



**HAL**  
open science

## Radar hyperfréquence embarqué appliqué à la cartographie du corridor fluvial

Marion Jaud, R. Rouveure, P. Faure, M.O. Monod

► **To cite this version:**

Marion Jaud, R. Rouveure, P. Faure, M.O. Monod. Radar hyperfréquence embarqué appliqué à la cartographie du corridor fluvial. SAGEO Conférence internationale de Géomatique et d'analyse spatiale, Sep 2013, Brest, France. 12 p. hal-00948369

**HAL Id: hal-00948369**

**<https://hal.science/hal-00948369>**

Submitted on 18 Feb 2014

**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.

---

# Radar hyperfréquence embarqué appliqué à la cartographie du corridor fluvial

M. Jaud<sup>1</sup>, R. Rouveure<sup>1</sup>, P. Faure<sup>1</sup>, M-O. Monod<sup>1</sup>

1. UR TSCF, Irstea Clermont-Ferrand

Campus des Cézeaux, 24 avenue des Landais, BP50085, 63172 Aubière cedex, France

marion.jaud@irstea.fr, raphael.rouveure@irstea.fr

---

*RESUME.* La gestion des rivières est une composante essentielle d'un développement durable et de la préservation des ressources en eau. Dans ce contexte, des levés réguliers doivent être réalisés. Cet article présente le radar embarqué K2Pi pour cartographier le corridor fluvial. Afin d'en évaluer le potentiel, les cartes radar obtenues sur un tronçon de l'Allier (Auvergne, France) de 18km sont comparées à des images aériennes RGB et infra-rouges. De par sa souplesse d'utilisation et la faisabilité d'une acquisition sans GPS, ce système s'avère complémentaire des techniques classiques de suivi.

*ABSTRACT.* River monitoring plays a crucial role in sustainable management of water resources. Regular surveys have so to be performed. This paper will present the ship-borne radar K2Pi in a perspective of mapping the river corridor. A 18km long reach of the river Allier (Auvergne, France) has been scanned by the radar. The radar map is compared with RGB and infra-red aerial images, so as to examine the radar potential. The implementation of the K2Pi radar is relatively straightforward and do not need a GPS. This system appears to be complementary to conventional monitoring techniques.

*MOTS-CLES :* Cartographie radar, radar FMCW, Fourier-Mellin, ortho-images.

*KEYWORDS:* Radar mapping, FMCW radar, Fourier-Mellin, ortho-images.

---

## 1. Introduction

De par leur attractivité et leur richesse écologique, les cours d'eau sont un objet géographique associé à d'importants enjeux environnementaux, sociétaux et économiques (Liverman et Cuesta, 2008). Depuis 2000, la France, comme tous les États membres de la Communauté Européenne, met en œuvre la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) afin de parvenir en 2015 au « bon état » de tous les milieux aquatiques. Dans le cadre d'une gestion intégrée des cours d'eau, un suivi de leur morphodynamique s'impose (Malavoi et Bravard, 2010).

Les méthodes traditionnelles de suivi consistent généralement en un levé GPS (Global Positioning System) des berges (Higgit et Warburton, 1999). Or, en pratique, ce suivi peut s'avérer complexe : difficultés d'accès, signal GPS masqué par des gorges ou par la ripisylve (Yang *et al.*, 2011 ; Scherer *et al.*, 2012). Aussi, de nombreuses techniques de télédétection ont été mises en œuvre afin de s'adapter au mieux à ce type d'environnement (Marcus et Fonstad, 2010). La plupart de ces techniques s'appuient sur l'imagerie optique (Bird *et al.*, 2010 ; Lane *et al.*, 2010 ; Horn *et al.*, 2012), le LiDAR aéroporté (Notebaert *et al.*, 2009), le LiDAR terrestre embarqué sur un bateau (Heritage et Herington, 2007 ; O'Neal et Pizzuto, 2011) ou le radar à synthèse d'ouverture (Jung *et al.*, 2010). Bien que fournissant des données haute résolution, ces systèmes sont dépendants des conditions météorologiques et doivent être impérativement couplés à un GPS et à une centrale inertielle. De plus, lors d'une acquisition aérienne, la canopée peut masquer la limite eau/sol ; tandis qu'une acquisition depuis une embarcation risque de subir des pertes GPS dans les zones encaissées.

Les techniques radar présentent l'avantage de pouvoir être utilisées dans des conditions météorologiques défavorables et quelles que soit les conditions d'illumination (Peynot *et al.*, 2010 ; Reina *et al.*, 2011). Dans ce contexte, nous avons élaboré un système original de cartographie radar K2Pi mis en œuvre depuis une embarcation. Cet article présente ce radar hyperfréquence dans une application de cartographie du corridor fluvial. On s'intéressera ici plus particulièrement à l'interface eau/sol. Après une description du capteur et du processus de création des cartes radar, nous comparerons les résultats obtenus à des photographies aériennes en encodage couleur de type RGB et InfraRouge (IR).

## 2. Création des cartes radar

### 2.1. Le radar K2Pi

Le radar K2Pi (figure 1a) a été conçu selon une architecture de radar continu à modulation de fréquence (Skolnik, 1980 ; Monod, 1995 ; Rouveure *et al.*, 2003) ou radar FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave). Cette architecture ne nécessite qu'une faible puissance d'émission et la technologie associée est moins coûteuse que celle d'un radar à impulsion. L'avantage principal de la modulation de fréquence est de transposer dans le domaine fréquentiel des variables temporelles. Une faible variation de temps se traduit alors par une grande variation de fréquence, plus facile à mesurer. De plus, l'ouverture de l'antenne radar en site et en azimut permet de sonder une grande surface de l'environnement. Le signal reçu est une combinaison des signaux rétrodiffusés par l'ensemble des obstacles situés dans le volume scanné par l'antenne.

Le radar K2Pi est embarqué sur une plate-forme mobile se déplaçant dans l'environnement à cartographier (figure 1b). En une seconde, l'antenne tournante du radar effectue un scan de 360° dans le plan horizontal avec une portée de 100m. Un jeu de 360 spectres radar successifs est enregistré pour former une « image radar

panoramique » centrée sur la position du radar. Cette image est corrigée des déplacements du véhicule et des effets de speckle.

## 2.2. Construction de la carte radar

L'association d'images radar panoramiques successives donne lieu à la construction d'une carte grâce à l'algorithme « R-SLAM » (Rouveure *et al.*, 2008). Cet algorithme s'appuie sur la technique du SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) qui permet à un véhicule mobile de construire une carte relative de l'environnement tout en se localisant dans cette carte 2D grâce à différents capteurs optiques (Dissanayake *et al.*, 2001). Avec le radar K2Pi, la carte peut être construite de manière récursive, indépendamment de la dynamique de la plate-forme ou de la position du radar sur le véhicule.

Pour une image radar panoramique, cette méthode se décompose en deux étapes :

- un appariement de carte (via une corrélation croisée 3D) entre la  $n^{\text{ième}}$  image radar panoramique et la carte construite par itération jusqu'au rang  $n-1$ . Le maximum de corrélation donne une estimation des paramètres de déplacement et de rotation entre le scan d'ordre  $n-1$  et le scan d'ordre  $n$ .
- une mise à jour de la carte globale par fusion de la  $n^{\text{ième}}$  image radar panoramique avec la carte construite jusqu'au rang  $n-1$ .

La carte radar finale est un raster en échelle de gris, avec une résolution spatiale de 20cm (figure 1c). Les calculs successifs des déplacements et rotations inter-scans permettent de reconstruire simultanément la trajectoire relative du radar, appelée « trajectoire R-SLAM ».

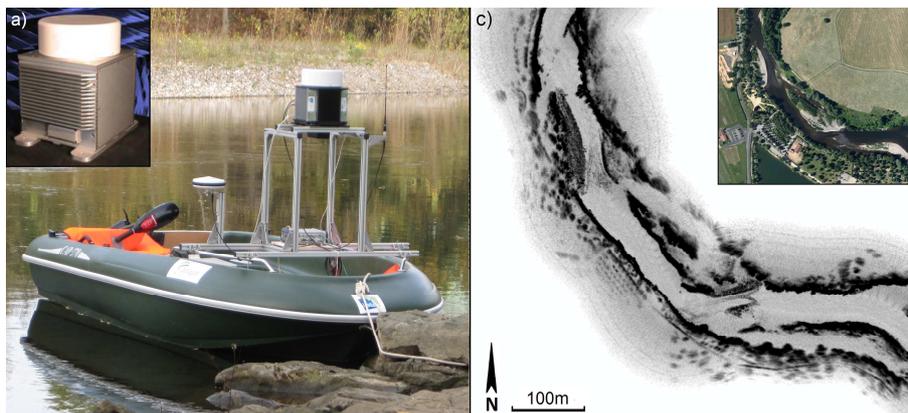


Figure 1: (a, b) Radar K2Pi embarqué sur un canot (photo Irstea©). (c) Extrait de la carte radar relative construite à partir de données radar acquises en Octobre 2012 sur l'Allier (Auvergne, France).

### 2.3. Géoréférencement de la carte radar

Une étape de géoréférencement vient compléter la construction de la carte radar. Afin de s'adapter au mieux au contexte d'étude et aux données disponibles, trois méthodes ont été développées (Jaud *et al.*, sous presse) :

- géoréférencement par sélection de paires de points de contrôle sur la carte radar et sur une ortho-photographie ;
- géoréférencement par appariement de la trajectoire relative R-SLAM avec une trajectoire DGPS enregistrée durant l'acquisition
- géoréférencement image à image, via la méthode de Fourier-Mellin (Casasent et Psaltis, 1976) schématisée par la figure 2.

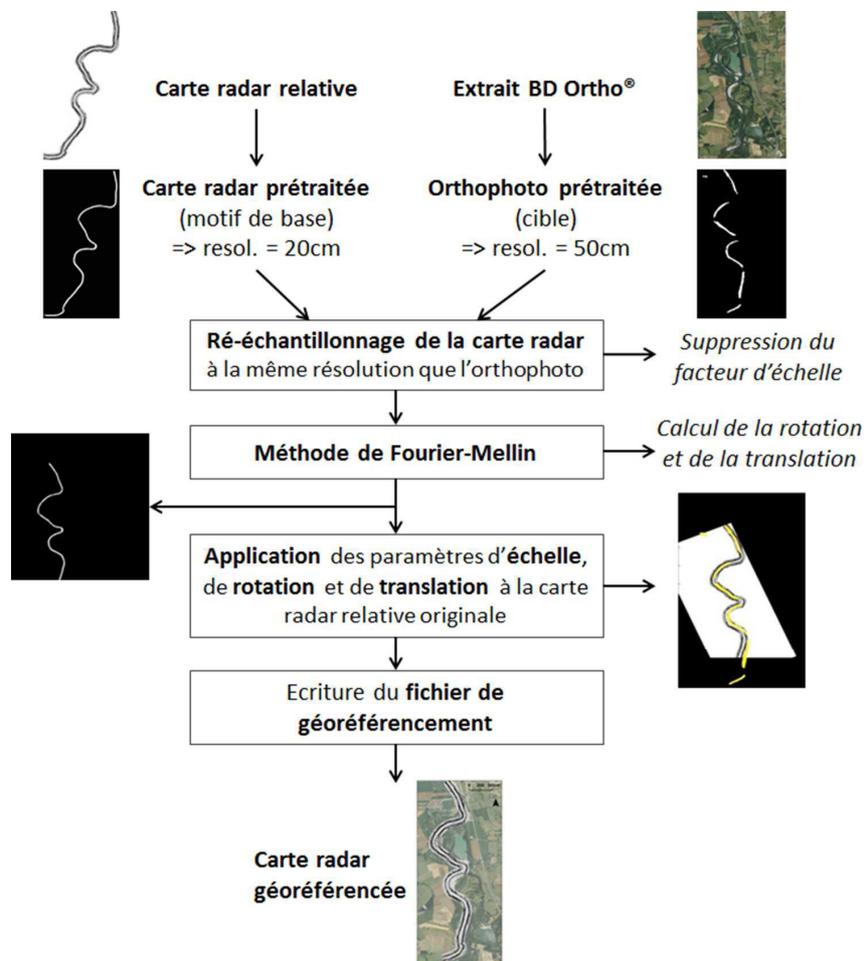


Figure 2: Différentes étapes de la procédure de géoréférencement basée sur la méthode de Fourier-Mellin pour le recalage d'une carte radar.

La méthode de Fourier-Mellin permet de déduire les paramètres de transformation en rotation et translation de la carte radar. Cette méthode se base sur la ressemblance globale entre la carte radar et une photographie aérienne. Toutefois, à une échelle plus fine, de nombreuses disparités apparaissent entre carte radar et photographie aérienne. Une étape de prétraitement des images s'avère nécessaire afin de ne conserver que les éléments caractéristiques communs. Une fois géoréférencée, la carte radar pourra être intégrée dans un SIG afin d'être exploitée. Cette méthode de géoréférencement image à image sera choisie préférentiellement car elle est entièrement automatique et ne nécessite aucun enregistrement GPS lors de l'acquisition radar. En contexte fluvial, le signal GPS peut en effet être masqué si la ripisylve est trop dense ou si le cours d'eau circule dans des gorges.

### **3. Acquisition des données**

#### **3.1. Zone d'étude**

La zone d'étude est un tronçon de l'Allier (Auvergne), située entre Mirefleurs et Pont du Château (figure 3a). Cette zone a été subdivisée en deux parties :

- un premier sous-tronçon de 8 km entre Mirefleurs et Cournon ;
- un second sous-tronçon de 10 km entre Cournon et Pont du Château.

Ce secteur, de style fluvial sinueux, marque la frontière entre l'Allier montagnard en amont et l'Allier des plaines en aval (SAGE Allier Aval, 2007). Il présente ainsi des configurations très variées propices à une mise en situation du matériel : présence de zones urbanisées, de zones de falaises, de gravières, etc.

#### **3.2. Moyens mis en œuvre**

Les deux sous-tronçons ont été cartographiés par le radar K2Pi en Octobre 2012. Le canot, équipé d'un moteur électrique, a effectué le parcours de 18 km en un peu plus de 3 h, soit une vitesse moyenne d'environ 6 km/h. Cette vitesse ne doit pas être trop élevée afin de limiter l'écart entre deux images panoramiques radar successives. Au total, près de 12000 images panoramiques ont été acquises. La carte radar totale couvre près de 3,5 km<sup>2</sup> avec une résolution de 20 cm.

Parallèlement à l'acquisition radar, un survol de la zone a été effectué (figure 3b) afin d'acquérir des photographies en encodage couleur de type RGB ainsi que des images en InfraRouge (IR) couleur dans un rayon de 300 m de part et d'autre de la rivière (figure 3c). Ces images ont une résolution de 20cm, similaire à celle de la carte radar.

6

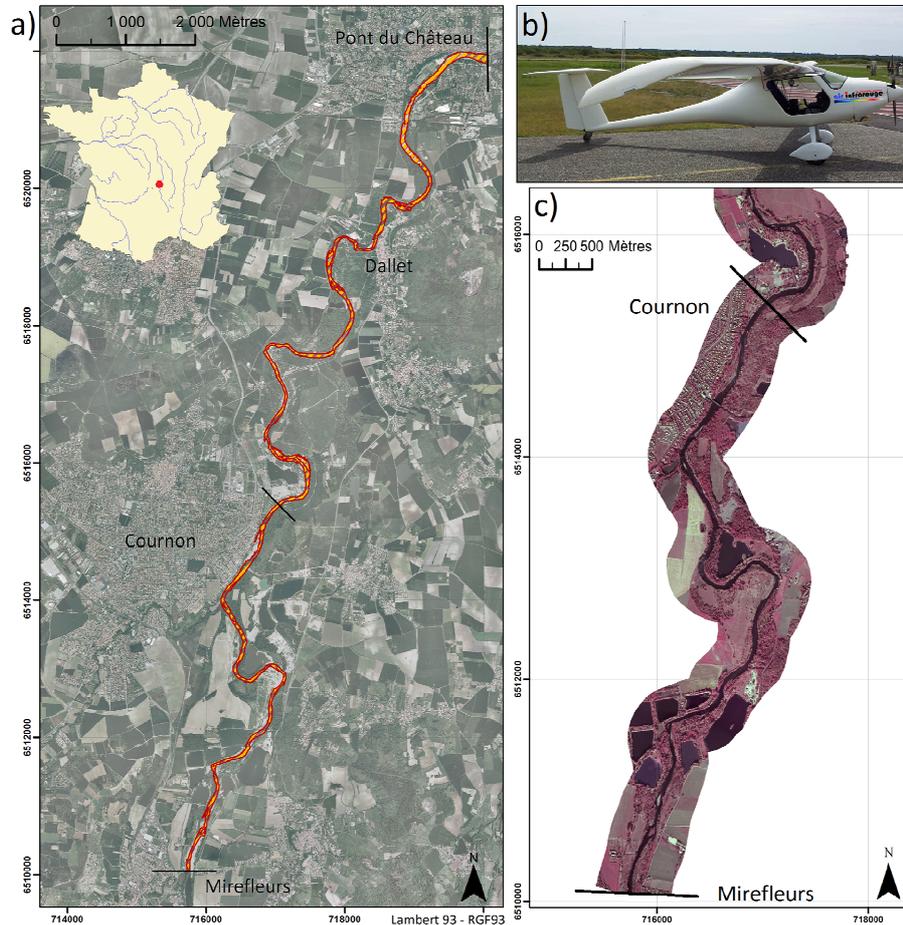


Figure 3 : a) Zone d'étude subdivisée en deux tronçons : Mirefleurs-Cournon (8km) et Cournon-Pont du Château (10km). b) Avion utilisé par la société Air Infrarouge pour le survol de la zone d'étude. c) Extrait de la mosaïque d'ortho-images IR.

#### 4. Potentiel et limitations

Les atouts et limitations de la cartographie radar K2Pi par rapport aux images aériennes RGB et IR sont récapitulés dans le Tableau 1. Lors d'une acquisition depuis un canot, la portée du radar (100 m) est en pratique fréquemment réduite par la présence de talus de berges ou de falaises. Cet inconvénient limite l'étendue de la carte radar de part et d'autre du cours d'eau. On a donc très peu d'informations sur le proche bassin versant ou sur la nature des berges.

En imagerie aérienne, les résultats obtenus dépendent largement de la période durant laquelle le survol a été effectué. Cette date est fixée notamment en fonction des conditions météorologiques (vent faible, temps ensoleillé, absence de brumes à l'aplomb de la rivière, etc.). De plus, à l'automne, la fréquentation touristique est quasi-nulle et la ripisylve est moins dense, ce qui limite le masquage de l'interface eau/sol. En revanche, les effets d'ombre portée sont plus importants (figure 4a et 4b). La carte radar, quant à elle, n'est pas affectée par les conditions d'illuminations, les effets d'ombrages ou les conditions météorologiques (figure 4c). D'autre part, l'acquisition radar se déroulant depuis une embarcation, les effets de masquage par la ripisylve sont moins importants que pour une image aérienne.

Abstraction faite des effets d'ombrage, la localisation de l'interface eau/sol est facilitée par un fort contraste sur les images IR et sur la carte radar. La distinction de cette limite peut s'avérer plus difficile sur l'image RGB selon la couleur de l'eau et celle de la berge. De plus, la « couleur » des zones immergées varie sur les images RGB et IR (présence de végétation aquatique, sèches, bancs de sables, radiers, etc.), alors que l'eau apparaît globalement plus uniforme sur la carte radar. En effet, si la surface de l'eau est quasiment lisse, l'onde incidente se réfléchit de manière spéculaire, le radar ne reçoit donc pas d'écho retour. A l'inverse, sur les zones de remous une partie de l'onde incidente est réfléchiée en direction du radar, permettant de mettre en évidence les obstacles émergés ainsi que les zones de rapides (figure 5).

*Tableau 1. Potentiel et limitations de la cartographie radar par rapport aux images aériennes RGB et IR.*

	Radar K2Pi	Photo RGB	Image IR
Mode d'acquisition	au sol	aéroporté	aéroporté
Géoréférencement des données	méthode de Fourier-Mellin	GPS + centrale inertielle	GPS + centrale inertielle
Zone visualisable	100m max. de part et d'autre du radar	fonction du nombre de lignes de vol	fonction du nombre de lignes de vol
Interprétabilité de l'image	faible (coeff. de rétro-diffusion)	forte (couleurs / textures)	forte (couleurs / textures)
Ombres portées + Influence éclaircissement	non	oui	oui
Masquage par la ripisylve	faible	oui	oui
« Couleur » de l'eau	uniforme	variable	quasi-uniforme
Localisation de rapides	oui	ambiguë	ambiguë

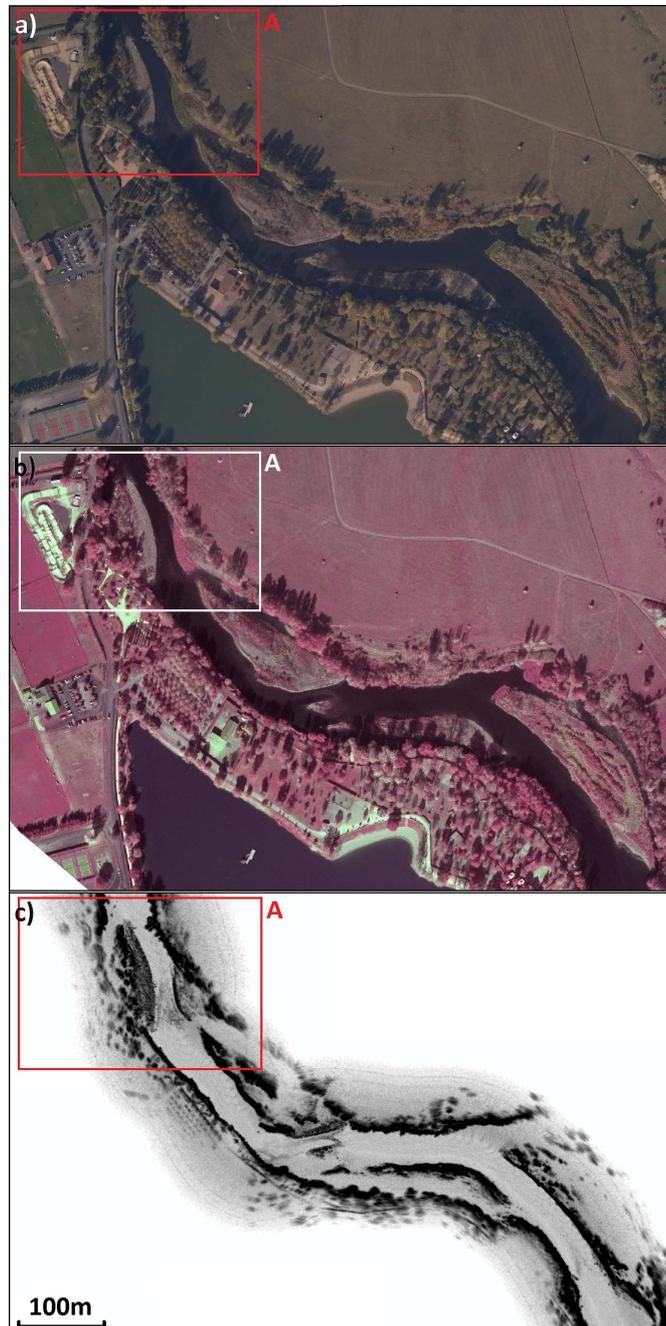


Figure 4 : Comparaison de (a) la photographie aérienne RGB, (b) l'image IR et (c) la carte radar au nord de Cournon. La zone A sera l'objet d'un zoom à la Figure 5.

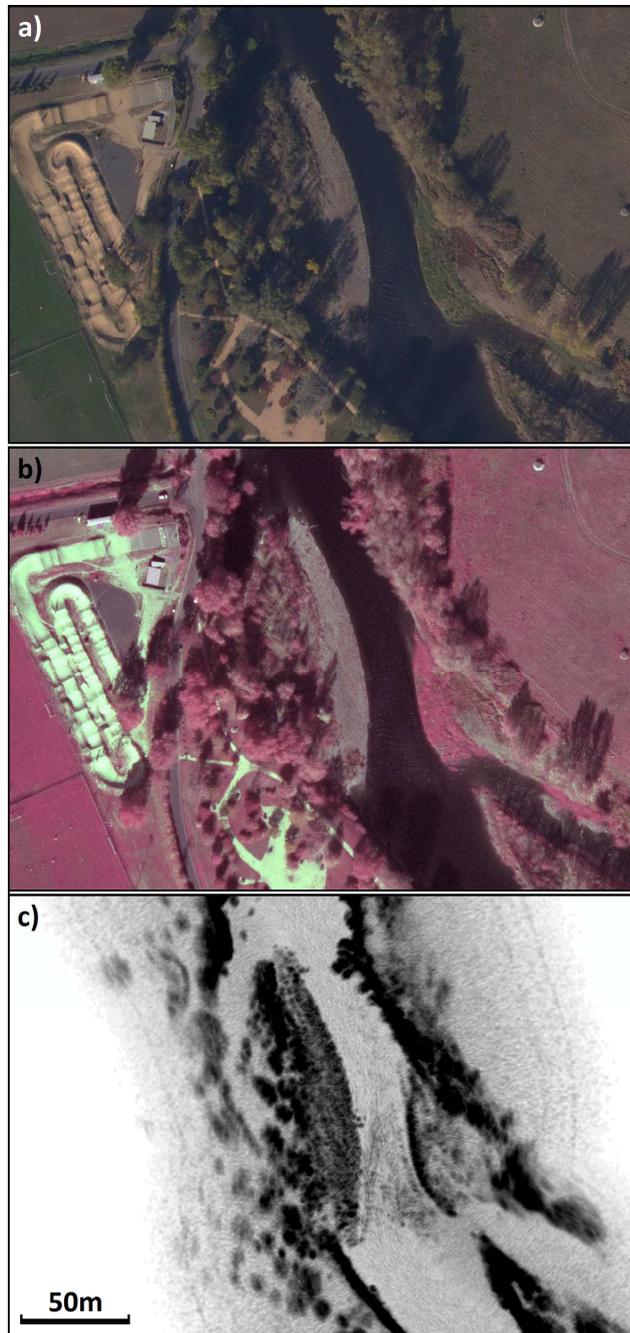


Figure 5 : Comparaison de (a) la photographie aérienne RGB, (b) l'image IR et (c) la carte radar – Zoom sur la zone A : rapide au nord de Cournon (cf. Figure 4).

## 5. Conclusion

Le radar cartographique K2Pi offre une grande souplesse d'utilisation puisque l'acquisition des données peut s'effectuer indépendamment des conditions météorologiques. Comparé aux techniques classiques de télédétection, l'acquisition n'est pas tributaire de capteurs annexes (GPS, centrale inertielle, etc.), ce qui en diminue le coût. Le radar K2Pi n'est donc pas soumis, contrairement à d'autres systèmes terrestres embarqués, tels que le LiDAR, aux phénomènes de masquages GPS, la carte étant géoréférencée a posteriori via la méthode de Fourier-Mellin.

Nous avons montré que la cartographie radar fait apparaître clairement la position de la limite eau/sol. Néanmoins, elle n'a pas vocation à se substituer aux méthodes classiques de télédétection, notamment du fait de sa couverture limitée et de sa difficulté d'interprétation. L'imagerie aérienne permet également de générer par stéréoscopie un Modèle Numérique de Terrain (MNT), ce que ne peut faire actuellement la cartographie radar. Plutôt adaptée à des études locales, comme par exemple les problématiques de localisation des bancs alluviaux (Malavoi et Bravard, 2010), elle s'avère une méthode rapide et relativement économique permettant de compléter les données de suivis aériens dont le pas de temps est parfois trop long par rapport à la dynamique de la zone.

### Remerciements:

*Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet PELICAN N°ANR-2010-EMMA-033 financé par l'Agence Nationale de la Recherche. Ce projet a été labellisé par le pôle de compétitivité ViaMeca.*

## Bibliographie

Bird S., Hogan D., Schwab J. (2010). Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 35, n°8, p. 952-970.

Casasent, D., Psaltis, D. (1976). Position, rotation, and scale invariant optical correlation. *Applied Optics*, vol. 7, n°15, p. 1795-1799.

Dissanayake G., Newman P., Durrant-Whyte H.F., Clark S., Csobra M. (2001). A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 17, n°3, p. 229-241.

Heritage G., Hetherington D. (2007). Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, n°1, p. 66-74.

Higgitt D.L., Warburton J. (1999). Applications of differential GPS in upland fluvial geomorphology. *Geomorphology*, vol. 29, n°1-2, p. 121-134.

Horn J.D., Joeckel R.M., Fielding C.R. (2012). Progressive abandonment and planform changes of the central Platte River in Nebraska, central USA, over historical timeframes. *Geomorphology*, vol. 139, p. 372-383.

Jaud M., Rouveure R., Faure P., Monod M-O. (sous presse). Methods for FMCW radar maps georeferencing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.

Jung H.C., Hamski J., Durand M., Alsdorf D., Hossain F., Lee H., Hossain A., Hasan K., Khan A.S., Hoque A. (2010). Characterization of complex fluvial systems using remote sensing of spatial and temporal water level variations in the Amazon, Congo, and Brahmaputra Rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 35, n°3, p. 294-304.

Lane S.N., Widdison P.E., Thomas R.E., Ashworth P.J., Best J.L., Lunt I.A., Sambrook Smith G.H., Simpson C.J. (2010). Quantification of braided river channel change using archival digital image analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 35, n°8, p. 971-985.

Liverman D.M., Cuesta R.M.R. (2008). Human interactions with the Earth system: people and pixels revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 33, n°9, p. 1458-1471.

Malavoi J-R., Bravard J-P. (2010). *Éléments d'hydromorphologie fluviale*, Onema (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), Vincennes.

Marcus W.A., Fonstad M.A. (2010). Remote sensing of rivers: the emergence of a subdiscipline in the river sciences. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 35, n°15, p. 1867-1872.

Monod M-O. (1995). *Frequency modulated radar: a new sensor for natural environment and mobile robotics*. Thèse en Robotique, Université Paris 6.

Notebaert B., Verstraeten G., Govers G., Poesen J. (2009). Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 34, n°2, p. 217-231.

O'Neal M.A., Pizzuto J.E. (2011). The rates and spatial patterns of annual riverbank erosion revealed through terrestrial laser-scanner surveys of the South River, Virginia. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 36, n°5, p. 695-701.

Peynot T., Scheduling S., Terho S. (2010). The Marulan Data Sets: Multi-Sensor Perception in Natural Environment With Challenging Conditions. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 29, n°13, p. 1602-1607.

Reina G., Underwood J., Brooker G., Durrant-Whyte H. (2011). Radar-based perception for autonomous outdoor vehicles. *Journal of Field Robotics*, vol. 28, n°6, p. 894-913.

Rouveure R., Marionneau A., Chanet M., Monod M-O. (2003). Méthodes dynamiques de caractérisation physique des sols agricole à l'échelle de la parcelle. *Ingénieries*, N° spécial, p. 7-21.

Rouveure R., Monod M-O., Faure P. (2008). Mapping of the environment with a high resolution ground-based radar imager, *Actes du colloque MELECON 2008*, Ajaccio, France.

SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) Allier Aval (2007). *Complément et mise à jour des connaissances sur la dynamique fluviale de l'Allier entre Vieille Brioude et le Bec d'Allier*. Diagnostic Hydratec – Asconit Consultant.

Scherer S., Rehder J., Achar S., Cover H., Chambers A., Nuske S., Singh S. (2012). River mapping from a flying robot: state estimation, river detection, and obstacle mapping. *Autonomous Robots*, vol. 33, n°1-2, p. 189-214.

Skolnik, M.I. (1980). *Introduction to Radar Systems*, 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill, New York.

Yang J., Rao D., Chung S-J., Hutchinson S. (2011). Monocular Vision based Navigation in GPS Denied Riverine Environments, *Actes du colloque AIAA Infotech at Aerospace Conference 2011*, St. Louis, USA.