

# ANALYSE MULTI-TEMPORELLE DES MARGES FLUVIALES FREQUEMMENT INONDEES A PARTIR D'IMAGES SATELLITES PLEIADES

Vincent Wawrzyniak<sup>1\*</sup>, Bianca Rapple<sup>1</sup>, Hervé Piégay<sup>1</sup>, Kristell Michel<sup>1</sup>, Hervé Parmentier<sup>1</sup>, Alice Couturier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 EVS. ENS de Lyon, Plateforme ISIG, 15 parvis René Descartes, BP 7000, 69342 Lyon Cedex 07, France, vincent.wawrzyniak@gmail.com

## Résumé

Cet article explore les potentialités des images satellites Pleades pour l'étude multi-temporelle des marges fluviales fréquemment inondées afin d'évaluer leur diversité d'habitats. L'intérêt des images Pleades est lie à leur résolution spatiale et temporelle. Le fait de disposer de plusieurs images sur un laps de temps court permet de caractériser la fluctuation de la zone en eau liée à la seule variation du débit au sein de tronçons fluviaux dont la géométrie n'a pas ete remaniée. Des fréquences d'inondation variables garantissent en effet une plus grande diversité d'habitats au sein des corridors fluviaux. Trois cas contrastes ont ete retenus, chacun d'eux présentant des enjeux operacionnels en termes de caractérisation des habitats : des bancs, des chenaux secs, des zones humides riveraines. Les résultats soulignent que la répétitivité temporelle des images pleades est relativement bonne pour appréhender ces questions. Il a ete possible de disposer de trois à cinq images sur l'année, heureusement acquises pour des débits contrastes ce qui a permis de bien caractériser la fréquence de mise en eau des bancs de galets et du réseau de chenaux. Dans le cas des zones humides riveraines, il a ete possible d'identifier les cas les plus tranches mais avec seulement deux acquisitions pour des débits contrastes, il était difficile d'être plus précis. Le nombre d'images reste malgré tout limite pour effectuer de telles caractérisations. Un recul de plusieurs années est important afin de voir combien d'états contrastes hydrologiquement il est raisonnablement possible de disposer sur les différents sites. Pouvoir disposer de dix à quinze acquisitions annuelles permettrait plus probablement de répondre à ces enjeux.

**Mots-clés :** images satellites Pleades et photographies aériennes, cours d'eau, habitats aquatiques, systèmes lotiques et lentiques, Sud-Est de la France

## Abstract

*This paper explores the potential of Pleades satellite images for multi-temporal analysis of frequently inundated fluvial margins in order to evaluate their habitat diversity. The value of the Pleades images lies in their spatial and temporal resolution. The availability of several images acquired over a short period of time provided the opportunity to characterize the fluctuation of the aquatic zone in relation solely to discharge fluctuations within fluvial reaches whose geometry has not been re-worked. Variable inundation frequencies guarantee in fact higher habitat diversity within fluvial corridors. Three contrasting case studies have been considered, each one of them presenting operational issues in terms of habitat characterization: gravel bars, dry channels, riparian wetlands. The results underline that the temporal repeatability of the Pleades images presents a relatively good basis to comprehend these questions. It was possible to obtain three to five images over one year, fortunately acquired at contrasting discharge conditions, which allowed characterizing the frequency of inundation of the gravel bars and the channel network. In the case of the riparian wetlands, it was possible to identify the most contrasted cases. However, as the set of images represented only two differing discharge conditions, it was difficult to produce results of high precision. Despite the benefits of the Pleades images, the number of available images remains limited, which thus still impedes the establishment of such characterizations. A step back of several years is required to assess how many contrasting hydrological conditions can reasonably be acquired for the different sites. Ten to fifteen acquisitions per year would most likely respond to these issues.*

**Keywords:** Pleades satellite images and aerial photographs, rivers, aquatic habitats, lotic and lentic systems, South-eastern France

## 1. Introduction

Les cours d'eau occupent de vastes zones du fait de leur forme linéaire et de l'organisation du réseau hydrographique. En effet, en France, on compte environ 500 000 kilomètres de cours d'eau selon la BD CARTHAGE. Il peut ainsi s'avérer difficile de les étudier en s'appuyant uniquement sur des mesures de terrain, notamment lorsqu'il s'agit de les caractériser à l'échelle régionale. La télédétection permet de s'affranchir des contraintes liées aux mesures *in situ*. Pour l'étude multi-temporelle des cours d'eau, les photographies aériennes sont souvent utilisées. Pour le territoire français, les BD ORTHO Classique et Infra Rouge Couleur de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière), avec leurs résolutions spatiales de 50 centimètres, sont

fréquemment utilisées pour de telles approches. Ces orthophotos sont generalement acquises tous les trois ou quatre ans pour un même site et archivées sur une periodede près de 60 ans. Ce type de données est ainsi très intéressant pour analyser les changements morphologiques qui s'expriment à l'échelle décennale (Marston et al., 1995 ; Hooke, 2008). Cependant, il est moins pertinent pour aborder des changements s'exprimant à une échelle plus fine en lien notamment avec la fluctuation des débits et des niveaux d'eau. De plus, une telle caractérisation ne peut se faire que sur une fenêtre temporelle courte afin que des changements morphologiques n'interferent pas.

Dans le domaine fluvial, d'autres types d'images ont ete utilises pour caractériser la variabilité intra-annuelle. Nous pouvons citer l'exemple des drones (Lejot et al.,

2007 ; Wawrzyniak et al., 2013 ; Tamminga et al., 2014) ou de la télédétection à partir du sol (Carbonneau et al., 2005 ; Tonolla et al., 2010). Néanmoins, ces deux types d'imagerie ne permettent généralement de couvrir que des zones faiblement étendues spatialement. La télédétection satellitaire a également été utilisée (Mertes, 2002). Dans la plupart des cas, elle concerne des études à large échelle spatiale (Frazier et al., 2003 ; Aalto et al., 2008), les données des satellites ayant des résolutions spatiales grossières étant souvent gratuites comme c'est le cas pour Landsat. Cependant, lorsque les objets étudiés sont de petites tailles, de l'ordre du mètre, comme certaines unités de végétation (Hervouet et al., 2011) ou des chenaux très étroits (Belletti et al., 2013), des images à très haute résolution spatiale sont ainsi nécessaires. Il existe plusieurs satellites possédant des résolutions inframétriques. Nous pouvons citer Ikonos, Quickbird, GeoEye, et WorldView 1 et 2. Cependant, ces données sont couteuses, notamment pour les approches multi-temporelles où plusieurs images sont nécessaires. Leur programmation n'est en outre pas toujours aisée et flexible, ne permettant pas forcément de disposer de plusieurs acquisitions sur une période annuelle. Elles sont par conséquent relativement peu utilisées dans l'étude multi-temporelle des cours d'eau, les photographies aériennes acquises dans le cadre de missions spécifiques leur étant préférées afin de disposer d'un état précis (après une crue, pour un débit donné...).

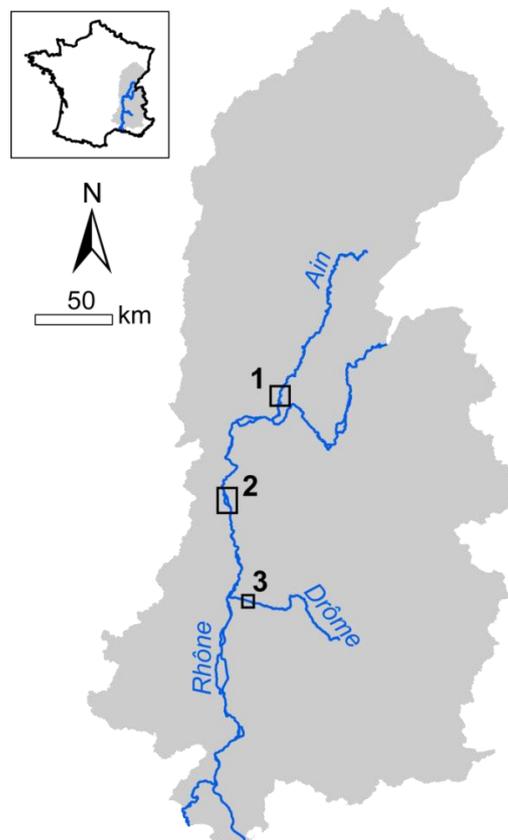
Depuis 2012, les deux satellites Pléiades constituent une nouvelle source d'images à très haute résolution spatiale et temporelle. Leurs images ont des résolutions spatiales natives de 0,7 mètre en mode panchromatique et de 2,8 mètres en multispectral. Ces images sont ensuite rééchantillonnées à 0,5 et 2 mètres, respectivement. Ces nouveaux satellites d'observation ont l'avantage d'avoir une capacité de revisite quotidienne. Il est ainsi possible d'obtenir plusieurs images d'une même zone sur une année. De plus, les programmes sont flexibles et des acquisitions sont réalisables sous de très courts délais, ce qui permet, par exemple, d'anticiper des débits particuliers. La constellation Pléiades permet-elle d'acquérir suffisamment d'images au cours d'une année ou plus exactement d'une période courte sans changement morphologique notable pour observer une variabilité spatiale des surfaces en eau au sein d'un corridor fluvial ?

L'objectif de cet article est ainsi d'explorer les potentialités des images Pléiades pour l'étude multi-temporelle des marges fluviales à l'échelle de tronçons de quelques kilomètres de long. Ces marges peuvent être de différentes natures : des bancs, des chenaux, ou encore des zones humides riveraines dont la mise en eau se matérialise différemment. Leurs surfaces peuvent être immergées ou émergées en fonction notamment de leurs connexions avec le cours d'eau ou la nappe. Toutefois, le potentiel écologique de ces milieux est très variable et la mise en eau constitue dans ce contexte un processus critique. Dans certains cas, des variations rapides de la mise en eau de ces zones peuvent être contraignantes : c'est le cas lorsque des organismes aquatiques se retrouvent émergés suite à une baisse du niveau d'eau (Saltveit et al., 2001). Les rivières où la production hydroélectrique se manifeste par des fluctuations des niveaux d'eau

plusieurs fois dans la journée sont directement concernées, des espèces aquatiques se retrouvant alors piégées dans des isolats en arrière des bancs. Un premier exemple abordera ce sujet. Dans d'autres cas, une mise en eau inégale de ces marges peut être un atout car cette situation maximisera l'hétérogénéité des conditions d'habitat en maintenant des stades successionnels différenciés sur le tronçon. Deux exemples seront analysés : des zones humides riveraines sur les marges d'un grand fleuve et un réseau de chenaux au sein d'un lit en tresses. Dans le premier cas, les habitats sont en arrière d'une digue submersible dont la fréquence de submersion peut être très variable et ils présentent un niveau de remplissage sédimentaire lui-même très variable. Dans le cas des réseaux de chenaux, la mise en eau est encore différente car celle-ci dépend non seulement du débit mais également du niveau de la nappe.

## 2. Sites d'étude

Les trois tronçons distincts concernés sont, respectivement, la basse vallée de l'Ain, le Rhône court-circuité de Péage-de-Roussillon et la Drôme dans les Ramières du Val de Drôme (figure 1).



**Figure 1** : Localisation des trois sites d'étude dans le bassin versant du Rhône : l'Ain dans sa basse vallée (1) le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon (2), et les Ramières du Val de Drôme (3).

Le premier secteur d'étude se situe sur la basse vallée de l'Ain (figure 1). Dans cette section de cinq kilomètres, la rivière est géomorphologiquement dynamique et présente de nombreux bancs de galets (Rollet, 2007). Son régime hydrologique est fortement influencé par les barrages hydroélectriques présents plus en amont, principalement celui de Vouglans. En

période de basses eaux, les éclusées peuvent entraîner un important marnage pouvant avoir des conséquences écologiques, notamment sur les poissons (Saltveit et al., 2001). Sur l'Ain, des mortalités de poissons et d'invertébrés ont été observées suite à l'émergence de bancs engendrée par une baisse du débit.

Le second site est le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon (figure 1). Ce tronçon d'environ douze kilomètres de long représente un système fortement aménagé. Il est la partie court-circuitée d'un aménagement hydroélectrique à dérivation mis en service en 1977. Des endiguements submersibles installés au XIX<sup>e</sup> siècle pour améliorer la navigation (Girardon, 1894), ont fortement influencé le caractère du tronçon (Fruget & Michelot, 1997). Ils ont créé des zones riveraines particulières, les casiers Girardon, qui sont inégalement atterrés et inégalement connectés au chenal. L'objectif de ce second cas est de caractériser ces habitats riverains en fonction de leur fréquence d'inondation afin de voir s'ils sont effectivement diversifiés.

Dans le secteur des Ramières (figure 1), la Drôme présente un style fluvial en tresses sur environ trois kilomètres. Ce troisième site d'étude présente un fort potentiel écologique. En effet, le tronçon est alimenté en étiage par des apports phréatiques et présente ainsi de nombreux bras (Belletti et al., 2013), qu'ils soient courants, stagnants ou alimentés par des eaux souterraines. Toutefois, le nombre d'états observés est faible et on peut se poser la question de savoir si cette diversité de bras est pérenne et fréquemment observée.

Dans les deux premiers cas, aucune donnée n'est actuellement disponible pour effectuer une telle caractérisation car celle-ci nécessite une série d'images acquises pour différents débits au cours d'une période courte durant laquelle la configuration morphologique étudiée n'a pas été affectée par un épisode de crue. Dans le dernier cas, les photographies aériennes disponibles ne couvrent pas toutes les conditions de débit.

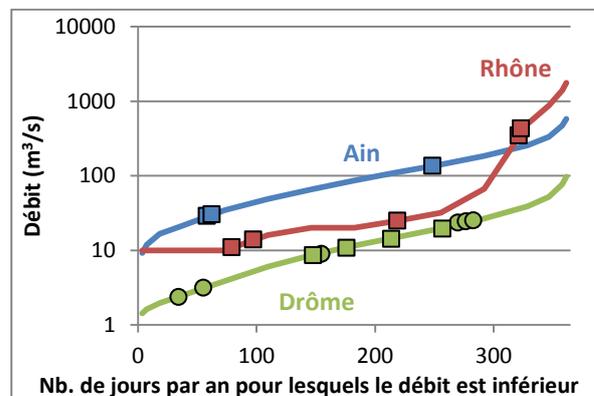
### 3. Méthode

Site	Date	Débit (m <sup>3</sup> /s)
Ain	12 août 2013	29
	31 août 2013	28-33
	7 décembre 2013	136
Rhône	21 juin 2013	434
	31 août 2013	25
	25 septembre 2013	14
	28 octobre 2013	347
Drôme	28 novembre 2013	11
	21 juin 2013	10,8
	12 août 2013	8,6
	28 octobre 2013	19,6
	27 novembre 2013	14,3

**Tableau 1 :** Images Pléiades disponibles sur les sites d'études. Les débits sont indiqués respectivement pour la station de Chazey-sur-Ain, la station à l'aval du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf et la station de Saillans.

Les images Pléiades permettent d'étudier les cours d'eau dans une large gamme de conditions de débits

(figure 2). Pour l'Ain, il est ainsi impossible d'identifier les zones affectées par un marnage entre 28 m<sup>3</sup>/s et 136 m<sup>3</sup>/s. Pour le Rhône, les cinq images Pléiades permettent d'appréhender une grande gamme de débits. En effet, nous disposons d'images pour lesquelles les débits étaient proches de 10 et 20 m<sup>3</sup>/s, ce qui correspond aux deux seuils de débit réservé de Péage-de-Roussillon. De plus, d'autres images nous permettent de caractériser les habitats dans des conditions de hautes eaux, lorsque le barrage est ouvert. Pour la Drôme, alors que les photographies aériennes de l'IGN se limitent principalement à des conditions d'étiage ou de hautes eaux, les images Pléiades permettent de caractériser les conditions intermédiaires (148 à 257 jours/an).



**Figure 2 :** Débits classés : l'Ain à Chazey-sur-Ain (calculés sur 20213 jours et représentés en bleu), le Rhône à l'aval du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf (calculés sur 9862 jours et représentés en rouge) et la Drôme à Saillans (calculés sur 18346 jours et représentés en vert). Les débits aux dates des images Pléiades sont représentés par les carrés. Les ronds indiquent ceux associés aux photographies aériennes.

Sur l'Ain, nous disposons de trois images Pléiades (tableau 1). La zone en eau a été digitalisée par photo-interprétation à partir de la bande panchromatique en utilisant un zoom correspondant à l'échelle 1/2000. A l'aide de la Fluvial Corridor toolbox développée par Roux et al. (2014), cette zone aquatique a été segmentée tous les cent mètres suivant l'axe médian du cours d'eau. La largeur moyenne du cours d'eau par segments a ainsi été calculée.

Sur le Rhône, cinq images Pléiades étaient disponibles correspondant à des conditions de débit différentes (tableau 1). A l'intérieur de chaque casier, les surfaces en eau et les surfaces atterrées ont été digitalisées par photo-interprétation à partir de la bande panchromatique en utilisant un zoom correspondant à l'échelle 1/2000. Le pourcentage de la surface en eau a été calculé pour les cinq dates pour caractériser le degré d'atterrissement pour chacun des débits. Le taux de variation de la surface en eau entre deux débits a ensuite été calculé :

$$\frac{(A_{eauD2} - A_{eauD1})}{A_{eauD1}}$$

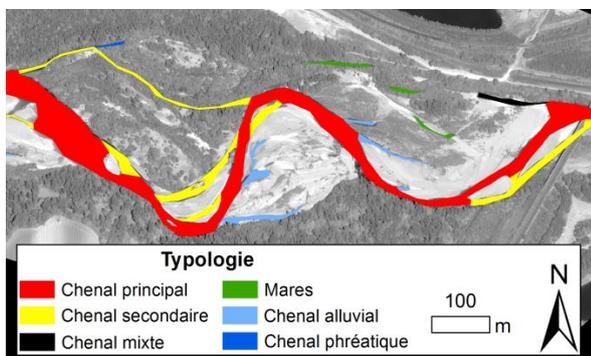
où  $A_{eauD1}$  est la surface en eau au débit inférieur et  $A_{eauD2}$  est la surface en eau au débit supérieur. Ce taux représente la variation de la surface en eau dans chaque casier en fonction du débit. Un taux faible

indique que le casier présente une topographie contrastée entre zones en eau et zones atterries alors qu'un taux élevé souligne que ces contrastes sont moindres et que la mise en eau est progressive, garante d'une diversité stationnelle plus élevée.

Cela a servi de base à une première classification des casiers. Une analyse des patrons spatiaux de l'atterrissement a été effectuée pour identifier des différences potentielles entre les casiers liés aux conditions locales le long du linéaire (patron amont-aval) ou encore selon l'orientation de la berge (concave/convexe). Le patron géographique peut en effet nous permettre de mieux identifier quels sont les facteurs qui régissent l'atterrissement de ces entités.

Quatre images Pléiades ont été utilisées sur la Drôme (tableau 1). Sur ces images les zones en eau ont été cartographiées par photo-interprétation. L'eau a été digitalisée par photo-interprétation à partir de la bande panchromatique en utilisant un zoom correspondant à l'échelle 1/1500. La même méthodologie a été utilisée sur six jeux de photographies aériennes issues de l'IGN (figure 2). Elles datent de 1972, 1989, 1991, 2001, 2006 et 2010. Leur résolution spatiale varie entre 0,25 et 1,32 mètre. Pour toutes les images, les masses d'eau ont été classées (figure 3) suivant la typologie de Belletti et al. (2013) :

- Chenal principal : plus large chenal courant.
- Chenal secondaire : courant, connecté au réseau courant, à l'amont et à l'aval.
- Chenal mixte : connecté uniquement à l'amont avec les chenaux courants.
- Mare : masse d'eau déconnectée du réseau.
- Chenal alluvial : naissant dans la bande active, connecté uniquement à l'aval avec les chenaux courants. Théoriquement alimenté par des eaux souterraines.
- Chenal phréatique : naissant hors de la bande active, connecté uniquement à l'aval avec les chenaux courants. Théoriquement alimenté par des eaux phréatiques.



**Figure 3 :** Typologie des masses d'eau du tronçon des Ramières du Val de Drôme. Le courant va de l'est vers l'ouest. Le fond est une image Pléiade du 21 juin 2013.

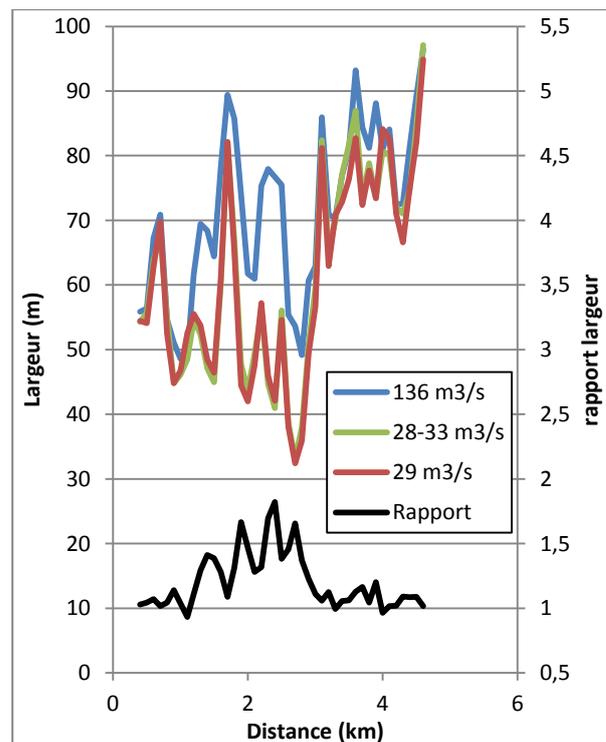
A partir de cette typologie, un indice de diversité des habitats aquatiques ( $H'$ ) a été calculé. Il est fondé sur l'indice de Shannon, initialement proposé par Shannon et Weaver (1949) et utilisé en écologie du paysage (Turner, 1990).

$$H' = \sum_{i=1}^n (p_i \times \ln p_i)$$

où  $n$  est le nombre de types de masses d'eau et  $p_i$  la proportion de surface du  $i^{\text{ème}}$  type. Cet indice permet de distinguer les cours d'eau ayant une forte diversité d'habitat et ainsi un fort potentiel écologique (type 1) de ceux présentant une faible diversité (type 2) (Belletti et al., 2013).

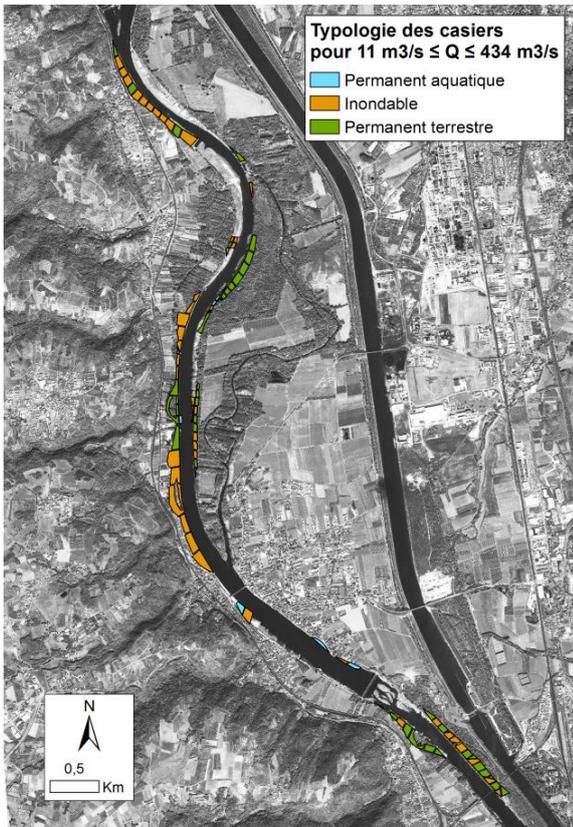
#### 4. Résultats

Dans le cas de l'Ain, la largeur de la zone en eau peut fortement varier longitudinalement (figure 4). Pour un débit d'environ 30 m<sup>3</sup>/s, la largeur peut ainsi atteindre de 30 à 90 mètres. Les secteurs de basses eaux les plus étroits enregistrent les variations de largeur de la zone en eau les plus importantes lorsque le débit augmente (figure 4). Cette largeur varie presque du simple au double entre 28-33 m<sup>3</sup>/s et 136 m<sup>3</sup>/s. Ces secteurs se caractérisent par des bancs de galets importants et sont les plus sensibles à la formation d'isolats aquatiques chaque fois que les niveaux d'eau redescendent.

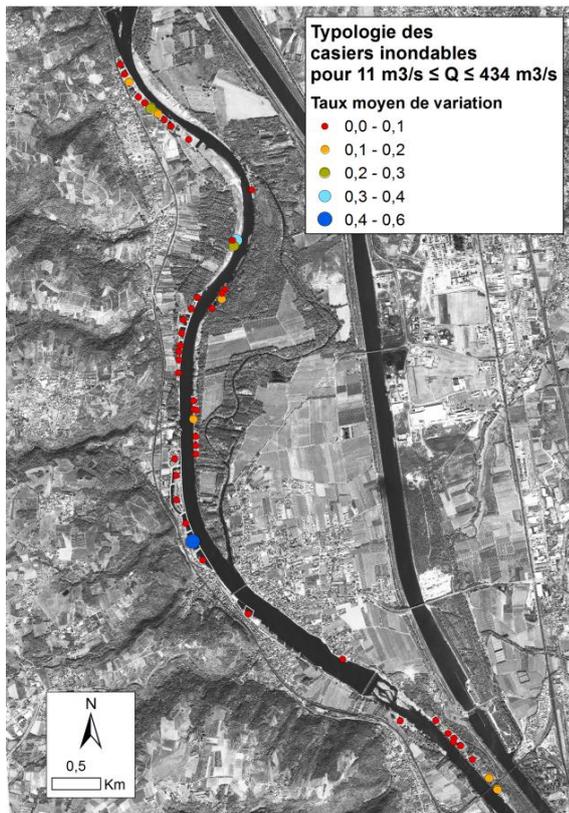


**Figure 4 :** Evolution de la largeur de la zone en eau pour le tronçon d'étude de l'Ain. Le rapport de largeur est calculé à partir des largeurs à 29 et 136 m<sup>3</sup>/s.

Dans le cas du Rhône, trois types de casiers ont été distingués selon leur niveau de mise en eau en fonction du débit : (1) permanent aquatique (surface en eau >75% pour les cinq dates), (2) inondables (surface en eau >25% et <75% pour les cinq dates) et (3) permanent terrestre (surface en eau <25% pour les cinq dates). Sur le linéaire, des zones distinctes de fort atterrissement ont été identifiées, ainsi que des zones qui sont inondées progressivement (figure 5). Les casiers toujours en eau se situent surtout dans un secteur particulier où un relèvement de la ligne d'eau a été enregistré à la suite de la construction d'un seuil plus récent.



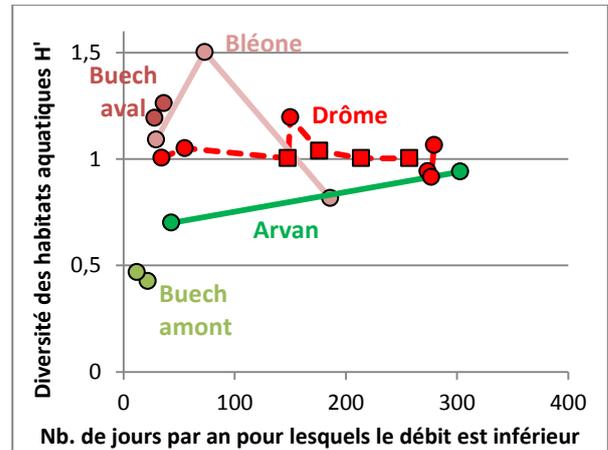
**Figure 5 :** Typologie des casiers du Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon en fonction de leur fréquence d'inondation. Le fond est une image Pléiade du 31 août 2013.



**Figure 6 :** Taux moyen de variation de la surface en eau des casiers inondables du Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon. Le fond est une image Pléiade du 31 août 2013.

Parmi les casiers inondables pour la gamme de débit étudiée, tous ne sont pas mis en eau de la même manière (figure 6). Dans la plupart des casiers la surface en eau varie peu en fonction du débit ce qui montre qu'il existe un fort contraste topographique entre les zones toujours en eau et les zones atterries et qu'une fluctuation de la hauteur d'eau ne se caractérise donc pas par une augmentation des surfaces en eau. D'autres, moins nombreux, présentent des taux de variation plus importants. Pour ces casiers, la surface en eau change fortement avec le débit, ce qui montre que la topographie du remplissage est beaucoup plus homogène. Cependant, aucun patron spatial ne peut être identifié selon les types morphologiques et une grande diversité de fonctionnement est ainsi observée localement.

L'utilisation combinée des photographies aériennes et des images Pléiades permet de montrer que l'indice de diversité des habitats aquatiques de la Drôme présente une grande pérennité temporelle dans la réserve naturelle des Ramières (figure 7). En effet, pour une large gamme de débits (34 à 279 jours/an), l'indice varie entre 0,9 et 1,2, ce qui situe ce site dans le groupe des rivières remarquables. A l'inverse, la Bléone et l'Arvan présentent une forte variabilité de leur indice de diversité des habitats aquatiques. Enfin, les Buech amont et aval montrent une très faible variabilité de leur indice. Toutefois, pour ces deux derniers cours d'eau, les images disponibles concernent des débits relativement similaires.



**Figure 7 :** Indice de diversité des habitats aquatiques pour différentes conditions de débit. Les cours d'eau de type 1 sont en rouge alors que ceux de type 2 sont en vert. Les carrés et les ronds représentent respectivement les images Pléiades et les photographies aériennes.

## 5. Discussion

Les images Pléiades présentent un potentiel très intéressant pour la caractérisation des unités intra-fluviales du fait de leur résolution spatiale et temporelle. Elles offrent la possibilité de caractériser des unités de taille réduite telles que les marges fluviales et d'enregistrer leur dynamique qui s'exprime par les fluctuations du niveau de l'eau ou la croissance végétale. Pour les cours d'eau où la morphologie change beaucoup, les photographies aériennes archivées sont inutiles car elles sont trop espacées

dans le temps et imagent ainsi des états morphologiques différents. C'est le cas de l'Ain où des crues morphogènes se produisent presque tous les ans. Dans ce type d'exemple, les images Pléiades apportent une information supplémentaire indispensable. La capacité de revisite est bien plus importante que celle des photographies aériennes produites nationalement par l'IGN. Dans le cadre de cette étude exploratoire, nous avons ainsi pu disposer d'une large gamme de conditions de débit présentes pour les trois cours d'eau étudiés. Ces images nous ont permis de caractériser les variations de la diversité des habitats liées aux seules fluctuations du débit dans la mesure où les images couvraient une période au cours de laquelle aucune crue n'a modifié la géométrie du cours d'eau. Nous avons pu ainsi identifier les secteurs fluviaux où il existe des habitats potentiellement sensibles au marnage et déterminer également la fréquence d'inondation des bancs de galets qui régit la diversité biologique de ces milieux (Datry et al., 2014). Il a également été possible d'analyser la mise en eau des zones humides riveraines du Rhône sur un tronçon de plusieurs kilomètres et de constater que les conditions d'inondation sont relativement uniformes. Peu de casiers enregistrent une inondation progressive et ceux-ci sont assez dispersés soulignant l'importance de facteurs très locaux pour expliquer ces patrons d'atterrissement. Ce travail typologique initial permet ainsi de savoir maintenant où concentrer les analyses de terrain pour déterminer plus précisément ces facteurs.

Contrairement aux deux autres exemples, le cas de la Drôme est particulier car l'analyse combinée d'images récentes et anciennes est intéressante. Les images Pléiades peuvent aussi se combiner aux photographies aériennes archivées de l'IGN pour former un jeu de données conséquent pour analyser l'état morphologique. Le réseau de chenaux au sein de la tresse est évidemment très dynamique, celui-ci évoluant significativement au gré des crues mais le style fluvial lui-même (la tresse) reste présent. Dans ce cas, il est ainsi intéressant de savoir si les habitats aquatiques résultant des arrivées phréatiques se maintiennent au cours du temps, quelques soient les débits enregistrés par la rivière et alors même que le réseau de bras évolue crue après crue. L'utilisation combinée de ces deux types de données permet de confirmer que la diversité fonctionnelle des chenaux en tresses est pérenne sur le site des Ramières du Val de Drôme. Cette diversité est élevée et engendrée par des apports d'eau souterraine plutôt constants. Pour les autres tronçons en tresses, nous ne disposons que de photographies aériennes. Dans certains cas, les photographies aériennes permettent de valider que la classe attribuée est la même pour un même débit (les deux tronçons du Buech sur la figure 7). Dans d'autres cas, l'indice de diversité des habitats aquatiques varie en fonction du débit (les tronçons de la Bléone et de l'Arvan sur la figure 7). Cette variabilité pourrait s'expliquer par des variations des apports d'eau souterraine. Cependant, nous ne disposons que de deux ou trois images pour caractériser ces cours d'eau. Un nombre plus important d'images est ainsi nécessaire pour comprendre le fonctionnement de ces tronçons, ce que seules peuvent permettre aujourd'hui les images Pléiades. Ces images satellites permettent ainsi d'identifier les cours d'eau présentant une forte diversité d'habitats aquatiques pour lesquels la

classification est pérenne. Le cas de la Drôme le confirme et les images Pléiades pourraient être utilisées sur d'autres cours d'eau de ce type pour confirmer que leur potentiel d'habitat est bien pérenne. Des préconisations en matière de restauration et de conservation pourraient ainsi être formulées avec plus de robustesse.

L'étude de ces trois exemples souligne qu'avec un nombre maximum de cinq images exploitables sur une période de presque un an, couvrant des états hydrologiques assez aléatoires, la résolution temporelle de cette donnée est en deçà de ce qui était attendu et reste encore modeste pour caractériser des dynamiques intra-fluviales qu'il s'agisse de la mise en eau des marges ou encore de la dynamique de la végétation qui nécessiterait de disposer de plusieurs états pendant la période végétative. Avoir la possibilité de programmer des acquisitions dans une période de temps courte serait ainsi un atout appréciable afin d'imager les états hydrologiques les plus pertinents et minimiser le nombre d'états nécessaire à une bonne caractérisation.

En plus de cette capacité de revisite élevée par rapport aux images aériennes, les images Pléiades présentent également d'autres avantages. Deux sont particulièrement intéressants pour les questions abordées ici. Le premier concerne leur qualité radiométrique. En effet, les images de la BD ORTHO® ou les photographies d'acquisitions aéroportées montrent des sauts radiométriques entre les images. Ces sauts posent des problèmes lorsqu'on s'intéresse à l'évolution de la radiométrie le long du cours d'eau, notamment pour déterminer la bathymétrie (Lejot et al., 2007). Sur les images Pléiades, de tels sauts n'existent pas. Le second avantage concerne le domaine spectral avec des données dans le proche infrarouge. Ces informations se retrouvent à la fois dans la bande numéro quatre du satellite, mais aussi dans le canal panchromatique. L'utilisation de l'infrarouge offre un double avantage. Elle permet de caractériser la végétation, qu'elle soit aquatique ou terrestre, et qui est un élément très dynamique des corridors fluviaux (Bertrand et al., 2013) car cette dernière réfléchit l'infrarouge de façon particulièrement élevée. A l'inverse, l'eau réfléchissant très peu cette gamme spectrale, est également facilement identifiable. C'est notamment le cas en mode panchromatique comme l'illustre la figure 6.

Toutefois, les images Pléiades montrent également des limites quant à l'étude des cours d'eau. La première concerne les ombres portées de la végétation. Dans les zones ombragées, bien souvent localisées à l'interface entre l'eau et la zone terrestre, il est difficile de déterminer l'occupation du sol. C'est particulièrement le cas en hiver et pour des images acquises le matin ou le soir. Lorsque l'étude porte sur de petits objets, la précision est fortement diminuée. L'exemple des casiers Girardon est illustratif, où l'ombre portée de la végétation riparienne a un impact sur la localisation de la bordure des petites surfaces en eau (de l'ordre d'environ 0,1 hectare). Dans ce cadre nous sommes confrontés à une seconde limite liée à la couverture végétale, notamment les surfaces masquées par des houppiers, qui varient selon l'angle d'acquisition de l'image. Ce phénomène a également rendu difficile la distinction entre d'éventuels rétractions ou expansions

des zones inondées et leur stabilisation. De plus, la limite entre l'eau et la zone terrestre n'est pas toujours identifiable, surtout quand la profondeur de l'eau montre une diminution graduelle.

### Remerciements

Le copyright des images Pléiades utilisées est © CNES (2013), distribution Airbus DS / Spot Image. Les photographies aériennes de la Drôme ont été fournies par la réserve naturelle des Ramières du Val de Drôme. Les données de débits débit proviennent de la Banque Hydro sauf celles du Rhône qui ont été fournies par la Compagnie Nationale du Rhône. Nous remercions les deux relecteurs anonymes pour leurs remarques constructives.

### Références

- Aalto R., Lauer J., Dietrich W. E., 2008. Spatial and temporal dynamics of sediment accumulation and exchange along Strickland River floodplains (Papua New Guinea) over decadal-to-centennial timescales. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003–2012), 113(F1).
- Belletti B., Dufour S., Piégay H., 2013. Regional variability of aquatic pattern in braided reaches (example of the French Rhône basin). *Hydrobiologia*, 712(1), 25-41.
- Bertrand M., Piégay H., Pont D., Liébault F., Sauquet E., 2013. Sensitivity analysis of environmental changes associated with riverscape evolutions following sediment reintroduction: geomatic approach on the Drôme River network, France. *International Journal of River Basin Management*, 11(1), 19-32.
- Carbonneau P. E., Bergeron N., Lane S. N., 2005. Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. *Water Resources Research*, 41(11).
- Datry T., Corti R., Belletti B., Piégay H., 2014. Ground-dwelling arthropod communities across braided river landscape mosaics: a Mediterranean perspective. *Freshwater Biology*, 59(6), 1308-1322.
- Frazier P., Page K., Louis J., Briggs S., Robertson A. I., 2003. Relating wetland inundation to river flow using Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(19), 3755-3770.
- Fruget J. F., Michelot J. L., 1997. Dérives écologiques et gestion du milieu fluvial rhodanien. *Revue de géographie de Lyon*, 72(1), 35-48.
- Girardon H., 1894. Amélioration des rivières en basses eaux. Publication pour le 6<sup>e</sup> congrès international de navigation intérieur – Le Hay, 85p.
- Hervouet A., Dunford R., Piégay H., Belletti B., Trémélo M.-L., 2011. Analysis of post-flood recruitment patterns in braided-channel rivers at multiple scales based on an image series collected by unmanned aerial vehicles, ultra-light aerial vehicles, and satellites. *GIScience & Remote Sensing*, 48(1), 50-73.
- Hooke J. M., 2008. Temporal variations in fluvial processes on an active meandering river over a 20-year period. *Geomorphology*, 100(1), 3-13.
- Lejot J., Delacourt C., Piégay H., Fournier T., Trémélo M. L., Allemand 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), 1705-1725.
- Marston R. A., Girel J., Pautou G., Piegay H., Bravard J. P., Arneson C., 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology*, 13(1), 121-131.
- Mertes L. A., 2002. Remote sensing of riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 47(4), 799-816.
- Rollet A.-J., 2007. Étude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse Vallée de l'Ain. Thèse de Doctorat, Université Jean Moulin – Lyon 3, 305p.
- Roux C., Alber A., Bertrand M., Vaudor L., Piégay H., 2014. "FluvialCorridor": A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology*, DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.04.018.
- Saltveit S. J., Halleraker J. H., Arnekleiv J. V., Harby A., 2001. Field experiments on stranding in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking. *Regulated Rivers: Research & Management*, 17(4-5), 609-622.
- Shannon C. E., Weaver W., 1949. The mathematical theory of communication. Urbana, IL: University of Illinois Press.
- Tamminga A., Hugenholtz C., Eaton B., Lapointe M., 2014. Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): A first assessment in the context of river research and management. *River Research and Applications*, DOI: 10.1002/rra.2743
- Tonolla D., Acuna V., Uehlinger U., Frank T., Tockner K., 2010. Thermal heterogeneity in river floodplains. *Ecosystems*, 13(5), 727-740.
- Turner M. G., 1990. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology*, 4, 21-30.
- Wawrzyniak V., Piégay H., Allemand P., Vaudor L., Grandjean P., 2013. Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13), 4812-4831.