
  - **étape 1** - Identification des valeurs radiométriques d'un échantillon de pixel (fenêtre d'apprentissage) ou bien de l'image entière.
  - **étape 2** - Analyse statique des valeurs radiométriques afin d'attribuer à chaque pixel de l'image une classe.
  - **étape 3** - Création d'une carte d'occupation du sol à partir des classes précédemment identifiées.
- ❖ Classification orientée-objet. Elle est basée sur l'analyse des valeurs radiométriques d'une image (comme la classification pixel à pixel) mais également sur l'identification des formes des objets composant l'image.
  - **étape 1** - Segmentation de l'image jusqu'à atteindre un seuil d'identification des objets
  - **étape 2** - les pixels agrégés (objets) sont alors isolés.
  - **étapes 3** - Analyse statique des valeurs radiométriques afin d'attribuer à chaque pixel de l'image une classe correspond à un objet.
  - **étape 4** - Création d'une carte d'occupation du sol à partir des classes précédemment identifiées.

-Figure 9 -



### - Données nécessaires

Relevés de terrain pour calibration et validation (nature des substrats ou de la végétation)



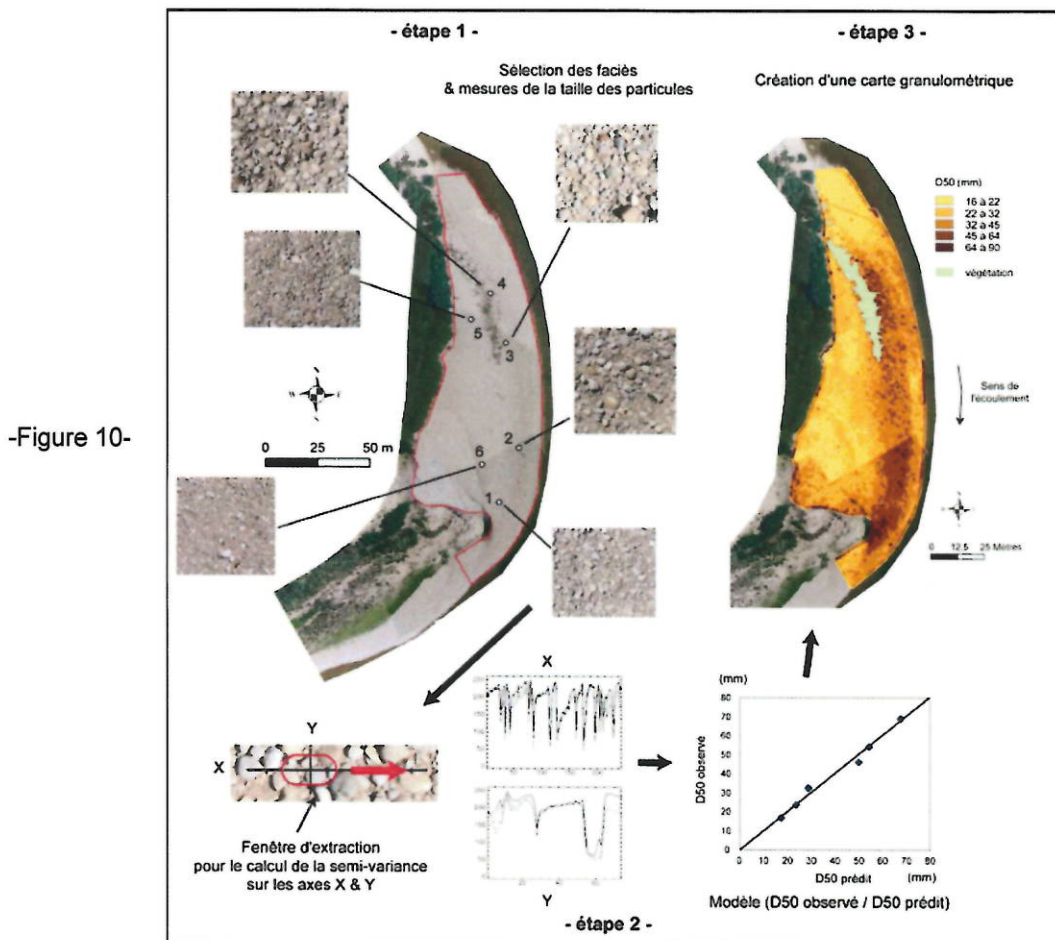
### - Restitution de la granulométrie de bancs de galets

La restitution de la granulométrie des bancs de galets permet d'illustrer, par des procédures automatiques, l'état textural des surfaces étudiées. L'analyse statistique des pixels de l'image est réalisée par semi-variance 2D. Cette approche géostatistique permet d'établir une relation de proximité entre les valeurs des pixels en prenant en compte à la fois les lignes et les colonnes de l'image (fig. 10).

- **étape 1** - Plusieurs faciès granulométriques homogènes (particules ayant la même gamme de tailles) sont identifiés à l'échelle du banc. Sur chacun d'eux, une mesure de la médiane des particules est réalisée (D50, échantillonnage basé sur la méthode de Wolman, Bunte et Abt, 2001).

- **étape 2** - A partir de paramètres d'ajustement, une fenêtre d'extraction balayant l'image sur les axes x et y est produite. Celle-ci permet le calcul de la semi-variance 2D. Cette valeur est ensuite comparée à la valeur granulométrique mesurée *in situ*. Appliquée à toutes les placettes mesurées, cette démarche permet d'étalonner un modèle de prédiction de la taille des particules (D50 observé / D50 prédit).

- **étape 3** - L'utilisation du modèle permet de réaliser une carte de la taille des particules.



- **Données nécessaires**  
Echantillonnage granulométrique *in situ* pour calibrer le modèle

## - Restitution de la topographie

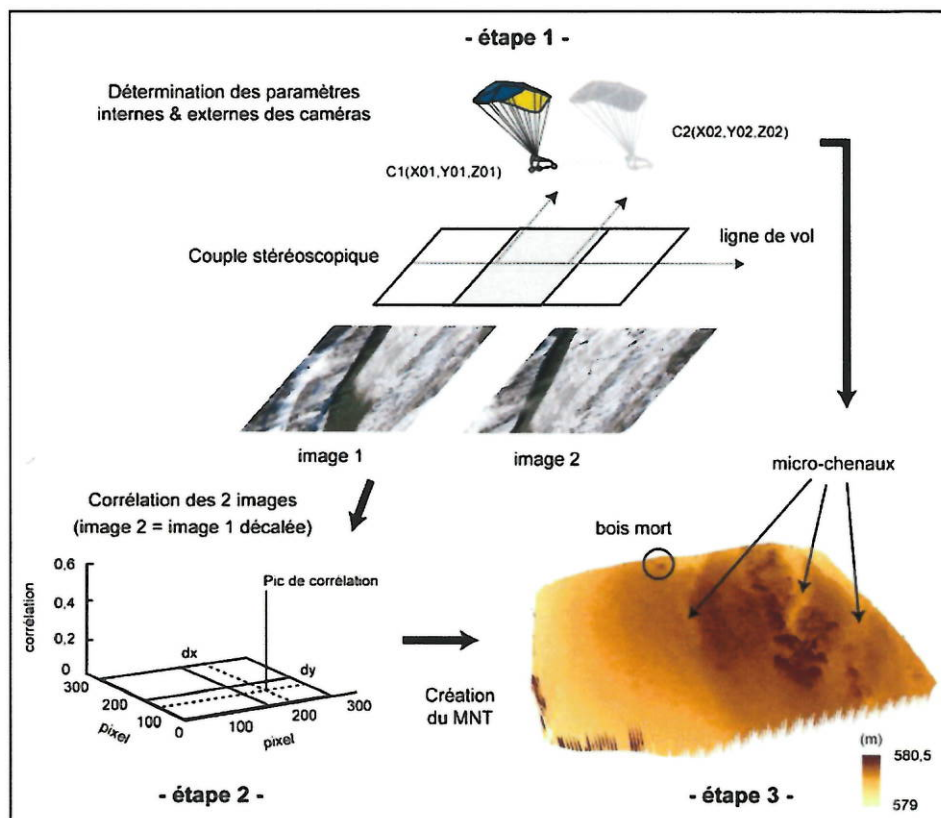
La restitution de la topographie à partir d'images aériennes est réalisée par photogrammétrie. Celle-ci est basée sur le principe de la stéréoscopie qui permet de reconstituer une vision en trois dimensions. A partir d'un couple d'images se superposant et acquis avec des angles différents (couple stéréoscopique), les objets 2D visés peuvent ainsi être reconstruits en 3D (fig. 11). Dans le cadre d'applications fluviales, l'objectif est de pouvoir restituer la variété altitudinale des unités, principalement la topographie des surfaces émergées d'un lit.

- **étape 1** - Détermination des paramètres des caméras (paramètres internes) et de leur position dans l'espace (X,Y,Z et angles de rotation : paramètres externes).

- **étape 2** - A partir du couple stéréoscopique, corrélation des pixels homologues aux deux images (traitement appliqué dans le domaine fréquentiel ; Casson, 2004).

- **étape 3** - A partir des paramètres des caméras et de la corrélation des deux images, production d'un MNT.

-Figure 11-



Il est à noter que cette technique de restitution est opérationnelle pour un seul couple stéréoscopique mais encore difficilement opérationnelle quand la surface à couvrir nécessite le traitement de plusieurs couples. Sous certaines conditions, cette technique est également utilisable pour la restitution des surfaces immergées (Feurer, 2008).

### - Données nécessaires

Acquisition d'un couple stéréoscopique (60 % de recouvrement minimal entre deux images)  
Repères au sol pour calibrer le modèle

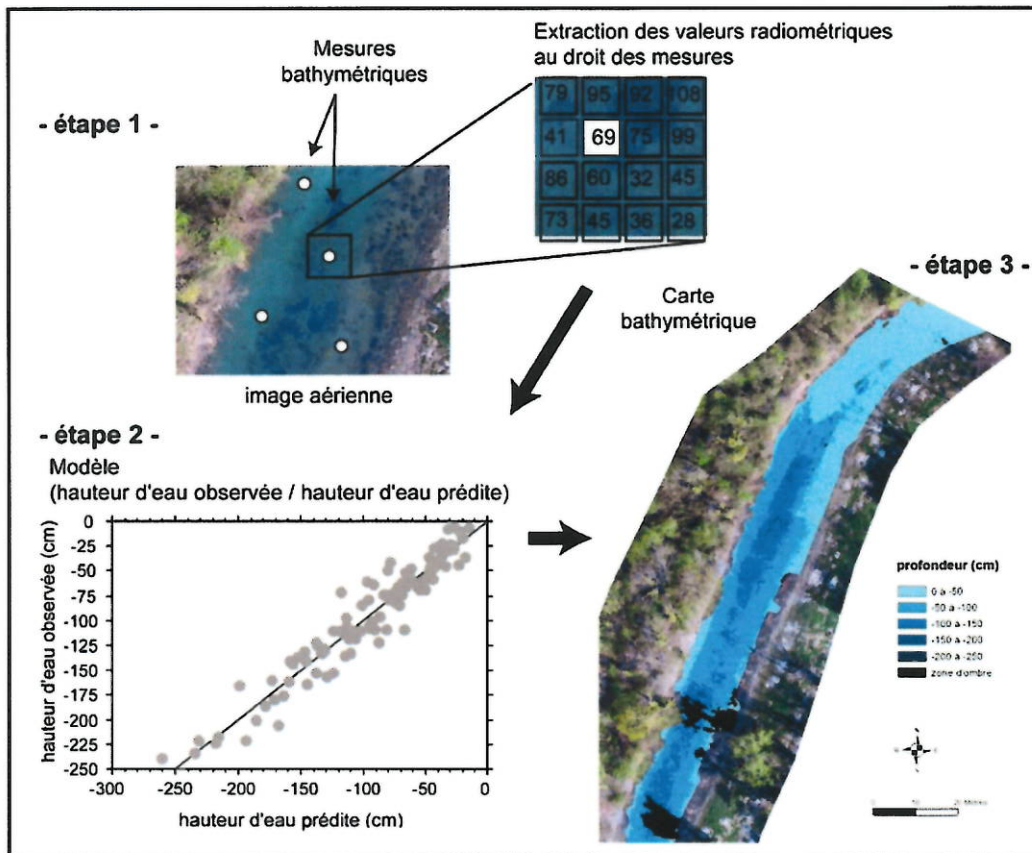


## - Restitution de la bathymétrie

La restitution des hauteurs d'eau par traitements d'image peut être réalisée par modèle bathymétrique empirique (Lejot *et al.*, 2007 ; Lejot, 2008). Cette approche permet de retranscrire la bathymétrie sur l'ensemble d'un plan d'eau (fig. 12).

- **étape 1** - Une valeur radiométrique (pixel) moyenne est calculée pour chaque mesure *in situ*.
- **étape 2** - Une régression est ensuite appliquée afin de prédire les hauteurs d'eau à partir des valeurs radiométriques des canaux (R, V, B) de l'image.
- **étape 3** - Le modèle de régression est ensuite utilisé pour réaliser une carte des hauteurs d'eau.

-Figure 12-



### - Théorie du modèle bathymétrique

En supposant que les conditions de l'atmosphère, de la masse d'eau et du fond du chenal, soient homogènes, le signal enregistré par le capteur n'est dépendant que de la profondeur de la colonne d'eau. A travers celle-ci, le signal lumineux décroît suivant une loi exponentielle (Lyzenga, 1978). Ainsi à partir d'une image, une relation peut être établie entre les valeurs des pixels et les profondeurs.

### - Conditions d'acquisition

Absence totale de turbidité et de turbulence.  
Privilégier la période d'étiage pour le survol des chenaux actifs et la période de dormance de la végétation aquatique pour les bras morts.  
Limiter la présence d'ombres (prises de vue à réaliser préférentiellement en milieu de journée).

### - Données nécessaires

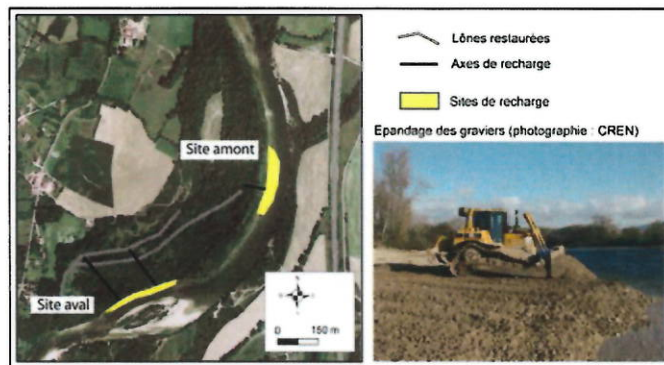
Images aériennes avec correction géométrique et radiométrique.  
Relevés de hauteurs d'eau et de leurs coordonnées planimétriques au moment de l'acquisition.



**- Exemple de l'utilisation des images à THR dans le cadre d'un programme de restauration : le suivi de la recharge sédimentaire réalisée sur la basse vallée de l'Ain en 2005 - 2006**

Dans le cadre des actions de recharge sédimentaire réalisées sur l'Ain, un programme pilote a été mené à partir d'images drone à très haute résolution afin d'évaluer l'efficacité des travaux de recharge sédimentaire (22000 m<sup>3</sup>). Dans ce but, un suivi spatial et temporel des matériaux réinjectés dans le lit mineur a été mené. Ce travail a été effectué sur les sites des Carronnières (Commune de Varambon) et de Bellegarde (Commune de Priay) (fig. 13). Seul ce dernier site fera l'objet d'une présentation.

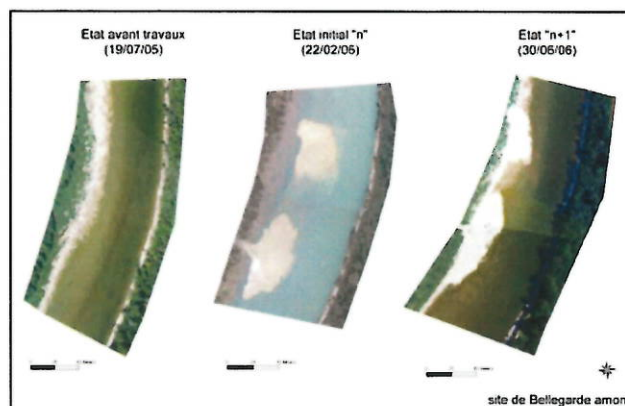
-Figure 13-



L'évaluation de ces actions de restauration s'est appuyée sur des indicateurs créés à partir de paramètres mesurables sur les images. Il s'agit notamment de la superficie et la mobilité des bancs ainsi que les variations topographiques du lit mouillé. Ces indicateurs ont permis de mettre en lumière la réponse fluviale à l'injection des matériaux et évaluer ainsi leur comportement vers l'aval.

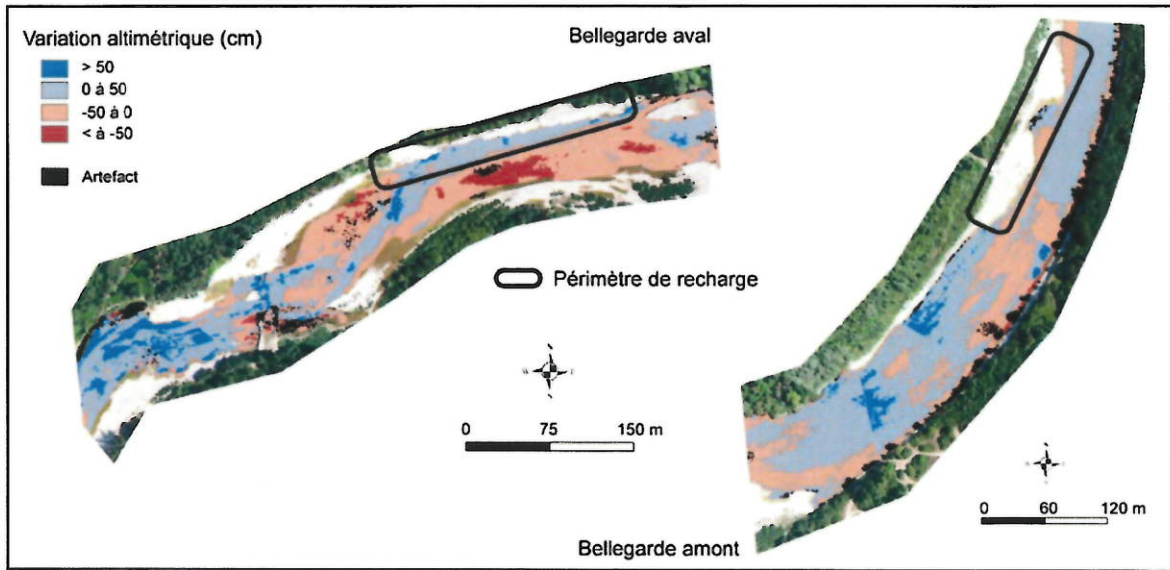
Ces travaux ont été réalisés à partir des démarches décrites dans les fiches de « cartographie de la végétation terrestre et aquatique », afin de caractériser les faciès rocheux de fond de chenal et les atterrissements, et « restitution de la bathymétrie » afin de retranscrire la topographie du lit mouillé. Le protocole de suivi mis en place a reposé sur trois états (fig. 14) : un état avant travaux (état de référence), un état initial « n » (état de référence immédiatement après les travaux) et un état « n+1 » (état morphologique à un an).

-Figure 14-



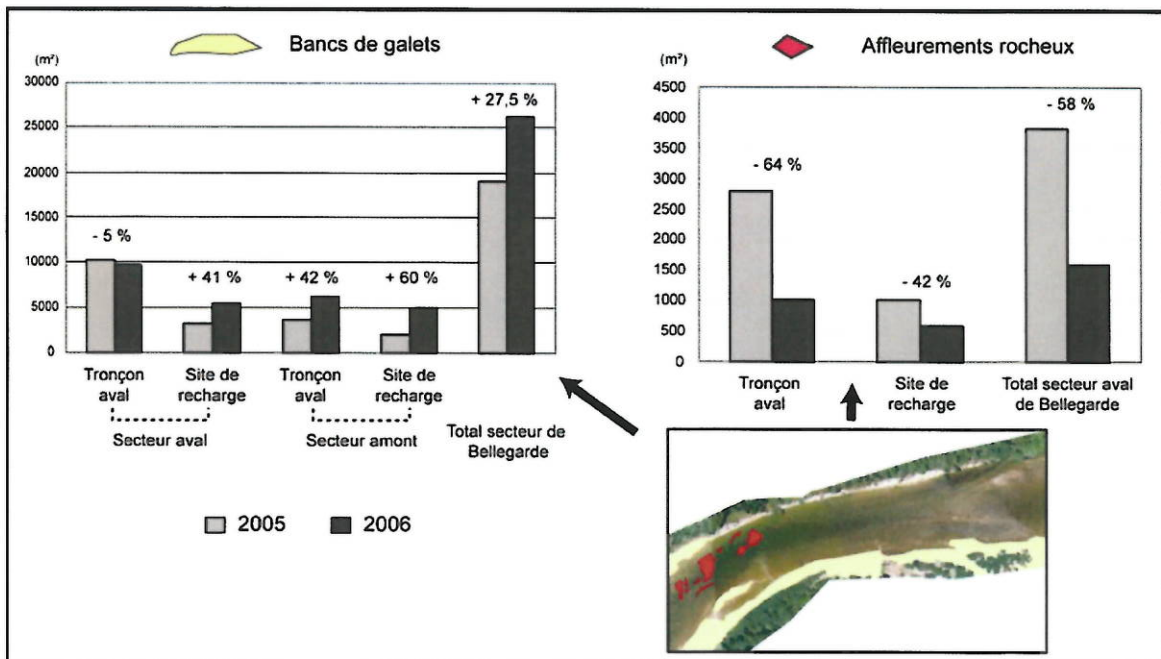
La restitution de la topographie du lit mouillé a permis de produire des référentiels bathymétriques afin de calculer des bilans sédimentaires et d'évaluer la mobilité de la masse sédimentaire réinjectée sur les tronçons aval. Ce bilan, établi à partir de la carte des amplitudes bathymétriques (différence entre deux états, fig. 15) présente un excédent de + 7000 m<sup>3</sup>. Les analyses surfaciques et altimétriques réalisées sur les tronçons aval ont démontré que la charge réinjectée en amont a été, pour partie, remobilisée. Les traces de cette mobilité, représentées par les langues de progression sédimentaire (altimétrie en bleu), estimées à environ 380 m ont été parfaitement détectées (fig. 15).

-Figure 15-



L'analyse de la superficie des différents faciès de fond de lit, un an après l'opération, a permis de mettre en lumière les changements morphologiques enregistrés : une nette progression des surfaces alluviales et inversement une nette réduction des affleurements rocheux (fig. 16).

-Figure 16-





## Quelques références bibliographiques

- 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.
- Bunte K. et Abt S.R. (2001). *Sampling surface and subsurface particule-size distributions in wadable gravel and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring*, USDA-Rocky mountain research station, general technical report RMRS-GTR-74, 428 p.
- Casson B. (2004). *Apport de l'imagerie optique haute résolution pour l'étude 3D de glissement de terrain*. Université Claude Bernard - Lyon1, 281 p.
- Feurer D. (2008). *Géométrie 3D des lits de rivières par stéréophotogrammétrie à travers l'eau*. Thèse de doctorat, AgroParisTech, 232 p.
- 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, 134 p.
- Lejot J., Delacourt C., Piégay H., Trémélo M.L., Fournier T. (2007). *Very high spatial resolution imagery for reconstructing channel bathymetry and topography from an unmanned controlled platform*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 : 1705-1725.
- Lejot J. (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 de Lyon, 257 p.
- Lyzenga, D.R. (1978). *Passive remote-sensing techniques for mapping water depth and bottom features*. *Applied Optics*, 17(3) : 379-383.
- Robin M. (1995). *La télédétection*. Editions Nathan, 318 p.
- Toutin T. (2004). *Photogrammétrie satellitale des capteurs de haute résolution : état de l'art*. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 175(3) : 57-68.
- Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H. (2008). *Action 6 Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux. Synthèse des connaissances et extraction d'indicateurs*. ISIG - UMR5600 - CNRS, Rapport pour le compte de l'Agence de l'Eau RMC, 46 p.