

Repérer les macrophytes depuis le ciel ou sous les eaux, quel appui pour les gestionnaires ?

Repérer la distribution des macrophytes est indispensable à une bonne gestion de leur développement. Pour ce faire, la télédétection propose de nouvelles solutions techniques. Quelles sont-elles ? Quelles informations apportent-elles ? Quels avantages présentent ces techniques ?

Les macrophytes, qu'ils soient indigènes ou exotiques, patrimoniaux ou envahissants, sont des espèces quelquefois peu connues car difficiles à repérer et à identifier sous les eaux des milieux où ils se développent : cours d'eau, plans d'eau, marais, ou milieu marin. Que ce soit pour la conservation de certaines espèces (posidonie) ou la gestion de certaines invasives (jussie), il est indispensable de passer par une première phase de connaissance de leur distribution, plus communément appelée inventaire. Dans la réalisation de cet inventaire, le gestionnaire peut alors être confronté à plusieurs difficultés : contraintes d'accès dans les milieux aquatiques, importance des surfaces ou des linéaires à inventorier, temps de prospection associé, effets observateurs en lien avec l'accessibilité visuelle aléatoire de ces espèces... Or cette phase d'inventaire est déterminante pour identifier les moyens de protection ou de gestion à mettre en œuvre, ainsi que leur organisation et planification. Le suivi dans le temps, à des fins de connaissance ou de gestion, nécessite des inventaires répétitifs qui répètent les difficultés précédemment énoncées. L'outil télédétection, qu'il soit sonar, radar ou optique, peut apporter une aide précieuse aux gestionnaires. L'application à des cas concrets – sonar en milieu marin par SEMANTIC TS et télédétection optique sur cours d'eau et plans d'eau par l'Institut d'aménagement de la Vilaine (IAV) – permet de faire un tour d'horizon des possibilités offertes.

Des moyens spécifiques mis en œuvre...

Télédétection optique de la jussie dans le bassin versant de la Vilaine

Pour développer ses travaux en télédétection optique, l'IAV, établissement public gérant le bassin de la Vilaine, s'est focalisé sur une espèce cible, la jussie (*Ludwigia grandiflora ssp. hexapetala*). Cette espèce invasive

amphibie possède de fortes capacités de développement sur cours d'eau et plans d'eau, créant des nuisances avérées et imposant des modalités particulières d'inventaire et de gestion. Elle offre une base de travail intéressante par sa large distribution et la diversité de ses développements, allant d'herbiers étalés et en mélange avec d'autres espèces, jusqu'à des herbiers denses et monospécifiques. Un partenariat scientifique avec Agrocampus-Ouest Rennes a été nécessaire en raison des multiples compétences requises, télédétection et écologie notamment, pour le bon déroulement du programme.

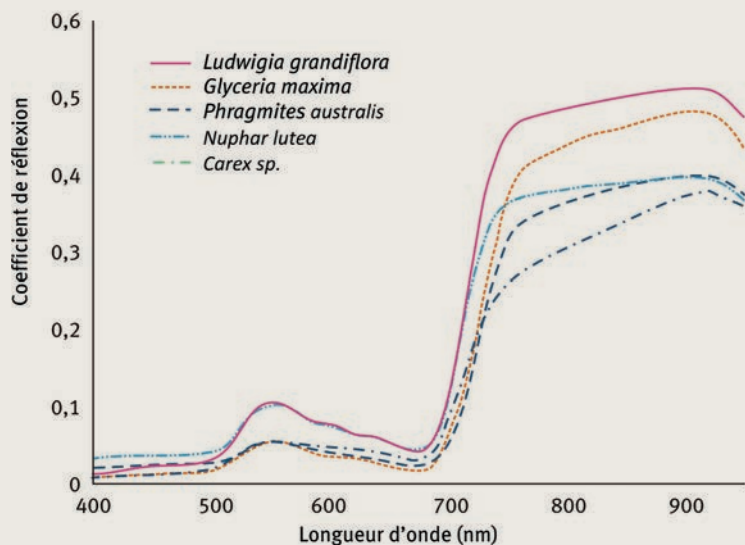
Ainsi, entre 2008 et 2013, de très nombreuses mesures radiométriques au sol ont été réalisées pour élaborer une bibliothèque spectrale de base permettant de comparer les spectres de réflectance de la jussie et d'autres espèces (figure 1). Ces mesures préliminaires étaient indispensables en raison de l'absence de données dans la littérature scientifique.

En parallèle, différentes images et données vecteurs ont été acquises et utilisées :

- images SPOT-5 multi-spectrales (vert, rouge, proche infrarouge, moyen infrarouge) à faible résolution spatiale (10 m x 10 m) à travers un programme de recherche ISIS[®] CNES mené par Agrocampus-Ouest Rennes ;
- images aéroportées avec un capteur HYSPEX VNIR 1600 à haute résolution spectrale (160 bandes, de 400 nm à 1 000 nm) et spatiale (1 m x 1 m) en intégrant un programme scientifique entre l'université de Nantes et la société ACTIMAR ;
- données vecteur Cours d'eau de la BD TOPO IGN[®] de 2010 (précision 1 m) et vérités terrain acquises entre 2008 et 2012 par GPS ou numérisées avec une forte précision.

Les logiciels utilisés pour le traitement des données sont ARCGIS[®] pour le traitement SIG (système d'information géographique), ENVI[®] pour le traitement des images et le Logiciel R pour les aspects statistiques. Les supports de base de données ORTHOPHOTO et BD TOPO IGN[®]

1 Spectres acquis pour différentes espèces et photographie d'une phase d'acquisition.



sont choisis pour leur disponibilité nationale et des données internes à l'IAV ont servi en ce qui concerne les informations de répartition de la jussie.

Un point important est la préparation des données : traitement statistique, ortho-rectification, correction radiométrique, assemblage des images, découpage par masque... Dans un deuxième temps, différentes méthodes de traitement peuvent être appliquées pour répondre aux questions posées :

- la classification par maximum de vraisemblance (MLH). Elle détermine statistiquement la probabilité d'appartenance des pixels de l'image par rapport à des classes identifiées au préalable ;
- la classification par angle spectral (SAM). Elle compare, dans un plan à n dimensions, l'angle formé entre les spectres des pixels de l'image et des spectres de références. « n » correspond au nombre de bandes de l'image ;
- le calcul d'indice de végétation NDVI. Celui-ci utilise la différence de réflectance dans le rouge et le proche infrarouge ;
- la fraction de couverture végétale (FVC). Elle calcule le pourcentage de couverture de l'eau par la végétation à partir de l'indice de végétation NDVI ;
- le calcul de variables biophysiques telles que la biomasse, l'indice foliaire (LAI), la teneur en eau, etc.

Les chaînes de traitement testées ont souvent fait l'objet de modifications par rapport à la littérature scientifique utilisée ; de nombreux tests ont permis d'aboutir progressivement aux meilleurs résultats.

Télédétection acoustique

SEMANTIC TS, bureau d'études en océanographie acoustique, utilise le son pour inférer et monitorer l'environnement aquatique : colonne d'eau (ressources halieutiques, observation d'espèces, comptage, cartographie...), végétations (posidonies, zostères, cymodocées, laminaires...), fond (topographie, nature, espèces : moules, crépidules...), sous-sol. Depuis 2006, il développe au travers de contrats de recherche et développement pour le compte de la DGA/MRIS (Délégation

générale pour l'armement – Mission pour la recherche et l'innovation scientifique) et de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, une méthode innovante de fusion multi-capteurs, exploitant les données acquises par plusieurs systèmes fonctionnant à différentes fréquences et apportant donc des informations complémentaires sur le milieu marin. En augmentant le nombre (et la nature) des capteurs, l'ensemble des informations collectées permet une meilleure compréhension du milieu exploré.

Les moyens suivants sont mis en œuvre :

- le navire océanographique SEMANTIC, dédié à la reconnaissance des fonds marins et présentant un très faible tirant d'eau ;
- un sonar latéral interféromètre GEOSWATH qui permet d'établir l'imagerie sonar latéral en même temps que la bathymétrie multifaisceaux, et/ou un sonar latéral complémentaire à plus haute fréquence, si la profondeur du milieu est supérieure à 20 m ;
- la méthode DIVA de détection et inspection verticale acoustique des végétations sous-marines (mise au point de 2003 à 2005) et la méthode CLASS de classification des sédiments marins. Ces méthodes sont des SAFLAF (systèmes acoustiques de classification des fonds).

Pour cartographier et monitorer les végétations marines (figure 2), on utilise tout d'abord une méthode de type surfacique qui permet d'obtenir une image multi-faisceaux (imagerie sonar latéral) et de contourner sur cette image des zones de réponses acoustiques homogènes. Ces zones sont ensuite « classifiées » à l'aide d'un échosondeur. Celui-ci émet du son à la verticale du navire et l'analyse du signal sonore réfléchi par le fond permet d'extraire des caractéristiques du fond qui aident à la classification.

Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un échosondeur qui enregistre et restitue le signal réfléchi. Des traitements spécifiques du signal sont ensuite effectués sur la réponse impulsionnelle afin d'en déduire de façon automatisée les caractéristiques géo-référencées de la végétation fixée (présence, absence, hauteur de la canopée) ou du sédiment superficiel (sable fin ou grossier, vase, roche...).

► La fusion des informations provenant de différents capteurs est ensuite réalisée, à savoir :

- la bathymétrie 3D renseignant sur la topographie du fond obtenue en même temps que l'imagerie sonar latéral ;
- la microrugosité bathymétrique (extraite de la bathymétrie fine, c'est-à-dire haute résolution) fournissant des informations sur la couverture végétale du fond. En dehors de la précision fournie qui permet d'obtenir la bathymétrie fine, le respect des méthodes d'acquisition (précision de la centrale-GPS + correction des profils de célérité) permet d'obtenir des cartographies de la microrugosité du fond. Celle-ci constitue un élément essentiel, car très informatif, de la méthode de fusion multi-capteurs. Elle n'est accessible que si la chaîne des précisions d'acquisition est respectée à l'échelle centimétrique. Elle découle d'un travail de mesure « propre », ne nécessite pas de contrainte en sus de celles du sonar latéral (qui fournit déjà la bathymétrie multi-faisceaux en sus) et n'a pas de coût supplémentaire ;
- l'imagerie sonar latéral, le niveau de gris renseignant sur la réflectivité et donc sur la nature de la couverture (végétale ou non) du fond ;
- l'information de présence ou d'absence de végétation fournie par la méthode DIVA et la nature des fonds sédimentaires fournie par la méthode CLASS (Chivers *et al.*, 1990).

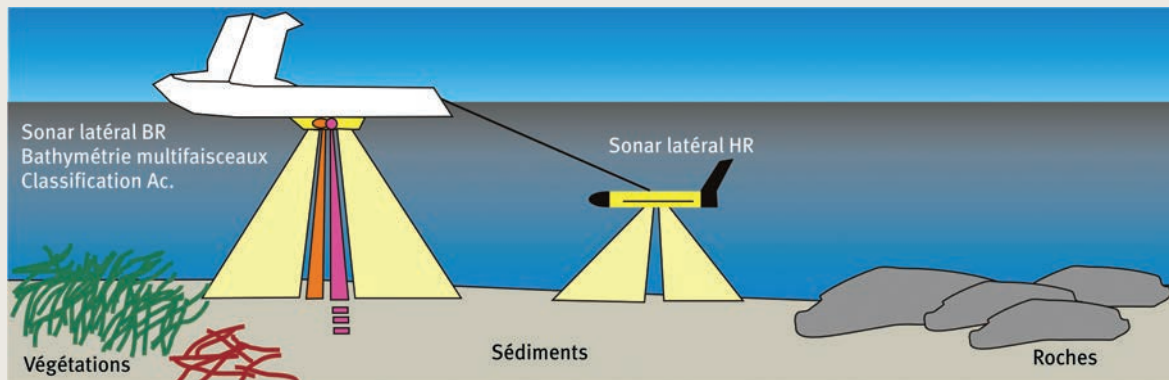
Les données en provenance de différents instruments sont très précisément géo-référencées par le même système de positionnement DGPS RTK/Centrale d'inertie (précision centimétrique) et sont synchronisées sur la même base temps. Les données étant enregistrées dans le même référentiel « position-temps », la fusion des données est extrêmement performante dans le cadre de l'amélioration de la connaissance et du suivi du milieu marin.

... Pour acquérir des informations pertinentes

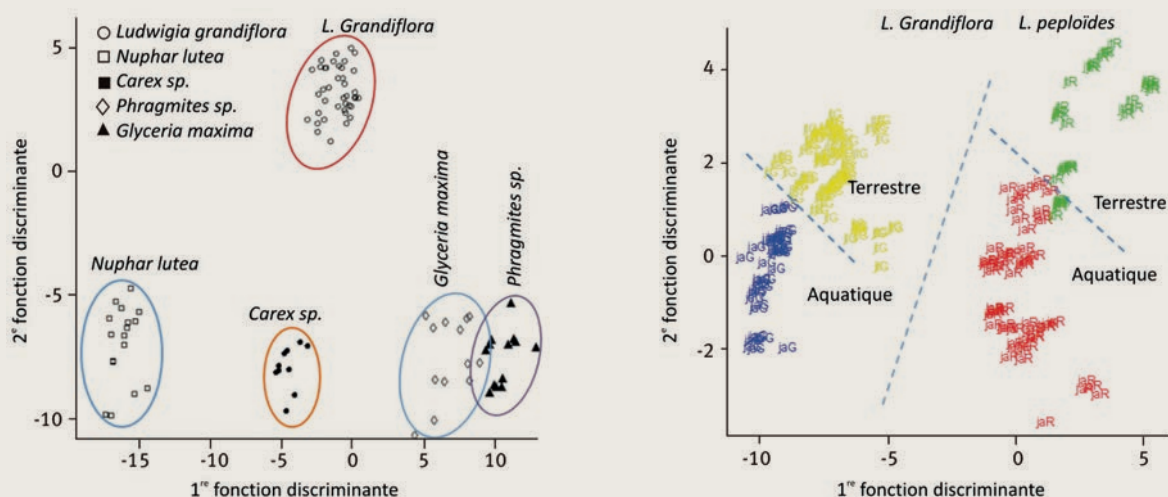
Téledétection optique

Pour l'exemple de la jussie, le premier pas a été de montrer que l'on pouvait discriminer la jussie des autres espèces. Pour cela, nous avons analysé statistiquement (analyse discriminante linéaire à deux dimensions) les spectres de réflectance mesurés pour les différentes espèces. Les résultats révèlent qu'il est possible de différencier la jussie des autres espèces, mais aussi les espèces indigènes locales entre elles (glycérie, phragmite, nénuphar, carex...) avec une discrimination optimale entre juin et août (un peu moins bien pour septembre). Il est également possible de différencier de cette manière les formes aquatiques et terrestres de jussie (figure 3).

2 Principes de la méthode de monitoring des végétations sous-marines par fusion multi-capteurs mise au point par SEMANTIC TS.



3 Deux exemples d'analyses discriminantes montrant la différenciation des espèces et la différenciation des formes de jussie.



Les meilleurs résultats de classification des images pour identifier la localisation des herbiers de jussie ont été fournis par la méthode de classification par maximum de vraisemblance (MLH), avec une identification correcte des couverts végétaux de grande taille (> 30 m x 30 m) pour SPOT-5 (Sourisseau *et al.*, 2009). Pour les images aériennes hyper-spectrales, une précision globale de 99,3 % (coefficient kappa de 0,99) est obtenue et permet de différencier précisément les couverts végétaux de petites tailles, ainsi que la ripisylve. La fiabilité des résultats est éprouvée également par comparaison des cartes de localisation produites avec les données de terrains précises disponibles ou des phases de prospections spécifiques.

À échelle fine, l'évolution de l'indice de végétation (NDVI) entre deux dates (années 2010 et 2011) offre la possibilité d'évaluer la densification des herbiers et leur propagation ou régression, apportant des éléments de connaissance dans la compétition entre espèces. À large échelle, le suivi temporel sur un site particulier (figure 4 ; Martin *et al.*, 2011) présente un historique de la colonisation et permet de comprendre les modalités de colonisation du site par la jussie.

À l'échelle du bassin hydrographique de la Vilaine (11 000 km²), le premier résultat est de disposer d'une couverture de 90 % du territoire, par l'assemblage de quatre images SPOT-5 après géo-référencement, corrections atmosphériques similaires et modalité d'assemblage permettant d'exclure le plus de zones ennuagées possibles. Plutôt que d'établir des cartes de localisation, nous avons travaillé à la réalisation de cartes d'alarme ou de probabilité de présence sur cours d'eau et plans d'eau. Ces cartes permettent de hiérarchiser les proba-

bilités de présence de la jussie. Deux méthodes ont été testées sur des images SPOT-5 masquées (masque BD HYDRO IGN® et sélection du réseau étudiable) :

- la première associe le recouvrement par les macrophytes (fraction de couverture végétale FVC) avec, pour les forts recouvrements, une classification par angle spectral de la jussie (SAM) permettant de disposer d'une carte à plusieurs niveaux de probabilité de présence de jussie. Quand on exclut la frange correspondant à la ripisylve (bordure), la précision est de 83,3 % ± 7 %, c'est-à-dire que dans plus de 80 % des cas, les pixels sont correctement identifiés ;

- la deuxième méthode testée commence par l'acquisition, dans les images SPOT-5, de plusieurs spectres de référence pour la jussie. Une classification SAM (comparaison avec les spectres de références prélevés) suivie d'une classification ISODATA (classification non supervisée) permet d'obtenir les secteurs potentiels de jussie. Par agrégat d'handicaps (comparaison des dates de prise de vue des images, localisation dans ou hors de secteurs d'eau permanente), une hiérarchisation est alors effectuée, donnant un niveau de certitude plus ou moins élevé. Sur les quatre images étudiées, 102 secteurs ont été identifiés en alarme jussie, avec une précision globale calculée de 92 %.

Enfin, pour aller plus loin sur les images hyper-spectrales, nous avons cherché à approfondir les données contenues dans chaque pixel en étudiant la relation entre le spectre du pixel et des variables biophysiques associées au pixel. Des liens forts ($R^2 > 0,9$) apparaissent entre l'indice foliaire (LAI), la teneur en eau, la matière sèche et la biomasse, et des indices calculés à partir des données spectrales : une prédiction des variables semble donc possible. ▶

4 Suivi temporel des recouvrements de jussie (noir) et de nénuphar (gris foncé) sur les surfaces en eau (gris clair) du Mortier de Glénac (Morbihan). Source : Martin *et al.* (2011).



► Télédétection acoustique

Les performances de la méthode de fusion multi-capteurs reposent d'une part sur les capacités de détection acoustique et de classification automatisée des végétations par l'échosondeur (mono-faisceau), et d'autre part sur l'intérêt de doubler cette approche linéaire par une approche surfacique, effectuée à l'aide d'une imagerie sonar latéral afin de segmenter la zone géographique étudiée (figure 5).

La méthode de fusion multi-capteurs permet de fusionner l'ensemble des informations, surfaciques pour le contourage des zones et linéaires pour la classification, comme l'illustre la figure 6.

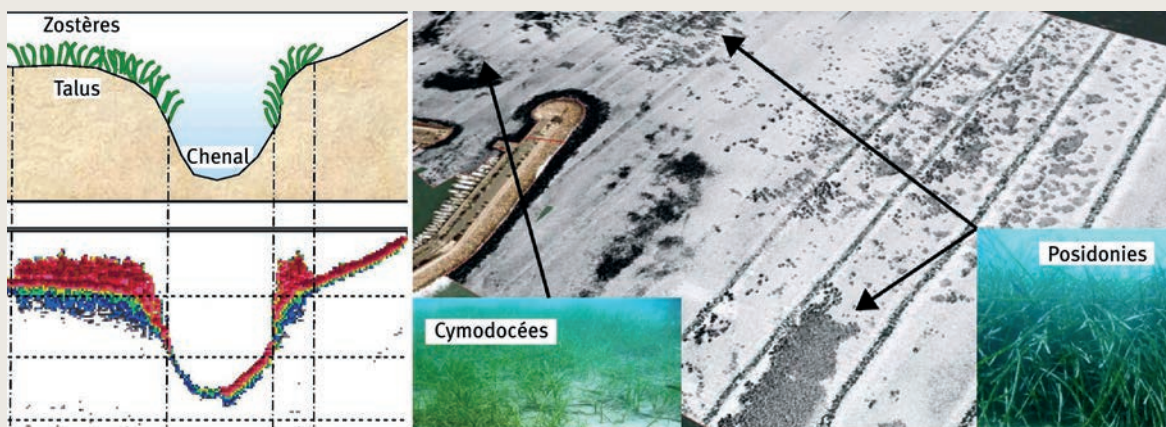
Si la méthode de fusion multi-capteurs a été développée initialement pour les posidonies, elle est à présent utilisée en standard et de façon opérationnelle sur différents types de végétations : zostères, cymodocées, laminaires... ainsi que sur différents espèces colonisant le fond : moules, crépidules...

La méthode linéaire DIVA de classification des végétations peut être aussi utilisée en méthode surfacique (réalisation d'un quadrillage de levé).

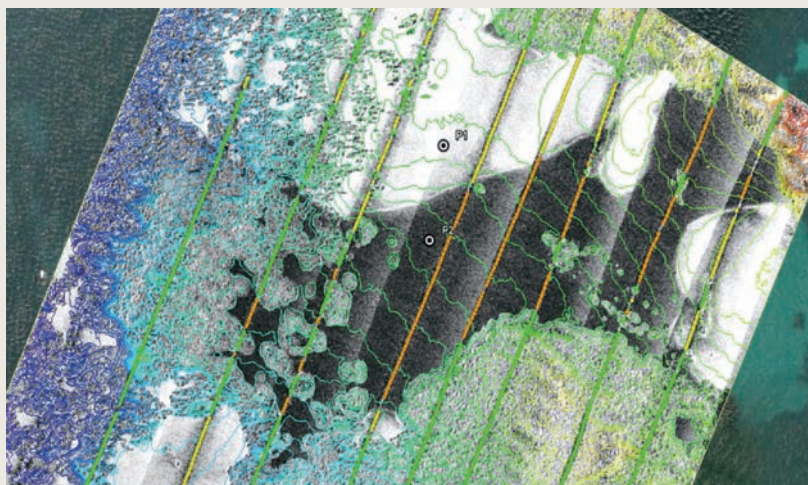
Ses plus-values sont les suivantes : elle fournit simultanément la bathymétrie, mesure environ 100 km/jour, fonctionne par toute profondeur (à très basse profondeur où les engins remorqués ne peuvent aller, par grands fonds là où il est difficile d'envoyer des plongeurs), elle est opérée simultanément avec d'autres appareillages (sonar, sondeur multi-faisceaux...), fonctionne de jour ou de nuit (indépendamment du courant, de la température ou de la turbidité de l'eau), est mise en œuvre extrêmement simplement (il suffit de naviguer ; pas de mise à l'eau : ni homme, ni engin), traitement quasi temps réel qui permet donc de se repositionner rapidement (optimisation des levés), mémorisations des informations : procédé répétitif : utile pour les suivis d'évolution et monitoring, faible coût de mise en œuvre (id navigation).

5 À gauche : détection des zostères par sondeur mono-faisceau.

À droite : cartographie des cymodocées et des posidonies à l'aide d'un sonar latéral. Taille de la zone cartographiée : 500 m par 500 m.



6 Résultat de la fusion multi-capteurs : zone de 500 m par 400 m. Superposition de la topographie du fond (1), de la microrugosité surfacique (2) et de la méthode linéaire DIVA (3) (point vert pour la végétation, jaune pour le sable fin, orange pour le sable grossier) définissant le contour de l'aire de présence des végétations sous-marines issue du sondeur multi-faisceau.



Discussion, limites et perspectives

Au travers des deux cas concrets étudiés ici (jussie et posidonie), nous avons pu faire un tour d'horizon des possibilités offertes par les outils de télédétection. De nombreux résultats opérationnels sont d'ores et déjà acquis.

La télédétection optique permet une vision haute que les gestionnaires ne peuvent acquérir sur le terrain. Quelle que soit l'échelle, les avantages sont importants : standardisation et répétitivité des méthodes, édition de cartes de présence ou d'alarme, suivis temporels, calcul de variables biophysiques... Cependant, certains aspects doivent encore être complétés, notamment par la meilleure prise en compte de la ripisylve (méthode orientée objet, par exemple), un travail sur les dimensions limites de détection (quelles résolutions spatiales des nouveaux capteurs ?), ou encore sur l'utilisation d'images prises à des dates différentes (quelle temporalité des nouveaux satellites ?).

Dans le domaine acoustique, le concept de fusion des données multi-capteurs est innovant et très puissant. Il permet d'établir des cartographies extrêmement précises des biocénoses situées sur le fond de façon aisée en diminuant les besoins d'intervention en vérité terrain (plongeur, caméra).

Les méthodes de cartographie basées sur la télédétection, aérienne ou acoustique, permettent des approches surfaciques très précises (géo-référencement précis de la donnée), très résolventes (petite taille des pixels des images) et à grand pouvoir couvrant. Le développement récent de méthodes instrumentales acoustiques et aériennes légères ainsi que la vulgarisation de l'accès et de la diffusion des images satellitaires en permettent l'utilisation à des coûts désormais accessibles au monde civil pour la gestion de territoires dulçaquicoles et marins (Noel *et al.*, 2009).

Ces méthodes offrent des perspectives dans le domaine du suivi ou du monitoring des milieux aquatiques. Présentant des hautes précisions et résolutions et surtout une forte répétitivité, elles permettent d'analyser les évolutions fines du milieu pour les corrélérer éventuellement aux impacts anthropiques du site, afin de mieux ajuster, de façon réactive et pertinente, les actions de gestion aux impacts observés.

Conclusion

Ces retours d'expériences dans le domaine de la télédétection nous démontrent les possibilités de cette technologie. Les moyens spécifiques nécessaires ainsi que les informations qu'ils peuvent dispenser sont mis en avant et en relation avec les besoins exprimés par les gestionnaires. Cependant, malgré l'aide précieuse que les outils de télédétection peuvent apporter aux gestionnaires, le constat d'une sous-utilisation reste évident. Est-ce lié à la technicité avancée ? Est-ce lié à la disponibilité ou au coût d'acquisition des images ? Ou plus probablement à une méconnaissance de ces outils et de leurs possibilités à laquelle nous espérons que cet article permettra de pallier. ■

Les auteurs

Benjamin BOTTNER

Institution d'aménagement de la Vilaine
Boulevard de Bretagne
F-56130 La Roche-Bernard – France
✉ benjamin.bottner@eptb-vilaine.fr

Claire NOEL

SEMANTIC TS
142 chemin de St Roch
F-83110 Sanary-sur-Mer – France
✉ noel@semantic-ts.fr

Remerciements

SEMANTIC TS remercie la DGA/MRIS et l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse qui soutiennent ces travaux de monitoring acoustique du milieu marin. L'Institution d'aménagement de la Vilaine remercie Agrocampus-Ouest Rennes pour le partenariat scientifique, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne pour le soutien financier et l'ensemble des stagiaires qui ont travaillé à l'obtention de ces résultats.

EN SAVOIR PLUS...

- 📄 CHIVERS, R.C., EMERSON, N., BURNS, D.R., 1990, New acoustic processing for underway surveying, *The Hydrographic Journal*, n° 56, p. 8-17.
- 📄 MARTIN, S., NICOLAS, H., BOTTNER, B., BREGER, P., HAURY, J., 2011, Mapping and monitoring of an aquatic invasive plant (*Ludwigia grandiflora*) with multispectral remote sensing in a large wetland in west of France, *in : 3rd International Symposium on Environmental Weeds and Invasive Plants*, Ascona CH, 2-7 oct. 2011.
- 📄 NOEL, C., VIALA C., COQUET, M., MARCHETTI, S., BAUER, E., EMERY, E., SAUZADE, D., KANTIN, R., COUDRAY, S., TRUT, G., 2009, Comparaison de méthodes de cartographie des végétations sous-marines côtières, *Revue Paralia*, n° 2, p 5.1-5.12, <http://www.paralia.fr/revue/rpa0905.pdf>
- 📄 SOURISSEAU, A., HAURY, J., BOTTNER, B., AMRI, R., NICOLAS, H., 2009, Monitoring Invasive *Ludwigia grandiflora* in the Vilaine Basin using multispectral remote sensing, *in : Aquatic Weeds 2009, Proceedings of the 12th European Weed Research Society Symposium*, 24-28 août, Jyväskylä, Finland, 106 p.
- 📄 VIALA, C., NOEL, C., COQUET, M., ZERR, B., LELONG, P., BONNEFONT, J.-L., 2007, Pertinence de la méthode DIVA pour l'interprétation des mosaïques sonar latéral, *in : Third Mediterranean Symposium on Marine Vegetation*, Marseille.