

*Université de Perpignan Via Domitia*  
Master 2 « Sciences de la Mer »  
Parcours « Géosciences Marines et Environnements Aquatiques (GMEA) »

**Une passe microtidale intermittente contrôlée par le vent :  
l'exemple du grau de La Franqui**



**FEYSSAT Pierre**  
Année universitaire 2018-2019

Sous la direction de :  
**Mr CERTAIN Raphaël**  
MCF -CEFREM/UPVD  
**Mr MEULÉ Samuel**  
MCF-CEREGE/Aix-Marseille



## REMERCIEMENTS

Dans cette partie, je tiens à remercier :

-Raphael CERTAIN pour sa disponibilité, le partage de ses connaissances et les relectures attentives de mon travail. Tout ce travail n'aurait pas été possible sans ses précieux conseils.

-Le Parc naturel régional de la Narbonnaise en Méditerranée pour le financement de ce stage, plus particulièrement Kattalin FORTUNÉ-SANS et Camille PFLEGER pour leurs disponibilités lors de nos nombreux échanges par mail.

-Nicolas ALEMAN, Bertil HEBERT et Olivier RAYNAL pour les longues heures de marche sur la plage de La Franqui depuis le début du suivi en novembre 2017. Mais aussi pour toutes les missions de terrain dans la bonne humeur ainsi que les coups de main sur Arcgis ou pour le maniement pas toujours simple du DGPS.

-Samuel MEULÉ pour m'avoir appris à me servir des instruments hydro et partagé ses codes *pyhton* pour le post-traitement, mais surtout pour sa réactivité à mes mails de détresse lors du traitement des données hydro.

-Nicolas ROBIN pour le partage de son expertise et l'aide sur le terrain.

-Le groupe de recherche GLADYS pour le prêt des instruments hydro (RBR, OSS et ADV).

-Damien SOUS pour le coup demain sur la lecture des données d'ADV.

-Emmanuelle BACHS pour les analyses granulométriques réalisées lors de son stage de licence 3.

-L'ensemble de l'équipe du CEFREM pour son accueil et sa bienveillance.

-Les enseignants du master Sciences de la Mer pour ses deux années riches en apprentissage.

Encore merci à vous



## Sommaire

I- Introduction .....	1
II-Cadre général.....	2
II.1- Les forçages généraux sur la zone d'étude .....	2
II.1.1- Les précipitations .....	2
II.1.2- Les vents.....	2
II.1.3- Les houles.....	2
II.1.4- Les marées.....	3
II.1.5- La dérive littorale .....	3
II.2- Le littoral de La Franqui.....	3
II.3- États des connaissances sur lagune de La Palme .....	4
II.4- États des connaissances sur le fonctionnement du grau de La Franqui .....	5
III- Méthodologie .....	6
III.1- Mesures des paramètres hydrométéorologiques .....	6
III.1.1- Mesures des houles .....	6
III.1.2- Mesures anémométriques.....	6
III.2- Instrumentation hydrodynamiques des forçages lagunaires et marins .....	6
III.2.1- Capteurs de pression .....	7
III.2.2- Courantomètre.....	7
III.3- Levés topographiques .....	7
III.4- Analyses granulométriques.....	8
III.5- Utilisation de données historiques .....	9
IV- Résultats.....	9
IV.1- Analyse historique du fonctionnement du grau .....	9
IV.2- Processus évènementiels court-terme du fonctionnement du grau.....	9
IV.2.1- En situation de Tramontane.....	9
IV.2.1.1 Évolutions morphologiques .....	9
IV.2.1.2 Hydrodynamique et variations des niveaux d'eau .....	12
IV.2.2- En situation de vent marin .....	15
IV.2.2.1 Évolutions morphologiques .....	15
IV.2.2.1 Hydrodynamique et variations des niveaux d'eau .....	17
V- Interprétation.....	19
V.1- Percolation au travers de la barrière.....	19
V.2- Modèle conceptuel de fonctionnement du grau de La Franqui.....	20
VI- Discussion.....	23
VI.1- Connaissances sur la percolation au travers de la barrière .....	23
VI.2- Confrontation avec les observations déjà réalisées pour le grau de La Franqui.....	23
VI.3- Insertion dans les modèles de la littérature internationale.....	23
VI.4- Limites de la présente étude .....	24
VII- Conclusion.....	25
VII.1- Perspectives de gestion du site .....	25
VII.2- Perspectives de recherche.....	25
Références bibliographiques .....	27
Listes des figures.....	30
Sommaire des Annexes .....	31
Annexes.....	32

## I- Introduction

L'étang de La Palme (Fig. 1) fait partie des nombreuses lagunes qui bordent le littoral du Languedoc-Roussillon, il est situé dans le département de l'Aude, entre les communes de Leucate (au sud), de La Palme (à l'ouest) et de Port-la-Nouvelle (au nord). De par sa richesse écologique, le site est classé *Natura 2000* au titre des directives « habitats, faune, flore » et « Oiseaux ». En 2006, il est déclaré « zone humide d'importance internationale » de la convention *Ramsar*. Enfin, l'étang est un site référence de la directive cadre sur l'eau du fait de la bonne qualité de ses eaux, des vastes herbiers et de son grau naturel.

L'étang est relié à la mer via l'un des derniers graus naturels de Méditerranée française : le grau de La Franqui. Un grau est le terme occitan pour désigner un estuaire, c'est un chenal étroit permettant la communication entre les eaux lagunaire isolées par une barrière littorale et la mer.

Cet estuaire a un fonctionnement intermittent, l'alternance entre les périodes closes et ouvertes est contrôlée par les conditions météorologiques. En période close, l'étang se trouve isolé de la mer. Le cordon de sable agit comme un barrage empêchant soit la vidange de l'étang et faisant courir un risque d'inondation en cas de fortes précipitations. Soit empêchant la réalimentation de la lagune par les eaux marines lors de périodes d'assèchements, ce qui entraîne une importante dégradation de la qualité de l'eau lagunaire. Les migrations de la faune aquatique sont également entièrement dépendantes de l'état du grau.

Sous le poids des différents enjeux et pour veiller à une gestion concertée du grau respectant son fonctionnement naturel, un cahier des charges a été rédigé par le Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée (PNRNM), gestionnaire du site. Ce document décrit les conditions qui pourraient aboutir exceptionnellement à une ouverture artificielle du lido avec les impacts que pourraient avoir ces actions sur la plage et la lagune (Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2010a). Le but des gestionnaires est cependant d'éviter les ouvertures artificielles du cordon et de laisser le grau évoluer naturellement au maximum. Une meilleure compréhension

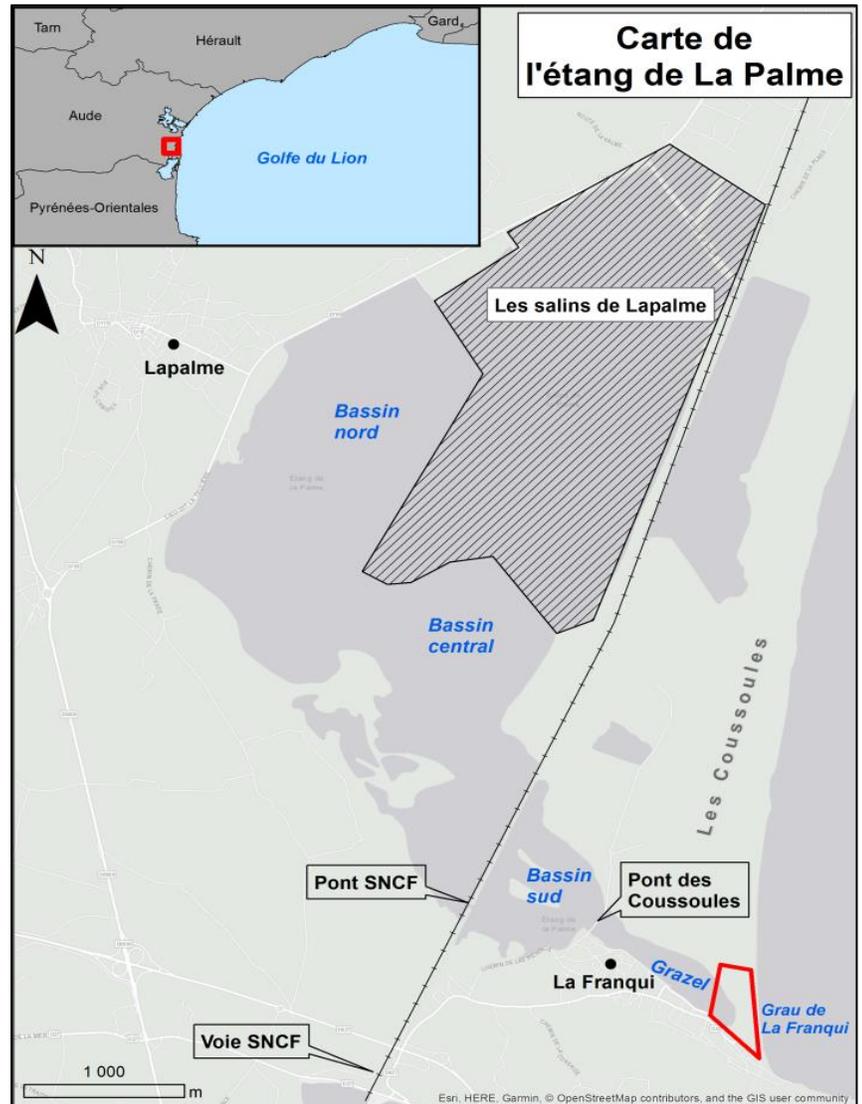


Figure 1 Carte de l'étang de La palme. En rouge : zone de suivi topographique

des facteurs qui contrôlent les phases d'ouvertures et de fermetures du grau permettrait d'affiner les critères de gestion de son cahier des charges. Ce travail a aussi un aspect historique, en apportant des connaissances sur le fonctionnement d'un des derniers graus non-endigué de la Région Occitanie il permet de comprendre la dynamique des littoraux passés. Les conditions météorologiques amenant à une ouverture ou un comblement du grau ont déjà été partiellement décrites lors de la rédaction de ce document (Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2010a).

Ce travail en partenariat avec le PNRNM a été initié suite à une phase anormale de construction de la berme qui a aboutie à la fermeture du grau de février 2017 jusqu'au début de l'hiver 2017. Le suivi du grau a débuté en novembre 2017 et a fait l'objet de mon stage de 2 mois en master 1 en 2018. Le présent travail va servir à conforter les observations déjà faites par de nouvelles données et à corriger certaines hypothèses. Pour cela les suivis topographiques et hydrométéorologiques ont été maintenus, le nouvel apport étant le déploiement d'instruments de mesures hydrodynamiques. Cela va permettre de : 1) caractériser les variations de niveau d'eau entre la lagune et la mer afin de mieux comprendre les processus d'ouvertures et de fermetures du grau, 2) mesurer les courants dans le grau et la lagune, 3) de mettre en évidence les possibles échanges entre la mer et la lagune à l'intérieur du cordon en fonction des forçages hydrométéorologiques.

Les résultats présentés ci-dessous s'appuient sur des données historiques, les résultats du stage de master 1 et sur les données acquises lors de la période de stage de master 2. Ce travail doit permettre de caractériser et de comprendre dans leurs globalités les mécanismes qui amènent à l'ouverture ou au comblement du grau de La Franqui. Le but est d'obtenir un modèle de fonctionnement du grau au cours d'un cycle annuel.

## **II-Cadre général**

### **II.1- Les forçages généraux sur la zone d'étude**

#### II.1.1- Les précipitations

La moyenne des précipitations annuelle sur la région est de l'ordre de 600 mm. Le mois d'octobre est le plus humide avec un cumul moyen des précipitations d'environ 80 mm et la période la plus sèche est le mois de juillet avec en moyenne seulement 15 mm d'eau (Larue and Rouquet, 2016; Météo-France, 2019; Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2014).

#### II.1.2- Les vents

Le vent dominant de la région est la Tramontane (60 % du temps), vent de nord/nord-ouest qui souffle depuis le continent vers le Golfe du Lion. C'est un vent froid et sec qui peut souffler remarquablement fort, il n'est pas rare d'enregistrer des vitesses de l'ordre de  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Le vent marin (de sud/sud-est) est quant à lui moins fréquent et s'accompagne de houle, c'est le vent associé aux violents épisodes de tempêtes hivernaux (Aleman et al., 2015; Wilke and Boutière, 1999). Une certaine saisonnalité est observables dans ces régimes de vents: en été les brises de mer sont fréquentes, le printemps connaît des épisodes de Tramontane plus violents tandis que les tempêtes atteignent leur maximum d'intensité en automne et en hiver (Certain, 2002).

#### II.1.3- Les houles

La houle la plus fréquente, de provenance N/NO, est engendrée par la Tramontane. Du fait d'un *fetch* limité, c'est une houle le plus souvent de faible taille (hauteur significative  $H_s < 1,5 \text{ m}$  dans 94 % des cas) et de courte période significative (en moyenne  $T_s \approx 5,7$  et  $6,3 \text{ s}$ ) dans le Golfe du Lion. La houle issue du vent marin en provenance du S/SE est caractérisée par une taille et

une période plus importante ( $T_s \approx 5$  et 10 s), du fait de son *fetch* plus étendu (Certain, 2002). Tout comme pour les vents, une saisonnalité est observable dans les conditions de houle. Le printemps et l'été sont caractérisés par des conditions de faible énergie alors que l'automne et l'hiver sont des périodes plus énergétiques (Aleman et al., 2015; CEREMA and DREAL Languedoc Roussillon, 2018).

#### II.1.4- Les marées

Le régime de marée en Méditerranée est semi-diurne à inégalité diurne avec des amplitudes moyennes de l'ordre de 0,3 m (microtidale). Les harmoniques semi-diurnes sont légèrement plus importantes que les harmoniques diurnes. Il y a alors deux pleines mers et deux basses mers par jour, mais les amplitudes entre pleines mers et basses mers successives sont différentes (Fiandrino et al., 2012). Des variations de hauteurs d'eaux plus importantes peuvent avoir lieu en lien avec la direction et l'intensité des vents ou les fluctuations de la pression atmosphérique. Lors d'épisodes de tempête, la surcote peut atteindre plus d'un mètre sous l'effet conjugué de l'onde de tempête et de la houle (Certain, 2002).

#### II.1.5- La dérive littorale

La direction de la dérive littorale dans le Golfe du Lion est issue de la forme convexe de la côte et de la position des caps rocheux qui jalonnent le littoral. Il en résulte une dérive littorale orientée vers le nord dans la partie sud du golfe et orienté vers le sud dans la partie nord. Les deux dérives de sens opposés se rencontrent au niveau du littoral du Narbonnais, où se trouve notre zone d'étude avec un flux moyen combiné de 20 000 m<sup>3</sup>/an. De ce fait, ce secteur est une zone d'accumulation de sédiments (Brunel et al., 2012; Certain, 2002; Kulling, 2017).

### **II.2- Le littoral de La Franqui**

Le littoral entre Cap Leucate et Port-la-Nouvelle est composé d'une unité de sable mobile, l'*Upper Sand Unit* (USU). Cette unité regroupe les sables remobilisable naturellement par les processus hydrodynamiques lors d'évènements de tempêtes allant jusqu'à l'occurrence séculaire. Les barres d'avant-côte sont la partie sommitale de cette USU (Raynal et al., 2015). Cette unité, d'une épaisseur maximum de 5 m, repose sur un substrat de grés de plage. Le système présente une pente de 0,75 % (Aleman et al., 2015), la plage est donc classée comme dissipative (Wright and Short, 1984). Le système présente trois barres festonnées (Aleman, 2013), les deux plus proximal de type RBB (*Rythmic Bar and Beach*) avec une barre externe de type LBT (*Longshore Bar-Trough*) dissipative (Short and Aagaard, 1993; Wright and Short, 1984). La longueur d'onde et l'amplitude de ces festons augmente avec l'éloignement à la côte. Une importante barre est en place à plusieurs centaines de mètres du rivage, de forme arquée elle relie le cap Leucate à la plage des Coussoules. Elle est issue des sédiments transportés par la dérive littorale qui contournent le cap.

L'étude de l'interaction entre le Trait de Côte (TC) et le Bilan Sédimentaire de l'Avant Côte (BSAC) permet de caractériser les plages suivant leurs rapports TC/ BSAC (Brunel et al., 2012; Brunel and Certain, 2014). Sur la période 1984/2009 la cellule Leucate/La Franqui subie une érosion de l'ordre de -440 m<sup>3</sup>/an. La relation TC/BSAC est majoritairement proportionnelle selon un modèle standard progradant accumulant, avec cependant localement deux zones en évolution non-proportionnelle progradante érosive voir érosive au Sud le long du cap.

La convergence des dérives littorales dans ce secteur du Golfe du Lion assure une importante alimentation en sédiments du système. Le compartiment du Narbonnais est le seul où le phénomène d'accrétion est majoritaire (44%) (Certain et al., 2005). Les sédiments en provenance du nord sont principalement issus du démantèlement d'anciens dépôts deltaïques du Rhône ainsi

que des apports des petits fleuves côtiers régionaux. Ce sont en général des sables fins à moyens. Les apports sédimentaires en provenance du sud sont en grande partie issus de l'érosion des massifs détritiques de la zone nord pyrénéenne (Larue et al., 2009). Ces sédiments sont filtrés par la barrière semi-perméable que forme le cap Leucate. Les plus grossiers (sables moyens à grossiers) sont interrompus, en revanche la fraction plus fine passe le cap et va alimenter la partie aval du littoral. Cette séparation des sédiments explique le changement brutal de typologie de plage : les plages intermédiaires au sud du cap se développant sur des sédiments plutôt grossiers (entre 0,3 et 1 mm) avec deux barres festonnées. Les plages dissipatives au nord sont composées de sables plus fins (entre 0,2 et 0,8 mm) et comportent deux voir temporairement trois barres (Aleman, 2013; Brunel et al., 2012; Certain, 2002; Raynal et al., 2015). La barre externe est rectiligne au niveau de La Franqui et devient festonnée vers Port-la-Nouvelle

Le système de barres d'avant-côte influence fortement la morphologie de la plage émergée, la position des cornes de la plage correspond au point de connexion des cornes des festons de la barre interne avec la plage aérienne. En période de faible énergie, les cornes des sinuosités de la plage présentent des profils concaves, la berme est peu marquée et moins haute ce qui crée des zones de plus faible élévation aux niveaux de ces cornes. En période plus énergétique, le trait de côte rétrograde et aggrade. Il en résulte une berme plus haute et fortement pentée vers la mer (Ferrer, 2010).

### **II.3- États des connaissances sur lagune de La Palme**

La lagune est composée de 3 bassins (Fig. 1) de tailles et de profondeurs décroissantes : le bassin nord-ouest, le bassin central délimité au sud par la voie SNCF, le bassin sud compris entre la voie de chemin de fer et la route des *Coussoules* et le *Grazel* le long du village de La Franqui (Wilke and Boutière, 1999). Le fond est constitué en grande majorité de vase aux débouchés des venues d'eau à l'ouest et généralement sur les berges. La proportion en sable augmente vers le sud du bassin pour atteindre une proportion de l'ordre de 50 à 60 % (Ifremer, 2013). Les marées bien que de faibles amplitudes sont observées sur la côte, en revanche l'onde ne se propage pas dans l'étang. Le signal est atténué par les étranglements successifs (grau, ponts), il en résulte une faible propagation de la marée en amont du pont SNCF. Les variations de marées ne sont donc pas un facteur important dans les échanges entre la mer et le nord de la lagune (Fiandrino et al., 2012).

L'étang d'une surface de 500 ha pour une profondeur moyenne de  $\approx 0,9$  m et une profondeur maximum de 1,8 m contient un volume de  $2,6 \text{ Mm}^3$  d'eau (Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2010b). Le bilan hydrologique annuel indique un volume total en entrée de  $38 \text{ Mm}^3$ , les sources karstiques et les ruisseaux représentent la majorité des entrées ( $27 \text{ Mm}^3$ ) alors que les apports maritimes ne représentent que  $7 \text{ Mm}^3$  (Fiandrino et al., 2012; Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2010c). Malgré cela, l'étang de La Palme est classé comme une lagune confinée avec un taux de renouvellement faible ( $\approx 8$  %). Ce taux de renouvellement n'est pas fixe et peut atteindre 20 % en hiver car il est fortement influencé par les conditions de forçage hydrométéorologiques et l'état du grau (Fiandrino et al., 2012). Les échanges en eaux entre la lagune et la mer se font soit par le grau lorsque celui-ci est ouvert, soit par submersion du cordon dans le cas de fort coup de mer (Anselme et al., 2008). La percolation au travers du lido est considérée comme une voie d'échange d'eaux entre la mer et la lagune (Larue and Rouquet, 2016), mais ce phénomène n'a pas été étudié.

Dans la littérature, il est dit que si la barrière est assez étroite l'eau va percoler au travers du sédiment poreux. Le gradient hydraulique de part et d'autre de la barrière déterminera la direction de l'écoulement, la vitesse d'écoulement est également fonction de la taille des sédiments (Perera

et al., 2019). Dans certains cas où le gradient hydraulique est très important, ce phénomène de percolation peut être à l'origine de la liquéfaction du matériel constituant la barrière conduisant ainsi à sa rupture (Kraus et al., 2008, 2002; Zietsman, 2004). Le phénomène de circulation d'eau dans la berme sous la zone de *swash* (Sous et al., 2016) entre certainement en jeux dans les mécanismes de percolation ainsi que dans les phases de constructions et d'érosion de la berme. A La Franqui les hauteurs d'eau dans le *Grazel* et en mer étant fortement influencées par les forçages hydrométéorologiques, il est possible que la percolation le soit aussi.

#### II.4- États des connaissances sur le fonctionnement du grau de La Franqui

Le grau de La Franqui est assimilé à une passe (*inlet*) microtidale intermittente. Dans la littérature ces objets sont référencés sous plusieurs appellations : ICOLLs *Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons* (Haines et al., 2006; McSweeney et al., 2017), TOCEs *Temporarily Open/Closed Estuaries* (Stretch and Parkinson, 2006), *seasonnally open inlets* (Ranasinghe et al., 1999; Ranasinghe and Pattiaratchi, 2003a) ou encore IOCE *Intermittently Open/Closed Estuarues* (McSweeney et al., 2018, 2017).

Les passes microtidales intermittentes sont des formes d'estuaires particulièrement dynamiques caractérisés par des fermetures périodiques de leurs exutoires en mer. Ce sont de petites passes permettant la communication entre la mer et une lagune côtière, leur largeur dépasse rarement la centaine de mètres pour au maximum quelques mètres de fond (Ranasinghe and Pattiaratchi, 2003a). Elles sont courantes dans les environnements micro-tidaux dominés par l'énergie des vagues où d'importantes variations dans les volumes des décharges fluviales et dans les régimes de houles sont observées (Cooper, 1994; FitzGerald, 1996). La dynamique de l'exutoire est contrôlé par l'équilibre entre le transport *onshore* et *offshore* de sédiments (Ranasinghe et al., 1999; Ranasinghe and Pattiaratchi, 2003a; Seminack and McBride, 2018), lui-même fortement influencé par l'énergie des vagues (Haines et al., 2006; Wainwright and Baldock, 2015) et le courant sortant de l'*inlet* (Boyd et al., 1992; Cooper, 2001; Stretch and Parkinson, 2006).

Le modèle de fonctionnement établi pour ces estuaires par différents auteurs est le suivant. En hiver lorsque les conditions météorologiques sont plus énergétiques, du sédiment est transporté depuis la plage aérienne vers la zone de surf où il est stocké dans les barres d'avant-côte. Le courant sortant de l'*inlet* est équivalent à un fort courant de jusant qui va soit élargir une passe existante dans la barrière, soit en créer une. Ce courant va entraîner le dépôt d'un delta de jusant au débouché de l'exutoire en mer. Deux processus de fermeture ont été identifiés en fonction soit de la dominance de la dérive littorale, soit du transport cross-shore par la houle (modèle conceptuel annexe 1).

Dans le cas d'une forte dérive littorale, les sédiments transportés par le courant sortant s'accumule en aval dérive pour former une petite flèche. Quand le flux s'affaiblis et ne peut plus contrer l'effet de la dérive littoral, la flèche migre et ferme l'embouchure. Ceci s'applique surtout dans le cas de littoraux rectiligne soumis à une houle oblique (FitzGerald, 1996; Hayes, 1991; McSweeney et al., 2018; Ranasinghe et al., 1999).

Dans les cas où de houles de longue période arrivant face à la plage, une partie du sédiment accumulé au cours de l'hiver est remobilisé sous la forme d'une barre, le delta jusque-là sous-marin émerge sous l'action des vagues. Si l'intensité du courant sortant de l'*inlet* est inférieure à la capacité de transport de la houle, la barre et le delta vont migrer jusqu'à être incorporé à la plage fermant ainsi l'exutoire. Ce mécanisme de *cross-shore transport* (CST) est courant dans le cas de plage fermée et fonctionne pour des vitesses de courant sortant faible ( $<0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), couplé à un taux transport sédimentaire *longshore* faible avec une incidence de la houle normale à la

côte (Cooper, 1994; FitzGerald, 1988; FitzGerald and Buynovich, 2003; Hayes, 1991; McSweeney et al., 2018; Ranasinghe et al., 1999; Ranasinghe and Pattiaratchi, 2003b; Treloar et al., 1993).

Les travaux de MM. Boutière et Wilke (Wilke and Boutière, 2000, 1999) sur le grau de La Franqui décrivent trois configurations propices à l'ouverture du grau. Tout d'abord, la condition principale d'une ouverture est une augmentation significative du niveau d'eau dans l'étang, de l'ordre de 0,32 m au-dessus du niveau de la mer. Ceci se produit en général en fin d'automne ou au cours de l'hiver après de fortes pluies. Conjugués à cette augmentation de la charge hydraulique, plusieurs régimes de vents peuvent aussi conduire à une ouverture. Une forte Tramontane (vitesses maximales supérieures à 28 m.s<sup>-1</sup>) sur plusieurs jours entraîne une ouverture dans plus de 50 % des cas. Les périodes de fort vent marin (de l'ordre de 27 m.s<sup>-1</sup>), qui s'accompagnent en général d'une houle importante dirigée vers le littoral aboutissent à une ouverture dans ≈30 % des cas. Enfin, l'alternance de périodes de forts vents de terre et marin peut conduire à une ouverture du grau. Cette configuration est cependant la moins courante, >20 % des cas. Selon les auteurs, la barrière littorale n'atteint jamais une hauteur suffisante pour qu'une élévation du niveau d'eau dans le *Grazel* de +0,1 m couplé à des vents ≈27 m.s<sup>-1</sup> ne puisse la percer.

### III- Méthodologie

#### III.1- Mesures des paramètres hydrométéorologiques

##### III.1.1- Mesures des houles

Les mesures des paramètres physiques des houles sont issues de la campagne de mesure *in-situ* en continu CANDHIS (Centre d'Archivage National des Données de Houle In Situ).

Les données proviennent de la bouée houlographe de Leucate (42°55'00.04"N ; 3°07'30.03"E), située à 2,9 milles de la côte amarrée sur 40 m de fond (CEREMA and DREAL Languedoc Roussillon, 2019).

##### III.1.2- Mesures anémométriques

Les mesures des paramètres du vent proviennent de *Météo France* via la station du sémaphore de Cap Leucate (42°55'05"N ; 3°03'42"E). La station est située à environ 2,5 km à l'est de la plage de La Franqui, à l'extrémité du cap à une altitude de 42 m.

Des moyennes journalières du vent sont utilisés pendant les phases de suivies topographiques de la zone, soit du 1/11/2017 au 22/05/2019. Au cours du déploiement des instruments de mesures hydrodynamiques sur la zone, le pas des mesures de vent est ramené à une moyenne des conditions horaires du 7/02/2019 au 27/03/2019.

#### III.2- Instrumentation hydrodynamiques des forçages lagunaires et marins

Une première partie des données ont été généreusement partagé par Valentí RODELLAS du CEREGE à l'Université d'Aix-Marseille (Rodellas et al., 2018). L'équipe a installé trois capteurs mesurant la hauteur d'eau dans les bassins nord, central et sud entre le 18/11/2017 et le 9/01/2018 (Annexe 2). Notre déploiement sert à mesurer plus finement ces variations de niveaux entre la côte et le bassin sud en fonction du régime de vent. Du 7 février au 13 mai 2019 des instruments de mesures hydrodynamiques (capteurs de pressions et courantomètre) sont déployés au niveau de la plage de La Franqui (Fig. 2). Le but est de mesurer et de comprendre les mouvements d'eau sur la côte et dans la lagune en fonction des conditions hydrométéorologiques. L'essentiel des mesures concernent des hauteurs d'eau à des endroits stratégiques de la lagune et dans le cordon sableux. L'ensemble des données sont ensuite traitées et visualisés via l'environnement *SPYDER* (*Scientific Python Development EnviRonment*) sur la plateforme de logiciel *Anaconda*. La

position des capteurs est mesurée et contrôlée avec un DGPS cinématique ce qui assure un positionnement centimétrique, notamment en z pour rendre toutes les mesures de niveaux comparables dans le référentiel NGF.

### III.2.1- Capteurs de pression

Les instruments sont calibrés avant leurs mises en fonction afin de pouvoir dériver des hauteurs d'eau à partir des pressions mesurées. Deux types de capteurs de pression sont utilisés. Des capteurs RBR *Virtuoso* qui serviront au suivi des niveaux d'eaux dans la lagune et en mer, trois capteurs *Ocean Sensor Systems* OSS1-010-003 (OSS) pour le suivi de la nappe dans la barrière sableuse.

- les RBR sont des instruments faciles à déployer et précis (0,05 %), ils sont soit placé sur des lests de plomb soit sur une structure métallique immergé. Ils sont utilisés à des fréquences d'acquisition comprises entre 2 Hz et 8 Hz en fonction de leurs positions et des paramètres à mesurer (Fig. 2).

- les OSS servent à mesurer les variations de la nappe dans le cordon littoral (précision 0,05%). Le but est de mettre en évidence des échanges probables entre mer/lagune au travers de la plage car les volumes et les conditions de fonctionnements de ce flux ne sont pas encore connus. Les instruments sont placés sur des piquets métalliques de 2 m de long puis enfoncé dans la plage (Fig.2). La mise en place se fait avec une lance à eau, qui va permettre de liquéfier le sable et de placer facilement le matériel sans trop dénaturer la plage. Ces instruments fonctionnent à 2 Hz en continue pendant tout le déploiement (Fig. 2).

### II.2.2- Courantomètre

Un ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) est instrument permettant de calculer les vitesses du courant dans trois dimensions, dans un faible volume et à haute fréquence avec une précision de 0,25 %. Ces vitesses sont issues de mesure de vitesses sur les particules contenues dans l'eau en se basant sur l'utilisation de l'effet Doppler. Ici, un ADV *Vector* de la société *NORTEK* a été utilisé, cet instrument mesure également la pression dont on dérivera la hauteur d'eau. Dans un premier temps l'instrument est placé dans le chenal du grau pour estimer l'intensité des courants des échanges dans le grau par temps calme (du 07/02 au 8/02/2019). L'acquisition se fait à une fréquence de 1Hz par *burst* de 1 minute toutes les 10 minutes. Par la suite, l'instrument est placé sur une structure sous le pont de la SNCF (du 13/02 au 27/03/2019) à une fréquence d'acquisition de 1Hz par *burst* de 1min toutes les heures (Fig. 3).

### **III.3- Levés topographiques**

Les levés surfaciques de la plage de La Franqui (Annexe 3) sont réalisés avec un DGPS-RTK (Differential Global Positioning System-Real Time Kinetic) qui permet d'atteindre une précision centimétrique. Le matériel est composé d'une base fixe *Ashtech Proflex 500* et d'un module radio *ADL Vantage (Pacific Crest)* permettant la communication avec le mobile, rendant ainsi possible le levé en RTK. Le mobile étant une unité *Ashtech Proflex 800*.

Les données sont ensuite post-traitées puis importé sur le logiciel de SIG *ArcGIS 10.4*. Les MNT sont générés en utilisant la méthode d'interpolation *Natural Neighbor*. Les MNT différentiels sont obtenus par soustraction de deux MNT et permettent de mettre en évidence les évolutions morphologiques de la zone d'étude ainsi que de calculer des bilans sédimentaires sur la période couverte par les deux mesures. Leur précision en altimétrie est de l'ordre de  $\pm 2,5$  cm, les données contenues dans cette marge d'erreur ne sont pas représentées sur les figures.

Le suivi a débuté en novembre 2017 et se poursuit depuis à une fréquence de levé quasi-mensuelle. Les levés sont faits de manière à représenter des situations de plage spécifique (après un évènement de Tramontane, de tempête, une fermeture/ouverture du grau...). Lors de la période de déploiement des instruments de mesure hydrodynamiques sur la zone la fréquence des levés est hebdomadaire.

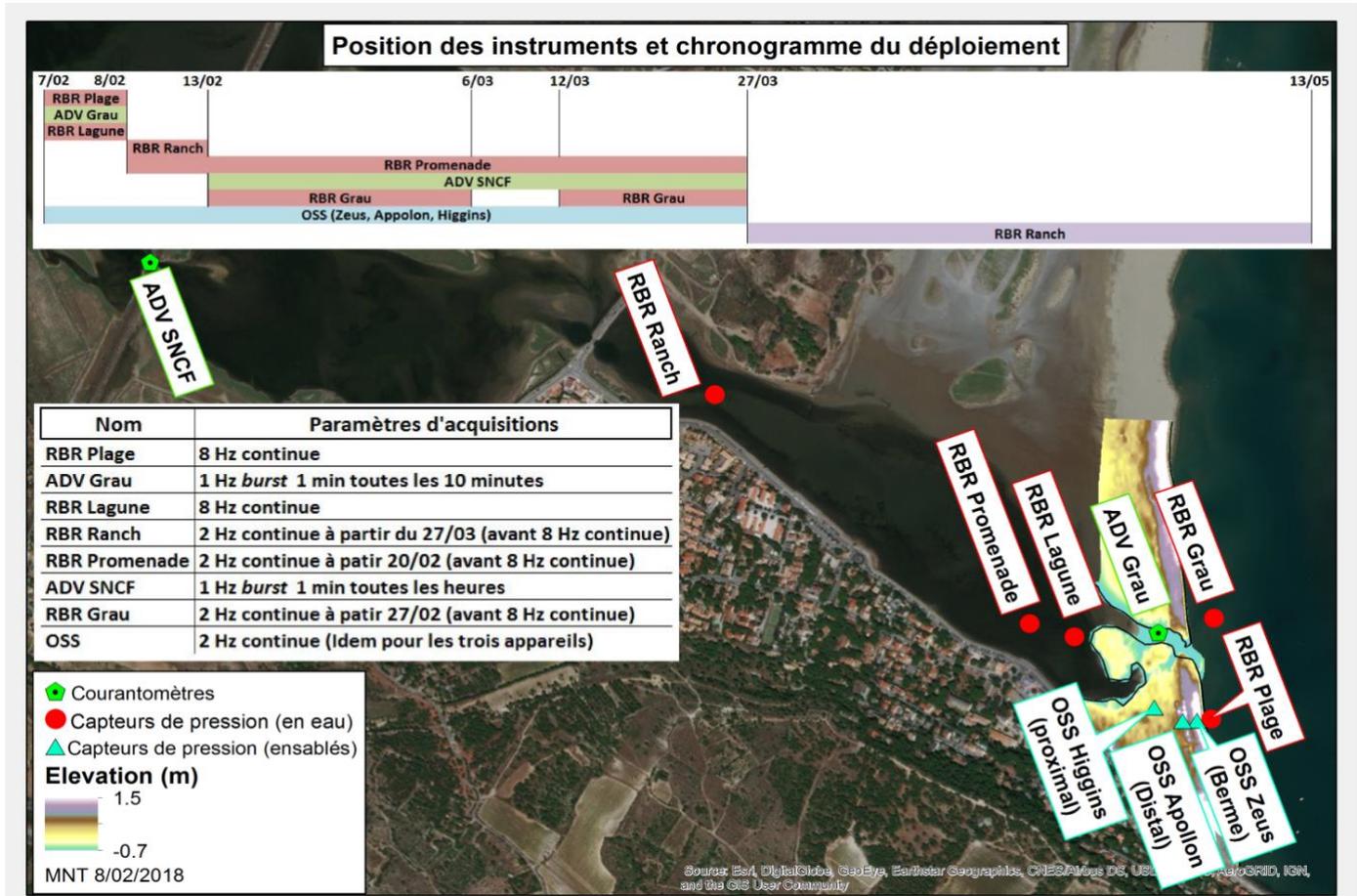


Figure 2 Carte de positionnement des instruments au cours du déploiement

### III.4- Analyses granulométriques

Deux séries de prélèvements de surface ont été fait sur la zone d'étude, un transect au-dessus des capteurs de pression ensablés (Fig. 2) partant du talus de collision jusqu'à la limite de la lagune. Ainsi que plusieurs autres prélèvements ponctuels : chenal du grau, *Grazel*, dune éolienne, haut de berme au sud afin de caractériser les sables transportés (Annexe 7). La première campagne d'échantillonnage a eu lieu le 8 février 2019 (Annexe 9). La seconde a eu lieu le 22 mars 2019 sur les mêmes points (Annexe 10).

Les échantillons seront tamisés à sec sur une colonne de 18 tamis de 10 à 0,2mm avec une progression de raison  $10^{1/10}=1,2589$  conforme à la norme AFNOR en vigueur. Le tamisage dure 20 minutes avec une amplitude d'agitation de 35. Les masses des refus de chaque tamis sont ensuite mesurées avec une balance de précision.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont ensuite traités avec le logiciel Excel et importés le logiciel de SIG ArcGIS 10.4 (Annexe 11).

### **III.5- Utilisation de données historiques**

Une importante quantité d'images aériennes de la zone depuis les années 1940 ont été répertoriées (Annexe 4). Ces images proviennent en grande partie de la base de données de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN, 2019).

Les images sont géoréférencées sur le logiciel de SIG *ArcGIS 10.4*, puis les traits de côte sont digitalisés manuellement. La position de l'exutoire du grau en mer est tracée, entre les deux points d'inflexion du trait de côte vers l'intérieur de la lagune. Si la qualité des images et la transparence de l'eau le permettent, les barres d'avant-côte sont également digitalisées.

L'étude de ces photos permet de voir l'évolution de ces barres, du trait de côte et de la plage aérienne sur le long terme. Cela nous fournit aussi d'importantes informations sur la relation entre la disposition du système de barres et la morphologie de la plage.

## **IV- Résultats**

### **IV.1- Analyse historique du fonctionnement du grau**

L'analyse d'images aériennes d'archives permet de faire ressortir des grandes tendances morphologiques de la plage.

Tout d'abord, la particularité de ce site réside dans la présence d'une barre externe très éloignée, partant de l'extrémité du cap Leucate et venant se rattacher aux barres plus proximales au niveau des Coussoules. Le système de barres internes montre une évolution nord/sud de sa disposition. À la jonction avec le cap le système est simple avec un festonnage d'une longueur d'onde de l'ordre de 60 à 80 m. Vers le nord la position de la barre interne migre au large, elle se trouve à environ 300 m de la côte au niveau des Coussoules quand elle n'est qu'à une centaine de mètres de la côte à La Franqui. L'éloignement vers le large cette barre entraîne le dédoublement de cette dernière, au niveau du grau une seconde barre interne apparaît et la longueur d'onde du festonnage passe alors à environ 200 à 300 m. Le couplage morphologique entre la barre interne et la barre externe alterne entre phase et opposition de phase du festonnage.

Le chenal du grau se trouve au niveau d'une connexion entre les barres et la plage émergée, sa position semble relativement fixe aussi loin que remonte nos observations. L'enveloppe de mobilité depuis 1942 est d'environ 300 m dans l'axe N/S de la plage avec une largeur moyenne de l'exutoire d'une trentaine de mètres (Annexe 6). L'ouverture du grau va perturber la disposition de l'avant côte. Soit par la mise en place d'un delta de jusant à l'exutoire qui dépose une importante quantité de sédiments masquant en partie le système de barres voir le repoussant au large. Soit en rompant les barres sous l'effet du fort courant sortant, ce qui semble plus rare.

L'observation de la morphologie du chenal permet de mettre en évidence deux configurations courantes. Soit le grau est rectiligne dans l'axe de la Tramontane (voir orthophotos 1962, 1976, 2012, Annexe 5), soit le chenal est sinueux (voir orthophotos 1998 et 2018, Annexe 5). Le grau se met en place avec un chenal rectiligne qui peut évoluer vers une forme sinueuse avec le temps jusqu'à sa fermeture, l'ouverture suivant se fera de nouveau dans l'axe de la Tramontane. Ce fonctionnement semble suivre un cycle.

### **IV.2- Processus évènementiels court-terme du fonctionnement du grau**

#### IV.2.1- En situation de Tramontane

##### *IV.2.1.1 Évolutions morphologiques*

Le vent qui s'engouffre entre la presqu'île des Coussoules et la falaise du Cap des Trois Frères va décaper la plage émergée, exportant une partie du sable vers le trait de côte et la mer où il va sédimenter. Au cours des épisodes de Tramontane le vent produit une houle dirigée vers le sud-

est ayant peu d'impact sur le littoral entraînant une progradation du trait de côte de l'ordre de 3 à 4 m. L'autre partie du sable exporté par la Tramontane s'accumule au sud du lido le long de la promenade, bloqué par les aménagements anthropiques. L'engraissement par le vent se manifeste par une extension de cette zone d'accrétion de plusieurs dizaines de mètres et une augmentation d'élévation de l'ordre de quelques dizaines de centimètres (Fig. 4) ; alors qu'au même instant le reste de la plage est en érosion  $\approx 0.1\text{m}$  (exemples Annexe 13 et Annexe 14), ces estimations sont en revanche fortement dépendante des conditions de vents qui les précèdent.

Les analyses granulométriques des échantillons de surfaces récoltés (Annexe 9 et Annexe 10) sur la plage à la suite d'épisodes de Tramontane (08/02/2019 Annexe 11) montrent une diminution de la taille moyenne du sédiment du nord vers le sud contre la promenade (Fig. 3). Passant de sables de tailles médianes entre  $0,5 < x < 0,8$  mm sur le transect central (au-dessus des OSS voir III.2) à des sables de tailles médianes de l'ordre de  $\approx 0,4$  mm le long de la promenade. La présence de cette accumulation de sable explique que la partie sud du cordon littoral soit la plus haute (en moyenne 0,6 m de plus) et la plus large de la zone d'étude et qu'elle s'amincisse vers le nord (Fig. 4).

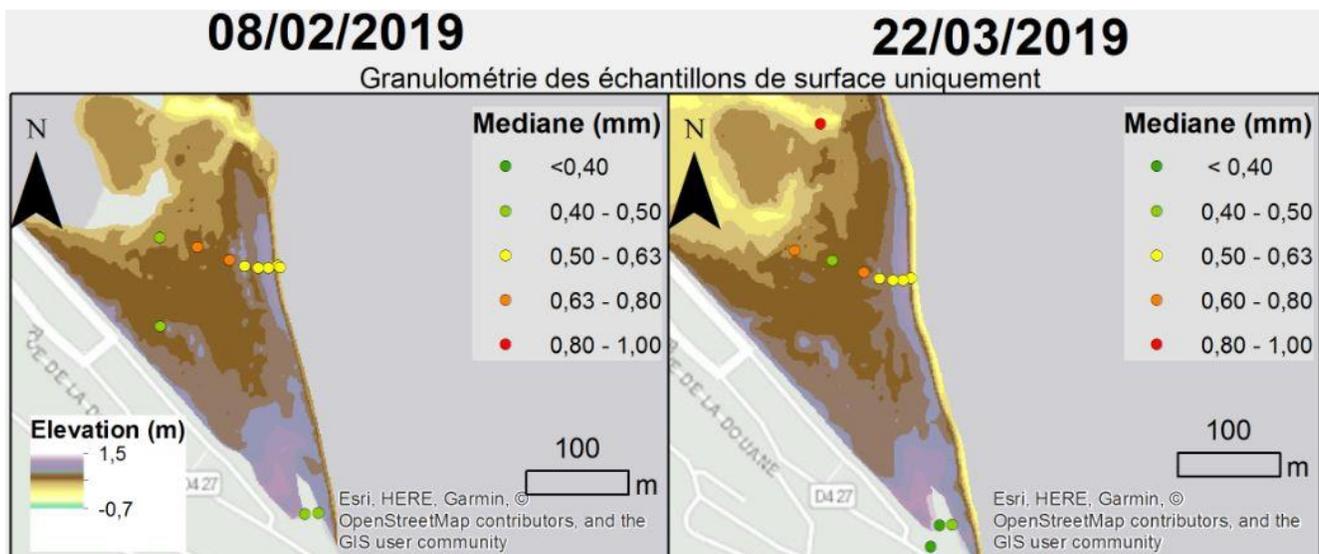


Figure 3 Tailles médiane des sédiments en surface

A la suite de ces événements de vent de terre fort sur plusieurs jours, la berme est moins haute et en pente plus douce vers la mer, des zones de plus faibles altitudes sont visibles au niveau des cornes de sinuosités de la plage, c'est-à-dire des connexions avec les barres d'avant côtes en festons (Fig. 4[a], [c]). La figure en annexe (Annexe 15) représente le MNT de la plage le 12/07/2018, la position des barres d'avant-côte est digitalisée à partir d'une image satellite du 13/07/2018. On y voit que les cornes des sinuosités de la plage sont des zones de plus faible élévation où la plage aérienne est quasiment connectée au système de barres d'avant-côte internes. Des observations similaires sont faites à partir des images LiDAR en 2009 et 2014 (Annexe 16).

Ces évolutions morphologiques correspondent à la mise en place du profil de faible énergie de la plage.

Les ouvertures du grau sont courantes en période de forte Tramontane ( $\geq 10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Les observations tendent à montrer que les premières ouvertures automnales sont causées par une succession de périodes de Tramontane soutenue qui vont exporter le surplus de sable déposé lors de la période estivale d'hydrodynamisme plus faible. L'ensemble des observations ont permis de

conclure que présence d'une berme barrant le passage de l'eau au niveau du futur chenal empêche la vidange de la lagune en mer (Fig. 4). La berme a été mise en place lors du comblement du grau, au début de l'automne elle est particulièrement bien marquée car la période de plus faible hydrodynamisme estival a permis de l'engraisser (Fig. 4 [b] et [c]). L'ouverture du grau se fera par rupture de la berme au niveau d'une corne de sinuosité, cette zone de plus faible élévation est une "faiblesse" dans la plage facilitant l'échappée en mer de l'eau lagunaire.

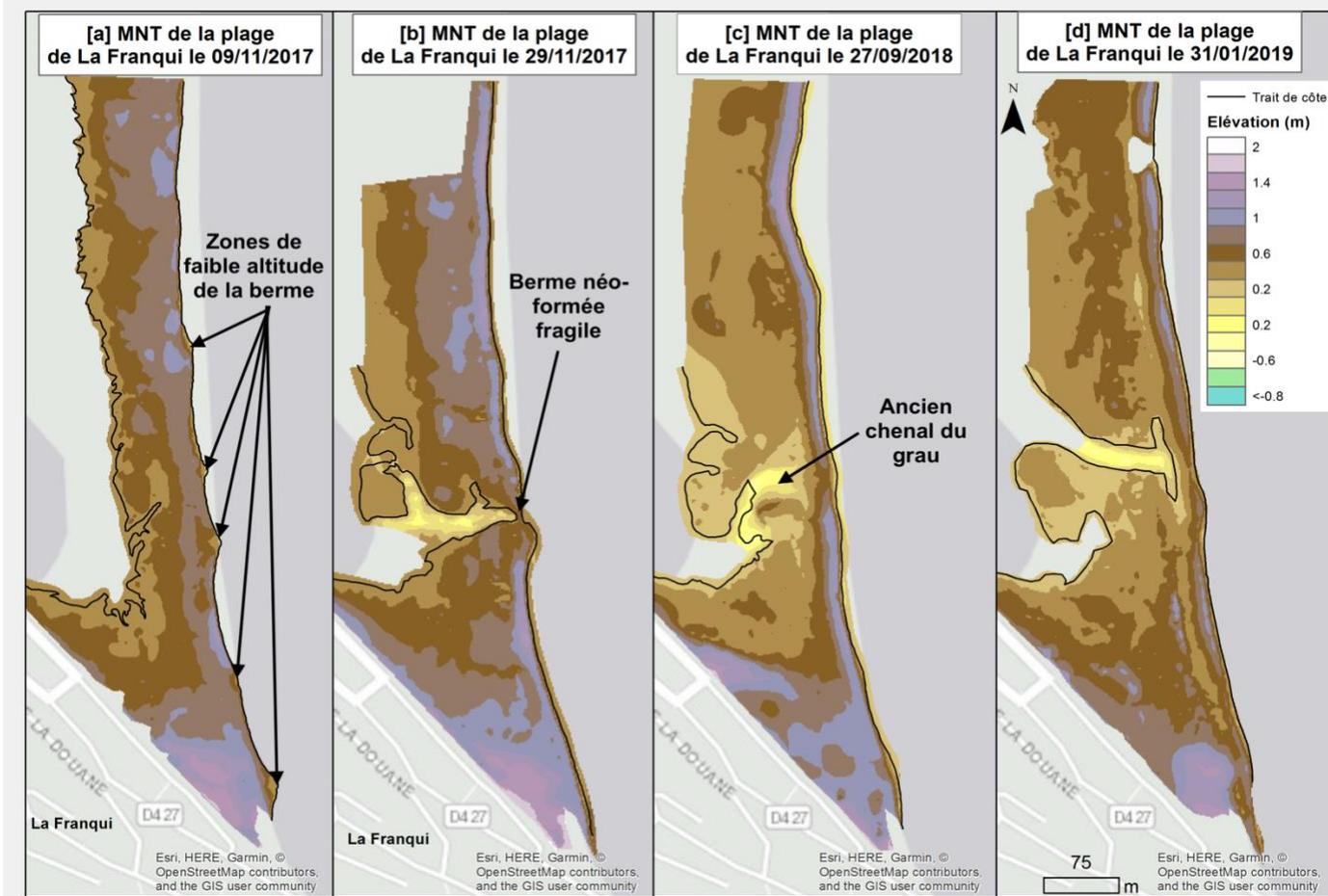


Figure 4 MNT de la plage avant ouverture en d'automne (suite à des conditions de Tramontane) [a], [c] et au cours de l'hiver [b], [d].

Dans les premiers temps suivants l'ouverture, le flux est uniquement sortant et va entrainer le creusement d'un chenal de plus d'un mètre de profondeur dans la plage. Les sédiments sont évacués en mer et vont en partie se déposer sous forme d'un « delta de jusant » à l'exutoire du grau (Fig. 10 [a] et [b]). Le delta est particulièrement bien développé lors des premières ouvertures automnales du grau, le volume de sable expulsé par le creusement du chenal est estimé à  $2\,500\text{m}^3$ .

Au cours de la période hivernale, le grau peut subir plusieurs cycles d'ouverture et de fermeture en fonction des conditions météorologiques et du niveau de la lagune. Les réactivations sont facilitées par la présence d'une zone en dépression à l'arrière de la berme, cette morphologie est généralement héritée du tracé du grau précédent (Fig. 4 [b] et [d]). Lors de ces phases d'ouverture secondaire au cours de l'hiver, le delta sera en général moins développé (Fig. 9 [b]).

#### IV.2.1.2 Hydrodynamique et variations des niveaux d'eau

Les données de hauteurs d'eaux fournis par le CEREGE (voir III.2 et Annexe 2) dans les trois bassins de la lagune permettent de voir qu'en condition de Tramontane on observe un basculement du plan d'eau vers la barrière. Cela se traduit par une baisse de niveau dans les bassins nord et central et une augmentation du niveau d'eau dans le bassin sud (Fig. 5). Ces mouvements d'eaux sont de l'ordre d'une vingtaine de centimètres, mais cela varie en fonction de l'intensité du vent et de l'ouverture du grau. On voit un lien entre la hauteur d'eau dans le bassin sud et le fonctionnement de l'*inlet*, il s'ouvre avec un niveau  $\approx 0,25$  m et se ferme lorsque celui-ci est inférieur à 0.1 m. Notre déploiement en 2019 s'intéresse lui aux variations de niveaux entre l'avant-côte et le bassin sud en fonction du régime de vent.

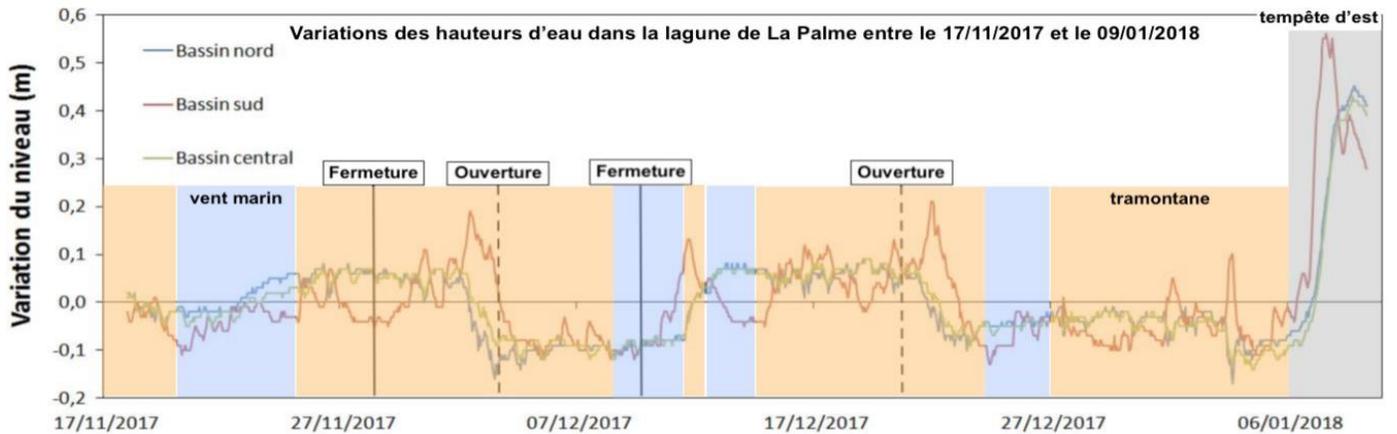


Figure 5 Niveau dans la lagune entre le 17/11/2017 et le 10/01/2018 (données : Rodellas et al., 2018)

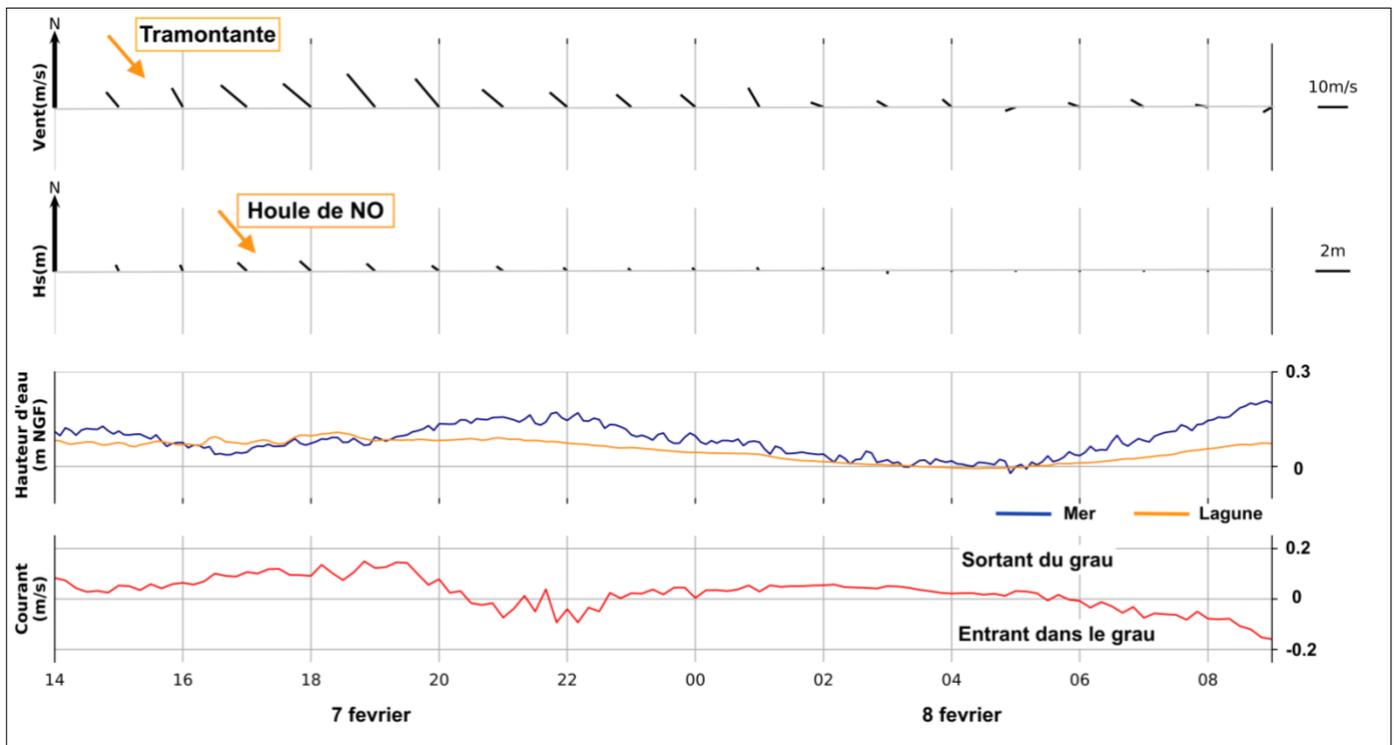


Figure 6 Variations des niveaux d'eaux en mer, en lagune et vitesse de courant dans le grau

Le déploiement dans le grau ouvert ne dure que deux jours, un adv est placé directement dans le chenal et des capteurs de pressions sont placés de part et d'autre du cordon (Fig. 2). Ceci nous permet de voir que la marée s'exprime en mer avec une amplitude de l'ordre d'une dizaine de centimètre. En revanche l'oscillation du plan d'eau lagunaire sous l'effet de la marée est peu marquée seulement  $\approx 5$  cm, les variations liées à la marée sont inférieures à celles créées par le vent (Fig. 6).

En fin de journée le 7 la Tramontane souffle ( $\max 15 \text{ m.s}^{-1}$ ), cela va induire un courant sortant dans le grau dont la vitesse atteint au maximum  $\approx 0,2 \text{ m.s}^{-1}$  (Fig. 6). Lorsque l'intensité du vent baisse dans la soirée et que la marée est haute, le flux s'inverse et le courant entre dans la lagune à une très faible vitesse  $\approx 0,05 \text{ m.s}^{-1}$ . Le même phénomène de courant induit par la marée est observable entre 6h et 10h le 8, en l'absence de vent et avec une marée haute plus importante le flux entrant atteint une vitesse  $\approx 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ . Le courant dans le grau est induit principalement par le vent qui va déterminer la direction et l'intensité du flux. En l'absence de vent le courant est induit par les cycles de marées et surcotes/décotes du plan d'eau.

En plus de son effet décapant sur la plage décrit plus haut, le vent en soufflant vers la mer entraîne un basculement du plan d'eau lagunaire vers la barrière et une décote en mer. On s'intéresse à cette bascule lors des coups de Tramontane avec le grau fermé (Fig. 7). Entre le 28/02 et le 2/03, les vitesses de vents maximums sont atteintes en journée ( $\approx 18 \text{ m.s}^{-1}$ ) et le vent diminue de moitié pratiquement au cours de la nuit. Les variations de niveau dans le *Grazel* sont beaucoup plus importantes qu'en situation de grau ouvert, la hauteur augmente de  $\approx 0,3$  m en quelques heures sous l'effet du vent. La hauteur d'eau sous le pont SNCF augmente aussi rapidement que dans le *Grazel* en revanche un déficit de  $\approx 0,1$  m NGF est observable, cela montre que le plan d'eau est en pente vers l'intérieur de la lagune en condition de Tramontane. Lors des périodes de Tramontane de forte intensité  $\approx 15 \text{ m.s}^{-1}$ , une décote de  $-0,1$  à  $-0,15$  m NGF est visible en mer (le 1/03 et 2/03).

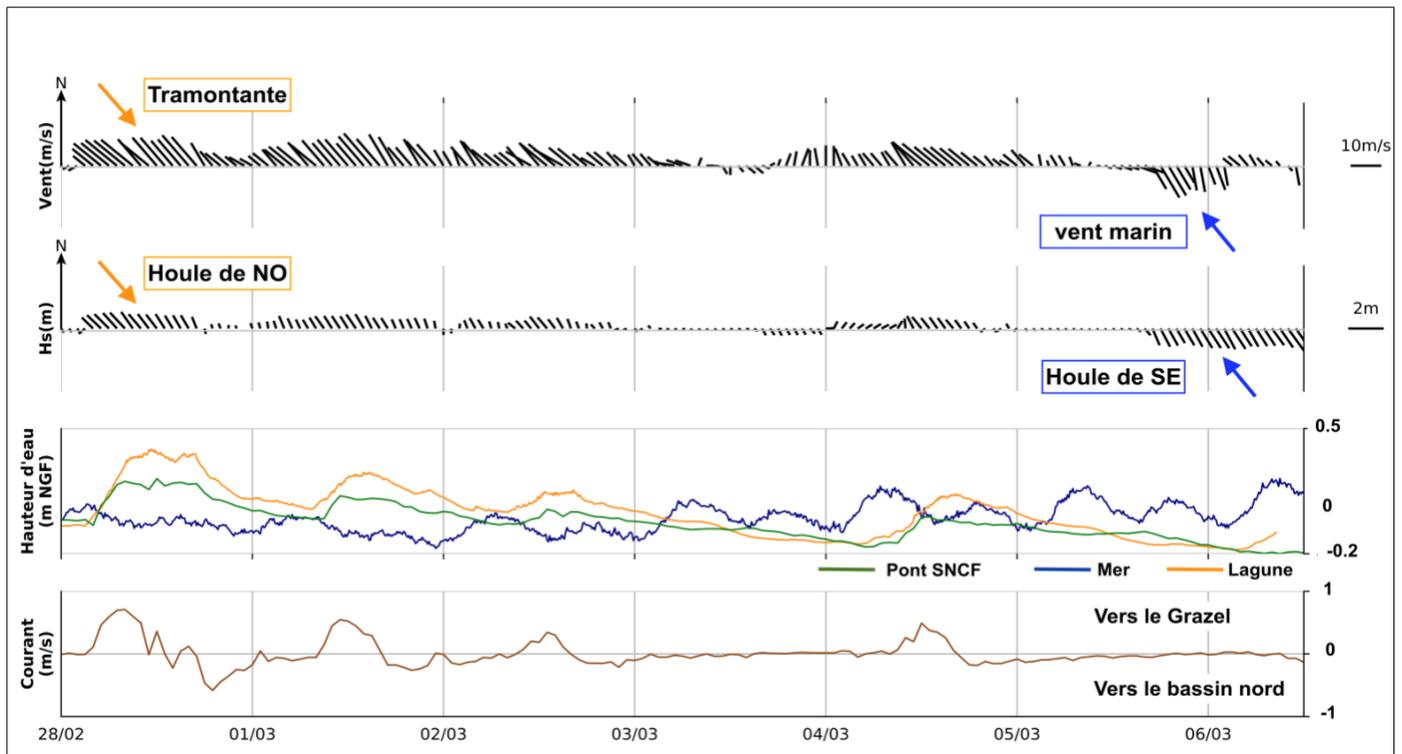


Figure 7 Variations des niveaux en mer et lagune, vitesse de courant sous le pont SNCF en fonction des forçages hydrométéorologiques

En phase montante du niveau et sous l'effet de la Tramontane, le courant au niveau du pont SNCF est important ( $\approx 0,8 \text{ m.s}^{-1}$ ) et dirigé vers le *Grazel* (Fig. 7). Quand le vent reste constant, les hauteurs d'eau se stabilisent et l'intensité du courant va alors baisser. Lorsque la vitesse du vent chute, la surcote dans le *Grazel* n'est plus à l'équilibre et une partie de l'eau repart vers l'intérieur de la lagune, on observe alors un courant vers le bassin nord d'une intensité de  $\approx 0,7 \text{ m.s}^{-1}$ . En fonction du niveau de remplissage antérieur de la lagune et de la morphologie du lido, les forts coups de Tramontane peuvent entraîner une submersion de la plage par les eaux lagunaires.

Le 28/02 la Tramontane ( $\approx 20 \text{ m.s}^{-1}$ ) crée une surcote dans la lagune atteignant  $+0,4 \text{ m NGF}$  alors que la mer est aux alentours de  $0 \text{ NGF}$ . On observe également une augmentation de niveau dans la plage (Fig. 8) grâce aux capteurs OSS enfouis (voir III.2.1). Le capteur le plus proche de la lagune (proximal) réagit le plus rapidement avec une augmentation de niveau de  $0,3 \text{ m}$  en quelques dizaines de minutes avant d'atteindre un pallier à  $+0,6 \text{ m NGF}$  dû à la stabilisation du forçage éolien et de la surcote dans la lagune. Cette augmentation rapide est dû à l'inondation de la plage au-dessus du capteur par la surcote. La montée du niveau sur le second capteur en position distale (en arrière de la berme) se fait environ  $2 \text{ h}$  après le premier et est bien moins marqué, seulement quelques centimètres pour atteindre la côte  $+0,5 \text{ m NGF}$ . Lorsque l'intensité du vent baisse durant la nuit, le niveau descend rapidement au-dessus des deux capteurs. Le 1/03 la Tramontane est moins forte ( $\approx 15 \text{ m.s}^{-1}$ ) la surcote dans la lagune est par conséquent moins marquée ( $\approx 0,2 \text{ m}$ ) en revanche en mer une décote de  $-0.15 \text{ m NGF}$  est enregistrée (Fig 8). On voit bien l'augmentation de niveau de la nappe sur le capteur proximal qui se stabilise quelques heures à  $+0,5 \text{ m}$  alors que la variation est à peine visible sur le capteur distal. En situation de Tramontane, le capteur dans la berme est placé trop haut ( $1 \text{ m NGF}$ ) pour enregistrer des variations de niveaux d'eau. Son positionnement répondant à l'étude spécifique du *swash* dans l'alimentation de la nappe.

En conclusion, on voit un dénivelé de  $10\text{cm}$  de la nappe dirigée de la lagune vers la mer due à la Tramontane et à la surcote qu'elle engendre dans la lagune.

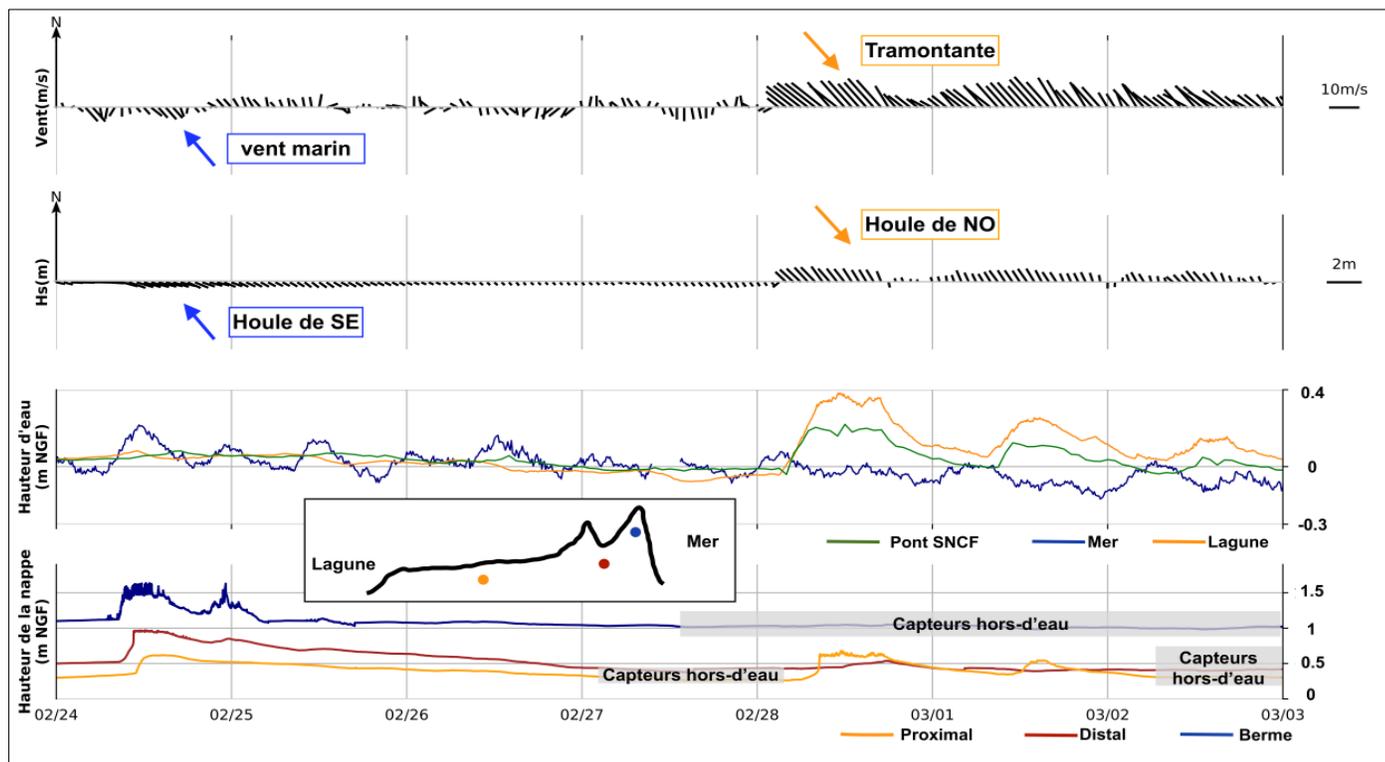


Figure 8 Niveaux d'eaux (lagune, mer) et de la nappe dans la plage en fonction des forçages hydrométéorologiques

## V.2.2- En situation de vent marin

### IV.2.2.1 Évolutions morphologiques

Ces conditions correspondent à une houle de taille significative inférieure à 3 m venant du large accompagnée d'un vent en provenance E/SE. Ce sont des périodes très morphogènes, les vagues arrivant perpendiculairement à la plage vont remodeler l'avant-côte et la plage aérienne entre le talus de collision et le haut de la berme.

Le trait de côte va rétrograder, les cornes des sinuosités de la plage enregistrent les plus forts changements avec des régressions allant de 1m à plus de 8m suivant l'intensité de la houle. Ce sont également les zones les plus érodées, les pertes d'altitude se chiffrent à plusieurs dizaines de centimètres et sont très localisés (exemple Annexe 18).

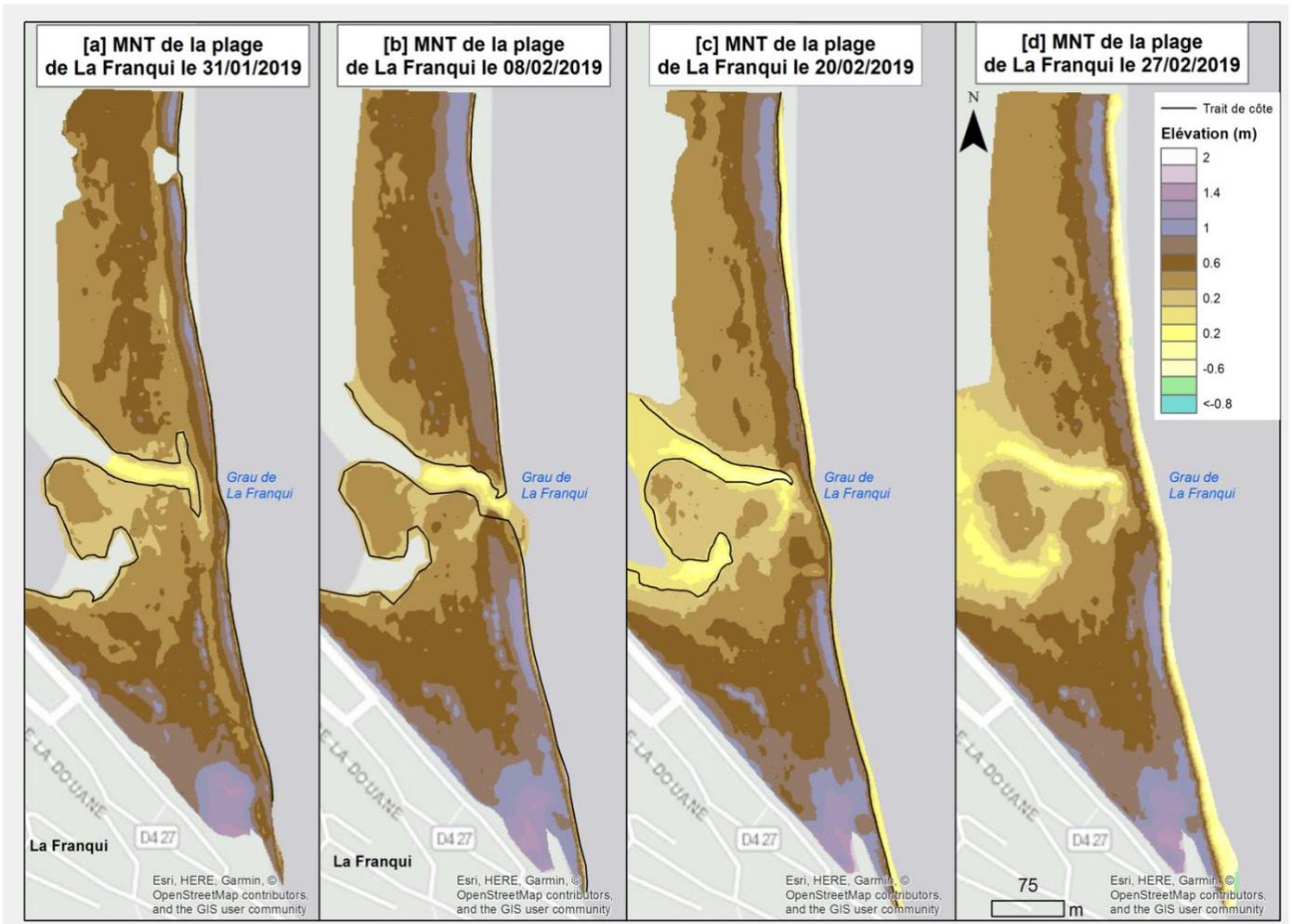


Figure 9 Évolutions morphologiques de la plage lors d'une fermeture du grau. Chronologie réelle [b], [a], [c], [d]

Le sable exporté par la Tramontane sur l'avant-côte est ramené vers la plage émergée par l'action des vagues sous forme d'une barre qui va venir petit à petit s'accoler à la plage existante (Fig. 9[a] Annexe 17). Une fois cette berme néoformée en place, l'action des vagues va continuer de l'alimenter en sédiment, la faisant ainsi rétrograder et aggrader jusqu'à ce que la jonction entre la berme pré-événement et la nouvelle ne soit plus visible. Ceci est observable sur la figure 9 on voit les deux berms au sud de la plage séparées par une zone plus basse [a] qui est petit à petit comblée par l'action de la houle [c] et [d]. Il en résulte une berme en moyenne plus haute de

quelques dizaines de centimètres, beaucoup plus large que lors de période de Tramontane (~30 m) et avec une pente vers la mer plus abrupte. Les analyses granulométriques (Fig. 3) montrent qu'entre le talus de collision et l'arrière de la berme active on retrouve des sables plus grossiers  $0,5 < x < 0,63$ , ces fractions plus grossières correspondent aux sédiments constituant la berme (le 08/02/2019) et sont identiques à ceux déposés lors d'un épisode de submersion (le 22/02/2019).

L'ensemble des évolutions morphologiques décrites ci-dessus correspondent à la mise en place du profil de forte énergie de la plage et peuvent conduire à la fermeture du grau par la mise en place d'une barre dans le chenal.

Lors des épisodes plus énergétiques, il est possible d'avoir une submersion d'une partie de la plage. Les vagues passent par-dessus la berme et ruisselle dans la zone de plus faible élévation parallèle à l'arrière de celle-ci alimentant la lagune en eaux marines.

Les épisodes les plus énergétiques sont les tempêtes, qui sont définies ici par des conditions de houle dépassant une hauteur significative de 3 m. Bien que de courte durée (quelques jours au maximum), la forte énergie délivrée par la houle arrivant perpendiculairement à la côte est très morphogène.

Le trait de côte enregistre des rétrogradations moyennes pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres, le maximum de retrait est observé sur les cornes des sinuosités de la plage. Le trait de côte est lissé, les sinuosités ne sont presque plus visibles à l'issue du coup de mer. A titre indicatif, pour la tempête de mars 2017 avec des conditions de houle particulièrement fortes ( $H_s = 6$  m,  $H_{max}$  à plus de 10 m, des périodes aux alentours de 10 s et du vent d'est avoisinant les 15  $m.s^{-1}$ ). Le retrait moyen du trait de côte fut de 22 m atteignant 36 m au niveau des cornes de sinuosités (Annexe 19 [b]). La forte houle va également entraîner le rehaussement de la berme qui pourra gagner jusqu'à 0,5 m de hauteur par rapport à la situation de beau temps et rétrograder de plusieurs dizaines de mètres (Annexe 19 [c]). Ceci est surtout vrai pour la partie au nord du grau. La partie sud de la plage est érodée dans un premier temps, le prisme d'accrétion éolien est déplacé vers l'intérieur de la lagune par l'action des vagues laissant ainsi une large zone en dépression (Annexe 19 [d]). Dans les cas de submersions les plus violents, des cônes de *washover* sont déposés, témoignant de la capacité de transport des brisants. Ces épisodes de tempête résultent en une forte érosion de la plage, les pertes en sédiments peuvent atteindre plusieurs milliers de  $m^3$  sur de la partie émergée de la zone d'étude.

Lors de notre période de suivi, les tempêtes n'ont jamais conduit à un comblement du grau, mais plutôt à l'élargissement de son chenal. Le grau est maintenu ouvert lors d'une tempête par les courants entrant dans la lagune sous l'action de la surcote. Les crochons visibles de part et d'autre du chenal de *l'inlet* indiquent clairement la dominance des courants entrants (Annexe 19 [b]). Les fermetures de grau se font en période de vent marin s'accompagnant d'une houle de petite taille  $< 1$  m et de forte période  $T_s \approx 8$  à 10 s. Cette houle longue très énergétique entraîne une rétrogradation générale du trait de côte. Les cornes des sinuosités de la plage, décrites plus haut, enregistrent les plus forts changements avec des régressions allant de 1 m à plus de 8 m. Ce sont également les zones les plus érodées, les pertes se chiffrent à plusieurs dizaines de centimètres. Le processus est partiellement observé lors des levés de fin janvier et début février 2019 (Fig. 9), l'ordre chronologique réel lors d'une fermeture étant [b], [a], [c], [d]. Si un delta est présent au niveau de l'exutoire du grau, celui-ci sera alors remanié par la houle arrivante face à la plage. L'action des vagues entraîne d'abord la formation d'un banc de sable émergent (Fig. 10 [c]) qui va par la suite rétrograder. Le sédiment de la proche l'avant-côte déposé au cours des périodes de Tramontane qui ont précédées est également remanié et remonté vers la plage. Il en résulte la formation d'une barre incorporant les sédiments du delta de jusant et de l'avant-côte qui va migrer vers la plage et venir s'accoler à la berme existante en entraînant en continuité latérale la

fermeture du grau (Fig. 9 [a]). A ce stade le chenal du grau est barré, mais le grau est toujours alimenté par les vagues passant par-dessus cette berme néoformée (Annexe 17). L'eau ruisselle ensuite dans la zone de plus faible élévation parallèle à celle-ci, le grau est ainsi alimenté latéralement.

Le comblement total du chenal du grau se fait par dépôt de sédiments, transportés par le ruissellement en arrière de la berme, sous forme de lobes parallèles au trait de côte (Annexe 17). Enfin, la berme alimentée en sédiments par les vagues va aggrader et le sillon en arrière va être comblé jusqu'à reformer une berme continue barrant le chenal du grau. Si le chenal en arrière n'est pas entièrement rempli, il servira à guider l'ouverture suivante du grau en canalisant le flux d'eau et en créant une zone de faiblesses dans la barrière (Fig. 9 [c], [d]).

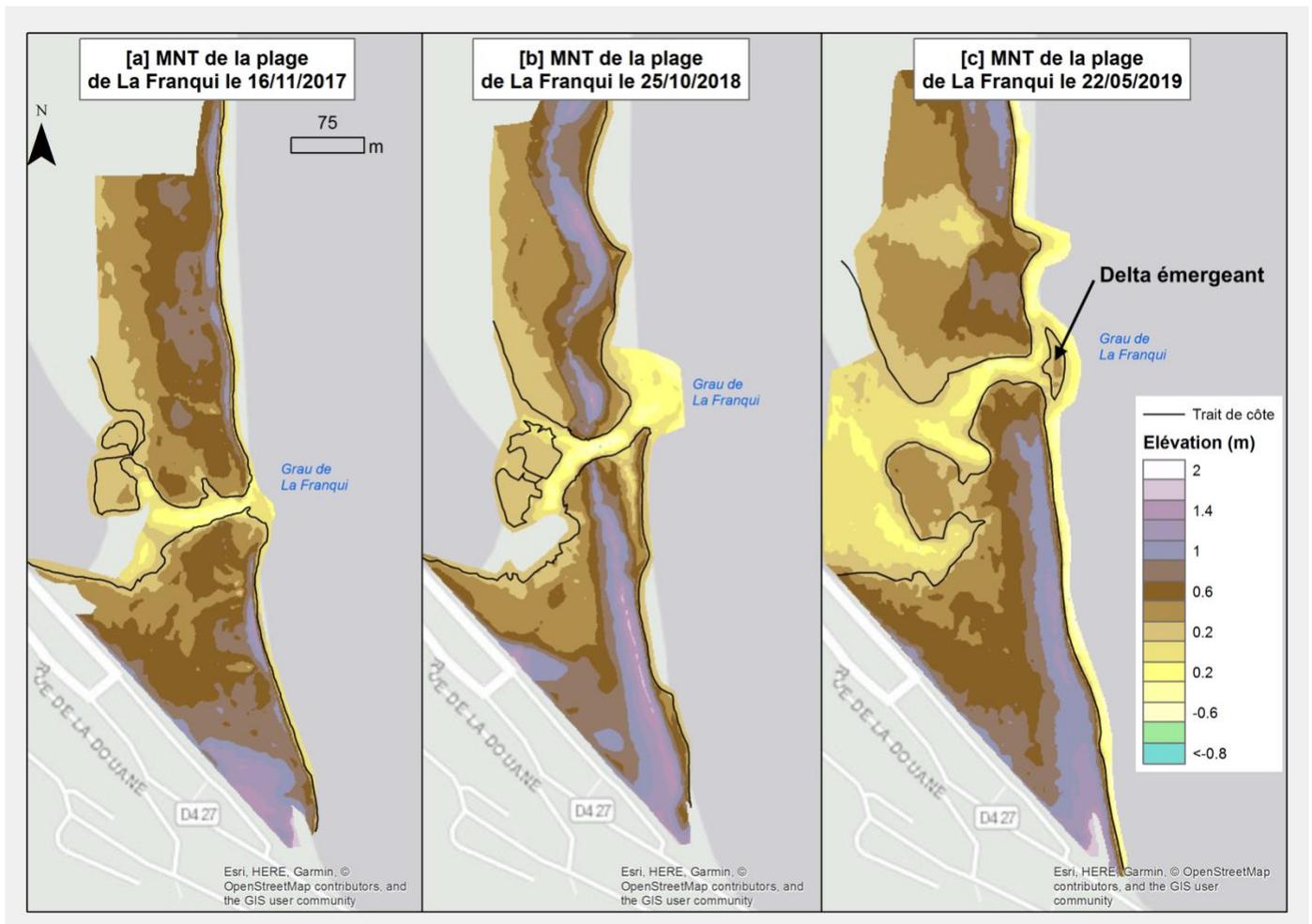


Figure 10 Disposition de la plage avec un delta de jusant

#### IV.2.2.1 Hydrodynamique et variations des niveaux d'eau

Un épisode de fermeture du grau a été observé le 14 février 2019 (Fig.11), la hauteur d'eau dans le *Grazel* est autour d'une dizaine de centimètres NGF en l'absence de vent. Ces conditions se sont maintenues entre le 8 et le 13 février. Le 12, les niveaux s'équilibrent autour de 0,1 m NGF dans le *Grazel*, à partir du 13 le vent marin se met à souffler faiblement (max  $10 \text{ m.s}^{-1}$ ) suffisant pour faire baisser le niveau de lagune à environ 0,05 m NGF. Ce vent est accompagné

d'une petite houle ( $H_{max} \approx 0,6$  m et  $T_{max} \approx 10$  s) dirigée vers la côte qui va permettre la fermeture du grau en l'absence de flux sortant significatif.

Lors du coup d'est du 5 et 6 mars 2019 (Fig. 7), le vent marin atteint au maximum  $\approx 15$  m.s<sup>-1</sup>, la houle est autour de 2 m (maximum 3,5 m) et le grau est clos. Lors du pic de houle conjuguée à une marée haute (+0,15 m) la plage est submergée, le niveau lagunaire dans le Grazel augmente d'une dizaine de centimètres. Au même instant, un petit pic de courant ( $\approx 0,3$  m.s<sup>-1</sup>) allant vers le bassin nord est enregistré sous le pont de la SNCF, indiquant que la submersion créée par le jet de rive sur la berme entraîne un rechargement en eau marine de la lagune. Avec la marée descendante la submersion cesse le plan d'eau du Grazel s'équilibre avec le reste de la lagune.

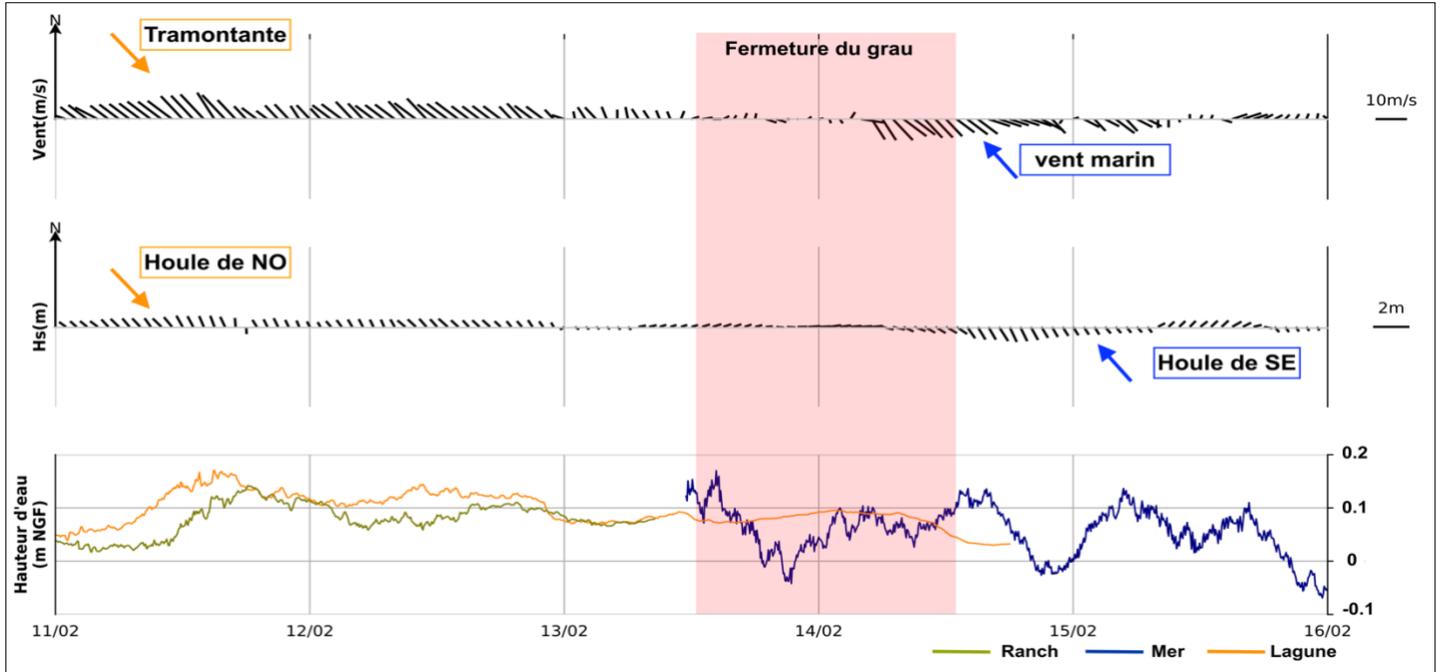


Figure 11 Variations des niveaux en mer et dans la lagune en fonction des forçages hydrométéorologiques lors d'une fermeture du grau

Le 24/02 (Fig. 7) la houle arrive droit sur la plage ( $H_s \approx 1$  m et  $H_{max} \approx 2$  m), combiné avec l'effet de la marée haute le niveau de la mer atteint +0,3 m NGF alors que la lagune est à +0,15 m NGF. Le capteur dans la berme montre une rapide augmentation (+0,4 m) de niveau pour atteindre +1,5 m NGF. Une augmentation de niveau de même ordre de grandeur est observable sur le second capteur en contrebas du revers de la berme. Le capteur proximal enregistre lui une variation de seulement +0,2 m, avec un décalage cette fois-ci de 2h. Au cours du temps, les courbes ont des aspects de plus en plus lissés et les variations s'atténuent.

La pente de la nappe dirigée de la mer vers la lagune dans le cordon sableux est due à la houle et à la marée (Fig. 8), ce phénomène se maintient du 24/02 au 27/02 avec la houle d'est mais son intensité baisse avec la diminution de la houle ( $H_{max} \approx 0,7$  m le 27/02). Au vu de la position du capteur dans la berme, celui-ci enregistre en grande partie le déferlement des vagues dans la zone de *swash*. A la suite d'une tempête ce capteur s'est même retrouvé hors du sable en raison de sa position très haute sur le profil de plage (Annexe 12).

## V- Interprétation

### V.1- Percolation au travers de la barrière

La surcote dans la lagune engendrée par la Tramontane va induire une très faible pente de la nappe vers la mer ( $\approx 0,1$  m entre les capteurs proximal et distal). La forme de la nappe au niveau de la berme n'est pas connue car le toit de la nappe passe sous le capteur de pression (Fig. 12). Ce phénomène est sûrement influencé par la morphologie de la plage qui contrôle la surface d'inondation par la lagune.

La pente plus forte de la nappe dirigée de la mer vers la lagune en période de vent marin est due à la houle et à la marée ( $\approx 0,9$  m entre les capteurs berme et proximal). L'augmentation du niveau dans la berme semble aussi fortement soumise au *swash* voir au franchissement de la berme par la houle (Fig. 12).

Au cours de notre période de mesure la percolation engendrée par la Tramontane était la moins intense, le maximum d'intensité est observé juste avant une ouverture du grau quand la surcote liée au vent est maximum. La percolation depuis la mer est sûrement elle beaucoup plus importante dans le cas de fortes différences de niveaux entre la mer et la lagune ce qui se produira au cours de l'été. Cette configuration n'a pas été instrumentée mais des observations de sortie d'eau marine en arrière de la berme et qui s'écoule ensuite lentement vers la lagune a été faite (Annexe 17).

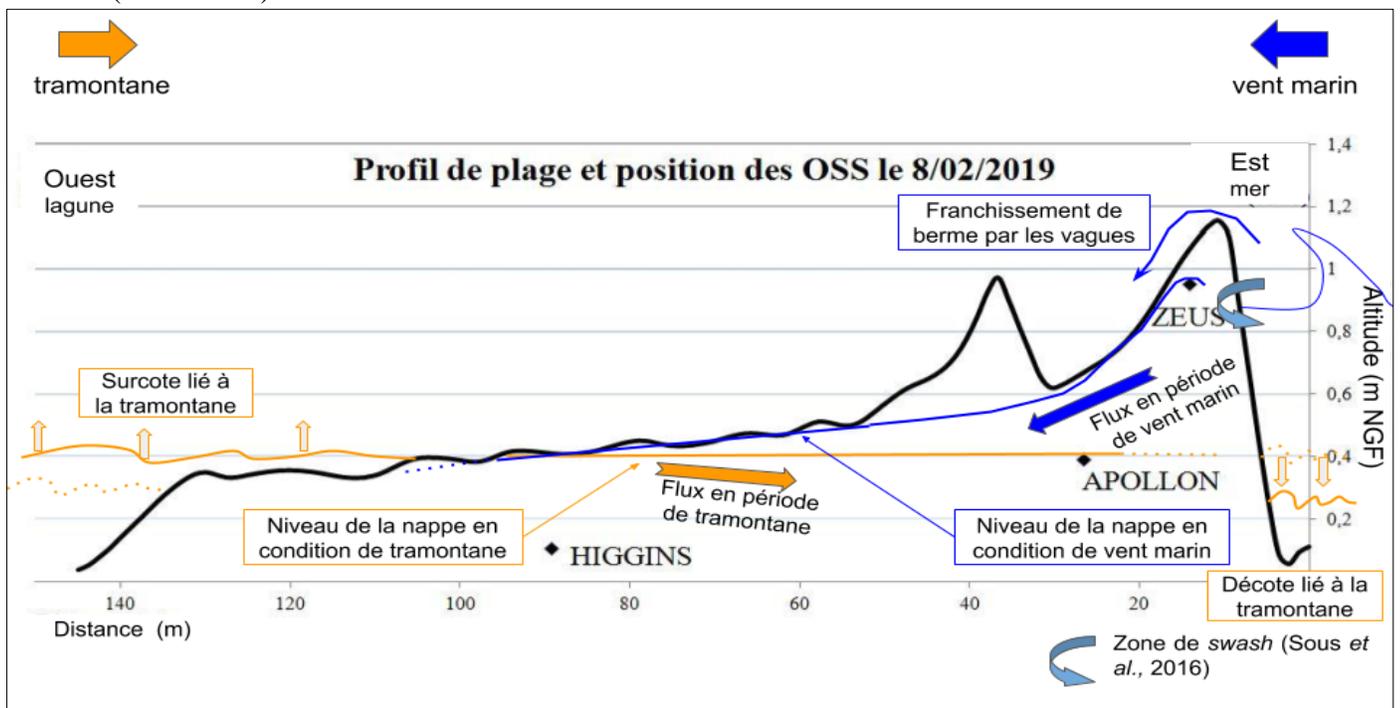


Figure 12 Schéma conceptuel du phénomène de percolation au travers de la barrière sableuse

## V.2- Modèle conceptuel de fonctionnement du grau de La Franqui

Dans cette partie, on propose un modèle conceptuel de fonctionnement du grau à partir des données et des observations dont nous disposons (Fig.13).

► **A partir du début de l'automne**, les épisodes de tramontane deviennent plus intenses et plus longs. Ces périodes de vent de terre, entraînent une progradation du trait de côte. Le vent balaye une partie du sable superficiel de la plage vers la mer où il va sédimenter sur la proche avant-côte. Les houles accompagnant ces épisodes de Tramontane sont généralement dirigées vers le sud-est et ont donc très peu d'impact sur la plage. Ces conditions entraîneront une avancée du trait de côte particulièrement visible au niveau des cornes des sinuosités de plage. L'autre partie du sable est transportée depuis l'arrière plage et s'accumule au sud du lido le long de la promenade sous la forme d'un prisme d'accrétion éolien essentiellement composé de sables moyens ( $\leq 0,45$  mm). Alors que le reste de la plage montre une perte de sédiment, ce prisme est la seule zone en accrétion. Les gains de matériel se manifestent par une extension de la zone d'accrétion et une augmentation d'élévation de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. La présence de ce prisme d'accrétion explique que cette partie du cordon littoral soit la plus large et la plus haute de la zone. L'épais cordon de sable n'est pas propice au creusement d'un *inlet*. La forme triangulaire de cette accumulation de sable montre par contre que sa largeur et sa hauteur diminuent vers le nord, permettant ainsi à l'eau lagunaire et donc au grau de traverser le lido dès que la hauteur et l'épaisseur de sable le permettront. La forme et la position de ce prisme sont en partie responsables de la faible mobilité du grau dans l'axe N/S de la plage. Les pluies plus courantes en cette saison et les apports des submersions marines vont petit à petit remplir la lagune en eau, cette phase de pré-conditionnement essentielle est assez longue (1 sur la Fig. 13). Les périodes de Tramontane peuvent alors engendrer d'importante à la surcote dans la lagune qui vont inonder en partie le cordon de sable et entraîner une pente de la nappe dans la plage dirigée de la lagune vers la mer (Fig.12).

► **La première ouverture du grau après le hiatus estival** a lieu suite à plusieurs épisodes de Tramontane qui évacuent l'excès de sable accumulé durant l'été sous la forme d'une berme généralement élevée. En plus de son effet décapant décrit plus haut le vent en soufflant vers la mer entraîne un basculement du plan d'eau lagunaire vers la barrière et une décote en mer lors des phases les plus intenses, le gradient hydraulique de part et d'autre de la barrière qui peut atteindre  $\approx 0,4$  m.

La berme au niveau des cornes de festons est moins haute et en pente plus douce vers la mer. C'est au niveau d'une ces zones de connections entre la plage aérienne et le système de barres internes que le lido cèdera. La rupture du cordon est causée par un gradient hydraulique fort de part d'une zone de faiblesse du lido au niveau d'une connexion avec le système de barres d'avant côte qui sont des points de faiblesses dans la berme (2 sur la Fig. 13). Dans les cas où le gradient hydraulique est très important des ouvertures à plusieurs graus sont observable (3 sur la Fig. 13). La position du grau est également influencée par la présence du prisme d'accrétion éolien mis en place par la Tramontane, le grau se forme lorsque la plus faible topographie et la largeur de sable à franchir est suffisamment faible vers le nord.

Une fois le cordon percé, l'écoulement crée un chenal en quelques heures seulement. Le courant sortant du grau peut être proche de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ , il va entraîner du sédiment et le déposer sous forme d'un « delta de jusant » à l'exutoire du chenal. Le delta est particulièrement bien développé lors des premières ouvertures automnales du grau car le courant évacue le sable ayant comblé le chenal durant l'été, ce volume de sédiments est estimé à  $2\ 500 \text{ m}^3$ . Par la suite lors de phases d'ouverture secondaire au cours de l'hiver le delta sera moins important.

► **Lorsque la Tramontane cesse et que l'action des vagues d'est devient le forçage dominant**, le courant sortant de la lagune ralenti voir s'annule ( $<0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ). Les fermetures ne sont pas dépendantes des vents, elles se feront quel que soit la direction de provenance du vent pour des vitesses  $<10 \text{ m.s}^{-1}$ . En revanche, les fermetures ont lieu à la suite de petites houles de sud-est de  $H_{\max} < 1 \text{ m}$  de période élevée  $T_{\max}$  pouvant atteindre 12 s. Les vagues possèdent alors beaucoup plus d'énergie et transportent davantage de sédiments vers la plage en raison de l'asymétrie des vagues. L'action de ces vagues arrivant perpendiculairement à la côte va remodeler la plage. Le sable exporté par la Tramontane et le grau est ramené vers la plage émergée par l'action des vagues sous forme d'une barre qui va venir petit à petit s'accoler à la plage existante (4 sur la Fig. 13). Si le flux sortant de l'exutoire du grau est faible alors le transport *cross-shore* est dominé par la houle. Les vagues repoussant le sédiment vers la côte vont alors entraîner la formation d'un banc de sable émergeant au niveau de l'exutoire. L'action des vagues va continuer d'alimenter la berme en sédiments et la faire ainsi s'accoler au trait de côte et aggrader. Entraînant par conséquent le comblement de l'exutoire de *l'inlet*.

Bien que barré, le chenal du grau peut être alimenté très localement latéralement par les vagues lors d'épisodes de submersion. L'eau ruisselle dans la zone de plus faible élévation parallèle à la berme néoformée. Le comblement du chenal à l'arrière de la berme se fait ainsi par dépôt de sédiments sous forme de lobes parallèles au trait de côte. Ils sont issus du transport de sédiments par le ruissellement en arrière de la berme et vont combler le chenal petit à petit. La berme alimentée en sédiments par les vagues va aggrader et le sillon en arrière va être comblé jusqu'à reformer une seule berme continue barrant le chenal du grau. Si le chenal n'est pas entièrement comblé lors d'évènements de submersion, il servira à guider l'ouverture suivante du grau en canalisant le flux d'eau lagunaire et en créant une zone de faiblesses à l'arrière de la barrière littorale. Ceci est particulièrement vrai lors des cycles d'ouvertures/fermetures au cours de l'hiver (5 sur la Fig. 13). On distingue deux grandes morphologies de grau fermé. Soit le grau a un chenal rectiligne dans le sens de la Tramontane à la suite d'une fermeture rapide. Soit le chenal est sinueux. Ceci semble être le résultat d'un processus de fermeture du grau plutôt lent, s'étalant sur une période de temps de l'ordre de plusieurs semaines. Le chenal initial va lentement migrer vers le nord du fait de la dérive littorale et dans le même temps du fait des conditions d'hydrodynamisme favorable la plage prograde. La conjonction de ces conditions aboutit à une forme sinueuse du chenal.

Lors d'épisode de marin avec le grau fermé la surcote en mer et la décote de la lagune vont créer un flux d'eau de la mer vers la lagune dans la plage. Ce flux participe au remplissage de lagune même en l'absence de submersion de la plage par les vagues (Fig. 12).

► **Au cours de la période hivernale**, le grau peut subir plusieurs cycles de réouvertures et de complements en fonction des conditions météorologiques et du niveau de la lagune. La durée de ces fermetures est trop courte pour que la plage revienne à un état similaire à celui de sortie d'été. La berme est moins haute ce qui facilite les submersions lors d'épisodes de marin, ces submersions ainsi que les apports du bassin versant vont participer à la recharge de la lagune en eau. La fragilité de la berme ne lui permettra pas de résister longtemps lors de prochains épisodes de Tramontane couplés avec un haut niveau d'eau dans la lagune (4,5,2 sur la Fig.13).

► **Les tempêtes d'est** s'accompagnant de fortes houles dirigées perpendiculairement à la côte sont courantes en hiver. Ces épisodes engendrent une érosion de la plage, les pertes en sédiments peuvent atteindre plusieurs milliers de  $\text{m}^3$  sur la zone d'étude. Le trait de côte enregistre une importante rétrogradation, particulièrement marqué au niveau des cornes des festons. Les sinuosités de la plage ne sont presque plus visibles à l'issue du coup de mer et la pente du talus de collision est subvertical. La forte houle va également entraîner le recul et le rehaussement de la

berme. La partie la plus érodée de la plage est le sud le long de la promenade. L'avant-côte est constituée d'une seule barre interne en plus de la barre externe très éloigné au large, offrant moins de protection face à la houle. La portion de plage plus au nord est plus protégée par un système plus développé à deux barres proximales. Le prisme d'accrétion éolien est remanié et déplacé vers l'intérieur de la lagune par l'action des vagues. L'ensemble de ces changements correspond à la mise en place du profil de tempête de la plage.

La petite houle résiduelle post-tempête permet en général une reconstruction rapide de la plage, notamment de la partie la plus endommagés au sud, grâce à l'important disponible sédimentaire dans ce secteur.

Lors de notre période de suivi de 2 ans, les tempêtes n'ont jamais conduit à un comblement du grau, mais plutôt à l'élargissement de son chenal (7 sur la Fig.13). Le grau est maintenu ouvert par les courants circulant dans le chenal sous l'action de la surcote, de la submersion ou des décharges du bassin versant. En revanche des cas de fermetures à la suite de coup de mer ont déjà été observés par le passé semble-t-il, cette situation hypothétique est représentée en 6 (Fig.13). Dans le cas où le grau est fermé, les apports d'eau par submersion du cordon vont remplir la lagune et faciliter la prochaine ouverture lors d'un futur épisode de forte Tramontane.

► **En saison estivale**, le vent de nord-ouest est plus faible et les conditions de vagues sont constructrices. Le profil de la plage est plus plat et le cordon est beaucoup plus large, c'est le profil de faible énergie (correspond au retour vers la situation 1 sur la Fig.13). Le niveau dans la lagune est beaucoup plus bas qu'en hiver, du fait des faibles précipitations, des apports marins par submersion du cordon quasi-inexistant et du fort taux d'évaporation. La différence de niveau moyen est de l'ordre d'environ 0,4 m par rapport au remplissage hivernal. Le grau est donc fermé à cette période le taux d'ouverture en période estivale est le plus faible, seulement 16% depuis 1998.

Le retour du forçage automnal va permettre d'enclencher un autre cycle évolutif saisonnier annuel. La boucle la plus fréquente est 1-2-4-5 avec des phases de fermetures réouvertures hivernales fréquentes (4-5-2) ; les situations 3 et 7-6 sont plus rares et résultent de phénomènes très intenses. On a même observé suite à la tempête des 1999 une situation à 3 graus.

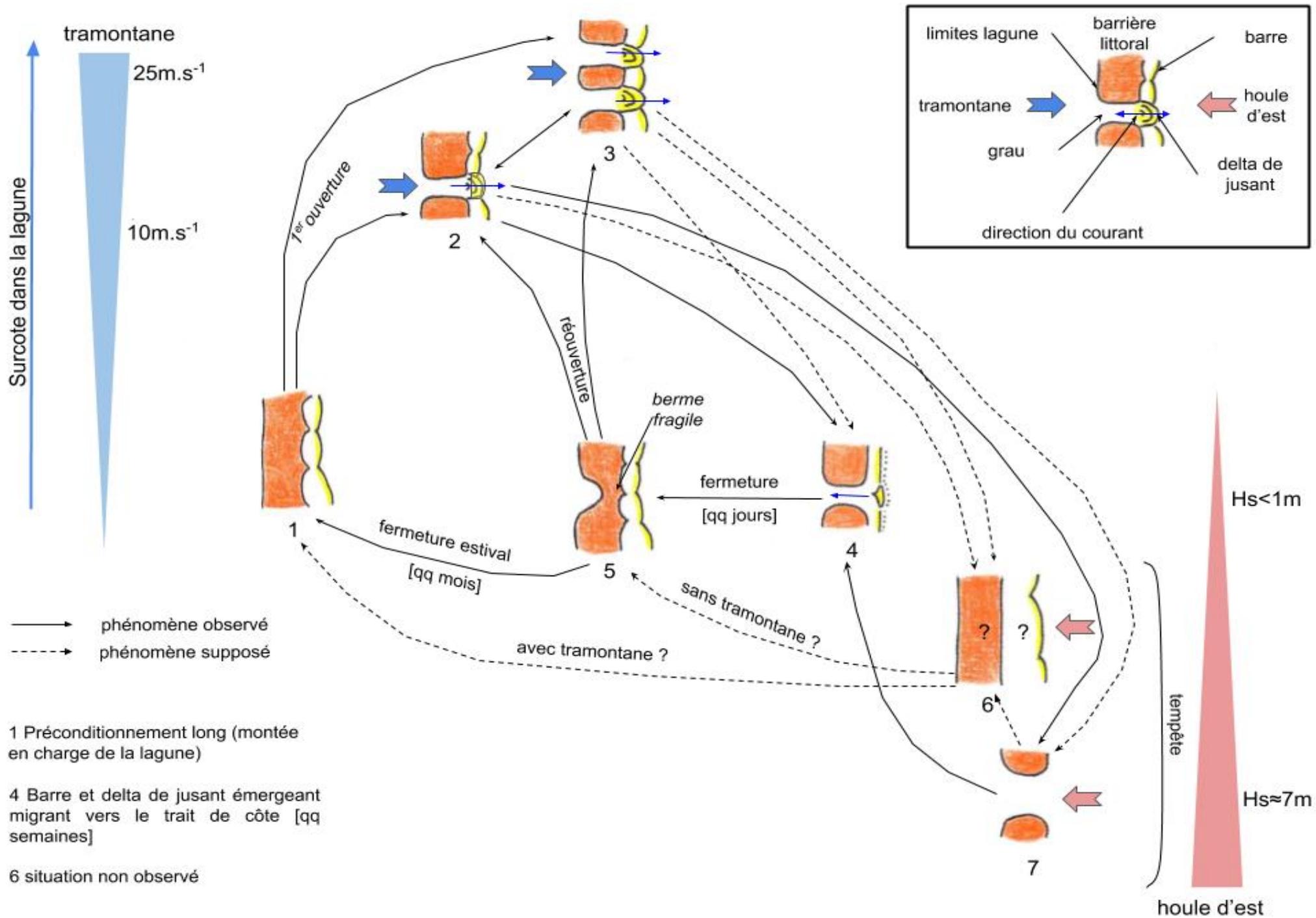


Figure 13 Modèle conceptuel de fonctionnement du grau de La Franqui

## VI- Discussion

### VI.1- Connaissances sur la percolation au travers de la barrière

Nous avons mis en évidence un inversement de la pente de la nappe au sein de la barrière littorale sableuse ce qui suggère que les flux d'eau au travers de cette dernière sont influencés par le forçage éolien. Cette percolation est considérée comme une voie d'échange d'eau entre la mer et la lagune (Larue and Rouquet, 2016), mais ce phénomène n'avait jamais été mis en évidence sur ce site. Notre instrumentation ne nous a cependant pas permis de mettre en évidence la forme et la position des zones de décharges de la nappe de part et d'autre du cordon. Ni de faire la part entre l'augmentation réelle de la nappe et l'effet du *swash* dans la berme (Sous et al., 2016). Au vu des niveaux bas de la lagune l'été (Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2014) et des modèles de circulation déjà établis pour ce type d'environnement (Perera et al., 2019), on doit avoir un flux entrant maximum au travers de la barrière à cette période. Les différences de niveaux de part et d'autre de la barrière ne semblent pas assez importantes pour entraîner la liquéfaction des sédiments et leur déstabilisation syn-ouverture, comme ce qui est décrit sur certains estuaires barrés où les différences de niveau sont de l'ordre de plusieurs mètres (Kraus et al., 2008, 2002; Zietsman, 2004).

La percolation au travers de la barrière semble donc un phénomène minoritaire dans les échanges mer/lagune. Si ce phénomène était suffisant il n'y aurait pas d'ouverture du grau, la totalité de la charge d'eau lagunaire contre le cordon passerait au travers.

### VI.2- Confrontation avec les observations déjà réalisées pour le grau de La Franqui

Au cours de notre période d'étude, seules des ouvertures en conditions de Tramontane ont pu être observées. Or, les travaux d'autres auteurs suggèrent que des ouvertures peuvent avoir lieu lors d'alternance de périodes de Tramontane et de vents marins avec un niveau de la lagune supérieur de 0,3 m à celui de la mer (Wilke and Boutière, 1999). Ce qui semble probable dans la mesure où la période de vent marin s'accompagnerait d'une submersion faisant ainsi augmenter le niveau la lagune et facilitant une ouverture lors d'un coup de Tramontane postérieur. En revanche les ouvertures en cas de fort vent marin s'accompagnant de houle (Wilke and Boutière, 1999) semble contraire à nos observations qui indiquent un rehaussement du profil de plage et une submersion accompagnée d'un basculement du plan d'eau vers l'intérieur de la lagune. Ceci va aussi à l'encontre des modèles de fonctionnement de systèmes similaires qui mettent en avant des fermetures lors des tempêtes du fait de la plus forte capacité de transport de la houle (McSweeney et al., 2018; Morris and Turner, 2010).

L'onde de marée est très réduite après le passage du grau ( $\approx 0,05$  m), elle est bien moins importante que les variations de niveaux dans la lagune induite par le vent qui peuvent atteindre  $\approx 0,5$  m. Ces résultats sont en accord avec ceux des modèles conceptuels déjà décrits (Cooper, 1994; McSweeney et al., 2017; Morris and Turner, 2010) et avec les mesures déjà effectuées dans la lagune (Fiandrino et al., 2012). La succession des ponts et du grau atténue quasiment totalement le signal tidal dans cette lagune, le vent étant donc le forçage dominant de la circulation des masses d'eaux.

### VI.3- Insertion dans les modèles de la littérature internationale

Le grau de La Franqui présente l'ensemble des caractéristiques pour pouvoir être classé dans la catégorie des *ICOLL Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons* (Haines et al., 2006; Morris and Turner, 2010) qui est le terme le plus utilisé pour décrire ce type d'*inlet* intermittent (McSweeney et al., 2017). Les ouvertures se font par montée en charge de la lagune mais la

particularité est que l'accumulation d'eau à l'arrière du cordon est créée par un fort vent de terre et non de fortes décharges fluviales comme la plupart des systèmes décrits (Cooper, 1994; Ranasinghe et al., 1999).

En revanche on retrouve bien une saisonnalité dans les périodes d'ouverture et de fermeture qui est défini par : 1) les régimes de vents, le vent de terre est plus courant en hiver (Certain, 2002) ; 2) les régimes de houles, l'hiver est le plus énergétique et propice aux tempêtes (Aleman et al., 2015; CEREMA and DREAL Languedoc Roussillon, 2018) tandis que les petites houles sont courantes en été (moyenne mensuelle  $\approx 0,5\text{m}$ ) ; 3) les hauteurs d'eaux dans la lagune, le niveau est plus haut en hiver du fait des précipitations plus importantes et des apports par submersion (Larue and Rouquet, 2016; Météo-France, 2019; Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2014). C'est lors de la montée en charge de la lagune que la percolation depuis la lagune se met en place. Les ouvertures sont également fortement dépendantes de la morphologie de plage. Celle-ci est influencée par le vent de terre qui décaisse le sable de la plage abaissant la hauteur de la berme et mettant en place un prisme d'accrétion éolien. La disposition du système de barres d'avant-côte a aussi son importance. La relation plage aérienne/système de barres internes et son effet sur le profil de plage sont bien décrits sur la plage de Leucate au sud du cap (Ferrer, 2010). Les observations faites à La Franqui sont similaires, en période de faible hydrodynamisme le profil de plage est plus bas et les cornes de sinuosité sont convexes créant des zones de faiblesse dans la plage qui vont guider les ouvertures de grau. Au contraire, lors de période d'hydrodynamisme plus intense, le profil de plage est plus haut et plus abrupte rendant difficile une ouverture de grau. Ces deux états de plage oscillant entre profil de faible énergie et de forte énergie suivent une saisonnalité similaire à celle du vent.

Enfin, les fermetures du grau à la suite de périodes de petites houles dirigées vers la côte avec un flux sortant réduit se rapprochent fortement du modèle de fonctionnement de *cross-shore transport* (Cooper, 1994; FitzGerald and Buynevich, 2003; Hayes, 1991; Ranasinghe et al., 1999; Ranasinghe and Pattiaratchi, 2003b; Treloar et al., 1993). Lors de ces fermetures, une barre est formée à partir de l'excès de sable exporté par la Tramontane et le courant sortant. La position du cap Leucate au sud est un obstacle à la dérive littorale qui le contourne en partie par le large (Aleman et al., 2015), ce qui explique sa faible intensité sur la zone. Le cap protège également la plage des houles de sud obliques qui pourraient créer un fort courant *longshore*. Ceci invalide ici l'hypothèse d'une fermeture du grau *longshore* comme décrite sur les littoraux rectilignes non-interrompus (Cooper and Cooper, 1990).

Ce contrôle des ouvertures d'une passe microtidale intermittente par le vent de terre et la position des barres d'avant-côte n'est pas décrit dans la littérature

#### **VI.4- Limites de la présente étude**

L'expérience de mesure de la nappe dans le cordon sableux mis en évidence une évolution de la pente de la nappe au sein de la barrière littorale en fonction des conditions de forçage dominantes. Mais pour caractériser le plus finement possible cette circulation et obtenir des valeurs de vitesse ou volume, il faut un déploiement plus long avec plus de capteurs et une haute fréquence d'acquisition. Ceci nous permettra de mieux comprendre la percolation dans la plage, les volumes mis en jeu, et de faire la part du rôle du *swash* dans ce phénomène.

Le suivi hydrodynamique de la lagune s'est fait sur une courte période ( $\approx 50$  jours). Un suivi plus long sur un cycle saisonnier entier permettrait d'avoir une idée du fonctionnement de la lagune en période estivale et de mettre en évidence sa montée en charge en automne jusqu'à la rupture du cordon en début d'hiver. Pour réaliser un tel suivi il faudrait utiliser des modes de fixation d'instruments plus durables dans le temps et résistants aux tempêtes. La technique des

pieux enfoncés dans le sable avec de l'eau sous pression utilisé dans le déploiement des OSS semble être la plus adaptée car elle est relativement facile à mettre en œuvre (même sous l'eau) et totalement réversible.

Le suivi morphologique de la zone se concentre sur la partie aérienne de la plage, mais comme nous venons de le montrer cette dernière est fortement influencée par l'avant-côte. Pour mieux comprendre ce couplage il faudrait des levés topo-bathymétriques de la zone à haute fréquence couplés aux topographies, ce qui nécessite un investissement humain et matériel important. Des mesures hydrodynamiques *in-situ* au sein du système de barres seraient aussi utiles pour caractériser la circulation littorale dans cette zone et étudier l'effet des bancs de sables sur le déferlement de la houle. L'ensemble de ces données pourraient servir à établir un modèle pour anticiper les ouvertures du grau.

## **VII- Conclusion**

Le grau de La Franqui pourrait être un nouveau type *d'ICOLL*, car les passes microtidales intermittentes contrôlées par le vent et la position des barres d'avant-côte ne sont pas contenues dans les classifications actuelles.

Les résultats tendent à démontrer le rôle prédominant de la Tramontane dans les phases d'ouvertures, elle est à l'origine de l'accumulation d'eau en arrière de la barrière et de l'abaissement de la berme. Cette configuration permet ainsi au grau de s'ouvrir au niveau d'une corne de sinuosité de la plage, qui connecte la plage aérienne et le système de barres interne. Les phases de comblements semblent en revanche plutôt être contrôlées par la petite houle d'est à forte période liée au vent marin, qui vont ramener vers la côte le sédiment exporté par la Tramontane et par le grau. Si le courant sortant à l'exutoire est suffisamment faible, ce phénomène entraînera la fermeture du l'exutoire. Ces phases d'ouverture et de fermeture s'enchaînent au cours d'un cycle saisonnier, la première ouverture en début d'hiver est liée au retour des conditions de forte Tramontane. Au cours de l'hiver un cycle de fermeture et de réouverture se met en place avec l'alternance Tramontane, vent marin. Les épisodes de tempête sont le paroxysme des conditions marines mais reste rare. Les conditions automnales moins énergétiques permettent la sortie du cycle hivernal et d'amorcer un nouveau cycle saisonnier.

Un phénomène de percolation au travers de la barrière littorale est observé lorsque que le grau est fermé. Le flux d'eau est dirigé de la lagune vers la mer en condition de Tramontane et de la mer vers la lagune en condition de marin. La pente de la nappe dépend de la surcote engendrée par le forçage est des hauteurs d'eau de part et d'autre du cordon sableux.

### **VII.1- Perspectives de gestion du site**

Le site est très complexe. Pour comprendre au mieux son fonctionnement il faudrait réaliser une étude plus globale intégrant la lagune et son bassin versant couplant ainsi géologie, hydrogéologie, biologie, chimie...L'ensemble des données pourrait alimenter un modèle complet, permettant de mettre en place des stratégies de gestion intégrant l'ensemble des aspects de la lagune. Pour, par exemple, étudier l'impact des ponts sur la circulation d'eau dans la lagune qui influence le fonctionnement des masses d'eau et donc du grau et *in fine* les échanges biologiques avec la mer.

### **VII.2- Perspectives de recherche**

Ces travaux permettent d'identifier de nouveaux axes de recherches pour approfondir le modèle de fonctionnement du grau.

Dans ce cas précis, une étroite relation existe entre la disposition des barres d'avant-côte et la morphologie de la berme, qui sont des facteurs déterminant pour la mise en place du grau et de

son delta de jusant. Des levés topo-bathymétriques à haute fréquence et une campagne de mesure *in-situ* (courantomètre et capteurs de pressions) sur l'avant-côte permettrait de mieux comprendre ce système. L'installation d'un système vidéo performant permettant d'automatiser le suivi du grau et des barres d'avant-côte sur le modèle de ce que fait le BRGM à Sète, pourrait être envisageable. Ceci permettrait aussi de mieux comprendre le fonctionnement pendant les tempêtes ainsi que les mécanismes de reconstruction post-événements. Par exemple, pour connaître les conditions qui font que soit le grau évolue suivant le modèle *cross-shore transport* de fermeture lors de tempête ou au contraire qu'il soit élargi.

Un déploiement et des mesures sur une plus longue période (notamment dans le grau ouvert) seraient également importants car pour le moment on ne dispose de données que sur le cycle hivernal de fonctionnement du grau. Des mesures en conditions de forte Tramontane et de fort vent marin sont importantes pour une meilleure compréhension du grau. En ce qui concerne le phénomène de percolation au travers de la plage, un déploiement d'ampleur avec au moins une dizaine de capteur de pressions ensablés ainsi qu'un suivi de la lagune et de l'avant-côte à haute fréquence serait intéressant pour bien caractériser ces flux. Des traces de percolation depuis la mer ont été observées à l'intérieur de la lagune pendant la période de bas niveau de l'été.

Enfin, le grau de La Franqui est un système très particulier avec un bassin de taille réduite, fortement influencé par le vent et sa proximité avec le cap Leucate. Bien que très intéressant à étudier, il n'est semble-t-il pas représentatif de la majeure partie des graus méditerranéens. Le grau naturel de la Vieille-Nouvelle (nord de Port la Nouvelle) également sur le territoire du PNR de la Narbonnaise pourrait plus se rapprocher des modèles généraux avec une lagune plus grande et sans l'impact d'un cap mais le vent doit aussi y jouer un grand rôle. Un suivi similaire à celui initié à La Franqui pourrait y être envisagé.

## Références bibliographiques

- Aleman, N., 2013. Morphodynamique à l'échelle régionale d'une avant-côte microtidale à barres sédimentaires. Le cas du Languedoc-Roussillon à l'aide de la technologie LIDAR (Thèse). Université de Perpignan Via Domitia.
- 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-energy environment. *Geomorphology* 241, 175–191.
- Anselme, B., Goeldner-Gianella, L., Durand, P., 2008. Le risque de submersion dans le système lagunaire de La Palme (Languedoc, France) : nature de l'aléa et perception du risque. In: Colloque International Pluridisciplinaire , Les Littoraux : Subir, Dire et Agir. Lille, France, p. 0.
- Boyd, R., Dalrymple, R., Zaitlin, B.A., 1992. Classification of clastic coastal depositional environments. *Sediment. Geol., Research Conference on Quaternary Coastal Evolution* 80, 139–150.
- Brunel, C., Certain, R., 2014. REVOLSED: Relation entre l'évolution du trait de côte et le bilan sédimentaire de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon. DREAL-LR / UPVD-CEFREM, Perpignan.
- Brunel, C., Certain, R., Robin, N., Aleman, N., Raynal, O., Barusseau, J.-P., Sabatier, F., 2012. Atlas de l'évolution des fonds et des budgets sédimentaires séculaires de l'avant côte du Languedoc-Roussillon 1895/1984/2009. CEFREM, Perpignan.
- CEREMA, C. d'étude et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, DREAL Languedoc Roussillon, 2018. Fiche synthétique de la campagne 01001 Leucate.
- CEREMA, C. d'étude et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, DREAL Languedoc Roussillon, 2019. CANDHIS - Détail de la campagne 01101 - Leucate Cent. Arch. Natl. Données Houle Situ. URL <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/campagne/?idcampagne=c81e728d9d4c2f636f067f89cc14862c> (accessed 4.1.19).
- Certain, R., 2002. Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres: le Golfe du Lion (Languedoc-Roussillon) (Thèse). Université de Perpignan, Perpignan.
- Certain, R., Tessier, B., Barusseau, J.P., Courp, T., Pauc, H., 2005. Sedimentary balance and sand stock availability along a littoral system. The case of the western Gulf of Lions littoral prism (France) investigated by very high resolution seismic. *Mar. Pet. Geol.* 22, 889–900.
- Cooper, J.A.G., 1990. Ephemeral stream-mouth bars at flood-breach river mouths on a wave-dominated coast: Comparison with ebb-tidal deltas at barrier inlets. *Mar. Geol.* 95, 57–70.
- Cooper, J.A.G., 1994. Lagoons and microtidal coasts. In: Carter, R.W.G., Woodroffe, C.D. (Eds.), *Coastal Evolution Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. pp. 219–265.
- Cooper, J.A.G., 2001. Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South African coast. *Geomorphology* 40, 99–122.
- Ferrer, P., 2010. Morphodynamique à multi-échelles du trait de côte (prisme sableux) du golfe du Lion depuis le dernier optimum climatique (Thèse). Université de Perpignan Via Domitia, Perpignan.
- Fiandrino, A., Giraud, A., Robin, S., Pinatel, C., 2012. Validation d'une méthode d'estimation des volumes d'eau échangés entre la mer et les lagunes 104.

- FitzGerald, D.M., 1988. Shoreline Erosional-Depositional Processes Associated with Tidal Inlets. In: Aubrey, D.G., Weishar, L. (Eds.), *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. Springer New York, pp. 186–225.
- FitzGerald, D.M., 1996. Geomorphic variability and morphologic and sedimentologic controls on tidal inlets. *J. Coast. Res.* SI 23, 47–72.
- FitzGerald, D.M., Buynevich, I.V., 2003. Tidal inlets and deltas. In: *Sedimentology*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 1219–1224.
- Haines, P.E., Tomlinson, R.B., Thom, B.G., 2006. Morphometric assessment of intermittently open/closed coastal lagoons in New South Wales, Australia. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 67, 321–332.
- Hayes, M.O., 1991. *Geomorphology and Sedimentation Patterns of Tidal Inlets: A Review*. Presented at the Coastal Sediments, ASCE, pp. 1343–1355.
- Ifremer, 2013. Réseau de suivi lagunaire du Languedoc-Roussillon: Bilan des résultats 2013. Département Océanographie, Dynamique des Ecosystèmes UL- Laboratoire Environnement – Ressources du Languedoc-Roussillon, Languedoc-Roussillon.
- IGN, I.N. de l'Information G. et F., 2019. Remonter le temps Remonter Temps. URL //remonterletemps.ign.fr (accessed 4.16.19).
- Kraus, N.C., Militello, A., Todoroff, G., 2002. Barrier Breaching Processes and Barrier Spit Breach, Stone Lagoon, California 22.
- Kraus, N.C., Patsch, K., Munger, S., 2008. Barrier Beach Breaching from the Lagoon Side, With Reference to Northern California 76, 12.
- Kulling, B., 2017. Déformation du rivage et dérive littorale des plages du Golfe du Lion (Thèse). Université d'Aix-Marseille.
- Larue, J.-P., Bouabdallah, M., Étienne, R., 2009. Un littoral sableux en progradation : le lido entre Leucate et Port-la-Nouvelle (Aude, Golfe du Lion, France). *Physio-Géo Géographie Phys. Environ.* 151–173.
- Larue, J.-P., Rouquet, J., 2016. La lagune de La Palme (Aude, France) face au comblement et à l'eutrophisation. *Physio-Géo Géographie Phys. Environ.* 45–60.
- McSweeney, S.L., Kennedy, D.M., Rutherford, I.D., 2018. The daily-scale entrance dynamics of intermittently open/closed estuaries. *Earth Surf. Process. Landf.* 43, 791–807.
- McSweeney, S.L., Kennedy, D.M., Rutherford, I.D., Stout, J.C., 2017. Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons: Their global distribution and boundary conditions. *Geomorphology* 292, 142–152.
- Météo-France, 2019. CLIMAT PERPIGNAN par Météo-France - Normales et relevés sur la station Perpignan  
<http://www.meteofrance.com/climat/france/perpignan/66136001/normales>.
- Morris, B.D., Turner, I.L., 2010. Morphodynamics of intermittently open–closed coastal lagoon entrances: New insights and a conceptual model. *Mar. Geol.* 271, 55–66.
- Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2010a. Cahier des charges pour une gestion concertée du grau de l'étang de La Palme (dit grau de La Franqui). Parc Naturel Marin de la Narbonnaise en Méditerranée, Bages.
- Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2010b. Carte bathymétrie de l'étang de La Palme.
- Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2010c. Carte du fonctionnement hydrologique de l'étang de La Palme.
- Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 2014. Valorisation des données FILMED du 01/01/2014 au 31/12/2014. Etang de La Palme.

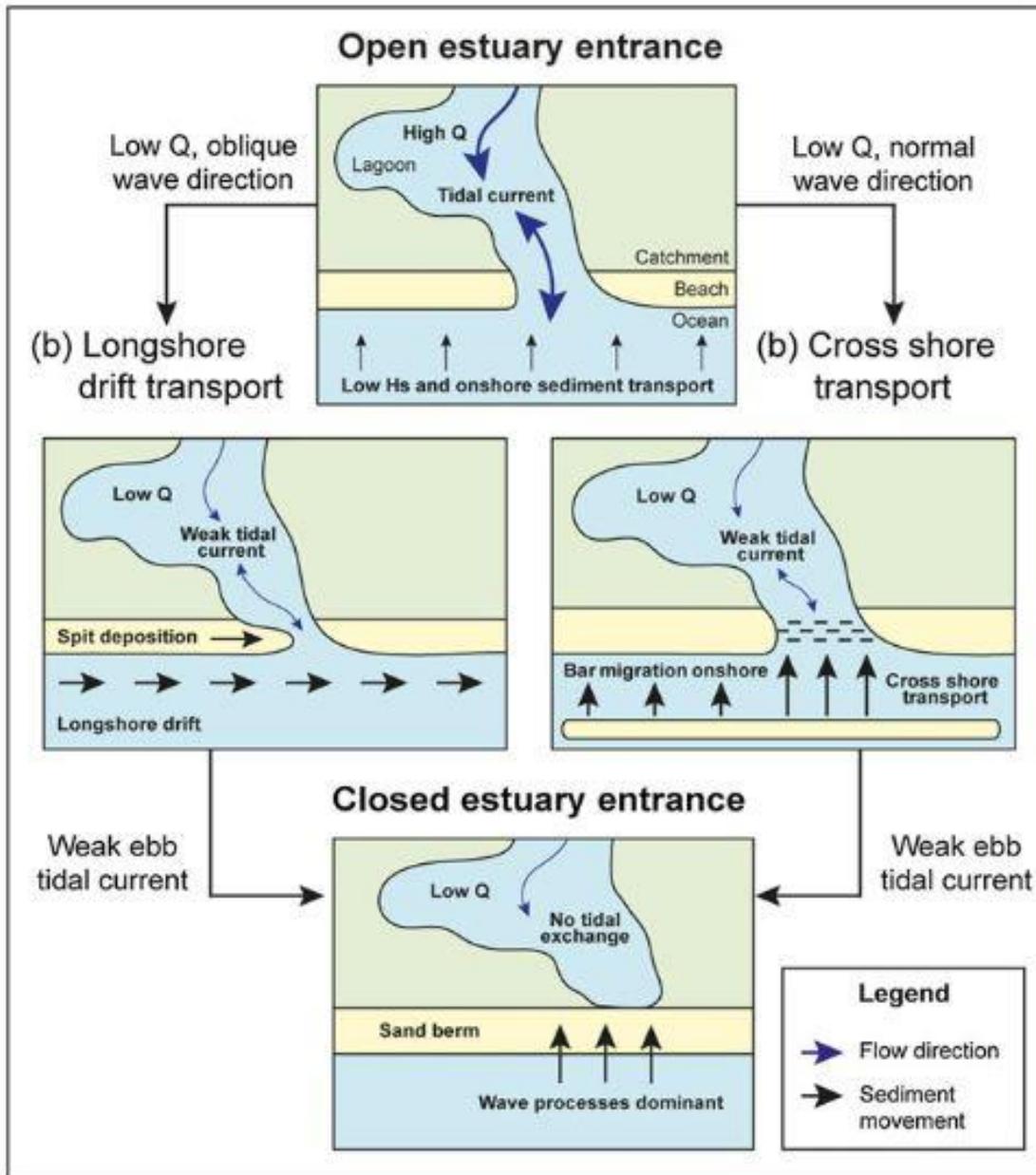
- Perera, E., Zhu, F., Dodd, N., Briganti, R., Blenkinsopp, C., Turner, I.L., 2019. Surface-groundwater flow numerical model for barrier beach with exfiltration incorporated bottom boundary layer model. *Coast. Eng.* 146, 47–64.
- Ranasinghe, R., Pattiaratchi, C., 2003a. The Seasonal Closure of Tidal Inlets: Causes and Effects. *Coast. Eng. J.* 45, 601–627.
- Ranasinghe, R., Pattiaratchi, C., 2003b. The Seasonal Closure of Tidal Inlets: Causes and Effects. *Coast. Eng. J.* 45, 601–627.
- Ranasinghe, R., Pattiaratchi, C., Masselink, G., 1999. A morphodynamic model to simulate the seasonal closure of tidal inlets. *Coast. Eng.* 37, 1–36.
- Raynal, O., Certain, R., Brunel, C., Aleman, N., Robin, N., Guérinel, B., Montel, L., 2015. LITTOSIS- Analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux du littoral du Languedoc-Roussillon. Rapport final 46.
- Rodellas, V., Stieglitz, T.C., Andrisoa, A., Cook, P.G., Raimbault, P., Tamborski, J.J., van Beek, P., Radakovitch, O., 2018. Groundwater-driven nutrient inputs to coastal lagoons: The relevance of lagoon water recirculation as a conveyor of dissolved nutrients. *Sci. Total Environ.* 642, 764–780.
- Seminack, C.T., McBride, R.A., 2018. A life-cycle model for wave-dominated tidal inlets along passive margin coasts of North America. *Geomorphology* 304, 141–158.
- Short, A.D., Aagaard, T., 1993. Single and Multi-Bar Beach Change Models. *J. Coast. Res.* 141–157.
- Sous, D., Petitjean, L., Bouchette, F., Rey, V., Meulé, S., Sabatier, F., Martins, K., 2016. Field evidence of swash groundwater circulation in the microtidal rousty beach, France. *Adv. Water Resour.* 97, 144–155.
- Stretch, D., Parkinson, M., 2006. The breaching of sand barriers at perched, temporary open/closed estuaries — a model study. *Coast. Eng. J.* 48, 13–30.
- Treloar, P.D., Roper, A.M., Smith, G.P., 1993. Lake Illawarra - Numerical Modelling of Entrance Processes. 11th Australas. Conf. Coast. Ocean Eng. *Coast. Eng. Partnersh. Nat. Prepr. Pap.* 617.
- Wainwright, D.J., Baldock, T.E., 2015. Measurement and modelling of an artificial coastal lagoon breach. *Coast. Eng.* 101, 1–16.
- Wilke, M., Boutière, H., 1999. Synthèse générale du fonctionnement hydrobiologique de l'étang de La Palme (No. 2). Centre d'Étude Hydrobiologique de Perpignan, Perpignan.
- Wilke, M., Boutière, H., 2000. Hydrobiological, physical and chemical characteristics and spatio-temporal dynamics of an oligotrophic mediterranean lagoon: the etang de La Palme (France). *Vie Milieu* 50, 101–115.
- Wright, L.D., Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.* 56, 93–118.
- Zietsman, I., 2004. Hydrodynamics of the temporary open estuaries, with case studies of Mhlanga and Mdloti (Thèse). University of Kwa-Zulu Natal, Durban.

## Listes des figures

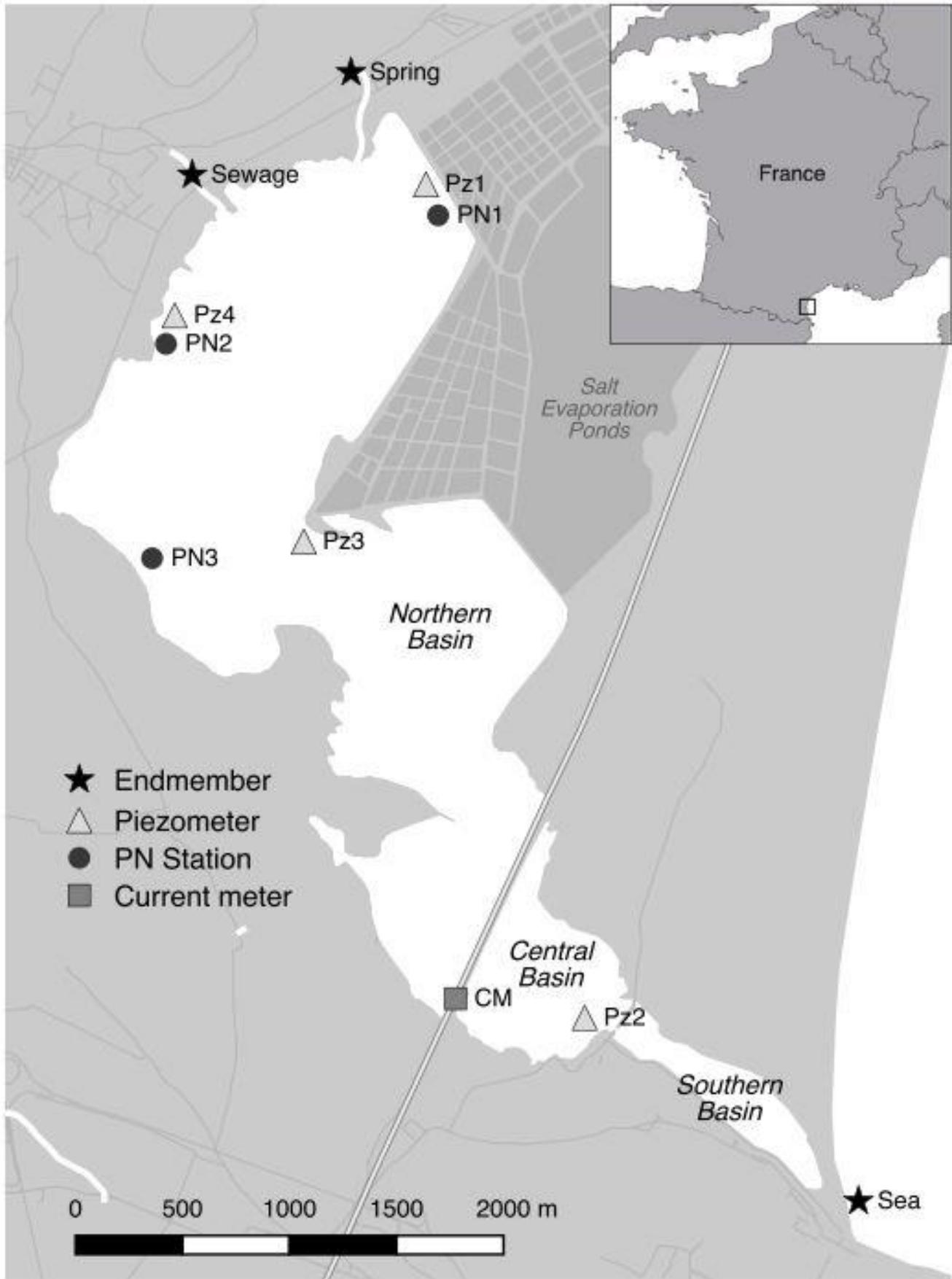
Figure 1 Carte de l'étang de La palme. En rouge : zone de suivi topographique .....	1
Figure 2 Carte de positionnement des instruments au cours du déploiement .....	8
Figure 3 Tailles médiane des sédiments en surface .....	10
Figure 4 MNT de la plage avant ouverture en d'automne (suite à des conditions de Tramontane) [a], [c] et au cours de l'hiver [b], [d].....	11
Figure 5 Niveau dans la lagune entre le 17/11/2017 et le 10/01/2018 (données : Rodellas et al., 2018).....	12
Figure 6 Variations des niveaux d'eaux en mer, en lagune et vitesse de courant dans le grau .....	12
Figure 7 Variations des niveaux en mer et lagune, vitesse de courant sous le pont SNCF en fonction des forçages hydrométéorologiques .....	13
Figure 8 Niveaux d'eaux (lagune, mer) et de la nappe dans la plage en fonction des forçages hydrométéorologiques .....	14
Figure 9 Évolutions morphologiques de la plage lors d'une fermeture du grau. Chronologie réelle [b], [a], [c], [d].....	15
Figure 10 Disposition de la plage avec un delta de jusant .....	17
Figure 11 Variations des niveaux en mer et dans la lagune en fonction des forçages hydrométéorologiques lors d'une fermeture du grau .....	18
Figure 12 Schéma conceptuel du phénomène de percolation au travers de la barrière sableuse ...	19
Figure 13 Modèle conceptuel de fonctionnement du grau de La Franqui.....	22

## Sommaire des Annexes

Annexe 1 Schéma conceptuel de fermeture d'une passe microtidale intermittente(McSweeney et al., 2018) .....	32
Annexe 2 Position des capteurs de pression du CEREGE du 17/11/2017 au 10/01/2018 (Rodellas et al., 2018).....	33
Annexe 3 Plan de positionnement des transects DGPS (les levés du trait de côte et de la berme ne sont pas représentés).....	34
Annexe 4 Récapitulatif de la base de données d'images aériennes et satellites .....	35
Annexe 5 Images aériennes du grau barré.....	36
Annexe 6 Position de l'exutoire du grau de 1895 à aujourd'hui .....	37
Annexe 7 Carte de localisation des échantillons de granulométrie sur la plage de La Franqui .....	38
Annexe 8 Caractéristiques des échantillons de granulométrie (S : surface ; X, Y, Z en Lambert 93 et mNGF).....	39
Annexe 9 Distribution des grains pour les échantillons de surface du 08/02/2019 .....	40
Annexe 10 Distribution des grains pour les échantillons de surface du 22/03/2019 .....	41
Annexe 11 Paramètres granulométriques des échantillons de surface .....	42
Annexe 12 Evolution du profil de plage au-dessus des instruments au cours du déploiement.....	43
Annexe 13 Évolution morphologique de la plage suite à un épisode de Tramontane et à une ouverture du grau.....	44
Annexe 14 Évolution morphologique de la plage suite à un épisode de Tramontane et à une ouverture du grau.....	45
Annexe 15 MNT de la plage le 12/07/2018 et disposition des barres le 13/07/2018 (digitalisées depuis une image Google Earth) .....	46
Annexe 16 Levés LiDAR de la plage de La Franqui extrait de la campagne Litto3 .....	47
Annexe 17 Mise en place de la berme néoformée et lobes comblant le chenal du grau (le 6/03/2019) .....	48
Annexe 18 Évolution morphologiques de la plage en condition de vent marin et à la suite d'une fermeture du grau .....	49
Annexe 19 Évolution morphologiques de la plage à la suite d'une tempête (27/02 au 2/03/2018) .....	50



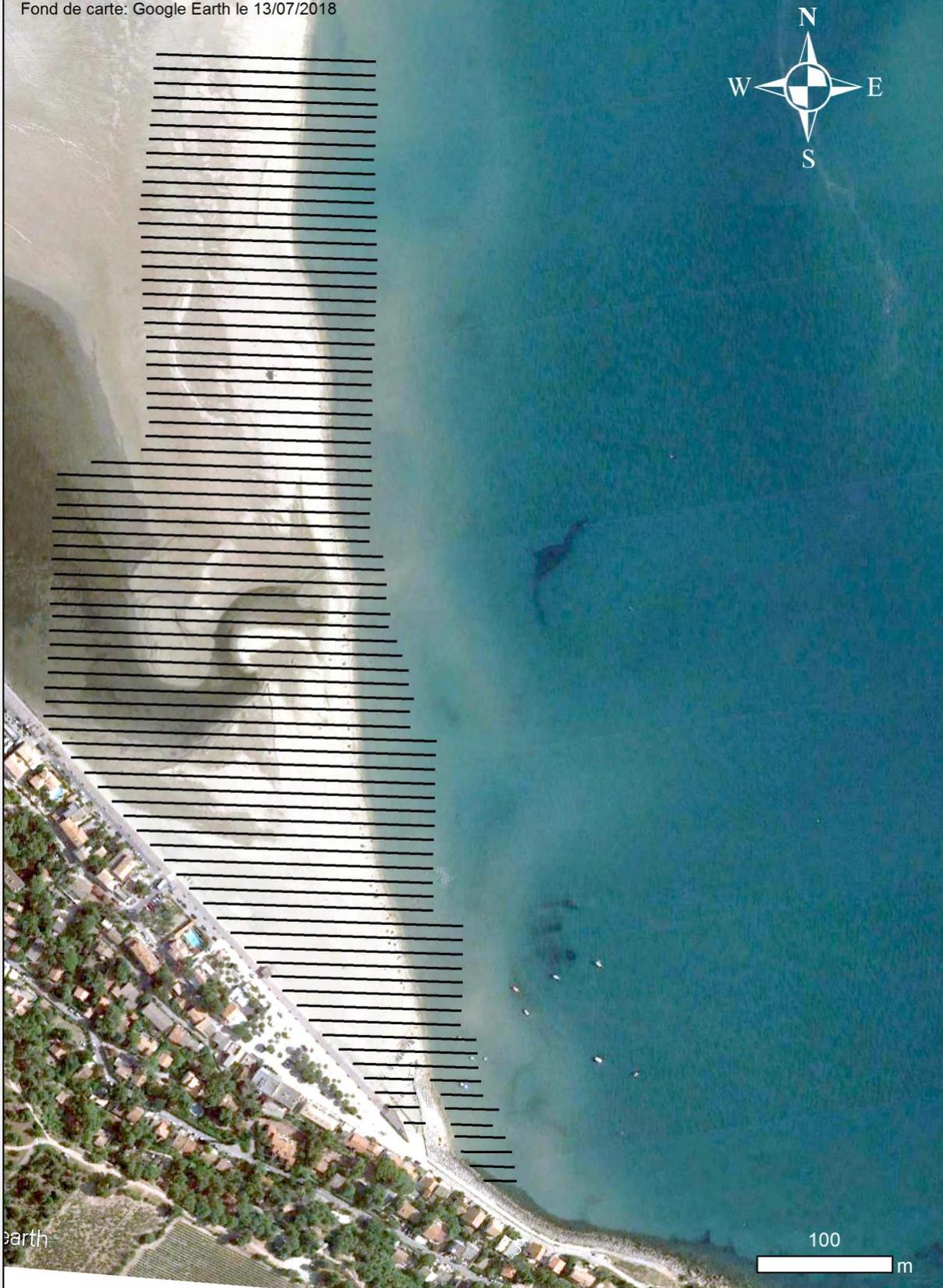
**Figure 1.** Conceptual model of entrance closure processes in IOCE. After known mechanisms of closure in seasonally open inlets from Ranasinghe and Pattiaratchi, 1999, 2003. Q refers to fluvial discharge. *Annexe 1 Schéma conceptuel de fermeture d'une passe microtidale intermittente (McSweeney et al., 2018).*



Annexe 2 Position des capteurs de pression du CEREGE du 17/11/2017 au 10/01/2018 (Rodellas et al., 2018)

# Plan de positionnement des levés DGPS à La Franqui

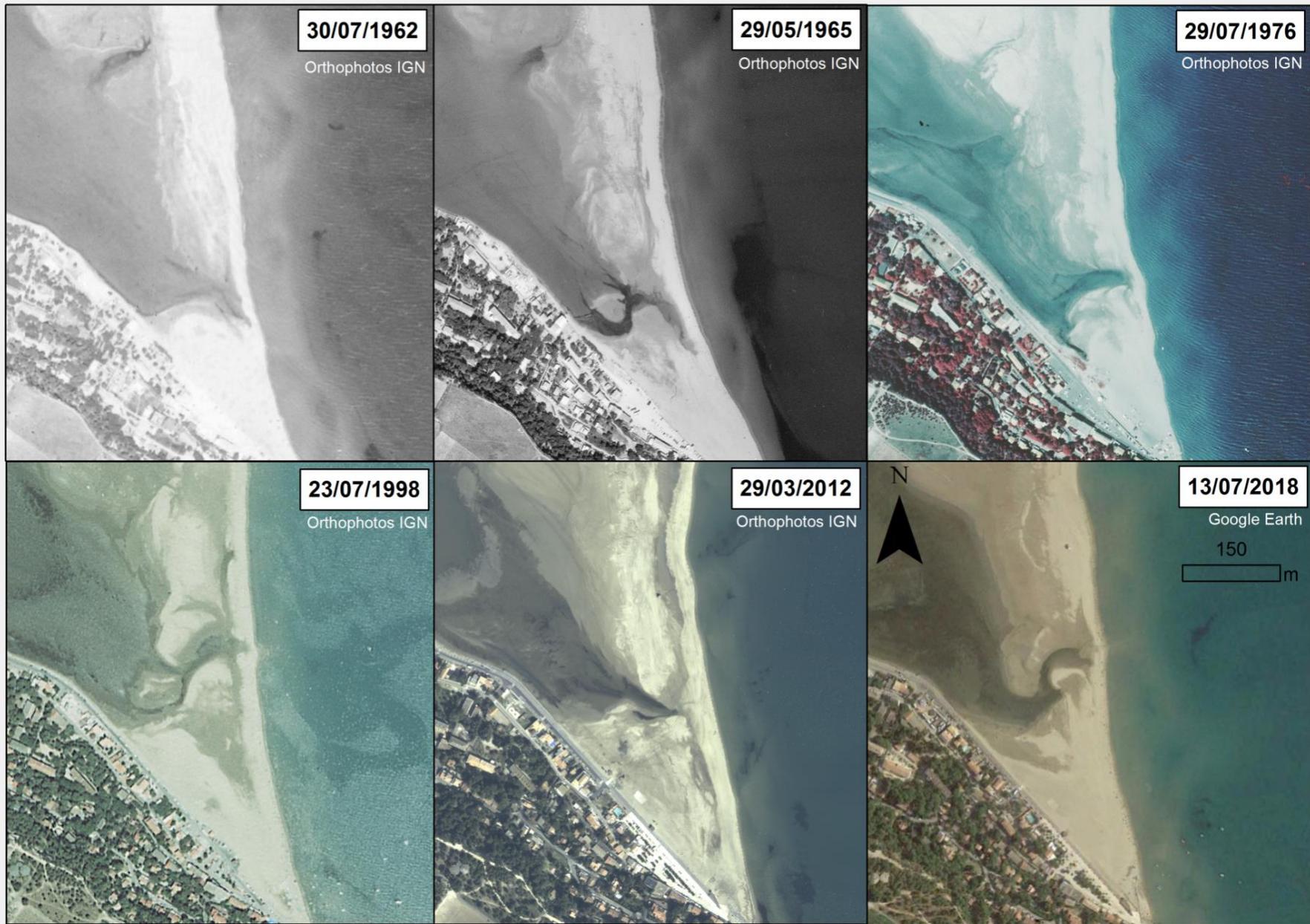
Fond de carte: Google Earth le 13/07/2018



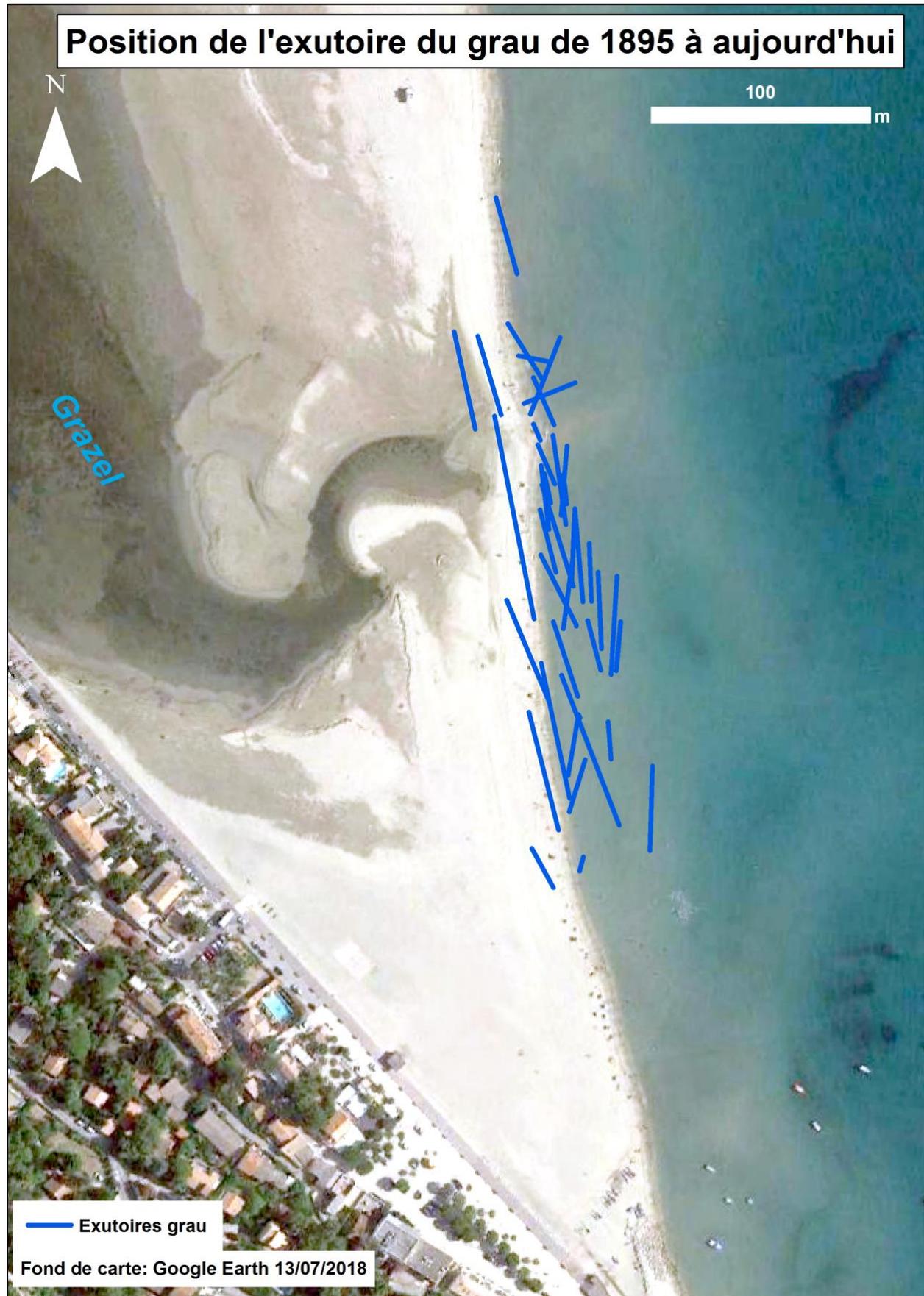
Annexe 3 Plan de positionnement des transects DGPS (les levés du trait de côte et de la berme ne sont pas représentés)

Annexe 4 Récapitulatif de la base de données d'images aériennes et satellites

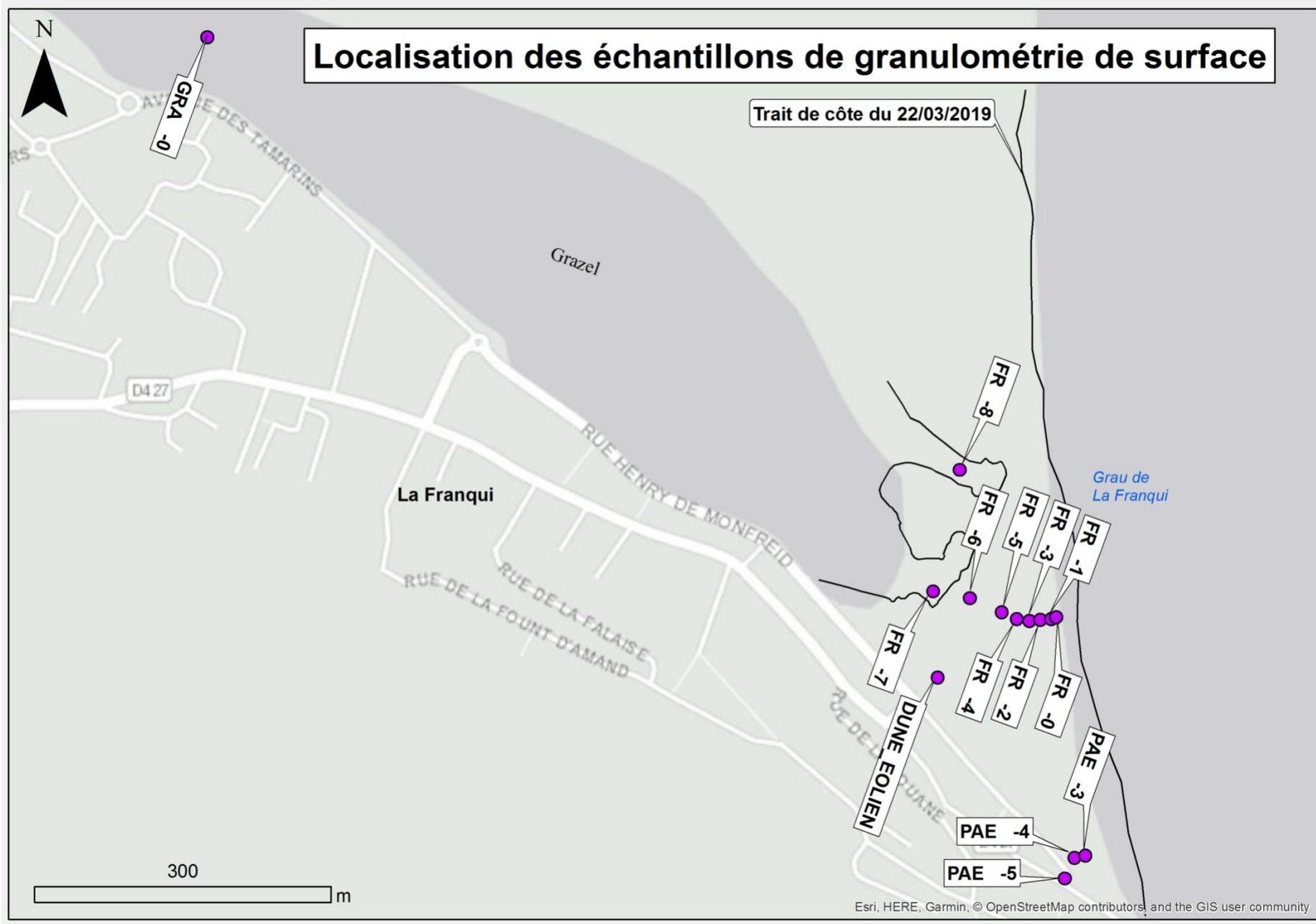
<b>Date de cliché</b>	<b>Source</b>	<b>Type</b>	<b>Grau</b>	<b>Barres visibles</b>
07/08/1942	IGN	Argentique	Ouvert	Non
24/06/1953	IGN	Argentique	Fermé	Non
30/07/1962	IGN	Argentique	Fermé	Oui
07/12/1962	IGN	Argentique	Ouvert	Non
26/06/1963	IGN	Argentique	Ouvert	Non
01/02/1965	IGN	Argentique	Ouvert	Non
02/02/1965	IGN	Argentique	Ouvert	Non
29/08/1965	IGN	Argentique	Fermé	Oui
05/10/1968	IGN	Argentique	Fermé	Oui
06/02/1974	IGN	Argentique	Fermé	Oui
29/07/1976	IGN	Argentique	Fermé	Oui
01/07/1977	IGN	Argentique	Ouvert	Non
08/02/1977	IGN	Argentique	Ouvert	Non
09/07/1979	IGN	Argentique	Ouvert	Non
31/07/1980	IGN	Argentique	Ouvert	Oui
10/08/1982	IGN	Argentique	Fermé	Oui
09/02/1986	IGN	Argentique	Fermé	Oui
17/07/1986	IGN	Argentique	Ouvert	Oui
.././1989	IGN	Argentique	Fermé	Oui
06/08/1992	IGN	Argentique	Ouvert	Oui
17/07/1995	IGN	Argentique	Fermé	Oui
08/03/1997	IGN	Argentique	Ouvert	Oui
23/07/1998	IGN	Argentique	Fermé	Non
01/07/1999	IGN	Argentique	Fermé	Oui
17/11/1999	IGN	Argentique	Ouvert	Non
22/05/2003	IGN	Argentique	Fermé	Oui
21/08/2006	Google Earth/NASA	Satellite	Fermé	Oui
01/01/2008	Google Earth/NASA	Satellite	Fermé	Oui
06/09/2013	Google Earth/Digital globe	Satellite	Fermé	Non
01/09/2014	Google Earth/Landsat/Copernicus	Satellite	Ouvert	Oui
29/06/2015	Google Earth/Landsat/Copernicus	Satellite	Ouvert	Oui
06/09/2015	Google Earth/Digital globe	Satellite	Fermé	Oui
04/07/2016	Google Earth/Digital globe	Satellite	Ouvert	Oui
15/05/2017	Google Earth/Landsat/Copernicus	Satellite	Fermé	Oui
13/07/2018	Google Earth/Landsat/Copernicus	Satellite	Fermé	Oui



Annexe 5 Images aériennes du grau barré



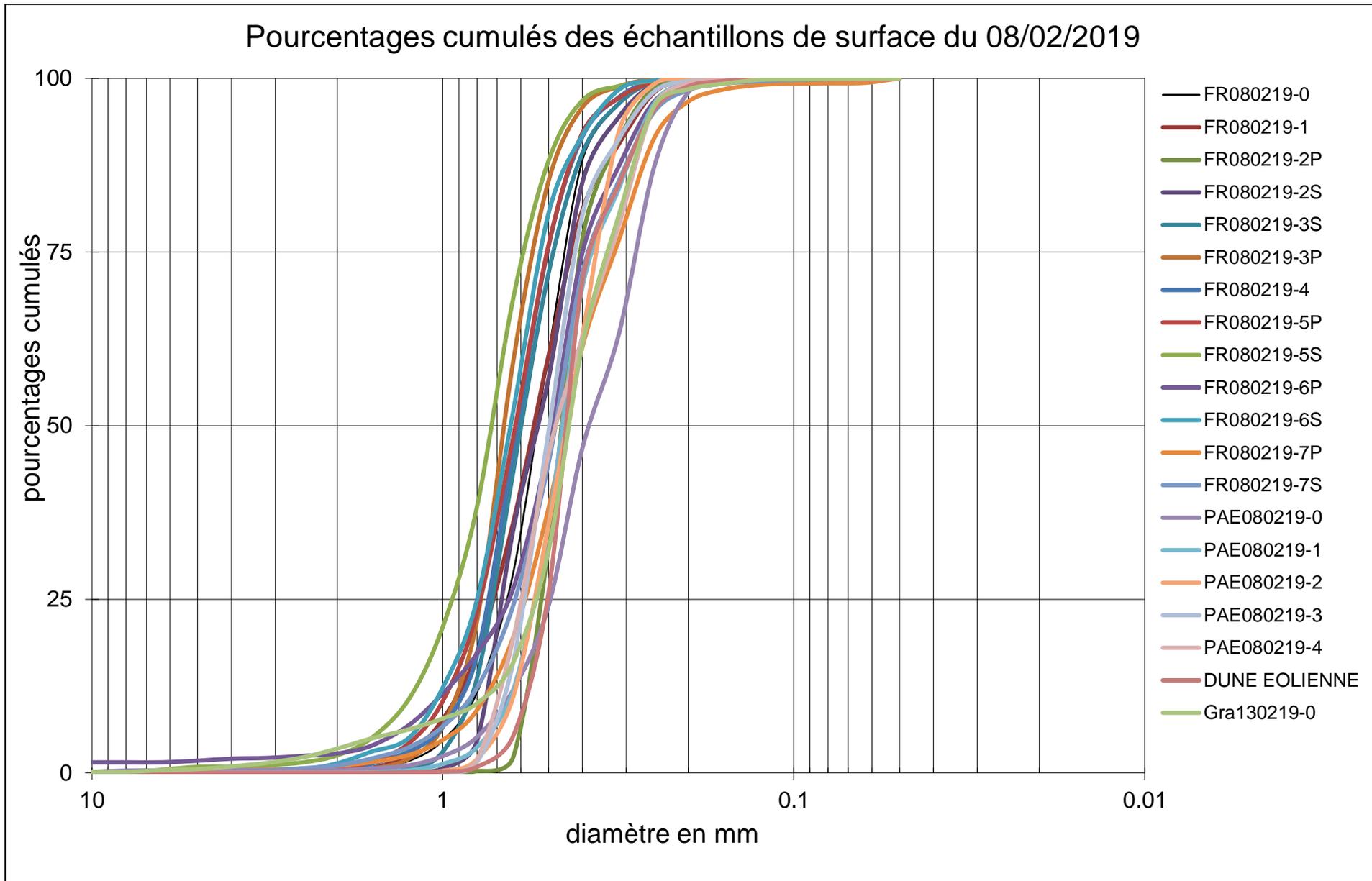
Annexe 6 Position de l'exutoire du grau de 1895 à aujourd'hui



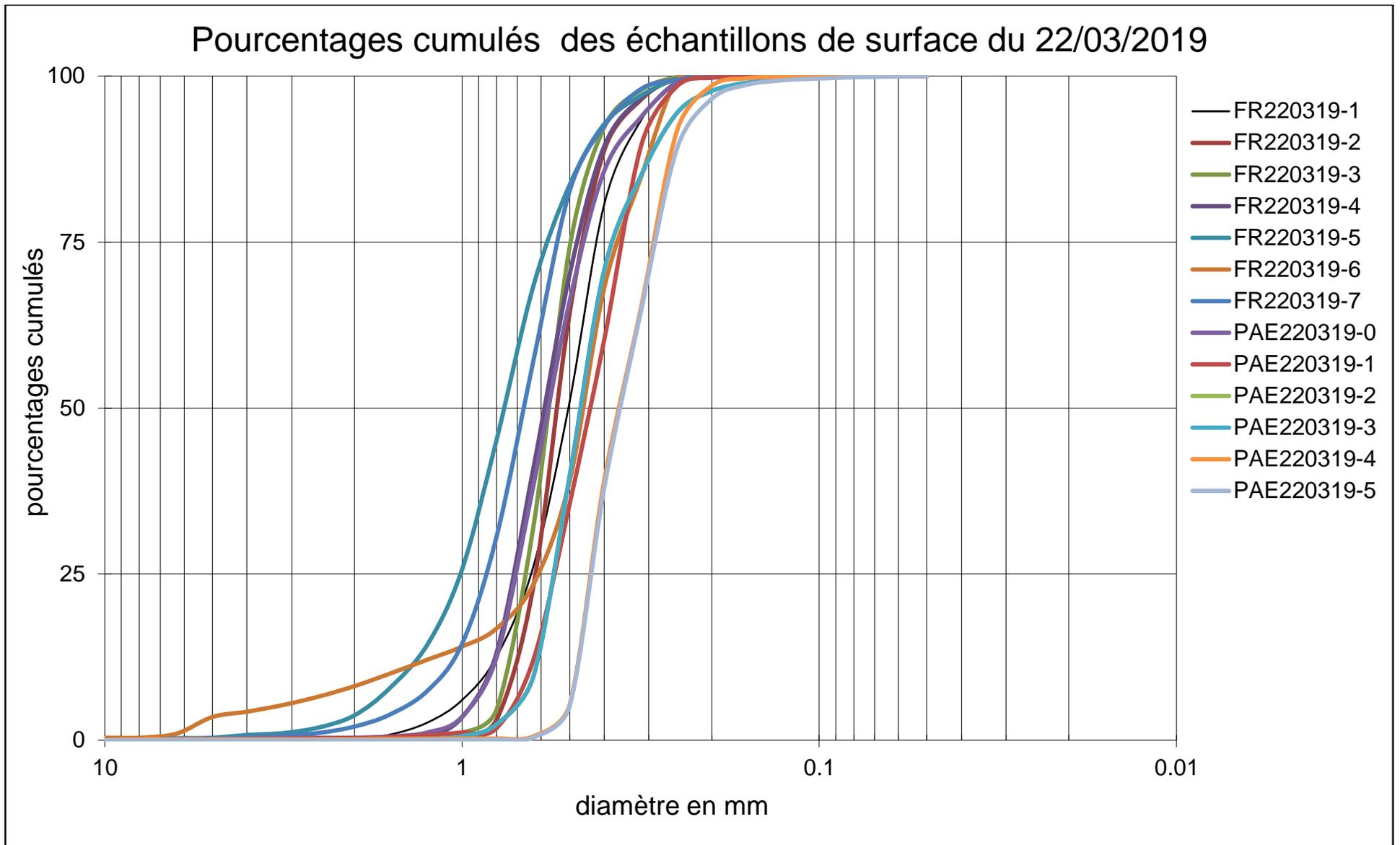
Annexe 7 Carte de localisation des échantillons de granulométrie sur la plage de La Franqui

Annexe 8 Caractéristiques des échantillons de granulométrie (S : surface ; X, Y, Z en Lambert 93 et mNGF)

Nom	X	Y	Z	DATE	Médiane (mm)	Moyenne (mm)	Sorting	Skewness	Kurtosis
DUNE_EOLIEN	703119,33	6203610,03	0,726	08/02/2019	0,447	0,443	1,348	-0,201	1,279
FR08219-1	703234,47	6203669,35	-0,154	08/02/2019	0,555	0,585	1,703	0,011	1,088
FR08219-2S	703225,22	6203667,30	1,238	08/02/2019	0,540	0,560	1,574	-0,076	0,860
FR080219-3S	703215,16	6203667,13	0,768	08/02/2019	0,600	0,606	1,524	-0,107	1,038
FR080219-4	703201,89	6203668,81	1,024	08/02/2019	0,615	0,626	1,496	-0,014	1,180
FR080219-5S	703186,80	6203674,72	0,521	08/02/2019	0,734	0,794	1,628	0,146	1,123
FR080219-6S	703155,78	6203687,44	0,426	08/02/2019	0,643	0,688	1,521	0,081	1,224
FR080219-7S	703118,90	6203697,01	0,301	08/02/2019	0,480	0,517	1,637	0,098	1,258
FR080219-0	703236,43	6203667,98	-0,349	08/02/2019	0,543	0,572	1,495	0,098	1,132
PAE080219-3	703273,75	6203427,28	1,044	08/02/2019	0,497	0,500	1,424	-0,127	1,157
PAE080219-4	703260,68	6203426,10	2,171	08/02/2019	0,476	0,478	1,795	-0,155	0,778
GRA130219-0	702384,26	6204256,39	-0,212	13/02/2019	0,440	0,456	1,639	0,185	1,517
PAE220319-3	703273,26	6203427,87	0,941	22/03/2019	0,467	0,464	-0,182	1,112	1,504
PAE220319-4	703260,84	6203427,23	2,086	22/03/2019	0,365	0,367	-0,136	0,797	1,517
PAE220319-5	703252,25	6203406,58	3,780	22/03/2019	0,362	0,364	-0,176	0,843	1,528
FR220319-1	703232,72	6203669,36	0,102	22/03/2019	0,505	0,547	0,171	1,217	1,543
FR220319-2	703224,96	6203667,13	1,091	22/03/2019	0,546	0,553	-0,103	1,122	1,370
FR220319-3	703215,39	6203667,12	0,704	22/03/2019	0,576	0,584	-0,107	1,058	1,363
FR220319-4	703202,03	6203668,77	0,627	22/03/2019	0,591	0,601	-0,067	1,017	1,535
FR220319-5	703186,53	6203674,73	0,458	22/03/2019	0,766	0,825	0,054	1,193	1,769
FR220319-6	703155,67	6203686,58	0,334	22/03/2019	0,462	0,547	0,415	1,977	1,692
FR220319-7	703118,88	6203696,13	0,262	22/03/2019	0,677	0,715	0,085	1,208	1,614
FR220319-8	703144,53	6203819,81	-0,426	22/03/2019	0,955	0,985	-0,131	1,100	1,742



Annexe 9 Distribution des grains pour les échantillons de surface du 08/02/2019

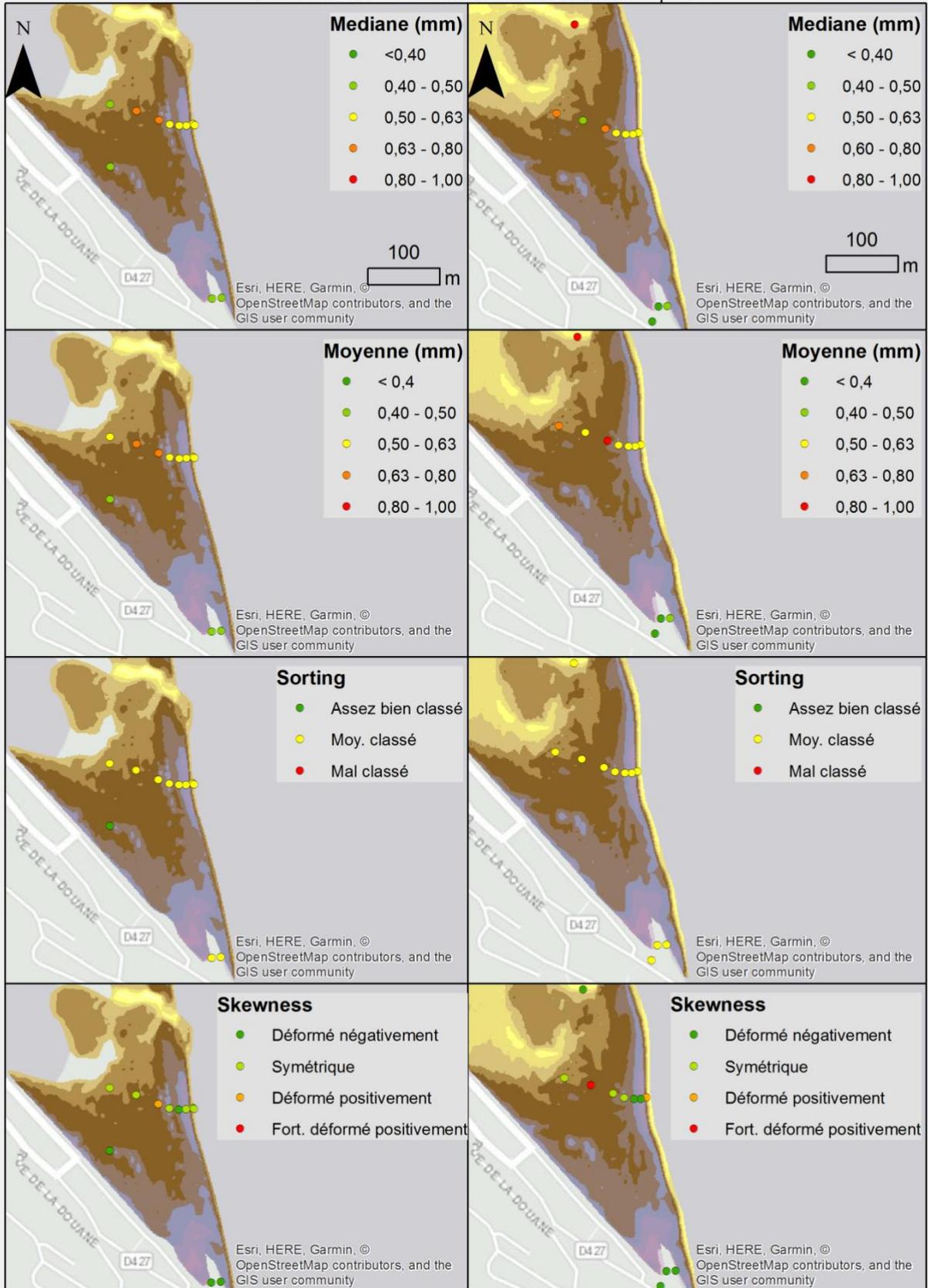


Annexe 10 Distribution des grains pour les échantillons de surface du 22/03/2019

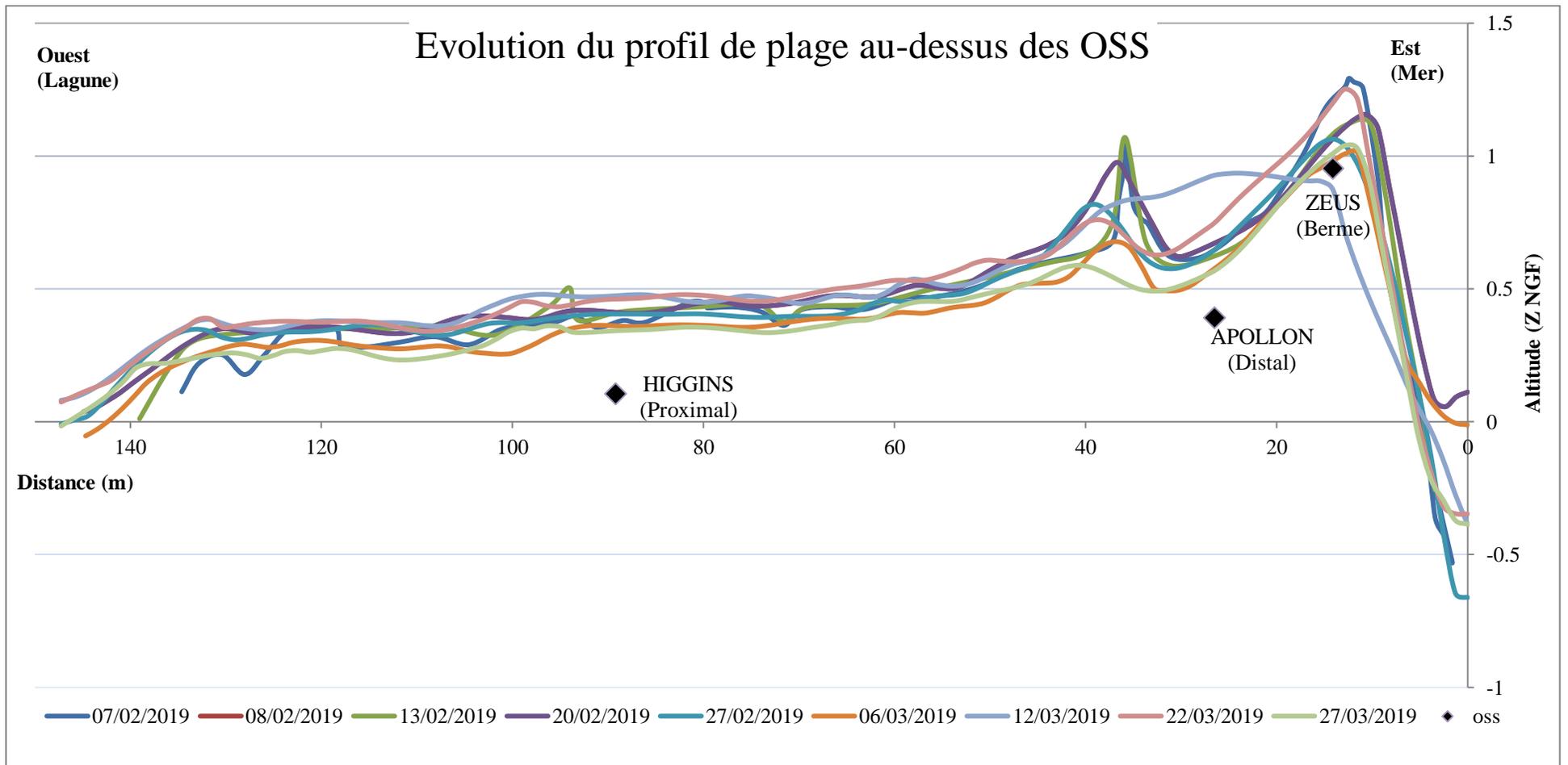
08/02/2019

22/03/2019

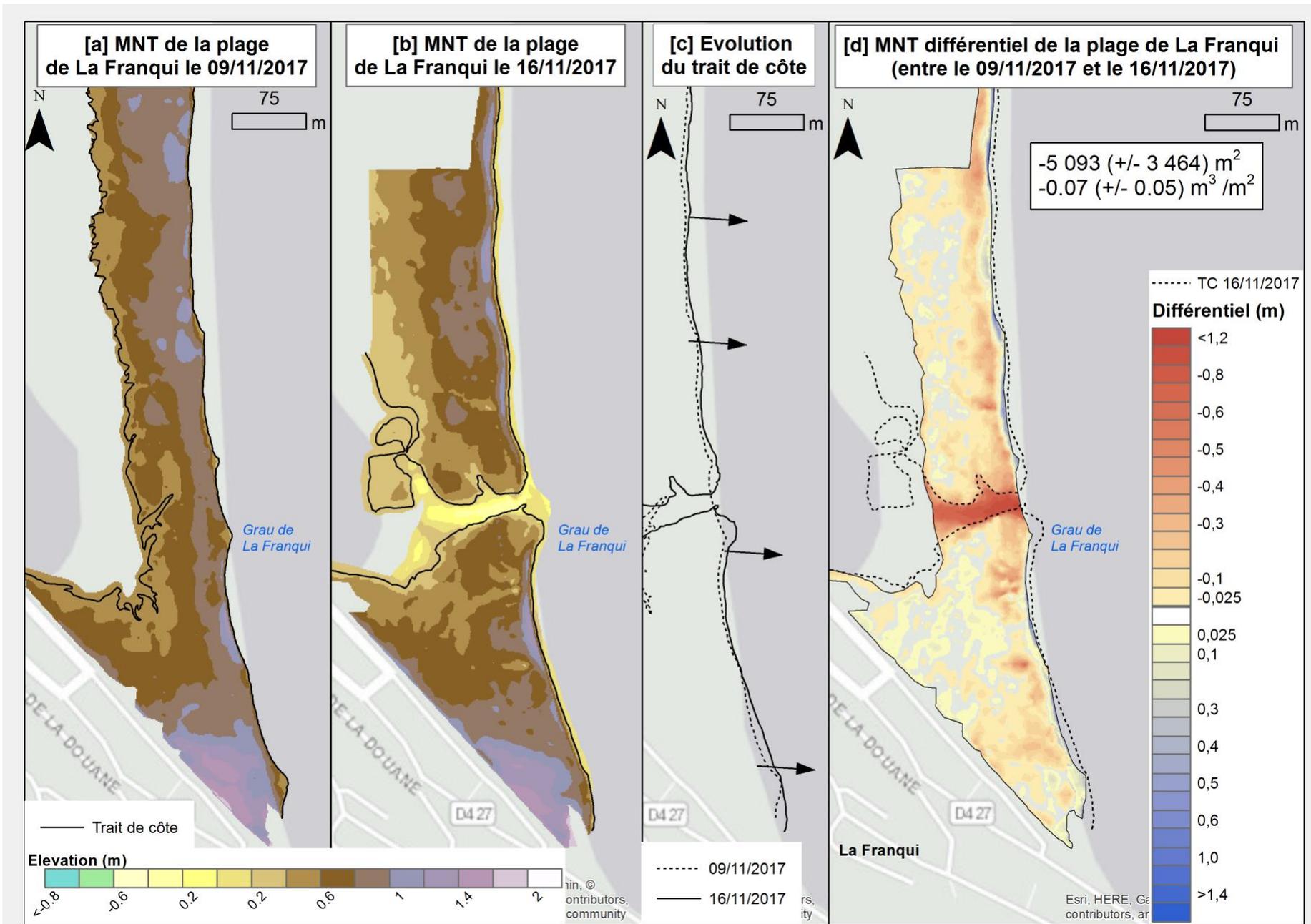
Granulométrie des échantillons de surface uniquement



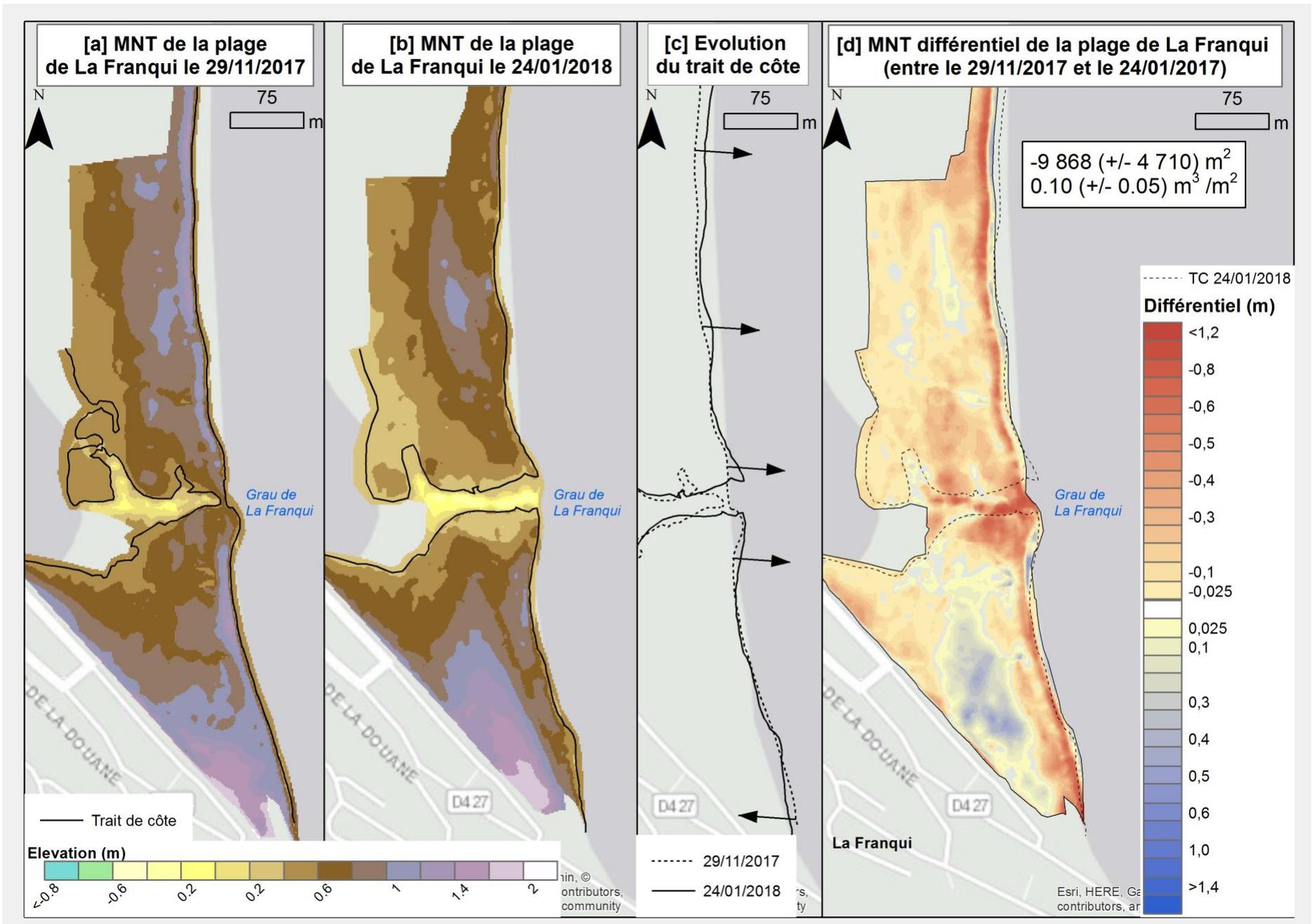
Annexe 11 Paramètres granulométriques des échantillons de surface



Annexe 12 Evolution du profil de plage au-dessus des instruments au cours du déploiement



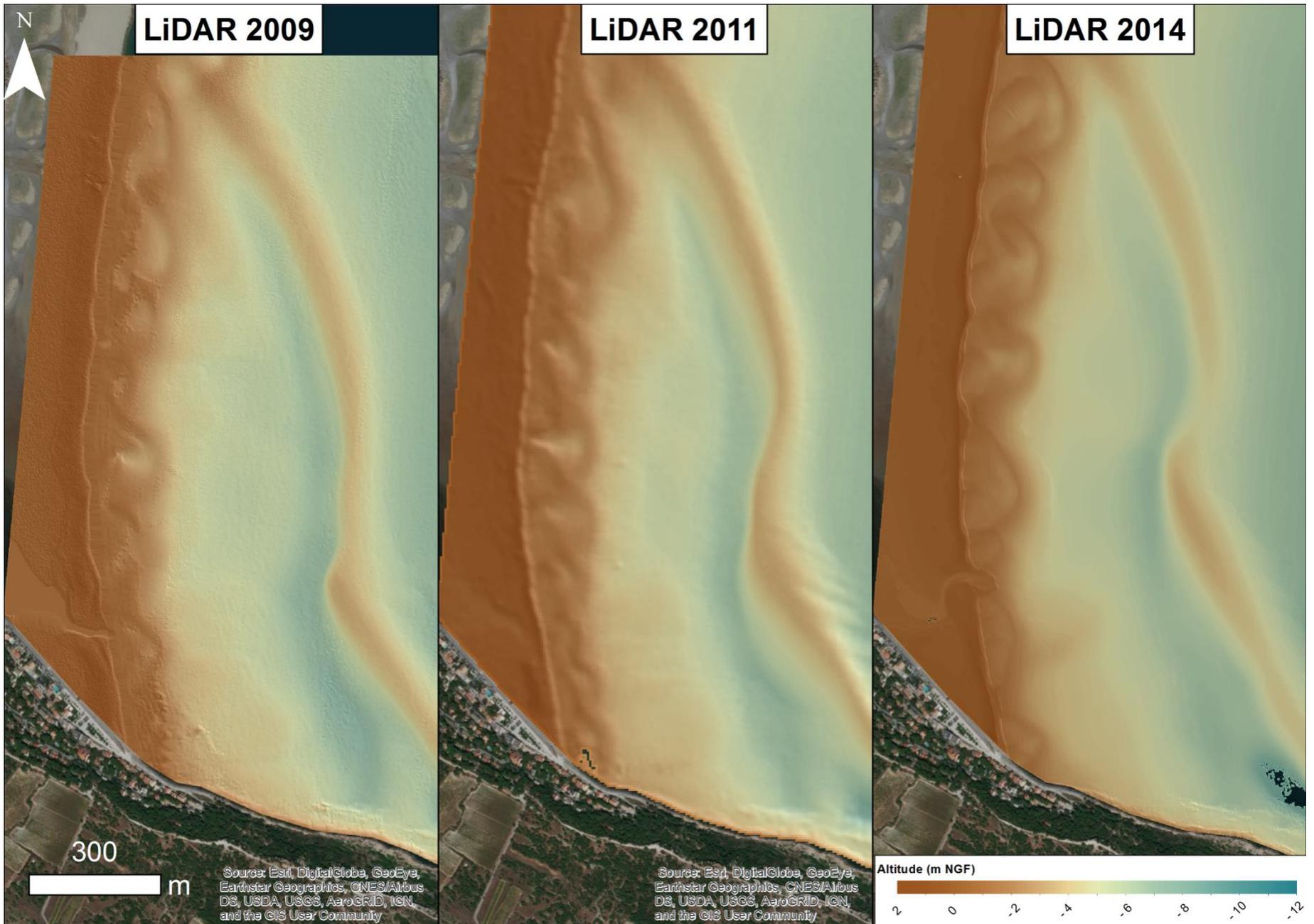
Annexe 13 Évolution morphologique de la plage suite à un épisode de Tramontane et à une ouverture du grau



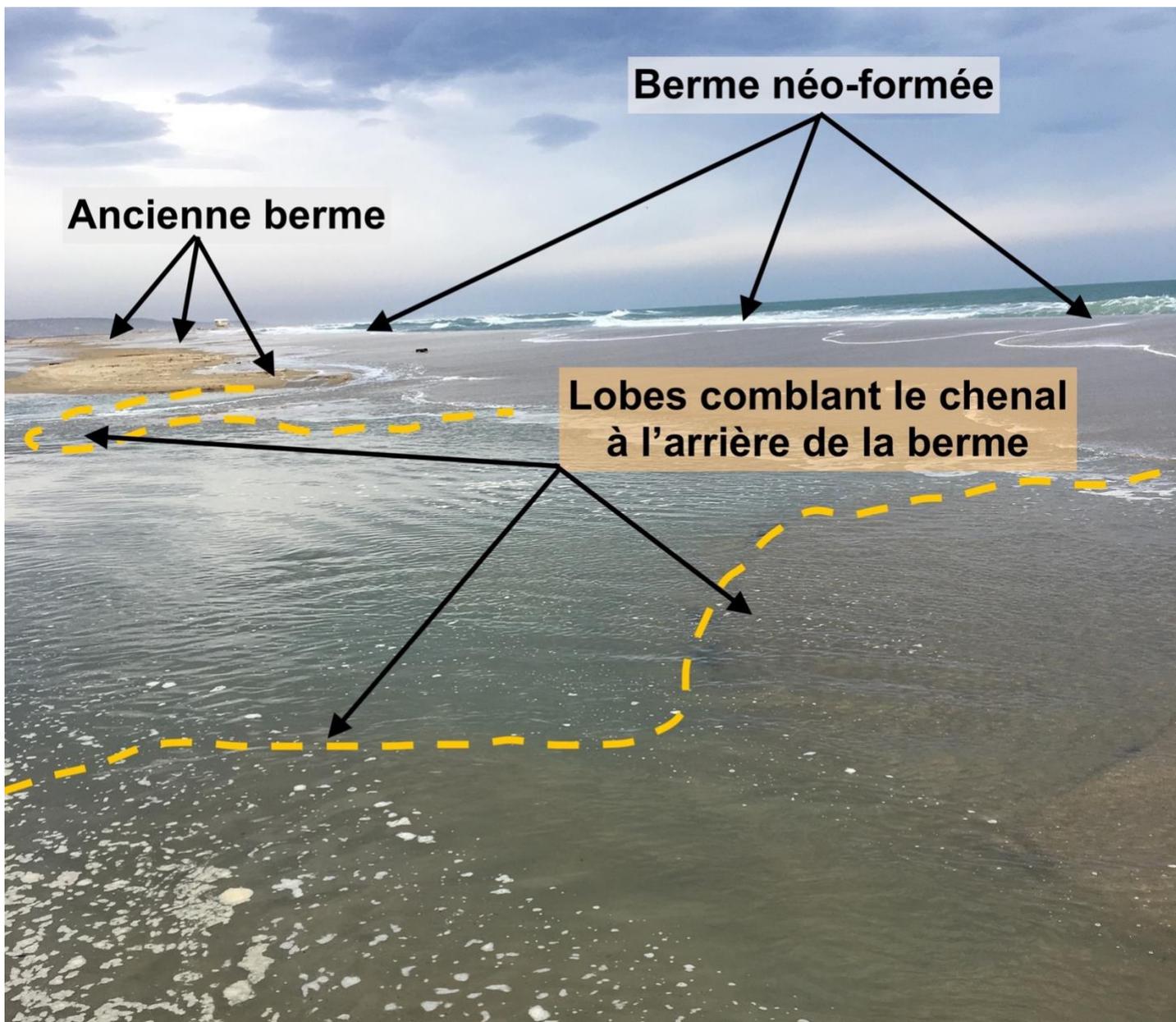
Annexe 14 Évolution morphologique de la plage suite à un épisode de Tramontane et à une ouverture du grau



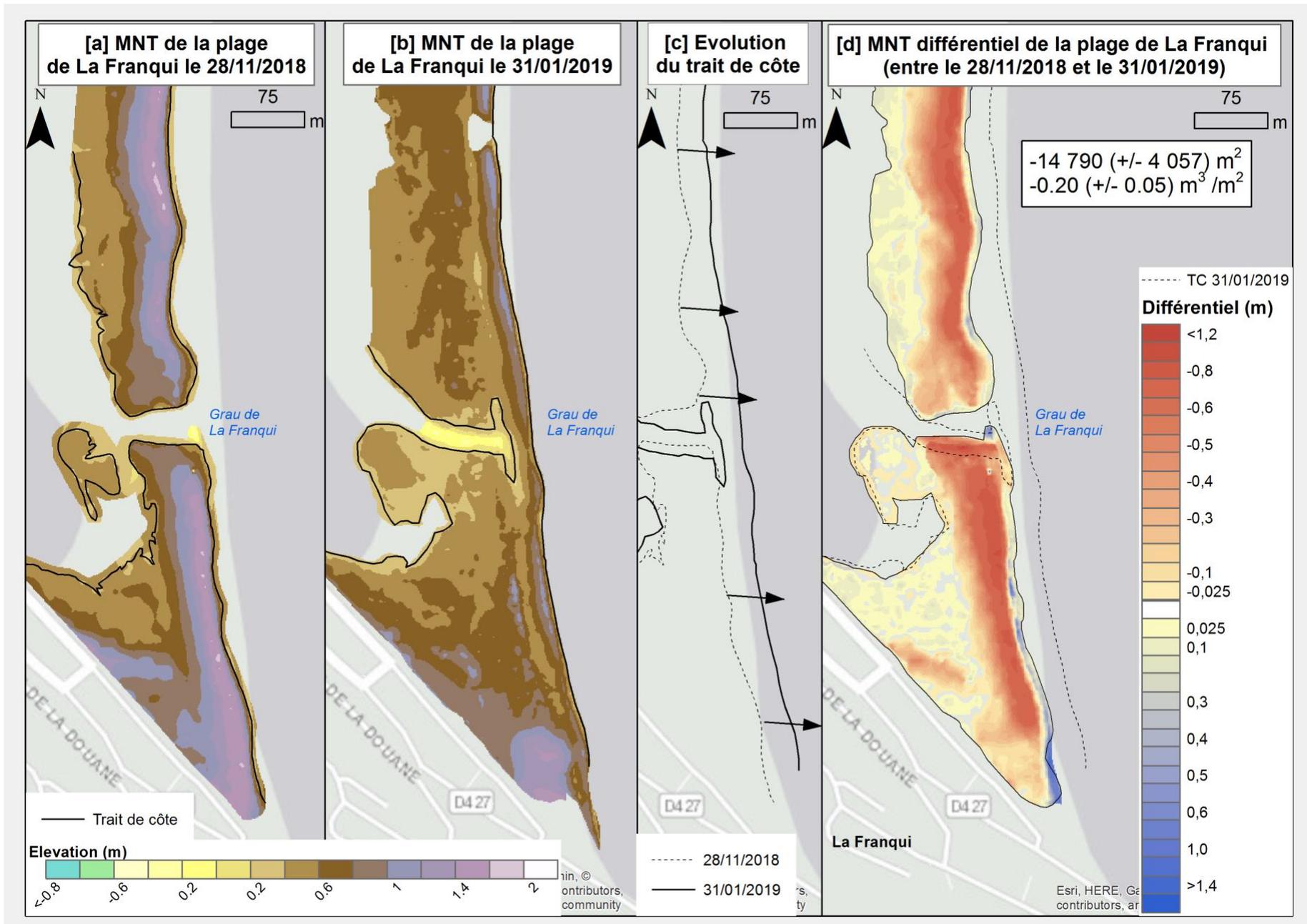
Annexe 15 MNT de la plage le 12/07/2018 et disposition des barres le 13/07/2018 (digitalisées depuis une image Google Earth)



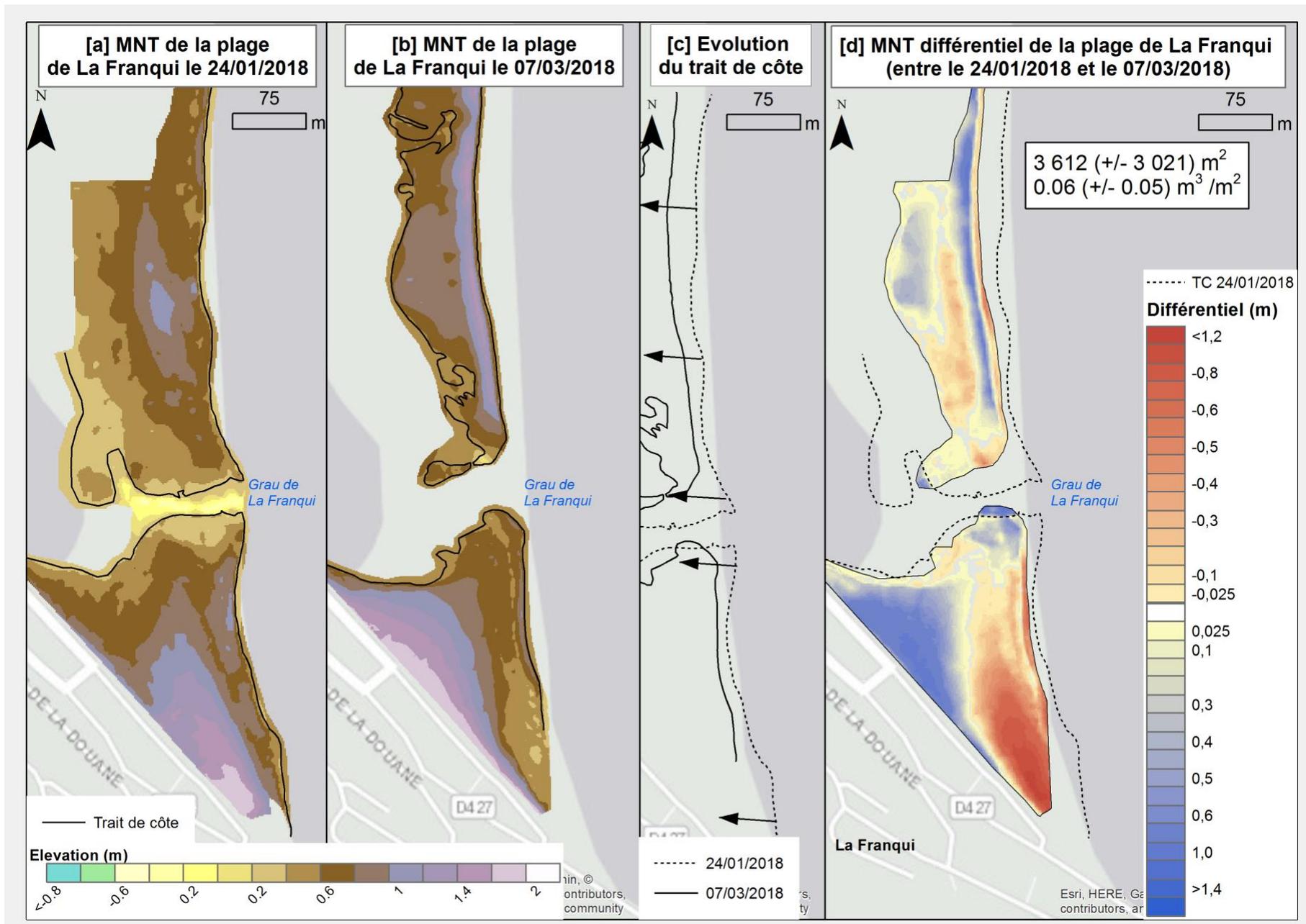
Annexe 16 Levés LiDAR de la plage de La Franqui extrait de la campagne Litto3



Annexe 17 Mise en place de la berme néoformée et lobes comblant le chenal du grau (le 6/03/2019)



Annexe 18 Évolution morphologiques de la plage en condition de vent marin et à la suite d'une fermeture du grau



Annexe 19 Évolution morphologiques de la plage à la suite d'une tempête (27/02 au 2/03/2018)

# Une passe microtidale intermittente contrôlée par le vent : l'exemple du grau de La Franqui

## Résumé :

Ce travail porte sur l'étude du fonctionnement d'un des derniers graus naturels de Méditerranée française : le grau de La Franqui. L'étude consiste en un suivi topographique (au DGPS) de la plage s'étalant sur 1,5 an et d'un déploiement d'instruments de mesures hydrodynamiques (sur 2 mois). Pour mesurer les variations de niveaux entre la côte et le bassin sud, ainsi que l'évolution de la nappe dans la plage en fonction des conditions de forçages dominantes.

Les résultats tendent à démontrer le rôle prédominant de la Tramontane dans les phases d'ouvertures, elle est à l'origine de l'accumulation d'eau en arrière de la barrière et de l'abaissement de la berme. Cette configuration permet ainsi au grau de s'ouvrir au niveau d'une corne de sinuosité de la plage, qui connecte la plage aérienne et le système de barres interne. Les phases de comblements semblent en revanche plutôt être contrôlées par la petite houle d'est de forte période liée au vent marin, qui va ramener vers la côte le sédiment exporté par la tramontane et par le grau. Ces phases d'ouverture et de fermeture s'enchaînant au cours d'un cycle saisonnier.

Le grau de La Franqui pourrait être un nouveau type d'ICOLL (Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons), car les passes microtidales intermittentes contrôlées par le vent et la position des barres d'avant-côte ne sont pas contenues dans les classifications actuelles.

Un phénomène de percolation au travers de la barrière littorale est observé lorsque que le grau est fermé. Le flux d'eau est dirigé de la lagune vers la mer en condition de Tramontane et de la mer vers la lagune en condition de marin. La pente de la nappe dépend de la surcote engendrée par le forçage est des hauteurs d'eau de part et d'autre du cordon sableux.

Mots clés : grau, passe tidale, microtidale, contrôlée par le vent, lagune côtière, DGPS-RTK, percolation, La Franqui, étang de La Palme, Golfe du Lion

## Abstract :

The aim of this study is to understand the driving mechanisms behind the closures and openings of one of the last natural inlets of the French Mediterranean coast: the *grau* de La Franqui. The study consists in a DGPS survey of the beach over a span of 1.5 year. To understand the effect of hydro-meteorological conditions on the water circulation, the water level in the lagoon and on the near shore was record for 2 months along with the water table height in the beach barrier.

The Tramontane (offshore wind) blows the sand away lowering the berm's height and create a water surge along the coastal barrier creating the optimal condition for barrier breeching. The actual opening of the inlet will occur where the berm crest is the lowest, wich is in front of the pointy end of the crescentic nearshore bar. Closures of the inlet are caused by the re-formation of the sandy bar during high period easterly waves and weak wind.

The *grau* de La Franqui might be a new type of ICOLL (Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons), as intermittent inlet driven by wind and nearshore bars systems are not described in actuals classifications.

Seepage trough the beach barrier was observed during closed inlet periods. The flow is toward the sea in Tramontane conditions and from the sea during onshore wind periods. The gradient of the water table slope is controlled by the surge caused intensity of the wind and the initial water level on both sides of the barrier.

Keywords: grau, tidal inlet, microtidal, wind driven, coastal lagoon, DGPS-RTK, seepage, La Franqui, La Palme lagoon, Gulf of Lion