

Cartographie bio-sédimentaire des estrans par imagerie multi-capteurs et multi-dates

Aurélie Dehouck¹, Nicolas Baghdadi², Aurélie Garcia³, Cécile Curti¹, Gilles Trut⁴, Virginie Lafon¹

¹ GEO-Transfert, UMR 5805 EPOC, Avenue des facultés, 33405 Talence cedex

² IRSTEA, TETIS, 350 rue Jean-François Breton, 34000 Montpellier, France

³ Museum National d'Histoire Naturelle, 8 Rue du Port Blanc, 35800 Dinard

⁴ IFREMER, quai du commandant Silhouette, 33120 Arcachon

Résumé

L'imagerie satellitaire optique dispose d'un bon potentiel de cartographie des espaces naturels littoraux de par l'emprise spatiale, la haute résolution et le recul temporel qu'offrent les 25 ans d'archives image SPOT. Cette communication explore le potentiel des images SAR (Synthetic Aperture Radar) Haute Résolution (HR) pour la cartographie des habitats intertidaux en complément de l'imagerie optique traditionnelle. Dans un premier temps, le potentiel de discrimination des habitats du Bassin d'Arcachon est brièvement évalué à partir d'une série temporelle constituée de 15 images TerraSAR-X et de 2 images ALOS-PALSAR acquises entre 2007 et 2011. L'étude a permis de caractériser les signatures radar de la couverture sédimentaire intertidale, des herbiers de zostères, des bancs d'huitres et de la végétation du schorre. Les bancs d'huîtres, les structures ostréicoles et le schorre ont des signatures radar très particulières (forte brillance) ce qui permet de les distinguer de la slikke, qu'elle soit végétalisée ou non, et de lever la confusion issue de l'analyse d'une image optique seule. Dans un second temps, l'article développe les résultats issus de la classification des données optiques et radar concaténées sur le secteur de La Hume (Gujan-Mestras). Les résultats les plus satisfaisants sont obtenus avec une classification supervisée de Mahalanobis basée sur les 4 bandes SPOT d'une image estivale, la bande XS2 d'une image SPOT d'hiver et une bande radar HH TerraSAR-X. Cette approche cartographique combinant données optiques-radar multi-temporelles permet de lever les principales difficultés ayant motivé cette étude. Enfin, ces travaux sont mis en perspective avec la cartographie récente de l'herbier de *Zostera noltii* du Bassin d'Arcachon réalisée à partir de l'imagerie satellite.

Introduction

Le Bassin d'Arcachon, lagune macrotidale du sud-ouest de la côte Atlantique, site Natura 2000 et futur parc marin, est un site de démonstration privilégié où les écosystèmes doivent s'adapter au changement du climat et aux usages anthropiques. Dès lors, la télédétection spatiale est un outil efficace et bon-marché pour cartographier les habitats naturels du Bassin et suivre leurs évolutions spatio-temporelles. Des travaux précédents ont démontré le potentiel des images de télédétection spatiale haute résolution pour la cartographie des faciès bio-sédimentaires du Bassin (Lafon *et al.*, 2008) et des zones naturelles littorales de par le monde. Cependant, l'imagerie multispectrale optique de résolution décimétrique (ex : SPOT et Formosat) peine à détecter correctement les bancs d'huitres, les herbiers de zostères peu denses et à discriminer herbiers denses de zostères et végétation du schorre (Lafon *et al.*, 2008). Ces lacunes peuvent en partie être levées en incorporant des données radar HR qui ont un potentiel intéressant d'imagerie des zones intertidales (Van der Wal *et al.*, 2005; Gade *et al.*, 2008). Cette communication vise à présenter le potentiel des images radar TerraSAR-X et ALOS-PALSAR pour la cartographie des habitats naturels intertidaux en complément de l'imagerie optique traditionnelle (programme SYNIHAL).

1. Données et méthodes

Les travaux du programme SYNIHAL s'appuient sur la base de données KALIDEOS (CNES, <http://www.kalideos.cnes.fr>) qui rassemble plus de 150 images satellite Haute Résolution optiques et radar du Bassin d'Arcachon (archive de 25 ans). Une série de 15 images radar TerraSAR-X (bande X, longueur d'onde 3 cm, résolution 1 à 2.75 m) et de 2 images ALOS-PALSAR (bande L, 24 cm, résolution 12.5 m) acquises dans des configurations instrumentales variées (polarisation, incidence) ont été examinées (Dehouck *et al.*, 2012a). Toutes les images radar acquises correspondent à des niveaux d'eau de basse mer. L'ensemble du jeu de données inclut également des images optiques de type SPOT-5 (10 m) et FORMOSAT-2 (8 m). Les images TerraSAR-X et ALOS-PALSAR sont géoréférencées et calibrées en coefficient de rétrodiffusion radar (σ_0 en dB). Les images optiques sont livrées en niveau 3 par le CNES, géoréférencées et calibrées en réflectance de surface.

Les données de terrain utiles à l'analyse des images, à la calibration et à la validation de la méthode de cartographie sont de plusieurs ordres. Des missions d'observation synchrones à l'acquisition des images TerraSAR-X ont été réalisées pour décrire l'état des surfaces intertidales et en interpréter leur signature radar. Ces observations sont géolocalisées avec un DGPS Trimble GEO-XT de précision sub-métrique. Des missions hyperspectrales ont également été réalisées en 2010 et 2011 environ tous les 2 mois pour acquérir une librairie spectrale permettant de caractériser la signature optique des faciès bio-sédimentaires et leur variabilité saisonnière (Dehouck *et al.*, 2012b). Ces mesures sont réalisées sur quelques sites de référence à l'aide de deux spectro-radiomètres TRIOS RAMSES qui permettent de restituer pour chaque type de surface, sa réflectance de télédétection.

La stratégie de cartographie consiste à exploiter des images satellite optiques et radar en synergie. Une méthode simple de classification supervisée a été utilisée à partir d'une image concaténée composée de canaux optiques (bandes SPOT-5) et de canaux radar (bandes TerraSAR-X). L'image TerraSAR-X a été rééchantillonnée à une résolution de 10 m équivalente à celle de l'image SPOT-5. Trois algorithmes supervisés ont été testés (minimum de distance, Mahalanobis et maximum de vraisemblance) entraînés par des parcelles (blocs de 3x3 pixels) de faciès connu. Il a été nécessaire de définir 21 classes d'entraînement pour représenter la diversité des substrats et obtenir un résultat cartographique fidèle à la réalité terrain.

2. Résultats

2.1. Signature optique des habitats

Les données radiométriques mesurées sur le terrain confirment la bonne séparabilité spectrale entre les sols couverts de végétation et les sols nus, exceptés pour les plus faibles taux de recouvrement de l'herbier dont la signature optique s'apparente à celle d'un sol nu. Elles confirment également qu'il est difficile de dissocier les spartines et les herbiers présentant un fort taux de recouvrement. Et comme l'hiver, les taux de recouvrement de l'herbier sont généralement faibles à l'échelle du Bassin, on peut exploiter dans une approche multi-temporelle la variabilité saisonnière de l'herbier en la confrontant à la pérennité des spartines pour les discriminer à l'aide par une approche multi-temporelle.

2.2. Signature SAR des habitats

L'analyse des données SAR indique un fort potentiel des images radar ALOS-PALSAR et TerraSAR-X pour combler les lacunes issues de l'utilisation d'images optiques seules pour la cartographie des habitats intertidaux. En premier lieu, les bancs d'huîtres sont facilement discriminables des autres substrats, nus ou végétalisés par les zostères, aussi bien en bande X qu'en bande L (forte brillance des bancs d'huîtres sur la Figure 1). La différence radiométrique est de 4 à 8 dB en polarisation HH (>2 dB qui est le seuil de séparabilité entre

2 faciès). Ceci s'explique par la rugosité centimétrique des coquilles d'huitres responsable d'une réflexion diffuse et conduisant à une forte rétrodiffusion radar en bande X ($\sigma_{0,HH} \approx -7$ dB à -9 dB) ainsi qu'en bande L ($\sigma_{0,HH} = -12$ dB). Les images radar apportent aussi une contribution majeure pour améliorer la séparabilité entre l'herbier de zostères et le schorre. La différence est d'environ 4 dB en bande L et varie entre 2 et 7 dB en bande X. Le schorre est caractérisé par une très forte rétrodiffusion radar du fait de mécanismes de diffusion double et multiple (interactions sol-plante et eau-plante) et par l'humidité des sols du fait de l'inondation lors de la pleine mer précédente. D'une manière générale, il existe de fortes variations de la réponse radar associées à une variabilité spatio-temporelle des propriétés de surface des sédiments (présence/disparition de figures sédimentaires, conditions d'humidité du sol et d'inondation par la marée variables) ainsi qu'à des facteurs instrumentaux (σ_0 décroît avec un angle d'incidence croissant, σ_0 des rides sableuses influencé par l'angle de visée du satellite).

2.3. Classification optique-SAR

Les bandes spectrales d'une image satellite optique d'été (SPOT-5 à 10 m du 28/08/11), d'une image radar (TerraSAR-X à 2.75 m du 7/09/11) et d'une image SPOT-5 d'hiver (1/02/10) sont concaténées pour former une image à 7 bandes (XS1_{été}, XS2_{été}, XS3_{été}, XS4_{été}, XS2_{hiver}, HH, VV) à 10 m de résolution. Parmi les différents tests de classification, la méthode de Mahalanobis donne les résultats les plus satisfaisants. La figure 2b montre les résultats de la classification de l'image SPOT du 28/8/11. On note une sur-détection des bancs d'huitres (grandes étendues blanches débordant des contours noirs obtenus par photo-interprétation) ainsi que de nombreux patches de végétation du schorre (rose/violet) au sein de l'herbier (vert), et réciproquement. L'intégration d'une bande radar permet de résoudre les problèmes de sur-détection des huitres et de réduire la confusion entre l'herbier et le schorre (Fig. 2c). En incorporant la bande rouge SPOT-5 d'hiver (XS2_{hiver}), la confusion herbier/schorre est presque totalement levée (Fig. 2d).

3. Discussion - Perspectives

Ces résultats sont très encourageants et indiquent que l'utilisation combinée d'images multi-temporelles optiques et radar permet de résoudre les principales difficultés issues de l'utilisation d'une image optique seule. Cette approche de classification simple sera testée dans le courant de l'année 2013 sur 3 nouvelles lagunes de la façade atlantique française : baie de Marennes-Oléron (collaboration Université de La Rochelle), baie de Bourgneuf (coll. Université de Nantes) et Golfe du Morbihan (coll. Ifremer). En parallèle, d'autres méthodes de fusion de données optiques et radar vont prochainement être testées pour exploiter au maximum la synergie entre les deux types de données. Pour améliorer la cartographie thématique de la lagune et la détection des faciès qui évoluent très rapidement (couvert de macro-algues), des espoirs sont fondés sur les méthodes de classification multi-temporelle exploitant une série (~mensuelle, à minima saisonnière) d'images optiques. Cette approche de classification est exploitée avec succès en agriculture pour cartographier la rotation des cultures.

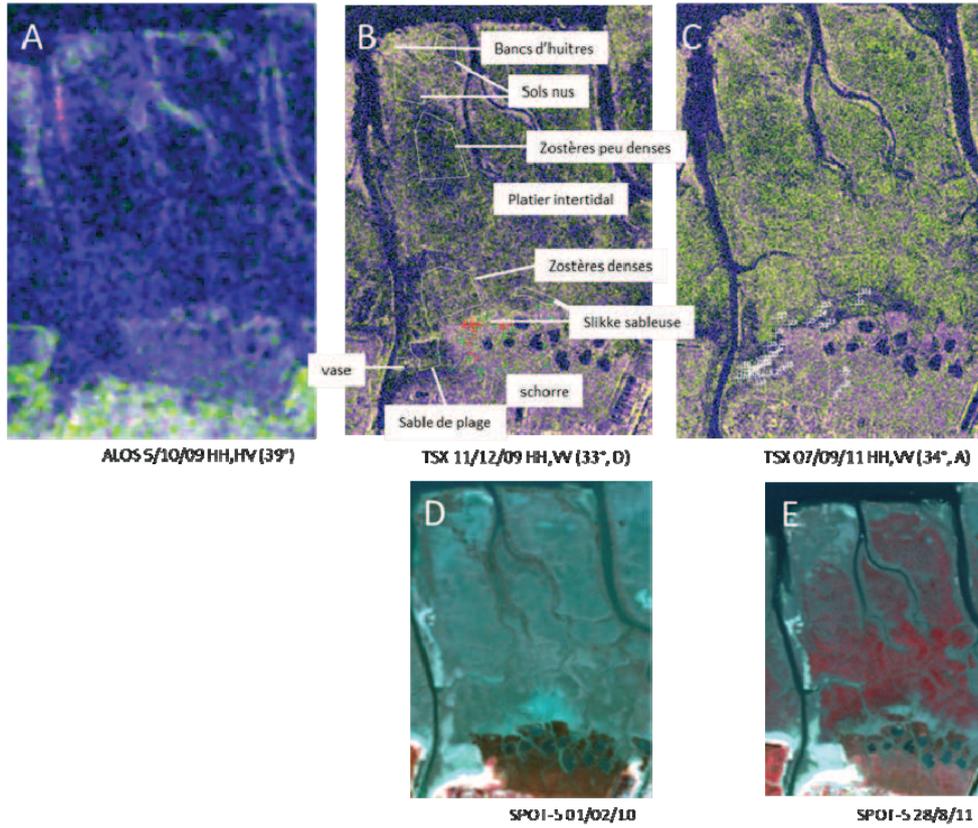


Fig.1 Compositions colorées issues des images radar ALOS-PALSAR polarisations HH, HV, HH-HV (A), TerraSAR-X polarisations HH, VV, HH-VV (B, C) et optiques SPOT-5 (D, E) du site de La Hume (Gujan-Mestras).

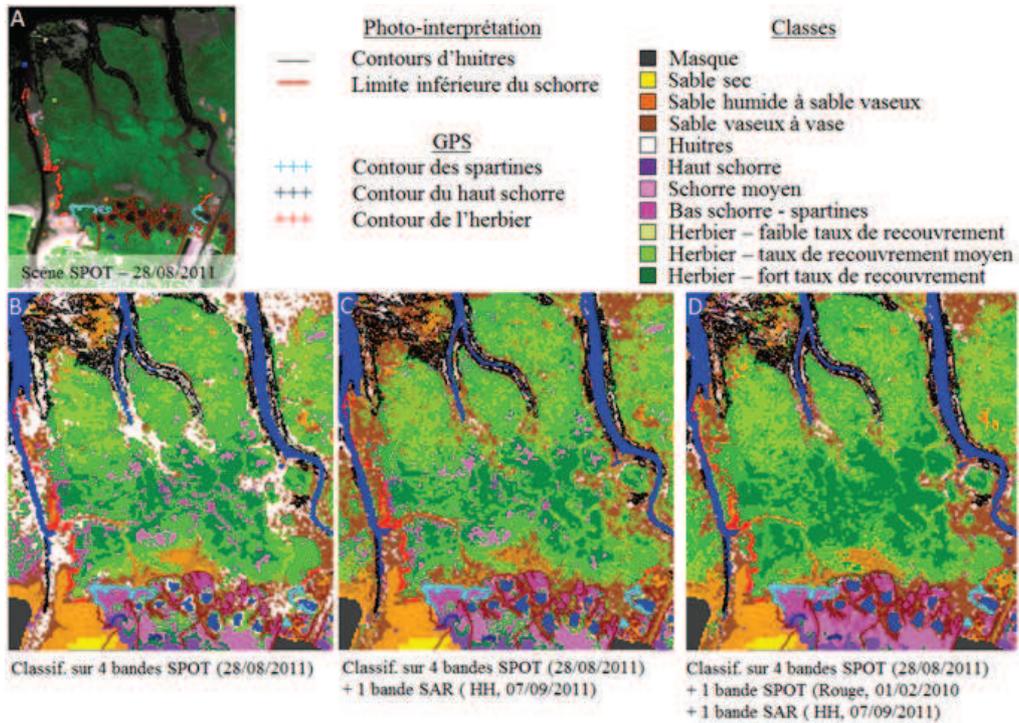


Fig.2 Stratégie de cartographie multi-temporelle multi-source des faciès bio-sédimentaires intertidaux (A) image optique SPOT-5 d'Août 2011 et vérité terrain (B) classification sur les 4 bandes SPOT, (C) sur les 4 bandes SPOT d'été + 1 bande TerraSAR-X HH de Septembre 2011, (D) 4 bandes SPOT + TSX HH + 1 bande XS2 SPOT-5 d'hiver.

La carte bio-sédimentaire ainsi réalisée peut servir de base à une analyse de caractéristiques biogéochimiques précises, comme par exemple l'emprise maximale de l'herbier à *Zostera noltii* pour trois classes de taux de recouvrement, qui sont des paramètres du suivi DCE pour les environnements lagunaires macrotidaux. Une étude portant sur la validation de la cartographie de ces indicateurs a été menée en 2012 (Figure 3). Un indice de végétation a été appliqué à la zone d'herbier, construit à partir de contours GPS de terrain enserrant des zones d'herbier homogènes. Puis la procédure de cartographie et la carte des zostères ont été validées à l'aide de 300 relevés GPS, indépendants des contours exploités pour caler la méthode. La précision globale de la carte satellite est de 70%. En revanche, les utilisateurs de la carte sont engagés à analyser prudemment la classe 0-25% car les très petits taux de recouvrement sont mal discernés, ou parfois confondus avec des biofilms. La carte spatiale doit être finalement réinterprétée à dire d'expert afin de limiter le nombre de polygones générés par le traitement (exclusion de très petits polygones, fusion de polygones proches) et d'exclure, sur la base des observations de terrain les polygones représentant des algues.

Ainsi, en 2012, la superficie globale occupée par des herbiers est de 42.5 km², soit près de 7% de moins que la superficie occupée en 2007. Suivant la tendance observée depuis 2005, les surfaces occupées par des herbiers à faible taux de recouvrement augmentent au détriment des herbiers présentant un taux de recouvrement fort. Fait nouveau, la surface des herbiers dont le taux de recouvrement est moyen décline également significativement depuis 2007. L'est du bassin continue d'être particulièrement touché par ce recul. Si cette approche demande à être améliorée, elle montre déjà un excellent potentiel.

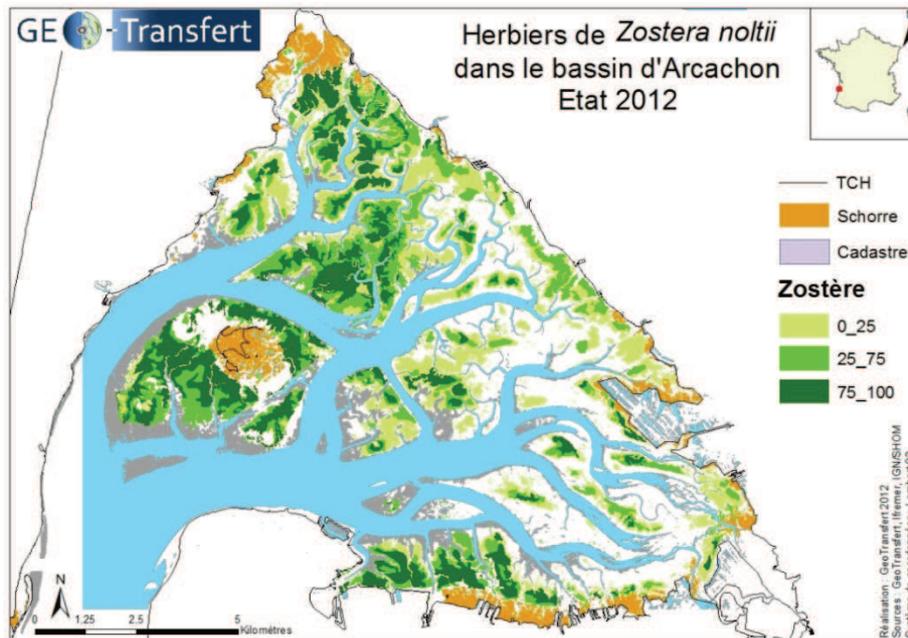


Fig.3 Cartographie de l'herbier à *Zostera noltii* du Bassin d'Arcachon – état 2012. Les trois classes DCE de recouvrement de l'herbier sont figurées en vert : 0-25% (vert clair), 25-75% (vert fluo), 75-100% (vert foncé).

Remerciements

Les travaux de recherche sont financés par le CNES dans le cadre du programme SYNIHAL (TOSCA 2011 et 2013). La cartographie de l'état en 2012 de l'herbier à *Zostera noltii* du Bassin d'Arcachon est financée par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

Références bibliographiques

- Dehouck A., Lafon V., Baghdadi N., Marieu V. (2012). Use of optical and radar data in synergy for mapping intertidal flats and coastal salt-marshes (Arcachon lagoon, France), IEEE Proceedings of IGARSS 2012, 2853-2856.
- Dehouck A., Lafon V., Lubac B., Kervella S., Bru D., Schmeltz M., Roubache A. (2012). Hyperspectral field database in support to coastal wetland mapping, IEEE Proceedings of IGARSS 2012, 2649-2652.
- Gade M., Alpers W., Melsheimer C., Tanck G. (2008). Classification of sediments on exposed tidal flats in the German Bight using multi-frequency radar data. Remote Sensing of Environment, 112, 1603-1613.
- Lafon V., Marieu V., Butel R., Dehouck A., Froidefond J.M., Trut G. (2008). Cartographie des faciès bio-sédimentaires du bassin d'Arcachon par imagerie Formosat-2. Actes des 10^è Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil, Sophia-Antipolis, 563-572.
- Van der Wal D., Herman P., Wielemaker-van den Dool A. (2005). Characterisation of surface roughness and sediment texture of intertidal flats using ERS SAR imagery. Remote Sensing of Environment, 98, 96-109.