

## Apport de la géophysique terrestre (géo-radar, sismique) pour l'aide à la gestion du trait de côte

Nicolas ROBIN <sup>1</sup>, Julie BILLY <sup>1</sup>, Éric PALVADEAU <sup>2</sup>, Samuel MEULE <sup>3</sup>,  
Yann BALOUIN <sup>2</sup>, Adnand BITRI <sup>4</sup>, Angélie PORTAL <sup>4</sup>, Alexis STEPANIAN <sup>5</sup>,  
Raphael CERTAIN <sup>1</sup>, Bertil HEBERT <sup>1</sup>, Olivier RAYNAL <sup>1</sup>,  
Alicia ROJAS-MARQUEZ <sup>1</sup>, Christine SOTIN <sup>1</sup>, Sébastien MARGUERITE <sup>3</sup>,  
Nicolas ALEMAN <sup>1</sup>, Jean-Paul BARUSSEAU <sup>1</sup>

1. CEFREM-UMR 5110, Université de Perpignan Via Domitia, 52 Avenue Paul Alduy, 66000 Perpignan, France. *nicolas.robin@univ-perp.fr*
2. BRGM, Université de Montpellier, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier, France.
3. Marseille Université, CNRS, IRD, Collège de France, CEREGE, Aix-en-P., France.
4. BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France.
5. BRGM, 117 avenue de Luminy, BP 168, 13276 Marseille Cedex 9, France.

### Résumé :

Le système dunaire de Torreilles (Pyrénées Orientales) a été choisi comme site test pour réaliser une campagne de géophysique terrestre combinant géo-radar et sismique ondes de surface. L'objectif est d'apporter une expertise de l'utilisation de ce type de technologie afin de i) comprendre la construction et l'évolution du système et, ii) estimer le stock sédimentaire terrestre en place. Ces résultats démontrent l'avantage qu'il y a de coupler les deux méthodes pour identifier et cartographier les unités sédimentaires constitutives du prisme littoral. Les données géo-radar permettent d'obtenir une image détaillée de l'architecture interne des dépôts jusqu'à 9m de profondeur (pendage des dépôts et sens de progradation, informations sur les phases de construction/destruction, toit de la nappe...). La donnée sismique présente l'avantage de pouvoir cartographier l'ensemble des unités jusqu'à 30 m de profondeur, toutefois sans détail architectural. Le volume des dépôts dunaires et de la plage fossile imagée atteint 8.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. La combinaison des résultats de la sismique et du forage permet de pouvoir identifier la limite sable/argile (13 m de profondeur) et d'estimer le volume de l'ensemble de l'unité sableuse entre 13 et 17 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Ces données sont susceptibles d'apporter des éléments de réflexion sur l'évolution du système à des fins de gestion du trait de côte.

**Mots-clés :** Géo-radar (GPR), Sismique, Ondes de surface, Stratigraphie dunaire, Stock sédimentaire.

### 1. Introduction

L'intérêt de la géophysique marine pour la gestion du trait de côte est croissant ces dernières années, puisqu'elle permet de confronter les évolutions bathymétriques

### *Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection*

constatées, avec le volume du stock sédimentaire marin susceptible d'alimenter la plage (BRUNEL *et al.*, 2014). Cette démarche innovante inspire ici l'étude de la partie terrestre du système littoral à l'aide de deux outils géophysiques : le géo-radar et la sismique en ondes de surface (MASW).

La géophysique terrestre est une méthode non-invasive qui présente l'avantage de pouvoir imager rapidement et de façon continue les structures sédimentaires d'une zone d'étude. Son développement par le biais de différents outils (géo-radar, sismique réflexion, sismique en ondes de surface, résistivité...) depuis une ou deux décennies a ainsi permis une amélioration significative de la compréhension spatiale des caractéristiques stratigraphiques d'un système en comparaison des outils traditionnellement utilisés auparavant à ces fins (carottages, tranchés...). L'utilisation de la sismique en ondes de surface est rare en domaine littoral à l'inverse de celle du géo-radar qui est maintenant devenue usuelle puisqu'elle permet d'apporter des informations précises sur les phases de construction ou de destruction d'un système (BILLY *et al.*, 2014). Ces deux outils peuvent également permettre de quantifier les stocks sédimentaires à terre. Ces informations sont donc à même d'aider les gestionnaires dans leur prise de décision face à la mobilité actuelle et future du trait de côte. C'est dans ce contexte que l'Observatoire de la Côte Sableuse Catalane (OBSCAT, <http://obscat.fr/>) a lancé le projet ESTER à l'origine de cette étude.

Les travaux qui comparent et discutent de l'utilisation conjointe de ce type de méthode géophysique sur une même zone d'étude restent rares et cantonnés au domaine purement continental (SCHWAMBORN *et al.*, 2002 ; SASS, 2006). L'objectif de cette étude est d'apporter une expertise sur l'utilisation de la géophysique terrestre (géo-radar et sismique en ondes de surface) en milieu littoral afin de mettre en avant la complémentarité de ces deux outils en comparant leurs avantages et leurs limites pour : i) comprendre la construction et l'évolution du système et, ii) estimer le stock sédimentaire terrestre en place.

#### **2. Site d'étude**

Le site de Torrelles (Pyrénées Orientales) présente un large système dunaire progradant vers l'est qui s'est développé depuis la fin Holocène. Il est bordé à l'ouest et au nord respectivement par le bras et l'embouchure de l'Agly, alors que sa partie maritime à l'est correspond à une plage de type intermédiaire, dominée par la houle, avec un système de doubles barres festonnées (figure 1A). Les granulométries du sable de plage montrent un mode dominant à 0.63 mm (ALEMAN *et al.*, 2015). La partie médiane du système présente une altitude d'environ 1.5 m NGF et une végétation typique d'une dune grise. En se rapprochant de la façade maritime, l'altitude augmente significativement pour atteindre localement 4 m NGF avec une végétation de dune jaune ou très clairsemée.

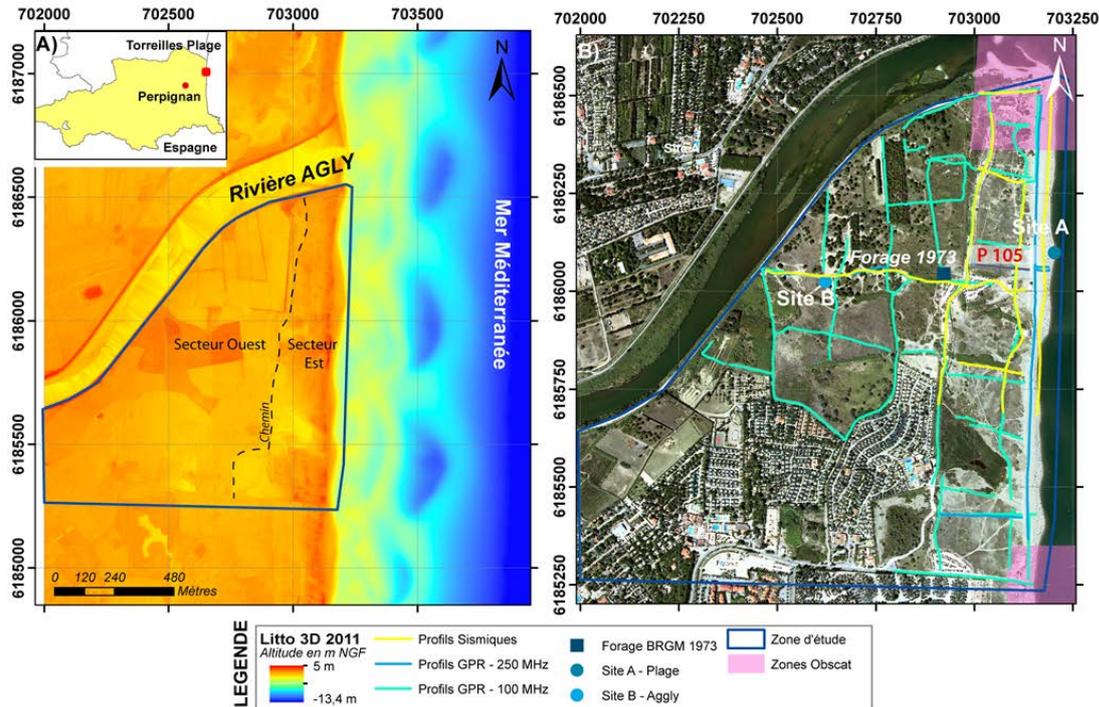


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et plan de position des profils géo-radar et de sismique en ondes de surface (source LIDAR : LITTO 3D 2011).

### 3. Méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs de cette étude, des mesures géophysiques à l'aide d'un géo-radar et de sismique en ondes de surface ont été réalisées. Des données sédimentaires (carottages, tarières et un forage) et topographiques (LIDAR et DGPS-RTK) complètent le jeu de données (figure 1B).

#### 3.1 Géo-radar

Le géo-radar (GPR) est une méthode géophysique qui permet d'imager les structures internes d'un objet sédimentaire sur plusieurs mètres de profondeur (NEAL, 2004 ; BILLY *et al.*, 2014). Son fonctionnement repose sur l'émission, la propagation et la réflexion d'ondes électromagnétiques hautes fréquences (centaines de MHz) dans le sol. À la réception du signal, les discontinuités électriques enregistrées par l'appareil symbolisent les différentes interfaces et les hétérogénéités sédimentaires présentes dans le sol. L'image générée permet ainsi de visualiser les dépôts, les pendages et les organisations sédimentaires. La pénétration du signal est fonction de la fréquence d'émission des antennes du système : plus la fréquence est élevée plus la pénétration du signal sera grande mais le signal perdra en résolution verticale, et inversement. Pour ce projet, 11.2 km de profils GPR (antennes MALA de fréquence 100 et 250 MHz ; figure 1B) transversaux et parallèles au trait de côte ont été enregistrés. Un DGPS-RTK a été couplé au géo-radar afin de localiser les profils et d'enregistrer la topographie associée.

## *Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection*

### 3.2 Sismique en ondes de surface (MASW)

La sismique active consiste à induire une vibration en surface et d'enregistrer le déplacement de l'onde créée, de la source vers une série de récepteurs. La vitesse des ondes sismiques de cisaillement ( $V_s$ ) constitue un excellent indicateur du comportement élastique des sols. Sa variation en fonction de la profondeur est ici estimée par l'analyse et l'inversion de la dispersion des ondes de surface (MASW, Multichannel Analysis of Surface Wave). Cette technique de sismique légère innovante (ligne de 24 géophones espacés de 2 m tractable par un quad) et non-destructive évite la mise en œuvre de méthodes classiques plus lourdes (essais cross-hole entre forages). Pour ce projet, 3.3 km de profils sismiques transversaux et parallèles au trait de côte ont été réalisés (figure 1B).

### 3.3 Données sédimentaires

Des données sédimentaires nouvelles (Site A : une carotte d'un mètre ; Site B : une carotte de 3.3 m et une tarière de 2 m, figure 1B) et anciennes (un forage archive de 1973 (<http://infoterre.brgm.fr/>) de 20 m, figure 1B) ont permis de corrélérer le signal géophysique à la réalité sédimentologique. Une série de 49 échantillons a été prélevée sur les nouvelles données sédimentaires. Le traitement du matériel sédimentaire a été réalisé via une colonne à tamis (10 à 0.05 mm) afin d'obtenir les caractéristiques granulométriques classiques des échantillons (Mode,  $D_{50}$ , classement, ...).

## **4. Résultats et interprétation**

### 4.1 Granulométrie

Les échantillons de la carotte du site A ont permis de mettre en avant le type de sédiments présent sur la plage actuelle. On constate ainsi qu'il est assez hétérogène, présentant un sable grossier avec des pics modaux de 0.63 à 1 mm et de nombreux galets et graviers. Les échantillons de la carotte et tarière du site B ont permis de révéler trois éléments : a) la présence d'un sol entre 0 à 0.60 m de profondeur (soit de +1.40 à 0.80 m NGF), b) la présence de sable entre 0.60 m à 1.80 m de profondeur (soit 0.80 à -0.40 m NGF) avec des modes dominants compris entre 0.25 et 0.63 mm (majoritairement entre 0.315 et 0.5 mm), c) la présence d'un sable entre 1.80 à 3.30 m de profondeur (soit de -0.40 à -1.90 m NGF) avec une répartition modale homogène des dépôts à 0.63 mm. Seul un mince horizon entre -0.90 et -1.10 m NGF montre un mode à 0.5 mm. Concernant l'archive du forage de 1973, elle indique la présence d'un petit sol sablo-argileux sur 1 m qui recouvre une épaisse couche de sable et de graviers jusqu'à 12.80 m de profondeur (soit -11 m NGF). La base de cette unité sables/graviers (le dernier mètre) est caractérisée par un sable argileux à graviers. Au-delà de 12.80 m et jusqu'à la base du forage (20 m de profondeur), les dépôts sont argileux avec quelques passages graveleux.

#### 4.2 Le Géo-radar

Les données géo-radar peuvent être découpées en deux zones par rapport au chemin nord-sud qui traverse la zone (figure 1) : 1) entre celui-ci et la rivière Agly (zone ouest), les données architecturales sont très chaotiques, difficilement interprétables et ne pénètrent pas à plus de 8 ou 9 m de profondeur ; 2) entre le chemin et la plage (zone est), deux unités sont visibles sur l'ensemble des profils.

Unité 1 : Présente entre un et deux mètres sous la surface, elle est interprétée comme une couverture dunaire.

Unité 2 : Présente sous l'unité 1 et jusqu'à la limite de pénétration de l'instrument (5 m et 9 m de profondeur respectivement pour l'antenne 250 et 100 MHz), elle montre des réflecteurs progradants vers l'Est sur 200 m dont le pendage est de l'ordre de 7-8°. La progradation semble continue, sans phases notable d'érosion à cette échelle visuelle. Du fait d'un pendage et d'une granulométrie (mode de 0.63 mm) identiques à la partie basse de la plage actuelle, l'unité 2 est interprétée comme la plage fossile (figure 2).

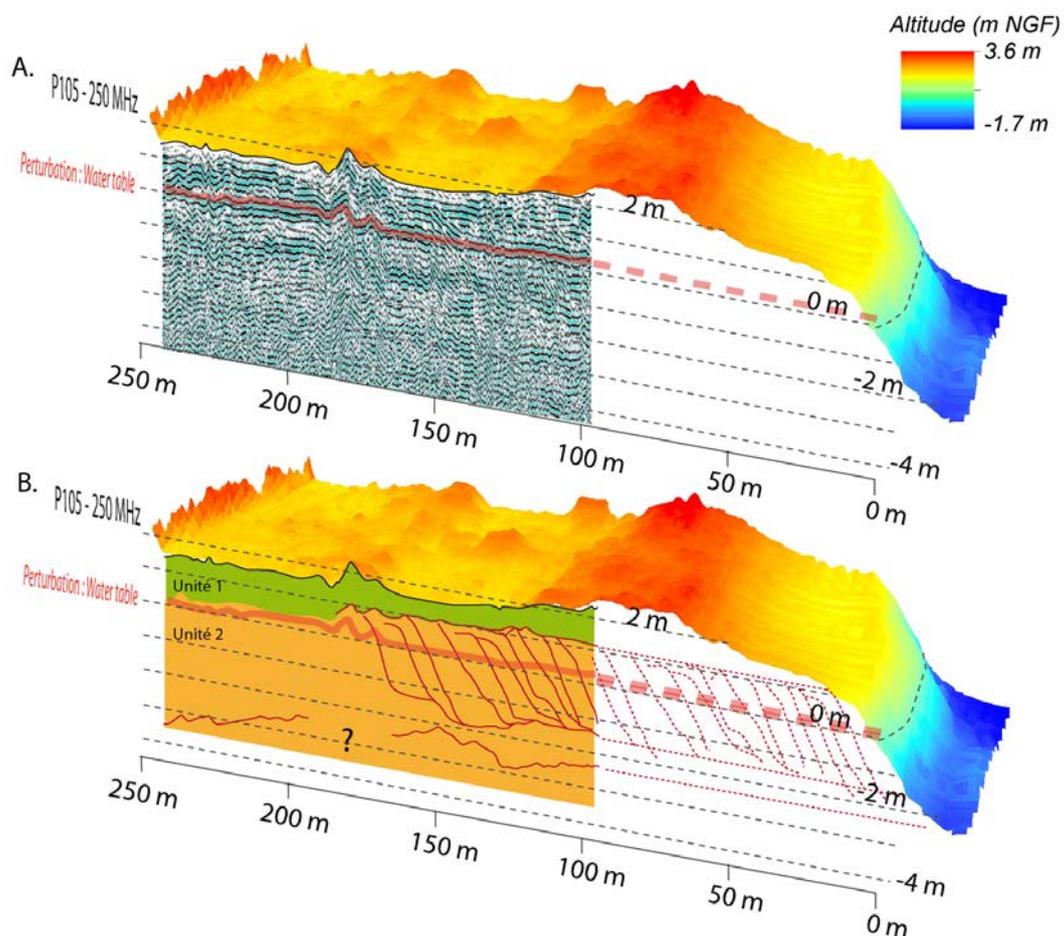


Figure 2. Illustration d'un profil géo-radar à l'aide de l'antenne 250 MHz (A. géo-radar traité, B. géo-radar interprété). Les réflecteurs de la plage fossile sont projetés avec similitude sous la plage actuelle (source LIDAR : LITTO 3D 2011).

## Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

### 4.3 La sismique MASW

L'ensemble des profils sismiques enregistrés entre le chemin et la plage (zone est) permet de montrer une homogénéité des dépôts du sud vers le nord. En effet, on constate que la limite à 300 m/s (en turquoise, figure 3) évolue autour de 15 m de profondeur (entre 12 et 18 m), et celle à 400 m/s autour des 20 m de profondeur. Le forage historique de 1973, localisé sur le profil sismique 5, est la clé pour la comparaison des données géophysiques et sédimentaires. Ainsi, la limite à 300 m/s correspondrait à la limite entre des dépôts de sable et graviers (au-dessus) et des argiles (en dessous). Les informations sédimentaires du forage se terminent à la profondeur 20 m (correspondant à notre limite 400 m/s) mais il n'est pas possible de lier cette limite avec une différence lithologique. Sur la zone ouest (profil 5), la profondeur de la limite 300 m/s reste relativement homogène. Elle devient beaucoup moins épaisse (environ 5 m) à l'extrémité ouest, endroit où la limite 700-800 m/s présente un dôme prononcé. L'absence d'autres profils sismiques sur cette zone ne permet pas de conclure sur un caractère général ou local de cette observation.

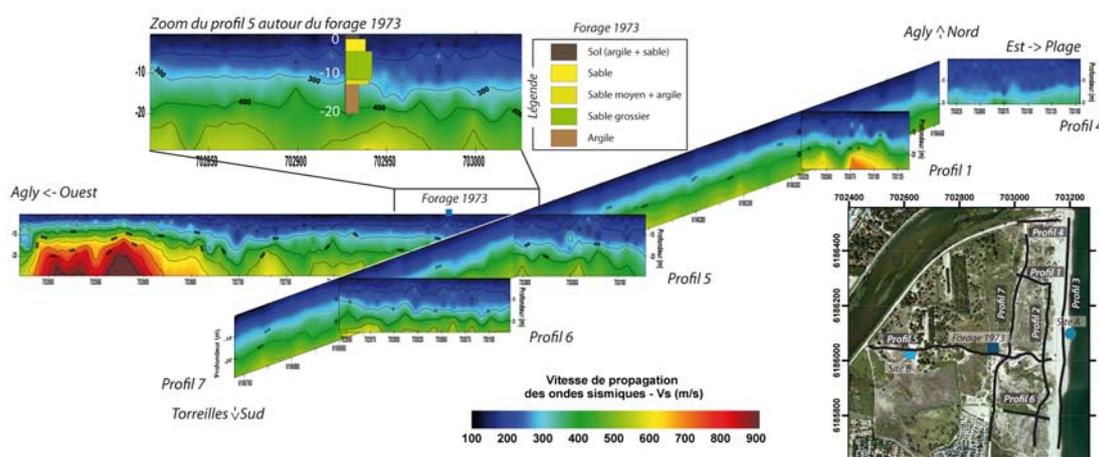


Figure 3. Illustration des profils sismiques MASW. La description lithologique du forage "archive" est indiquée sur le zoom du profil 5 (modifiée d'après CHRISTMANN *et al.*, 2017).

## 5. Discussion

L'étude géophysique du système dunaire de Torrelles démontre l'avantage qu'il y a de coupler l'utilisation du géo-radar et de la sismique en ondes de surface (MASW), afin d'obtenir une image complète et précise des différentes unités sédimentaires du site. En effet, cette approche permet de masquer les biais inhérents à chaque méthode (Tab.1).

### 5.1 Informations issues de l'archive sédimentaire

Les données géo-radar permettent d'obtenir une image détaillée de l'architecture interne sur les premiers mètres de dépôt (ici jusqu'à 8-9 m de profondeur). Le signal peut être perturbé par la présence d'intrusions salines (NEAL, 2004 ; BILLY *et al.*, 2014) mais

l'impact de ce facteur semble mineur sur ce site. Ces quelques mètres sont riches d'informations puisqu'ils permettent de connaître les modalités de mise en place du système, de pointer l'absence de phases érosives majeures, et accessoirement de pointer la position du toit de la nappe. La donnée sismique présente quant à elle l'avantage de pouvoir cartographier l'ensemble des unités jusqu'à environ 30 m de profondeur, toutefois sans détail architectural de ces unités.

*Tableau 1. Avantages et biais de l'utilisation du géo-radar et de la sismique MASW (++++ avantages, + biais).*

	<i>Facilité de déploiement</i>	<i>Vitesse d'acquisition</i>	<i>Pénétration du signal</i>	<i>Détail de l'archive sédimentaire</i>	<i>Temps du post- traitement</i>
<i>Géo-radar</i>	++++	++++	++(+)	++++	++++
<i>Sismique (MASW)</i>	+++	++	++++	+	++++

## 5.2 Quantifications des stocks sédimentaires

Cette étude permet d'identifier et de cartographier les unités sédimentaires constitutives du prisme littoral. Elle conduit à quantifier le volume des dépôts dunaires et de la plage fossile, et plus particulièrement sur le secteur est. Les profils géo-radar permettent d'estimer ce volume jusqu'à -3.5 m NGF avec l'antenne 250 MHz et -6.5 m NGF avec l'antenne 100 MHz. Pour cette dernière, il est de l'ordre de 7 à 8.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> et relativement homogène du nord au sud. La combinaison des résultats sismiques et du forage permet d'identifier la limite sable/argile à 300 m/s correspondant à une profondeur de -11 m NGF au point de forage archive. Ainsi le volume de l'unité sableuse dans son ensemble est compris entre 13 et 17 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Le site de Torreilles (secteur est) présente donc une couverture sableuse relativement homogène spatialement (figure 3). La confrontation de cette quantification avec les évolutions topographiques constatées et la dynamique du trait de côte, permettra d'estimer la résilience de ce stock. Outre l'intérêt de ces connaissances dans le cadre d'un plan de gestion des sédiments, elles informent également les gestionnaires sur la nature du sous-sol en cas de futurs aménagements.

## 6. Conclusions

L'étude géophysique du système dunaire de Torreilles est considérée comme une étape test pour la caractérisation et la cartographie des stocks sédimentaires à terre. De plus, l'information historique provenant d'archives sédimentaires est un élément clé à prendre en considération pour la compréhension de l'évolution actuelle du littoral et de ces projections futures. Face aux résultats positifs et l'apport que représente ce type d'approche pour les gestionnaires, son extension à l'ensemble du territoire de l'Observatoire de la Côte Sableuse Catalane (OBSCAT, <http://obscat.fr/>) ou à d'autres environnements est en perspective. Ce travail doit également permettre d'aboutir, dans

### Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

un second temps, à une quantification globale du stock sédimentaire présent sur l'ensemble du continuum terre-mer littoral, puisque celle de la partie marine est déjà effectuée dans le Golfe du Lion (BRUNEL *et al.*, 2014 ; RAYNAL *et al.*, 2015).

#### 7. Remerciements

Les auteurs remercient l'OBSCAT pour le soutien apporté au projet ESTER lors de son montage et sa réalisation et Perpignan Méditerranée Métropole pour son financement.

#### 8. Références bibliographiques

- ALEMAN N., ROBIN N., CERTAIN R., ANTHONY E. J., BARUSSEAU J. P. (2015). *Longshore variability of beach states and bar types in a microtidal, storm-influenced, low wave-energy environment*. *Geomorphology*, Vol. 241, pp 175-191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.029>
- BILLY J., ROBIN N., HEIN C., CERTAIN R., FITZGERALD D. (2014). *Internal architecture of mixed sand and gravel beach ridges: Miquelon Langlade Barrier, NW Atlantic*. *Marine Geology*, Vol. 357, pp 53-71. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.07.011>
- BRUNEL C., CERTAIN R., SABATIER F., ROBIN., BARUSSEAU J. P., ALEMAN N., RAYNAL O. (2014). *20<sup>th</sup> century sediment budget trends on the Western Gulf of Lions shoreface (France), an application of an integrated method for the study of sediment coastal reservoirs*. *Geomorphology*, Vol. 204, pp 625-637. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.009>
- CHRISTMANN H., PALVADEAU E., STEPANIAN A., BOLDERE G., BOUVIER C., HUREAU S., MALDAN F., MAURICE B., PORTAL A., DAILLOUX D., SABARICH L., SIBERT V. (2017). *Observatoire de la côte sableuse catalane-OBSCAT*. Rapport technique d'année 4, Rapport final, BRGM/RP-67386-FR, 185 p.
- NEAL A. (2004). *Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress*, *Earth-Science Reviews*, Vol. 66, pp 261-330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- RAYNAL O., CERTAIN R., BRUNEL C., ALEMAN N., ROBIN N., GUERINEL B., MONTEL L. (2015). *LITTOSIS-Analyse volumétrique et granulométriques du prisme sableux littoral du Languedoc-Roussillon*. Rapport final LITTOSIS, 46 p.  
URL : <https://elmusca.wordpress.com/>
- SASS O. (2006). *Determination of the internal structure of alpine talus using different geophysical methods (Lechtaler Alps, Austria)*. *Geomorphology*, Vol. 80, pp 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.09.006>
- SCHWAMBORN G. J., DIX J. K., BULL J. M., RACHOLD V. (2002). *High resolution seismic and ground-penetrating radar geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena Delta, Northern Siberia*. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 13, pp 259–269. <https://doi.org/10.1002/ppp.430>