

SURVEILLANCE DE LA MORPHOLOGIE SOUS-MARINE PAR TELEDETECTION SPATIALE SPOT : APPLICATION AUX PASSES DU BASSIN D'ARCACHON (FRANCE)

Jean-Marie Froidefond¹, Virginie Lafon²

1 : Université Bordeaux-1 - Laboratoire EPOC
Av. des Facultés 33405 Talence cedex
Tel : + (33) 5 40 00 88 67 - Fax : + (33) 5 56 84 08 48
jm.froidefond@epoc.u-bordeaux1.fr

2 : GEO-Transfert - Laboratoire EPOC
Av. des Facultés 33405 Talence Cedex
Tel : + (33) 5 40 00 88 67 - Fax : + (33) 5 56 84 08 48
v.lafon@epoc.u-bordeaux1.fr

Résumé

Le long des côtes, les fonds sableux se déplacent au gré des houles et des courants. Or, les sondages sont irréalisables sur les hauts fonds comme dans les passes d'entrée du Bassin d'Arcachon, qui sont particulièrement dangereuses pour la navigation. Une méthode basée sur l'exploitation de scènes satellites à haute résolution spatiale (Spot) a été mise au point dans le but de reconstruire la morphologie des fonds sous-marins à partir de quelques profils de sondage acoustique. Une corrélation est établie entre les profondeurs et les luminances Spot. Ensuite, si le fond a une couleur constante et si la turbidité est homogène sur la surface à cartographier, la relation est appliquée à l'ensemble des pixels Spot. Les profondeurs sont déduites des luminances de la bande XS1 (500-590 nm). La bande moyen infrarouge (XS4) permet de tracer la limite d'immersion dont le niveau est connu d'après les courbes de marée. Cette méthode permet de fournir une carte de la morphologie sous-marine. La précision absolue est de 0,2 à 0,4 m à proximité du niveau d'émergence et de 1 m au-delà. La profondeur maximale atteinte dépend de la turbidité. Sur les Passes du Bassin d'Arcachon, la "visibilité" Spot XS1 est souvent de 5 à 6 m mais elle peut être de 1 m seulement en hiver et dépasser 15 m en été. Cette surveillance est complétée par des cartes montrant les déplacements des bancs et des passes pour aider la navigation et le balisage des chenaux.

Mots-clés : télédétection, bathymétrie, morphologie, hauts fonds, sable, Spot, luminance.

Abstract

Along sandy coasts, the bottom morphology changes as a function of waves and currents forcing parameters. The sandy shoals located at the entrance of the Arcachon Bay are particularly mobile. Their constantly changing position drastically affects the coastal shipping security. Since hydrographic surveys are impracticable over these shoals, an alternative method based on high resolution satellite data (Spot) is used to map the sub-marine morphology. A correlation is established between measured depths and Spot radiances. Then, if the water turbidity and the bottom albedo are homogeneous, this relation is applied to all Spot pixels in order to derive the depth. Spot XS1 waveband (500-590 nm) is used because the penetration of light into water is maximum at these wavelengths. The mid-infrared Spot channel (XS4) enables to extract the sediment-water interface. Its depth is deduced from a tidal model. This approach allows us to provide a morphological map of the submarine shapes. The accuracy of the computed depth varies from about 0,2 to 0,4 m in the vicinity of the water surface to 1 m beyond. The maximum depth reached depends on the water turbidity. In the inlet of the lagoon of Arcachon, Spot XS1 "visibility" is about 5 to 6 m on average, but the light penetration depth at these wavelengths can be reduced to 1 m after a storm (high turbidity), and, on the contrary, may reach 15 m of depth during the summer after long calm weather periods (low turbidity). This yearly monitoring is completed by a diachronic analysis of the displacements of the channels and sandbanks in order to improve navigation safety and facilitate the channel buoying.

Keywords: remote sensing, bathymetry, morphology, shoals, sand, Spot, radiance.

1. Introduction

Les Passes du Bassin d'Arcachon, vues par le satellite Spot 5 (**Figure 1**), sont soumises à l'action des houles et

des courants de marée. Elles sont très dangereuses car les bancs de sable se déplacent sans cesse. Elles sont impraticables aux navires par forte houle du fait du déferlement de celle-ci sur les bancs de sable. Ces difficultés ont suscité des travaux pour connaître les

mécanismes de déplacement des bancs et des chenaux. Citons par exemple les recherches en hydrodynamique (Orgeron, 1974 ; Gassiat, 1989 ; Cayocca, 1996), en sédimentologie et géomorphologie (Manaud, 1971, Bouchet, 1974, Pellegrin et al., 1994, Michel, 1997) dont celles basées sur l'utilisation de la télédétection (Bricout et Froidefond, 1993, Lafon, 1999 ; Lafon et al., 2000).

À cause des risques pour la navigation, une surveillance annuelle des Passes par télédétection spatiale a été mise en place depuis 1999 par le Laboratoire EPOC (Froidefond, 2009) grâce au Syndicat Mixte du Bassin d'Arcachon. Elle repose sur les données de sondages bathymétriques réalisés chaque année par le SMNG (Service Maritime et de Navigation de la Gironde) et le SIBA (Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon). Des missions de terrain ont été réalisées avec des spectroradiomètres pour vérifier les données satellites.

Cette surveillance est effectuée à partir de la cartographie Spot des zones intertidales et subtidales des passes et des cartes comparatives quantifiant le déplacement des bancs de sable. Depuis 2006, une douzaine d'images satellites Spot sont acquises annuellement par le CNES dans le cadre du programme

Kalideos Littoral sur le Bassin d'Arcachon. Ce sont ces images qui ont été exploitées.

2. Prise de vue Spot 5 du 24 juin 2009

La télédétection spatiale à haute résolution présente des avantages par rapport à la télédétection aéroportée. Par exemple pour les satellites Spot, l'emprise de 60 x 60 km permet de couvrir l'ensemble du Bassin d'Arcachon et les régions environnantes. Ainsi, une seule correction géométrique est nécessaire contrairement aux photographies aériennes qui nécessitent de corriger les clichés un à un puis de les assembler.

De plus, pour cartographier les fonds sous-marins dans les passes du Bassin d'Arcachon, il est indispensable de disposer d'images avec des luminances dans le proche infrarouge et le visible. En effet, le proche infrarouge est utilisé pour situer avec précision la limite d'immersion des bancs sableux au moment du passage du satellite, tandis que le visible permet d'établir une corrélation entre les profondeurs et les luminances exprimées en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$.

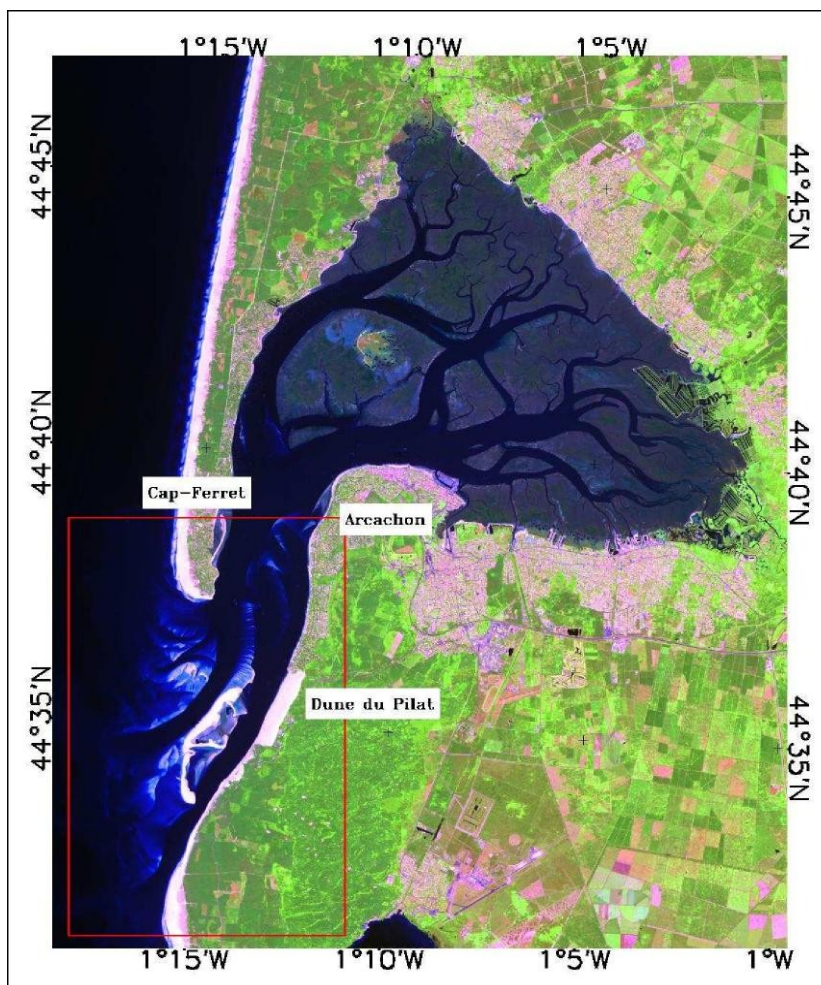


Figure 1 : Scène Spot 5 du 24 juin 2009 (© CNES) du Bassin d'Arcachon. Les passes (l'embouchure) se situent entre la flèche du Cap-Ferret et le littoral de la Grande Dune du Pilat. Le tracé du rectangle centré sur la zone des Passes représente l'emprise de la Figure 2.

La méthodologie est détaillée en s'appuyant sur la scène Spot 5 enregistrée le 24 juin 2009 à 10 h 43 TU dans le cadre du programme Kalideos Littoral du CNES (<http://kalideos.cnes.fr>). Cette scène satellite a été prise à 820 km d'altitude environ avec un angle de vue de 23,5° par rapport à la verticale. Elle est constituée de 4 images (pixels de 10 m) prises dans 4 bandes spectrales dans les domaines visible, proche et moyen infrarouge :

- La bande visible XS1 : 0,50 à 0,59 μm (jaune) ;
- La bande visible XS2 : 0,61 à 0,68 μm (rouge) ;
- La bande proche infrarouge XS3 : 0,78 à 0,89 μm ;
- La bande infrarouge MIR XS4 : 1,58 à 1,75 μm.

L'image couleur (Rouge, Vert, Bleu) du Bassin d'Arcachon et des passes (**Figure 1**) a été composée en plaçant l'image XS4 dans le plan rouge, l'image XS3 dans le plan vert et l'image XS1 dans le plan bleu.

Pour la bathymétrie, nous utilisons les données de la bande XS1, car c'est dans cette bande que les fonds

sous-marins apparaissent le mieux (l'absorption de l'eau est plus faible dans les courtes longueurs d'onde visibles). L'image XS1 des passes est représentée en noir et blanc sur la **Figure 2**. À chaque pixel de l'image est associé un nombre (Compte Numérique, CN) compris entre 0 et 255.

La luminance L (intensité lumineuse par unité de surface rétrodiffusée par le sol ou l'eau dans une direction particulière) d'une bande spectrale donnée est égale au compte numérique CN divisé par le produit du gain G par le facteur de calibration absolue K fourni dans l'entête de la scène satellite :

$$L (W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}) = \frac{CN}{(G.K)} \quad (1)$$

La **Figure 2** est une composition monochrome où les pixels sombres sont associés aux comptes numériques de très faible valeur (faible luminance) et les pixels clairs aux fortes valeurs (forte luminance).

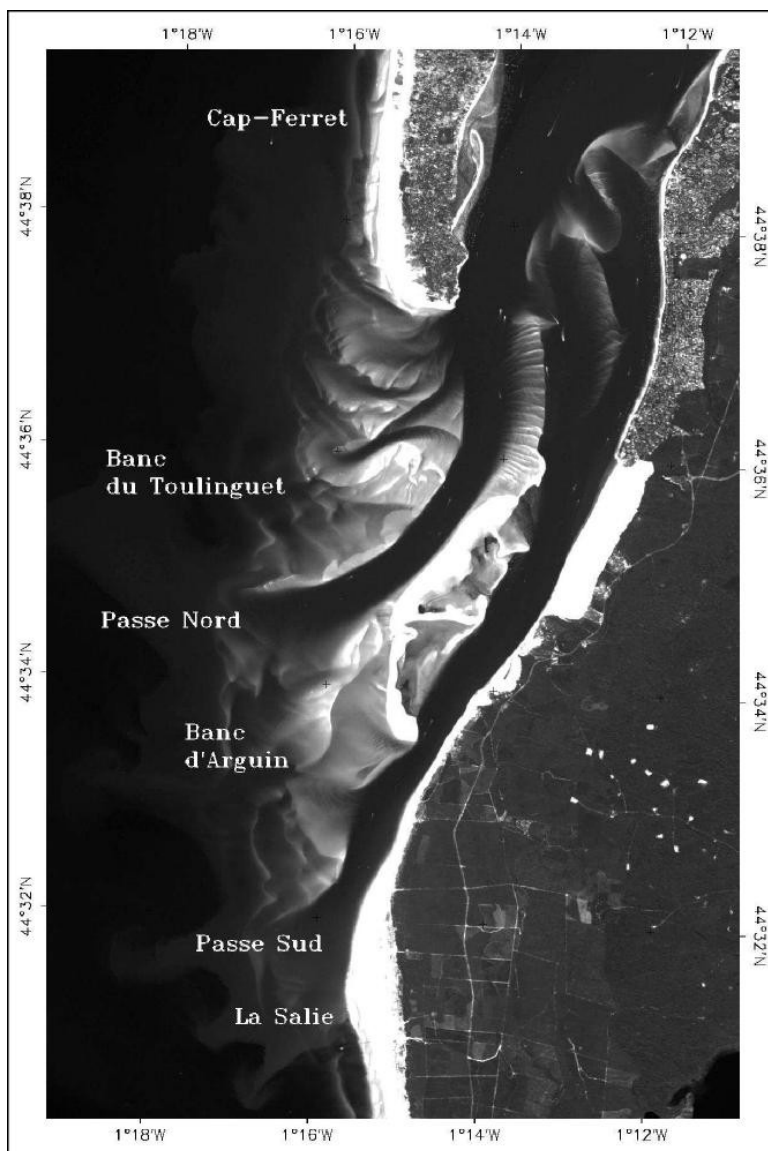


Figure 2 : Passes du Bassin d'Arcachon d'après l'image XS1 du 24 juin 2009.

3. Méthode de traitement

L'image enregistrée dans la bande XS1 permet de cartographier les bancs et les chenaux dans les Passes du Bassin d'Arcachon. Pour aboutir à cette cartographie, après les traitements effectués par le CNES (corrections radiométriques, géométriques et atmosphériques), différentes opérations ont été réalisées par l'équipe EPOC GEO-Transfert. Celles-ci sont répertoriées ci-dessous :

1. La scène SPOT est projetée dans le même référentiel cartographique (Lambert 3) que les sondages hydrographiques ;
2. La limite terre-eau (limite d'immersion) est détectée à partir de la bande infrarouge XS4. La luminance XS1 correspondante est associée au niveau d'immersion (profondeur) au passage du satellite ;
3. Les points de sonde issus des profils hydrographiques sont superposés à l'image Spot XS1 ;
4. Les luminances Spot XS1 et les points de sonde correspondants sont extraits ;
5. Une courbe de régression est calculée entre les profondeurs et les valeurs de luminance correspondantes ;
6. Cette relation empirique est appliquée à l'image de manière à remplacer les luminances par les profondeurs hydrographiques ;
7. Des isobathes sont tracées sur la carte des profondeurs.

3.1. Corrections géométriques et atmosphériques

Les corrections géométriques sont réalisées par le CNES dans le cadre du programme Kalideos Littoral. Le CNES utilise son propre algorithme intégrant les paramètres de vol et des points d'appui au sol complétés par des données IGN (MNT BD Topo, ©IGN). Une image Spot à 2,5 m de résolution a été choisie comme dalle de référence. Les mesures de décalage par rapport à l'image de référence (2,5 m) sont de 0,55 pixels en ligne (écart-type : 0,6) et de 0,2 pixel en colonne (écart-type : 0,8). Les corrections atmosphériques sont également effectuées par le CNES. Les données météorologiques et satellitaires (SeaWiFS) permettent de caractériser les conditions atmosphériques. La réflectance de surface est obtenue à partir du code de transfert radiatif 6S (Vermote et al., 1994) et de « look-up tables ».

3.2. Détection de la limite terre-eau

Comme référence de profondeur, il est nécessaire de tracer la limite d'immersion (interface terre/eau) à partir de la scène Spot. L'eau absorbe fortement la lumière dans le moyen infrarouge (bande XS4). Dans cette partie du spectre, un banc de sable immergé sous 10 cm

d'eau est presque invisible. Ainsi l'eau apparaît noire sur l'image XS4 alors que sur l'image XS1 les bancs de sable immergés à plusieurs mètres sont encore visibles. Au moment du passage du satellite, le 24 juin 2009, le niveau du plan d'eau était à + 0,7 m au-dessus du zéro des cartes marines (Z0) au Cap-Ferret, d'après le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). La luminance dans XS4 correspondant à + 0,7 m a été repérée. Ensuite la valeur Spot XS1 correspondante a été extraite et associée à la profondeur d'immersion (+ 0,7 m au-dessus de Z0).

3.3 Superposition des points de sonde et extraction des luminances Spot

Les points de sonde (sondages effectués en juin 2009 par le SMNG pour le SIBA) fournis en projection Lambert 3 sont superposés à l'image Spot 5 XS1 du 24 juin 2009 projetée en Lambert 3 (**Figure 3**). Les profondeurs sont couplées à la valeur du pixel superposé. De cette façon, le fichier obtenu comprend les coordonnées de chaque point de sonde avec la profondeur et la luminance Spot correspondante dans la bande XS1. La luminance Spot XS1 correspondant à la limite terre-eau (+ 0,7 m) est ajoutée à ces données.

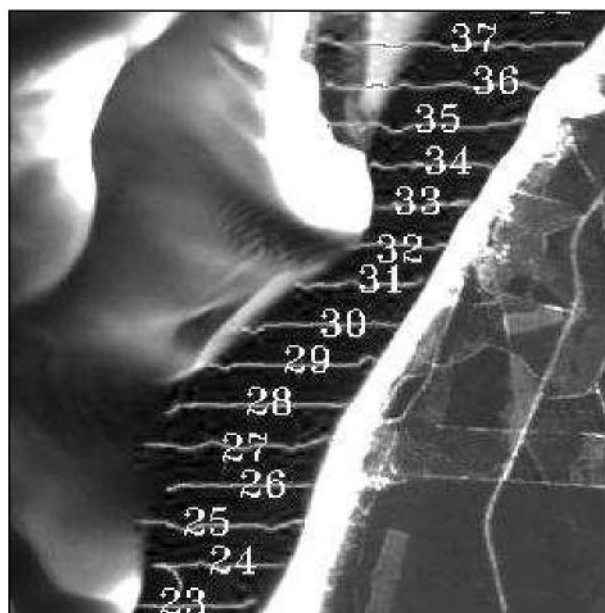


Figure 3 : Exemple de superposition des profils de sondage sur l'image Spot XS1 du 24 juin 2009.

4. Résultat : morphologie sous-marine des passes

4.1. Régression linéaire entre les points de sonde et les luminances Spot

La **Figure 4** représente les comptes numériques Spot en fonction des profondeurs (Z en valeurs négatives). La distribution des points (n = 5500) s'incurve entre - 6 m et - 3 m, conduisant ensuite à une forte augmentation de la luminance dans les faibles profondeurs. Une courbe de

régression est ajustée à la distribution en utilisant le logiciel TableCurve2D. L'expression est la suivante (coefficient de corrélation $r^2 = 0,99$) :

$$Z0 + 1 \text{ m} = a + \frac{b}{x} + \frac{c}{x^2} + \frac{d}{x^3} + \frac{e}{x^4} + \frac{f}{x^5} + \frac{g}{x^6} + \frac{h}{x^7} + \frac{i}{x^8} \quad (2)$$

Où $a = -4595,87$, $b = 3755762$, $c = -1,3 \text{ E}+09$, $d = 2,68 \text{ E}+11$, $e = -3,3 \text{ E}+13$, $f = 2,66 \text{ E}+15$, $g = -1,3 \text{ E}+17$, $h = 3,7 \text{ E}+18$, $i = -4,5 \text{ E}+19$.

Z représente la profondeur SH en valeur négatives, avec l'origine 0 prise 1 m au-dessus du zéro carte marine et x la valeur XS1 (comptes numériques CN) lue sur l'image XS1 du 24 juin 2009, corrigée des effets atmosphériques (Réflectance = CN/1000, CNES).

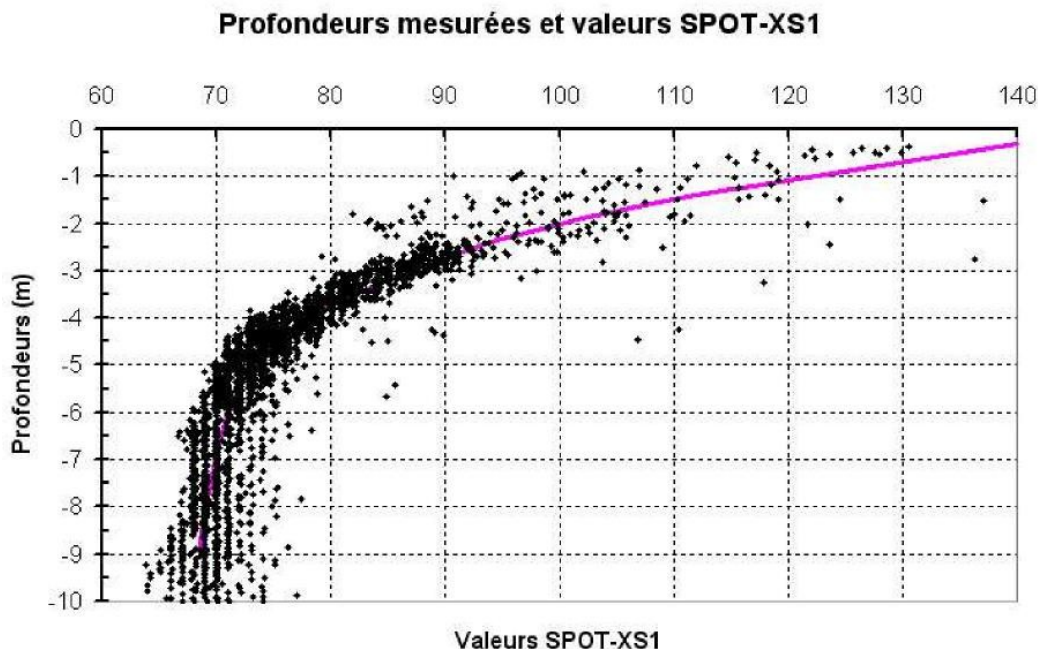


Figure 4 : Distribution des valeurs Spot 5 (24 juin 2009) en fonction de la profondeur et courbe d'ajustement (équation (2)). La valeur 0 sur l'axe des X est située 1 m au-dessus du zéro des cartes marines.

Des mesures hyperspectrales in situ réalisées avec un Spectron SE590 et un Trios ont été obtenues entre 1997 et 2004 pour les passes externes du Bassin d'Arcachon. En considérant l'albédo du fond comme peu variable et en faisant abstraction des variations de turbidité, ces données permettent de définir trois modèles de bathymétrie empirique de type exponentiel, basés sur la relation entre les valeurs de profondeur et la réflectance de l'eau R dans la bande XS1 (LAFON02). En compilant les deux jeux de données, la relation obtenue s'exprime ainsi :

$$Z = 15,047 \cdot e^{-88.69 \cdot R_{XS1}} \quad (3)$$

Cependant les paramètres de cette relation varient avec la turbidité, qui est inconnue à l'instant du passage du satellite Spot. C'est pourquoi, ce type de relation empirique n'est pas utilisé de façon opérationnelle. En effet, la réflectance à la surface de l'eau varie avec la profondeur, la couleur du fond et la turbidité. L'impact dans les petits fonds de faibles variations de ces deux derniers paramètres est très significatif, ce qui explique les erreurs de détermination de la bathymétrie dans le premier mètre de la colonne d'eau. Or, l'influence de ces différents paramètres peut être modélisée. Des

approches semi-analytiques sont développées afin d'exploiter simultanément l'information radiométrique dans plusieurs bandes spectrales et de déterminer les trois inconnues du système, ce qui permettrait, dans une approche assez opérationnelle, de déduire la profondeur en tous points de l'embouchure (Lyzenga, 1978 ; Philpot, 1989 ; Maritorea et al. 1994 ; Lee et al., 2010). L'approche de (Lee et al., 2002) est en cours de validation à Arcachon dans le cadre du programme INFOLITTORAL-1.

4.2. Cartographie hypsométrique

À partir de l'équation (2), les comptes numériques issus du canal XS1 ont été traduits en profondeurs SH, en retranchant 1 m. Puis, des iso-contours (**Tableau 1**) ont été tracés sur l'image obtenue (**Figure 5**).

Ce type de traitement, basé sur les points de sondage des relevés annuels, est celui que nous utilisons depuis 1999. Chaque année, la relation obtenue est différente, en particulier à cause de la turbidité de l'eau. Les résultats obtenus dépendent aussi de la représentativité des sondages (répartition géographique) et de leur date d'acquisition. En effet, si les sondages sont décalés dans le temps par rapport à l'acquisition de l'image

satellite, l'équation de calibration sera dégradée et ce d'autant plus que les profondeurs se seront modifiées, puisque les bancs de sable se déplacent rapidement.

CN XS1	Z (m)	Couleur Figure 4
72	4	Magenta
78	3	Bleu
86	2	Cyan
91	1.5	Vert foncé
97	1	Vert clair
105	0.5	jaune
115	0	orange
131	-0.5	rouge
140	-0.7	marron

Tableau 1 : Isobathes et valeurs satellites (CN XS1) correspondantes. Dans la terminologie des cartes marines, les valeurs négatives (- 0,5 ; - 0,7 m) correspondent à des hauts fonds situés au-dessus du zéro.

5. Précision des résultats hypsométriques

En comparant les profondeurs calculées à partir des luminances Spot 5 et les profondeurs mesurées, il est possible d'estimer la précision des profondeurs Spot 5 (**Figure 6**). Plus les points s'écartent de la droite $X = Y$, plus l'erreur est statistiquement importante. Un biais est observé entre 0 et - 2 m avec une surestimation des profondeurs calculées (diagonale au-dessus). Entre - 2,5 et - 4,5 m, les points sont proches de la diagonale et au-delà, leur dispersion augmente. Le **Tableau 2** donne les écarts-types par intervalle de profondeur. Cet écart-type est de 0,55 m pour les petits fonds, probablement à cause du faible nombre de points (26) et de l'hétérogénéité de la couleur des sédiments. Entre - 2 et - 5 m (- 1 et - 4 m sur carte marine), l'écart-type est faible (0,2 à 0,3 m). Il augmente ensuite. Au-delà de - 8 m (- 7 m sur carte marine), l'écart-type est important et cette relation perd sa signification.

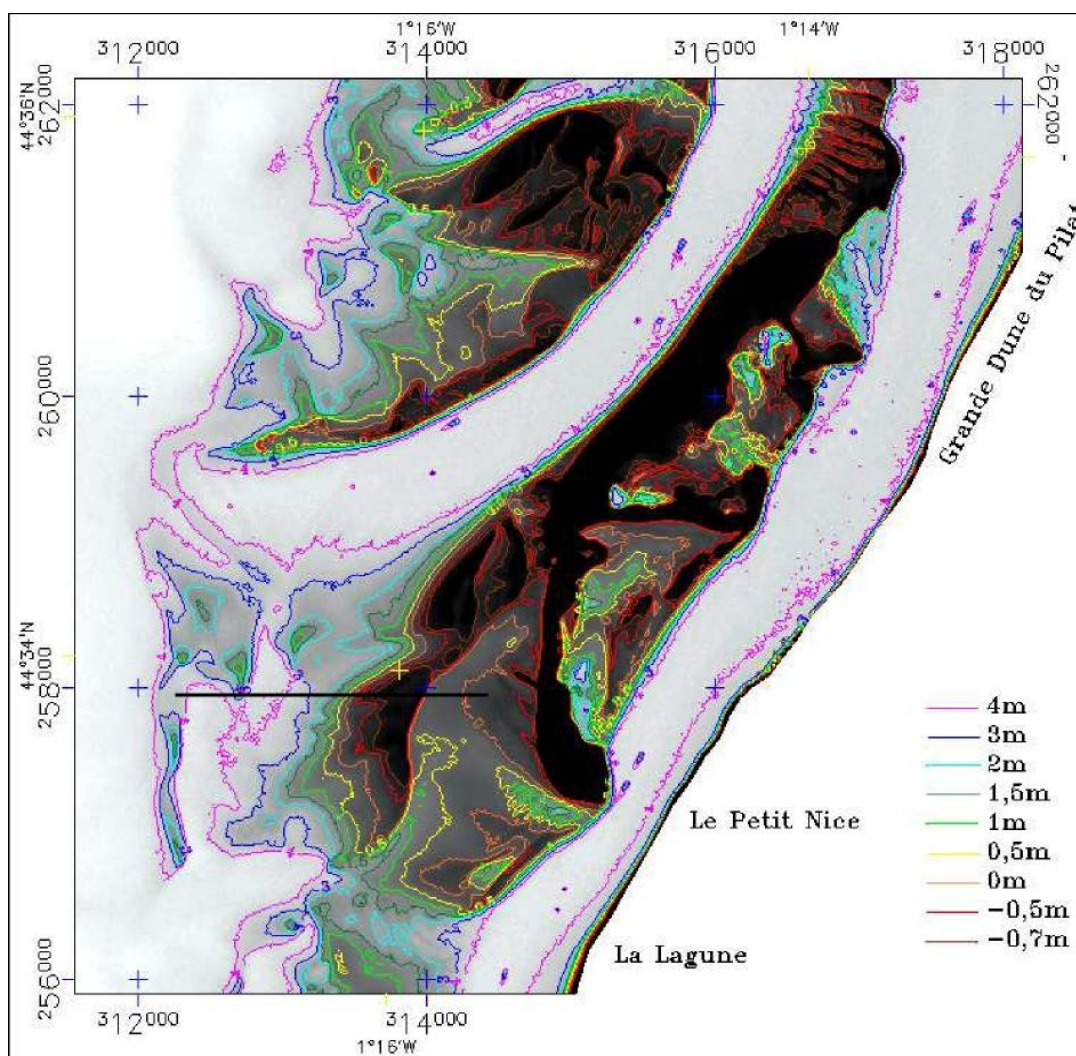


Figure 5 : Extrait de la carte obtenue à partir de l'image Spot XS1 du 24 juin 2009 avec le tracé des isobathes. Le 0 m correspond au zéro des cartes marines. Les valeurs négatives correspondent à des hauts fonds, situés au-dessus du zéro.

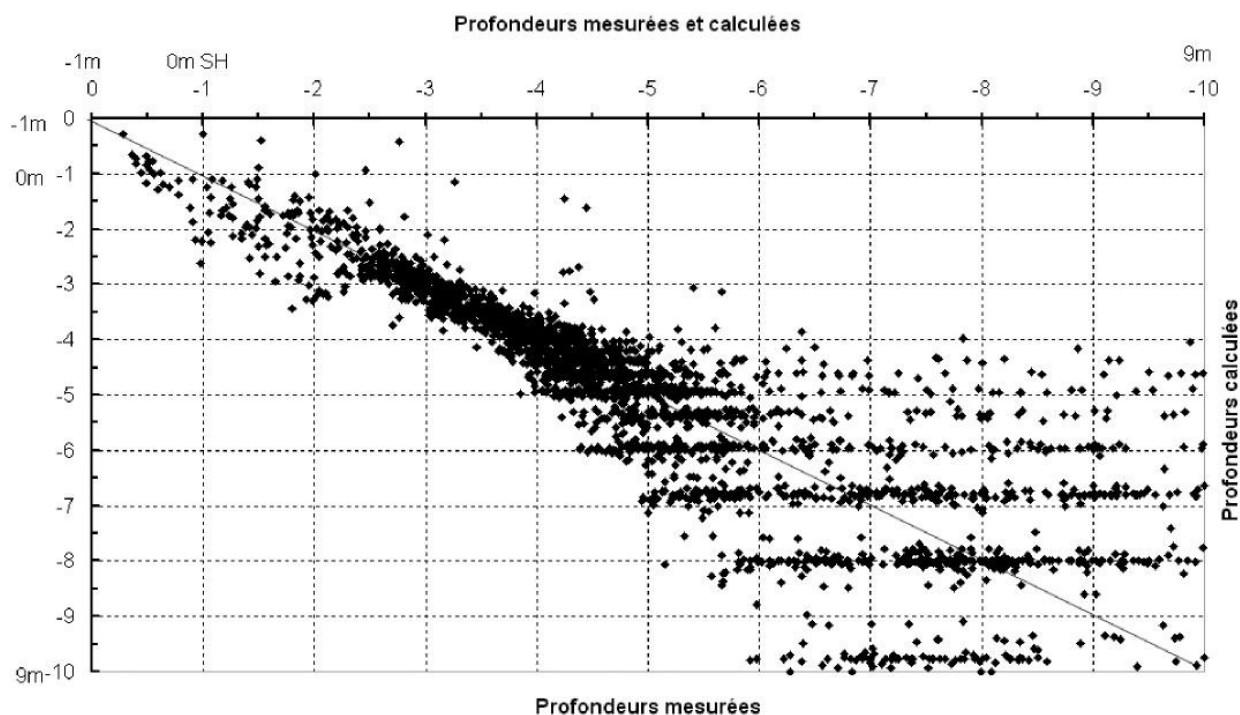


Figure 6 : Comparaison entre les profondeurs calculées à partir de l'équation (2) et les profondeurs mesurées par échosondeur. Le 0 est situé 1 m au-dessus du zéro marin cartes marines (- 1 m).

L'écart-type global est de 0,7 m pour les profondeurs cartographiées. Cet écart-type n'est pas représentatif de tous les points comme le montre le Tableau 2. À certains endroits, l'écart sera plus faible et à d'autres, plus élevé.

Intervalle	Passes du Bassin d'Arcachon	
	Nombre de points	Écart-type (m)
0 m à -1 m	26	0.55
-1 m à -2 m	75	0.52
-2 m à -3 m	232	0.25
-3 m à -4 m	507	0.20
-4 m à -5 m	827	0.35
-5 m à -6 m	1297	0.74
-6 m à -7 m	214	1.22
-7 m à -8 m	227	1.17
-8 m à -9 m	171	1.41
-9 m à -10 m	105	2.51
Global	3681	0,70

Tableau 2 : Écart-type par intervalle de profondeur.

6. Déplacement des bancs et des chenaux entre 2008 et 2009

Les déplacements des bancs de sable sont évalués en comparant les images satellites et en superposant sur l'image la plus récente le contour des bancs observés l'année précédente. Pour quantifier ces déplacements, il est préférable de disposer autant que possible d'images acquises avec un niveau d'eau comparable. Pour cet exemple, le niveau d'eau entre les scènes Spot du 16

septembre 2008 (+ 0,5 m au-dessus de Z0) et du 24 juin 2009 (+ 0,7 m au-dessus de Z0) diffère de 20 cm au niveau du Cap-Ferret (SHOM).

Pour atténuer l'effet du niveau de l'eau, ce sont les gradients des luminances, obtenus avec un opérateur « Sobel », qui servent de ligne de repère. Ces gradients minimisent les variations du niveau d'immersion. Cette solution est acceptable, à condition de ne pas tenir compte des faibles décalages observés (± 20 m). Puis des iso-contours de couleurs différentes ont été tracés sur les forts gradients (**Figure 6**).

À titre d'exemple, la **Figure 7** met en évidence le déplacement du banc d'Arguin entre 2008 (contour en bleu cyan) et 2009 (image sous-jacente, contour en rouge). Les distances séparant les limites des bancs et des chenaux sont mesurées sur l'écran. Ainsi la pointe (E) a progressé de 290 m vers l'ouest. Le banc au sud de la Passe Nord (F) s'est déplacé de 200 à 400 m vers l'est. Le littoral du Petit Nice a reculé de 30 à 40 m.

7. Conclusion

Cette méthode expérimentale est utilisée depuis dix ans pour cartographier la morphologie des bancs de sable et des chenaux à l'embouchure du Bassin d'Arcachon, pour le compte du SIBA. La cartographie est obtenue rapidement, un à deux mois après le passage du satellite. Toutefois, un levé bathymétrique classique dans un secteur de hauts fonds est indispensable pour calibrer les luminances satellites Spot XS1. Cette méthode ne peut pas s'appliquer à un secteur où la couleur du fond est variable. Les résultats dépendent

également de la turbidité de l'eau (dans le cas présent, faible de l'ordre de 3 à 5 mg/l). L'eau doit être suffisamment transparente pour « voir » le fond et la turbidité doit être homogène sur l'ensemble de la zone étudiée. Toutefois, l'application d'approches semi-analytiques, actuellement à l'étude sur le Bassin d'Arcachon à partir des travaux de Lee et al. (Lee et al. 2002 ; 2010), permettra d'envisager une application sur des fonds de couleur et turbidité variables. Le clapot de surface doit être faible pour éviter un effet de « glitter »

(reflets du ciel sur l'eau). Sur les fonds sableux où les déplacements des bancs sont rapides, la prise de vue doit être réalisée dans un intervalle de temps assez court (un à deux mois au maximum) autour des sondages bathymétriques utilisés pour la calibration de l'algorithme d'inversion. Cette étude montre que la précision est meilleure dans les petits fonds (écart-type $\pm 0,2$ à $\pm 0,4$ m) que lorsque la tranche d'eau excède 4 m (écart-type ± 1 à $\pm 1,5$ m).

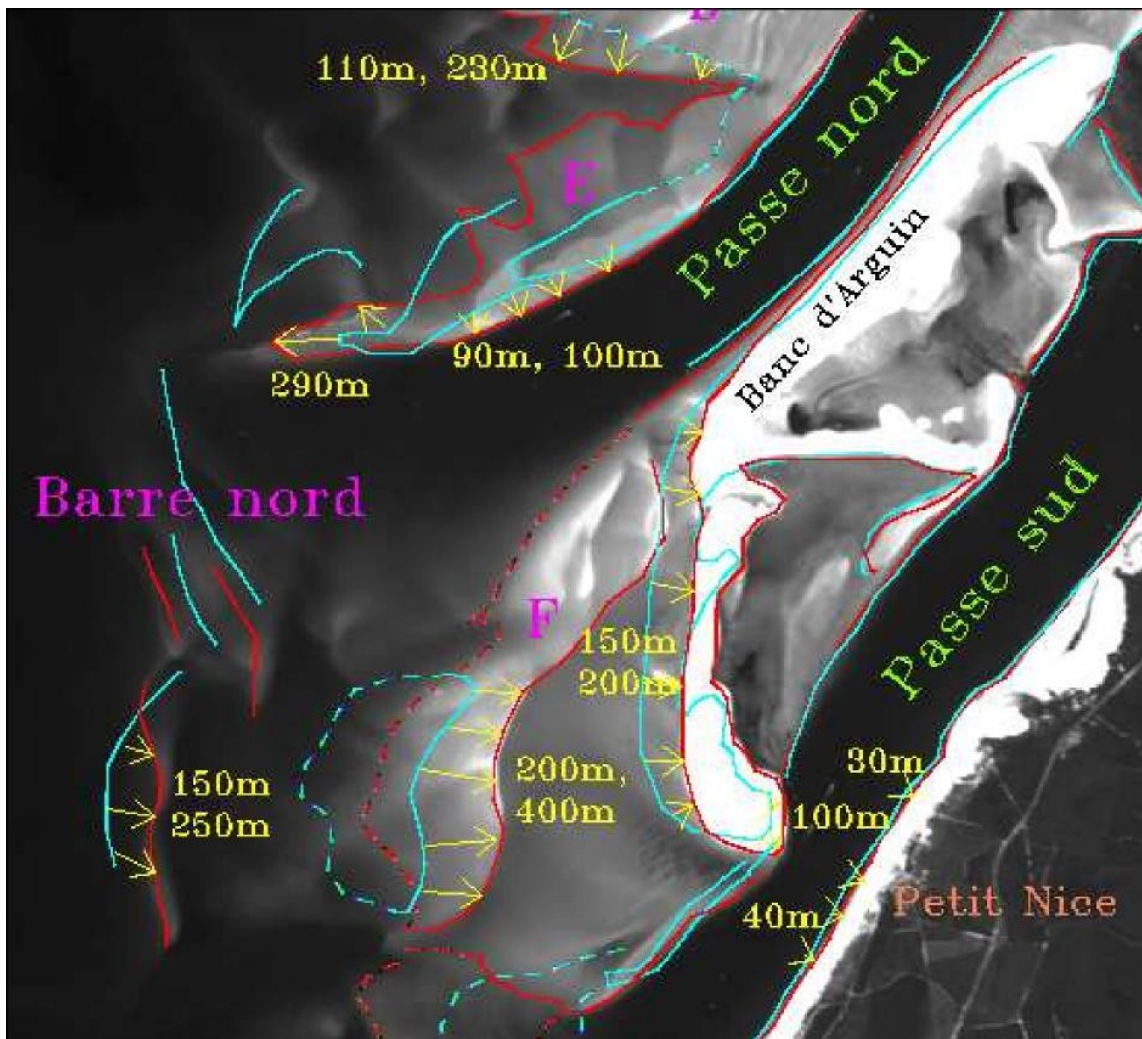


Figure 7 : Image XS1 du 18 juin 2007 avec le contour du Banc d'Arguin en mai 2006 superposé en mauve. Les flèches indiquent le sens et l'intensité du déplacement.

Remerciements

Nous remercions particulièrement le Président du SIBA et son Directeur Général qui ont soutenu ces recherches depuis 1999 et le programme Kalideos Littoral du CNES qui a mis les images analysées à notre disposition.

Références

Bouchet, J.-M., 1974. Évolution, hydrologie, écologie du Bassin d'Arcachon. Bulletin I.G.B.A., 14 : 15-20.

Bricout, V., Froidefond, J.-M., 1993. La télédétection : un outil pour la bathymétrie côtière. Bulletin I.G.B.A. Talence 53-54 : 199-207.

Cayocca, F., 1996. Modélisation morphodynamique d'une embouchure tidale : application aux passes d'entrée du Bassin d'Arcachon. Thèse de Doctorat de l'Université Bordeaux I, Talence, France.

Froidefond, J.-M., 2009. Surveillance des Passes du Bassin d'Arcachon en 2009 par imagerie satellite Spot 5. Rapport pour le SIBA. 78 p.

- Gassiat, L., 1989. Hydrodynamique et évolution sédimentaire d'un système lagune-flèche littorale. Le Bassin d'Arcachon et la flèche du Cap Ferret. Thèse de Doctorat de l'Université Bordeaux-1, Talence, France, 189 p.
- Lafon, V., 1999. Méthode de bathymétrie satellitale appliquée à l'environnement côtier : exemple du Bassin d'Arcachon. Thèse de Doctorat de l'Université Bordeaux-1, Talence, France. 240 p.
- Lafon, V., Froidefond, J.-M., Castaing, P., 2000. Méthode d'analyse de l'évolution morphodynamique d'une embouchure tidale par imagerie satellite. Exemple du Bassin d'Arcachon (France). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 331 : 373-378.
- Lafon, V., Froidefond, J.-M., Lahet, F., Castaing, P., 2002. SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements. Remote Sensing of Environment 81(1), 136- 148.
- Lee, Z.P., Hu, C., Casey, B., Shang, S., Dierssen, H., Arnone, R., 2010. Global Shallow-Water Bathymetry from Ocean Color Satellites. EOS 91(46), 429-430.
- Lee, Z., Carder, K.L., Arnone, R.A., 2002. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. Applied Optics 41(27), 5755-5772.
- Lyzenga, D.R., 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. Applied Optics 17(3), 379-383.
- Manaud, J.-F. 1971. L'évolution morphologique récente du Bassin d'Arcachon. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux-3, France, 101 p.
- Maritorena, S., Morel, A., Gentili, B., 1994. Diffuse reflectance of oceanic waters: influence of water depth and bottom albedo. Limnology and Oceanography 39(7), 1689-1703.
- Michel, D., 1997. Évolution morphodynamique d'un littoral sableux situé à l'aval d'une embouchure lagunaire. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux-1, Talence, France.
- Orgeron, C., 1974. Sédimentologie des Passes d'entrée du Bassin d'Arcachon. Bulletin I.G.B.A., 14, 30-51.
- Pellegrin, J.-C., Courrèges, M., Héraud Pina, M.A., 1994. Application de la télédétection à l'étude morphologique d'un littoral sableux : le Cap-Ferret et les Passes du Bassin d'Arcachon. Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée, Université Bordeaux-3 (12), 55-67.
- Philpot, W. D., 1989. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. Applied Optics 28(8), 1569-1579.
- Vermote, E., Tanré, D., Deuzé, J.-L., Herman, M., Morcrette, J.-J., 1994. Second simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). 6S User guide Version 0, 18 avril 1994.