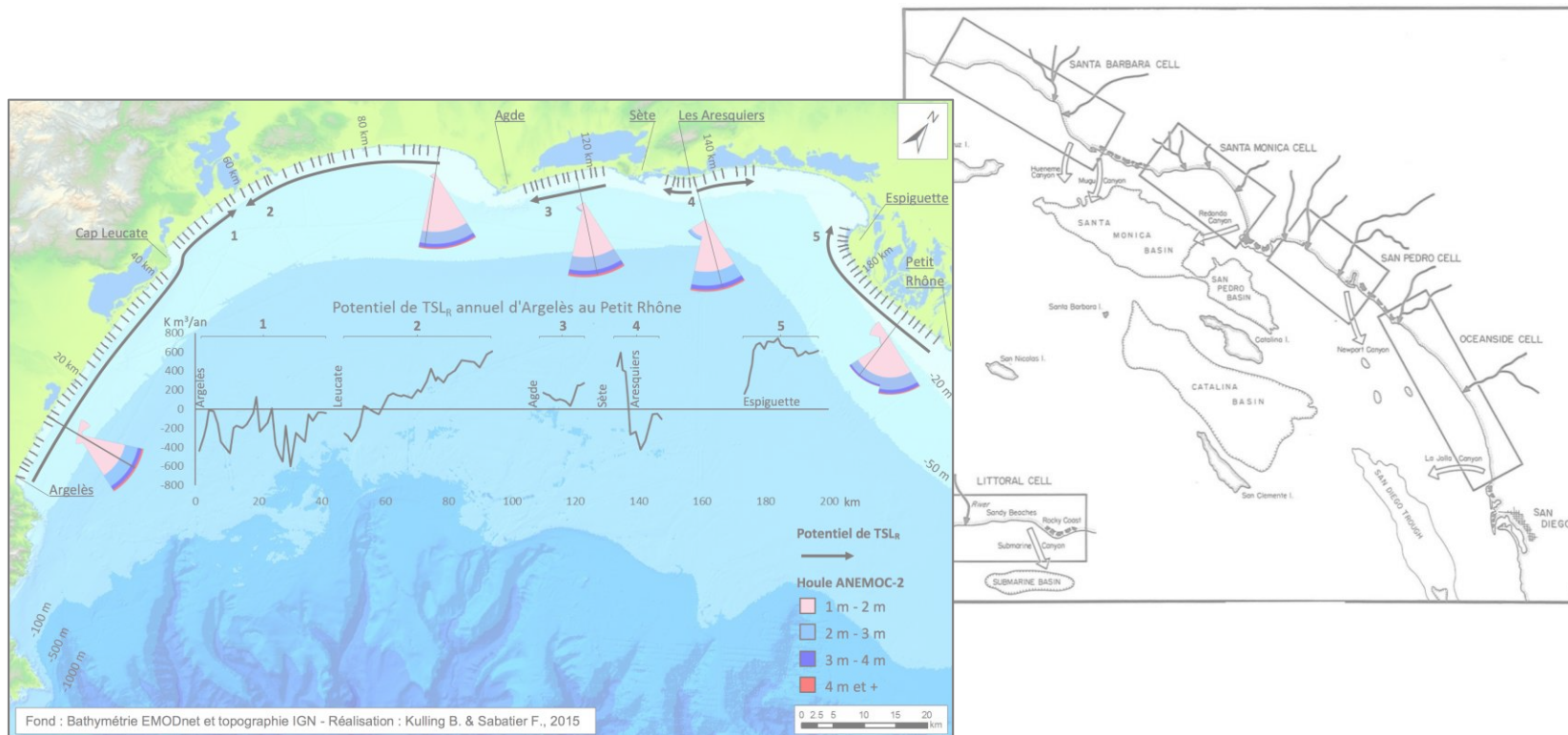


Modélisation du potentiel de transport sédimentaire longitudinal résultant annuel de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon



Sommaire

1	Introduction.....	1	3.6	Petite Camargue.....	29
1.1	Contexte	1	3.7	Remarques	29
1.2	Rappels bibliographiques	1	4	Cartographie des cellules potentielles de dérive littorale	30
1.3	Estimation de la direction résultante du TSL.....	5	5	Conclusion	32
2	Méthodologie	7	6	Bibliographie	33
2.1	Fonctionnement général d’Unibest-CL+	7			
2.2	Préparation des données en entrée du modèle	7			
2.2.1	Conception de scripts en langage Python	9			
2.2.2	Climats de houle	10			
2.2.3	Granulométrie	13			
2.2.4	Profils topo-bathymétriques	15			
2.3	Découpage spatial des simulations	15			
2.4	Calibration	22			
2.4.1	Principe de la calibration	22			
2.4.2	Mesures expérimentales	22			
2.4.3	Comparaison mesures - calculs	23			
2.5	Mises en garde	26			
3	Organisation et intensité du TSL	27			
3.1	Rappels	27			
3.2	Roussillon	27			
3.3	Narbonnais	28			
3.4	Lido de Sète	28			
3.5	Sète - Maguelone	29			

1 Introduction

1.1 Contexte

Ce rapport, réalisé dans le cadre de la thèse de B. Kulling sous financement de la DREAL Languedoc-Roussillon, propose donc (1) d'évaluer la répartition spatiale du potentiel de Transport Sédimentaire Longitudinal Résultant (TSLR) annuel à l'aide d'un modèle d'ingénierie côtière et (2) de comparer les résultats obtenus avec les estimations antérieures. La mise en œuvre du modèle numérique Unibest-CL+ (**Uniform Beach Sediment Transport**) édité par la société hollandaise Deltares est exposée dans la section 2. L'organisation et l'intensité du transport TSL_R en Languedoc-Roussillon sont décrits dans la section 3. Enfin, une cartographie des cellules potentielles de dérive littorale est donnée dans la section 4.

1.2 Rappels bibliographiques

Le Transport Sédimentaire Longitudinal (TSL) est un processus connu et étudié depuis la fin du 19^{ème} siècle : dans un recueil de cours de géologie, Elie de Beaumont (1845) décrit la décroissance du diamètre des galets en baie d'Audierne (Finistère), du nord vers le sud, montrant d'après lui un transport le long de la plage. Au cours du 20^{ème} siècle, de nombreux auteurs vont tenter de traduire mathématiquement les processus sous-jacents du TSL, jusqu'à proposer des équations permettant théoriquement de le prédire. Par exemple, à la moitié du 20^{ème} siècle, Bagnold & Taylor (1946) décrivent la mise en mouvement des sédiments sous l'action d'une houle linéaire. Au début des années 60, à travers une série d'articles, Longuet-Higgins & Stewart (1964) introduisent le concept de « contrainte de radiation », aboutissant *in fine* au calcul de l'intensité du courant longitudinal généré par la houle oblique au rivage et les variations longitudinales du plan d'eau. Dans la foulée, Inman & Bagnold (1963) proposent de calculer le taux de transport du poids de sédiments immergés

selon la logique suivante : les sédiments sont mis en suspension par la houle et le courant longitudinal - dont l'intensité est calculée grâce aux travaux de Longuet-Higgins & Stewart (1964) - produit un déplacement net de ces sédiments. Peu après, ces travaux sur les processus sont synthétisés par Inman & Frautschy (1965) et intégrés dans une vision quantifiée du littoral qui deviendra par la suite un outil apprécié des gestionnaires. L'obliquité de la houle incidente au rivage induit donc un mouvement des masses d'eau parallèle au rivage, nommé courant de dérive littorale ou plus simplement, dérive littorale. Ce courant est essentiellement localisé dans la zone de déferlement des vagues (Figure 1-1). Le transport sédimentaire longitudinal (TSL), ou encore le transit littoral, désigne le transport des sédiments, lorsque ces derniers sont disponibles, par la dérive littorale. Ce transport n'est pas constant : son intensité et sa direction dépendent intrinsèquement des conditions hydrodynamiques.

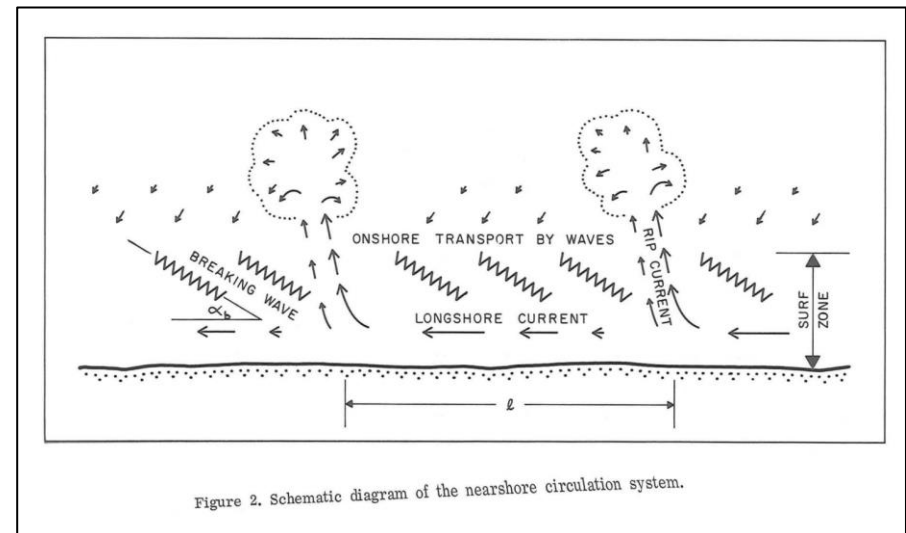


Figure 1-1 - Schéma de la circulation sédimentaire de l'avant-côte (Inman & Frautschy 1965).

Selon Inman & Frautschy (1965) le TSL est borné au sein d'une cellule littorale, celle-ci étant définie comme un segment de littoral qui jamais ne reçoit ou fournit des sédiments aux cellules adjacentes par le TSL. En d'autres termes, les cellules sont délimitées par un TSL nul. De plus, une cellule littorale autorise l'établissement d'un bilan sédimentaire, en vertu de l'application aux sédiments de la zone littorale du principe de conservation de la masse. Pour chaque cellule, il doit être possible d'identifier une zone source de sédiments en amont-dérive (ex. : un fleuve) complétée par une zone puits en aval-dérive (ex. : un canyon sous-marin), entre lesquelles s'intercale le plus souvent une zone de transit, le TSL permettant le transfert des sédiments de la source vers le puits (Figure 1-2). Dans cette logique, un budget sédimentaire négatif (positif) sera associé à un rivage en recul (progression). Comme le résume bien Carter (1988), comprendre le courant longitudinal c'est établir le lien entre la houle, le sédiment et le trait de côte.

Cette première définition des cellules littorales sera ensuite largement reprise et adaptée. Les travaux de Bray et al. (1995) sont en ce sens représentatifs de cette dynamique d'appropriation et d'amélioration en y apportant une contribution majeure. La compilation de données à différentes échelles spatio-temporelles sur le littoral du sud de l'Angleterre les amène à définir de nouvelles limites pour les cellules littorales (Figure 1-3). Elles sont dorénavant absolues ou poreuses, fixes ou mobiles et cette diversité autorise dès lors à segmenter les cellules littorales en sous-cellules pour refléter finement les dynamiques longitudinales.

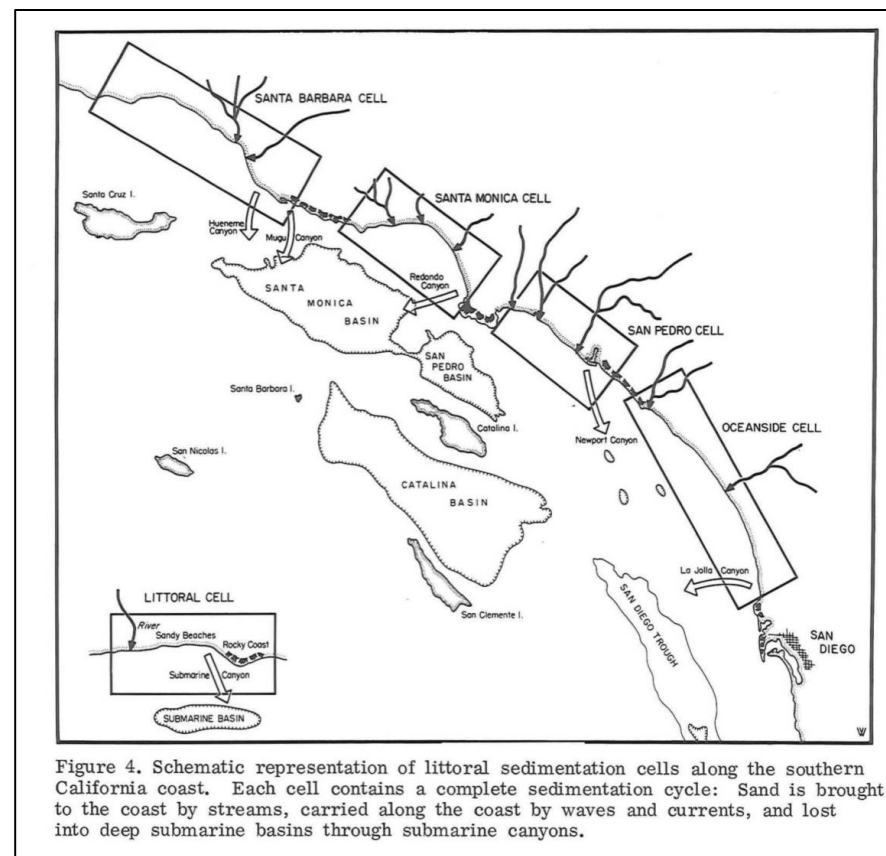


Figure 4. Schematic representation of littoral sedimentation cells along the southern California coast. Each cell contains a complete sedimentation cycle: Sand is brought to the coast by streams, carried along the coast by waves and currents, and lost into deep submarine basins through submarine canyons.

Figure 1-2 - Schéma des cellules littorales le long de la côte californienne (Inman & Frautschy 1965).

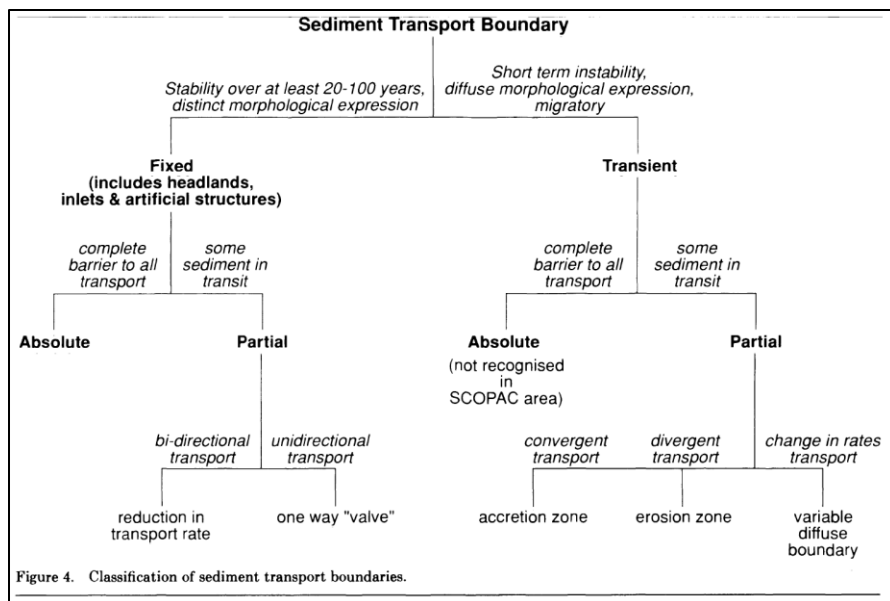


Figure 1-3 - Classification des limites du transport sédimentaire longitudinal (Bray et al. 1995).

Par ailleurs, ces travaux sous-entendent qu'il existe un lien entre le TSL et les variations du trait de côte, les zones en érosion ou en accretion étant considérées respectivement comme des sources et des puits de sédiments. TSL et cellule littorale sont donc deux notions indissociables. Enfin, l'approche de Bray et al. (1995) a permis de mettre en évidence les dégâts causés par une gestion du littoral à l'échelle communale, sans considération des dynamiques sédimentaires qui régissent le TSL à des échelles spatiales plus larges.

Une connaissance fine des déplacements sédimentaires longitudinaux est donc capitale pour les gestionnaires dans la mesure où tout ouvrage perpendiculaire au rivage peut perturber ce transit ; de même que toute action anthropique sur les sources sédimentaires. Sur ces bases, la

détermination des cellules littorales de la région Languedoc-Roussillon a fait l'objet de nombreuses études par le passé, synthétisées ci-après.

Référence longtemps incontournable, le *Catalogue sédimentologique des côtes françaises* (L.C.H.F. 1984) compile des travaux du Laboratoire d'Hydraulique National (LNH) et de la Société grenobloise d'étude et d'application hydraulique (SOGREAH) où la dérive littorale est déduite essentiellement par photo-interprétation. Cette approche permet de mener une analyse diachronique de la position du trait de côte, d'étudier les accumulations sédimentaires contre les ouvrages perpendiculaires au rivage et d'observer les orientations des embouchures afin d'estimer la direction à moyen terme du transit littoral. Analyse granulométrique, étude de la radioactivité naturelle des sédiments, immersion de traceurs radioactifs dans l'avant-côte (méthode aujourd'hui prohibée), analyse diachronique de profils topo-bathymétriques, étude des volumes de sédiments dragués dans les passes portuaires et modèles mathématiques complètent le panel de méthodes mises en œuvre pour estimer les intensités et directions des dérives littorales dans le golfe du Lion. D'apparence très complet, le *Catalogue sédimentologique des côtes françaises* est constitué d'un agrégat d'études isolées.

Il faut attendre 1997 pour qu'une étude réalisée par Masson, Crauchet et Sabatier quantifie l'évolution du trait de côte sur 50 ans, entre 1942 et 1992 (C.E.T.E. Méditerranée & I.P.S.E.A.U. 1997). Des volumes de sédiments érodés ou accumulés ainsi que des directions de TSL sont déduits de l'évolution des surfaces émergées des plages, sans toutefois préciser dans quelles proportions ils alimentent les dérives littorales.

Durand (1999) offre dans sa thèse une vision d'ensemble du fonctionnement de la frange littorale entre le Racou (66) et Sète (34). Cette dernière est segmentée en compartiments hydro-sédimentaires, eux-mêmes subdivisés en cellules hydro-sédimentaires sur la base des

variations de la position du trait de côte entre 1935 et 1997, déterminées par photo-interprétation. Durand (1999) s'inspire notamment des travaux de Bray et al. (1995) évoqués précédemment, sans toutefois respecter la terminologie employée par ces auteurs. A partir d'un travail bibliographique, l'auteur dresse une synthèse des directions et intensités du TSL estimées dans des travaux antérieurs. Durand (1999) propose sa propre estimation de l'intensité de ce transport, par l'analyse diachronique croisée de profils topo-bathymétriques et des traits de côte. Malheureusement, l'auteur estime que les volumes calculés sont assortis d'une marge d'erreur minimale $\pm 40\%$. En outre, la méthode de quantification, inspirée de la thèse de Suanez (1997) n'applique pas rigoureusement les règles préconisées par le SPM (C.E.R.C. 1984). Enfin, ce travail de thèse ne couvre pas la totalité de la région Languedoc-Roussillon, puisque les plages à l'est de Sète sont ignorées.

Les travaux de thèse de Sabatier (2001) ne concernent qu'une portion restreinte du littoral de la région Languedoc-Roussillon, la pointe de Espiguette. Néanmoins, il sera montré par la suite que ce secteur est capital pour notre travail : les directions et intensités du TSL données par l'auteur seront donc étudiées avec attention.

Les données de sismique réflexion très haute résolution de la thèse de Certain (2002) confirment certaines directions du TSL établies dans les précédents travaux. L'auteur observe ainsi un accroissement des volumes du disponible sédimentaire du sud vers le nord dans le Roussillon, et d'est en ouest sur le lido de Sète. Des « réflecteurs internes à pendage vers le nord » sont également identifiés sur certains profils sismiques longitudinaux du Roussillon. Enfin, « la forme asymétrique longitudinale des barres en feston » est mise en évidence par les bathymétries levées dans le Roussillon, avec « une pente plus abrupte au nord », traduisant encore un TSL dirigé vers le nord. Néanmoins, les mesures *in-situ* de ce

travail de thèse sont très localisées et essentiellement limitées au Roussillon ainsi qu'au lido de Sète.

La thèse de Samat (2007) porte notamment sur les érosions en aval-dérive des ouvrages perpendiculaires au rivage : si l'auteur ne fait que réutiliser les valeurs de TSL proposées avant lui, il confirme les directions dominantes connues. En outre, l'emprise spatiale de ce travail ne couvre que quelques sites dans le delta du Rhône et la partie nord du golfe du Lion.

Brunel (2010) présente dans sa thèse de nouvelles limites pour les cellules hydro-sédimentaires par rapport à Durand (1999), toujours sur la base des variations de la position du trait de côte mais cette fois sur un intervalle temporaire plus vaste, entre 1895 et 1989. Si les variations volumétriques de l'avant-côte sont quantifiées, Brunel (2010) n'avance pas d'interprétation en lien avec le TSL.

La Figure 1-4 résume les informations identifiées dans ce corpus bibliographique concernant l'organisation et l'intensité du TSL en Languedoc-Roussillon. Des rapports non publiés ont probablement échappé à notre bibliographie, mais les synthèses exhaustives dressées notamment par Durand (1999) puis dix ans plus tard par Brunel (2010) intègrent ces documents. Entre les études, des différences sont observées, en particulier sur la localisation et la nature des limites des cellules littorales. Par exemple, si Durand (1999) positionne une limite de cellule imperméable au niveau de Sète, Certain (2002) la place plus à l'est à hauteur de Frontignan. Le cap d'Agde forme une limite perméable pour le premier, tandis qu'elle est imperméable pour le second. Les directions des dérives sont également quelques fois contradictoires : il existe entre Vias et Agde une dérive littorale vers l'ouest dans la synthèse de Durand (1999), tandis que celle de Brunel (2010) fait apparaître une dérive inverse orientée vers l'est.

1.3 Estimation de la direction résultante du TSL

En outre, il convient d'apporter une précision importante : les travaux évoqués précédemment reposent sur des méthodes de géomorphologie expérimentale permettant d'estimer uniquement le TSL résultant (TSL_R). Il s'agit de la différence entre le TSL dirigé vers la gauche (TSL_G) et la droite (TSL_D) de la normale au rivage, lorsque l'observateur fait face au rivage (U.S.A.C.E. 2002).

L'ensemble des éléments présentés dans cette introduction témoigne de l'absolue nécessité d'établir les intensités et directions du TSL_R à l'aide d'une méthodologie reproductible pour l'ensemble de la région Languedoc-Roussillon. La modélisation numérique représente une alternative pertinente aux méthodes décrites précédemment, dans la mesure où elle s'appuie sur des données existantes. Mais l'application de cette solution sur un linéaire côtier aussi vaste que celui de la région Languedoc-Roussillon constitue un véritable défi.

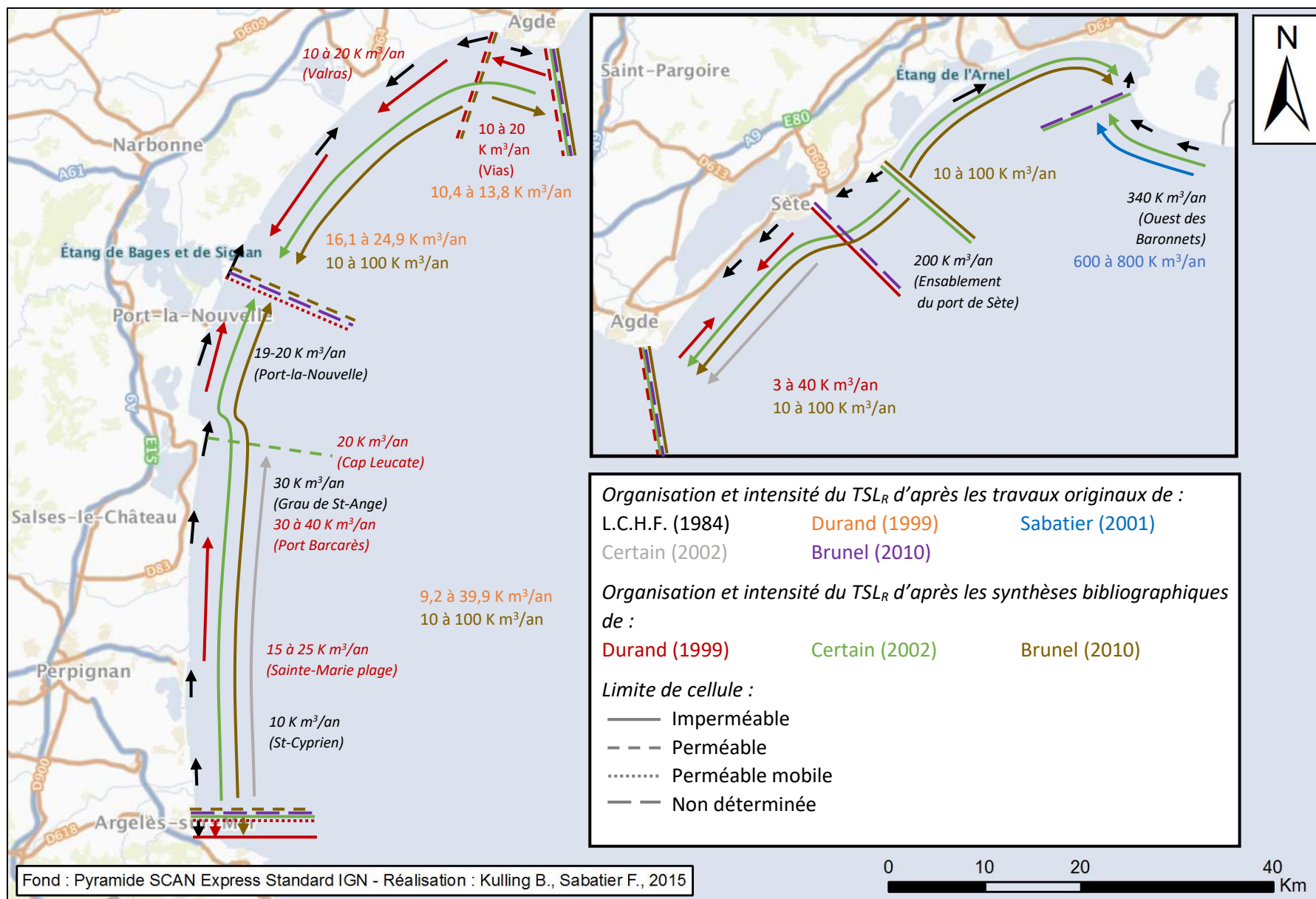


Figure 1-4 - Schéma de synthèse de l'organisation et de l'intensité du transport longitudinal en Languedoc-Roussillon, d'après les travaux originaux et les synthèses bibliographiques de différents auteurs.

2 Méthodologie

2.1 Fonctionnement général d'Unibest-CL+

La suite logicielle Unibest-CL+ est composée de deux modules : Le 1^{er}, Unibest-LT (Longshore Transport), permet de calculer le potentiel de TSL_R annuel, qui peut être utilisé ensuite dans le 2nd, Unibest-CL (CoastLine), pour déterminer la position du rivage par application de la théorie linéaire (Pelnard-Considère 1956).

Seul Unibest-LT est mis en œuvre dans le cadre de cette étude. Le potentiel de TSL_R annuel est calculé à partir de la houle et des courants induits par celle-ci, pour un profil de plage quelconque. Le jeu de données d'une simulation est donc composé d'un ensemble de profils topo-bathymétriques perpendiculaires au rivage, auxquels sont associés des climats de houle. Ces derniers doivent refléter les conditions de houle à l'extrémité en mer des profils.

A partir de chaque profil, une grille numérique 1D est automatiquement générée par Unibest-LT. Lors des simulations, la houle est propagée depuis le large jusqu'au rivage (Figure 2-9) par un modèle probabiliste basé sur les travaux de Battjes & Janssen (1978). Ce dernier prend en compte les principaux processus affectant la houle : réfraction induite par le fond, friction sur le fond, gonflement et déferlement.

La hauteur significative de la houle ainsi que l'intensité et la direction du courant longitudinal moyenné sur la hauteur d'eau sont calculés individuellement pour chaque nœud de la grille du modèle : ces valeurs sont ensuite réutilisées pour appliquer un modèle de transport sédimentaire et d'interaction vague-courant.

En fin de simulation, Unibest-LT donne une valeur de potentiel de TSL_R annuel qui est positive (négative) si le transport est dirigé vers la droite

(gauche) de la normale au rivage (observateur face à la mer). En outre, comme cette étude repose sur l'utilisation de séries de houle pluri-décennales schématisées afin de construire une année moyenne type, nous choisissons en conséquence de désigner les volumes potentiels estimés numériquement par potentiel de TSL_R annuel.

2.2 Préparation des données en entrée du modèle

L'utilisation d'Unibest-LT nécessite au préalable un travail de collecte et de préparation des données en entrée du modèle :

- Profils topo-bathymétriques,
- Conditions de houle à l'extrémité en mer de ces mêmes profils,
- Granulométrie de la zone de déferlement (D10, D50 et D90),
- Azimut du rivage, par rapport au nord géographique.

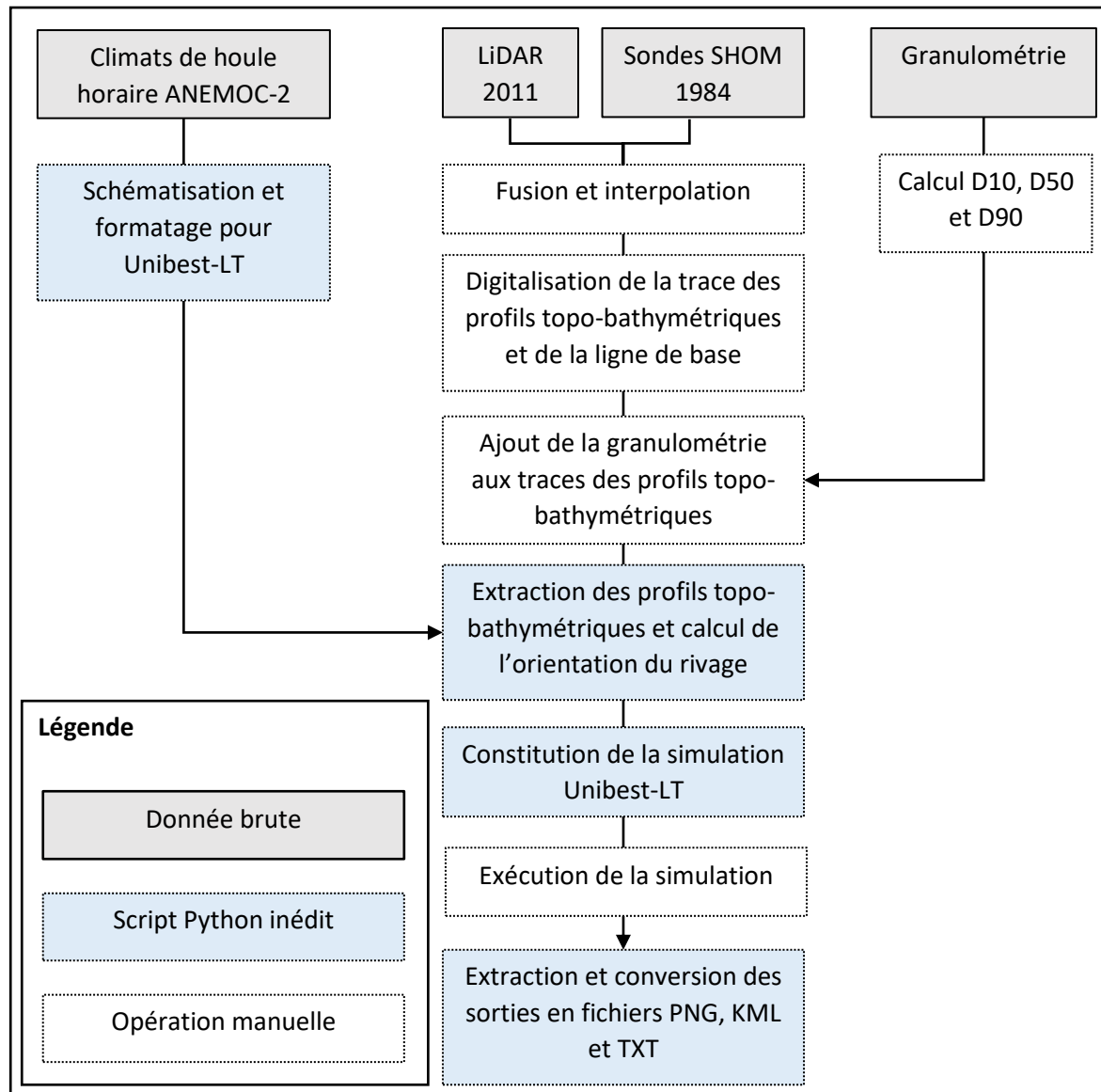


Figure 2-1 - Etapes de la mise en œuvre d'Unibest-LT.

2.2.1 Conception de scripts en langage Python

La suite Unibest-CL+ ne comporte aucun module de lecture et de formatage des données en entrée du modèle, alors que celles-ci doivent respecter un format précis. Par défaut, les profils topo-bathymétriques ainsi que les climats de houle doivent être saisis manuellement dans l'interface d'Unibest-LT. Si l'on considère la masse de données brutes à formater, cette procédure n'est pas envisageable pour l'ensemble du Languedoc-Roussillon. Outre un temps de mise en œuvre colossal, le risque d'erreurs de saisies, qui seraient de plus difficiles à identifier *a posteriori*, est ainsi considérable. De plus, les sorties générées par le modèle sont difficilement exploitables dans leur format original puisqu'il n'est pas possible de réaliser des comparaisons intra-modèle (par profil) ou inter-modèles (par séries de profils). Le conception d'un ensemble d'outils inédits en la forme de scripts en langage Python a donc permis de pallier ces lacunes de la suite Unibest-CL+. Le recours à des scripts est motivé par la volonté d'automatiser autant que possible les étapes pré- et post-modélisation, durant lesquelles de grandes quantités de données sont manipulées. A l'occasion de cette étude, dix scripts Python ont donc été conçus spécifiquement, représentant près de 11500 lignes de code.

- *analyseST* : Analyser des séries temporelles et les comparer à l'aide de graphiques et calculs statistiques.
- *CorreloRoses* : Discrétiser des climats de houle, puis générer leur représentation sous forme de diagrammes.
- *descriptionST* : Calculer des indicateurs statistiques (moyenne, médiane, écart-type, centiles) d'une série temporelle.
- *extractionProfilsUnibestLT* : Générer des profils topo-bathymétriques à utiliser dans Unibest-LT (fichiers .PRO).
- *SCOauto* : Schématiser les climats de houle pour utilisation dans Unibest-LT (fichiers .SCO).

- *LTinputs* : Constituer automatiquement un modèle Unibest-LT, prêt à être exécuté (fichiers .LTR).
- *LTspooler* : Gérer l'exécution de plusieurs simulations Unibest-LT, en parallèle.
- *LToutputs* : Extraire les volumes calculés par Unibest-LT vers des fichiers .KML, .PNG et .TXT.
- *LTqs2fc* : Concevoir un ensemble de classes d'entités pour la cartographie des sorties d'Unibest-LT.

Chaque script comporte une interface graphique ainsi qu'un manuel rédigé en langage *LaTeX*. Le développement des scripts aura nécessité plusieurs mois de travail, un laps de temps non négligeable, justifié par l'apprentissage du langage Python, avec notamment ses règles d'écriture (PEP¹), et une nouvelle méthodologie de travail. Cette dernière est basée sur l'utilisation conjointe d'un Environnement de Développement Intégré (IDE) pour l'écriture des scripts et d'un logiciel de contrôle de version. Par ailleurs, la mise en œuvre de Python en environnement Windows a nécessité plusieurs tentatives afin d'identifier une configuration de travail satisfaisante.

¹ <https://www.python.org/dev/peps/>

2.2.2 Climats de houle

2.2.2.1 Choix du type de donnée

Pour les climats de houles, deux types de données sont actuellement diffusées : (1) les observations du réseau de houlographes CANDHIS² et (2) les séries temporelles ANEMOC³ et ANEMOC-2, issues de modèles.

Les séries CANDHIS ne sont pas utilisées dans cette étude pour les raisons suivantes :

- 1) Couverture trop partielle de la zone d'étude, avec seulement 4 houlographes au large de Banyuls, Leucate, Sète et la pointe de l'Espiguette.
- 2) L'analyse des périodes de fonctionnement des houlographes (Figure 2-2) montre de nombreuses interruptions : bien que les climats de houle en entrée du modèle soient schématisés, utiliser les séries CANDHIS c'est prendre le risque d'ignorer des houles morphogènes. C'est d'autant plus vrai que des dysfonctionnements sont notamment observés en hiver (Figure 2-3), pendant la saison des tempêtes.
- 3) La plage temporelle commune aux 4 houlographes de la zone d'étude est trop courte pour répondre aux besoins de cette étude (Figure 2-2) qui vise à déterminer le potentiel de TSL_R pour un climat de houle annuel moyen, représentatif d'une série pluri-décennales.

Les séries ANEMOC couvrent une période de 30 ans, de 1979 à 2010, et ont l'avantage d'être parfaitement homogènes car issues du modèle TOMAWAC : « Développé par EDF - LNHE avec le soutien du CETMEF, c'est un modèle dit de « troisième génération » qui résout l'équation d'évolution en espace et en temps de la densité spectro-angulaire d'action d'onde »⁴.

De plus, la DREAL Languedoc-Roussillon souhaitait que cette étude valorise les données produites par le Cerema (ex-CETMEF). Les nœuds ANEMOC sont quatre fois plus dense spatialement, mais cela reste toujours insuffisant pour représenter finement les conditions hydrodynamiques de la zone d'étude qui s'étend sur près de 200 km. En conséquence, lors des premières simulations avec ANEMOC, de nombreuses incohérences ont été observées dans les sorties produites par le modèle.

La mise en œuvre initiale d'Unibest-LT avec ce premier jeu de nœuds ANEMOC a été suspendu dès la mise à disposition d'ANEMOC-2 par le CEREMA. Cette phase a cependant nécessité plusieurs mois de travail ce qui a largement décalé l'avancée de ce rapport. ANEMOC-2 offre la possibilité d'utiliser 116 points de sortie TOMAWAC en entrée des simulations Unibest-LT pour des profondeurs variant de 13,1 à 39,5 m, autrement dit dans la zone de déformation de la houle. Cette densité autorise à concevoir des simulations Unibest-LT dont la résolution spatiale est élevée, avec pour conséquence une représentation du TSL_R annuel d'autant plus fine. Par ailleurs, lors de la construction de la base de données ANEMOC-2, plusieurs améliorations sont apportées à la configuration du modèle TOMAWAC (Tiberi-Wadier et al. 2014).

Les scripts Python spécialement développés pour cette étude *analyseST*, *descriptionST* et *CorreloRoses* ont permis une analyse détaillée de ces 3 jeux de données.

Si la donnée CANDHIS est écartée pour la constitution des conditions aux limites, elle est néanmoins exploitée pour évaluer la qualité d'ANEMOC et ANEMOC-2.

² Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ

³ Atlas Numérique d'États de Mer Océaniques et Côtiers

⁴ <http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>

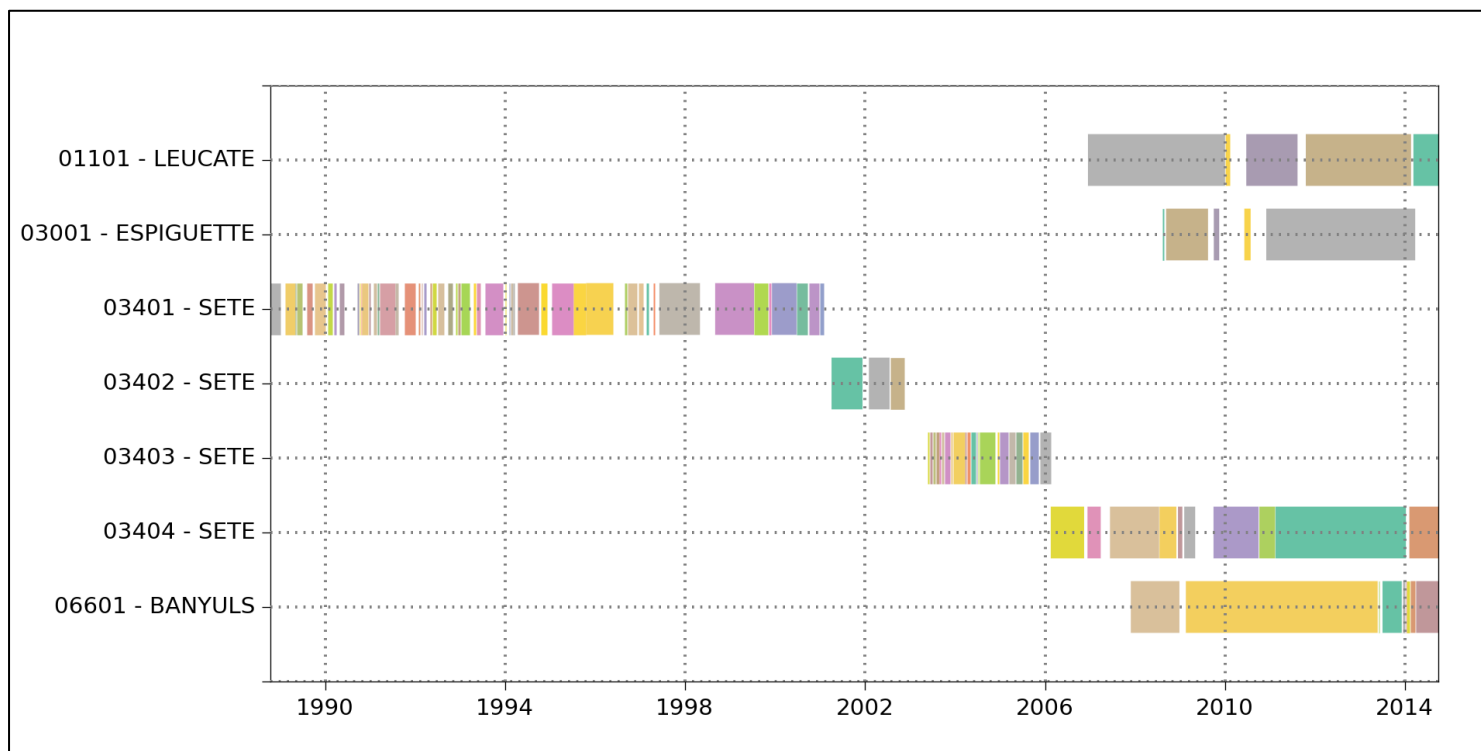


Figure 2-2 - Plages temporelles couvertes par les séries CANDHIS.
Chaque changement de couleur intervient après une interruption d'au moins 72h dans les mesures.

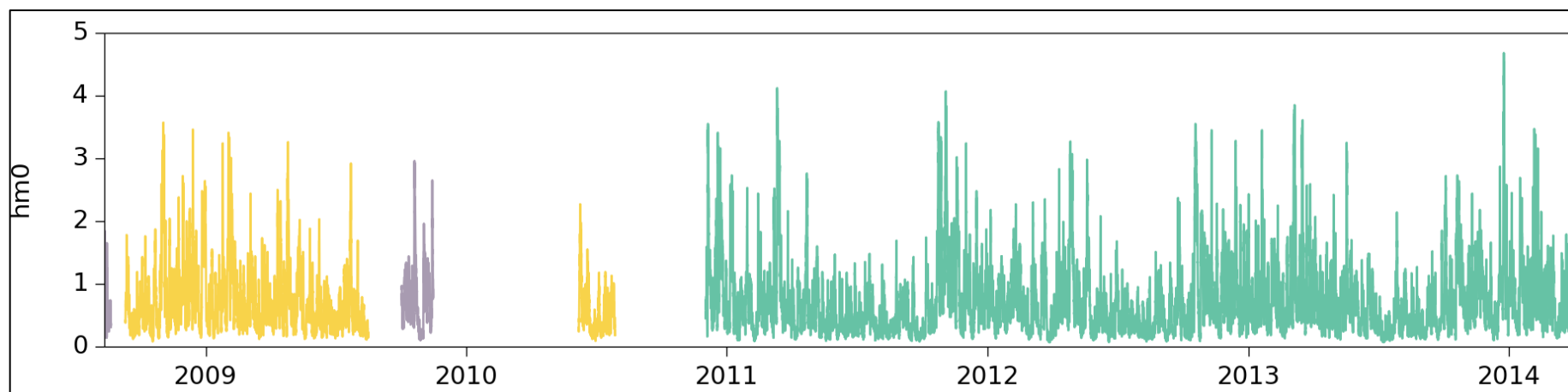


Figure 2-3 – Estimation des hauteurs significatives H_{m0} à partir des mesures du houlographe de l'Espiguette (Identifiant CANDHIS : 03001).
Chaque changement de couleur intervient après une interruption d'au moins 72h dans les mesures.

Pour chaque houlographe CANDHIS, les nœuds ANEMOC et ANEMOC-2 les plus proches spatialement sont retenus. Toutefois, les plages temporelles couvertes par ces différentes séries rendent difficile toute tentative de comparaison (Figure 2-2). Dans l'absolu, l'unique période commune aux trois jeux de données s'étend du 12/08/2008 07:00 au 27/12/2008 02:00. Les séries CANDHIS démarrent au 12 août 2008. ANEMOC s'interrompt au 31 décembre 2008, tandis qu'ANEMOC-2 est prolongé jusqu'au 31 décembre 2010. Une interruption dans les mesures de la bouée CANDHIS - 03001 - ESPIGUETTE à partir du 27 décembre 2008 à 2h00 explique la fin de la période commune à cette date (Figure 2-3).

Les estimations des hauteurs significatives H_{m0} sur ces périodes communes sont comparées par application d'un modèle de régression linéaire simple. Pour la période commune à CANDHIS, ANEMOC et ANEMOC-2, les corrélations sont systématiquement plus fortes entre ANEMOC-2 et CANDHIS qu'entre ANEMOC et CANDHIS (Tableau 2-1). Si l'on considère une période plus longue, du 12/08/2008 au 31/12/2010, où seules les séries CANDHIS et ANEMOC-2 peuvent être comparées, les valeurs des coefficients de détermination attestent d'une similarité forte entre les hauteurs modélisées et mesurées (Tableau 2-1). En revanche, pour les directions moyennes de provenances, ANEMOC-2 diverge des séries CANDHIS.

Par ailleurs, pour la validation d'ANEMOC-2, Tiberi-Wadier et al. (2014) comparent les estimations des hauteurs significatives H_{m0} générées par TOMAWAC aux mesures d'altimétrie spatiale, entre 2003 et 2005, à l'aide de quatre paramètres statistiques : le biais, l'erreur quadratique moyenne, l'indice de dispersion et l'asymétrie de la distribution. Dans l'ouest du golfe du Lion, le biais négatif compris entre -0.1 et -0.2 traduit une légère sous-estimation des hauteurs significatives H_{m0} par rapport aux données d'altimétrie spatiale (Figure 2-4). Il n'en demeure pas moins que les performances générales de TOMAWAC sont très satisfaisantes.

	CANDHIS - ANEMOC	CANDHIS - ANEMOC-2	CANDHIS - ANEMOC-2
	Du 12/08/2008 02:00 au 27/12/2008 07:00		Du 12/08/2008 au 31/12/2010
Espiguette	$R^2 = 0.57$	$R^2 = 0.78$	$R^2 = 0.81$
Sète	$R^2 = 0.60$	$R^2 = 0.83$	$R^2 = 0.81$
Leucate	$R^2 = 0.54$	$R^2 = 0.71$	$R^2 = 0.66$
Banyuls	$R^2 = 0.56$	$R^2 = 0.82$	$R^2 = 0.81$

Tableau 2-1 - Coefficients de détermination des régressions linéaires simples sur les hauteurs significatives des séries CANDHIS, ANEMOC et ANEMOC-2.

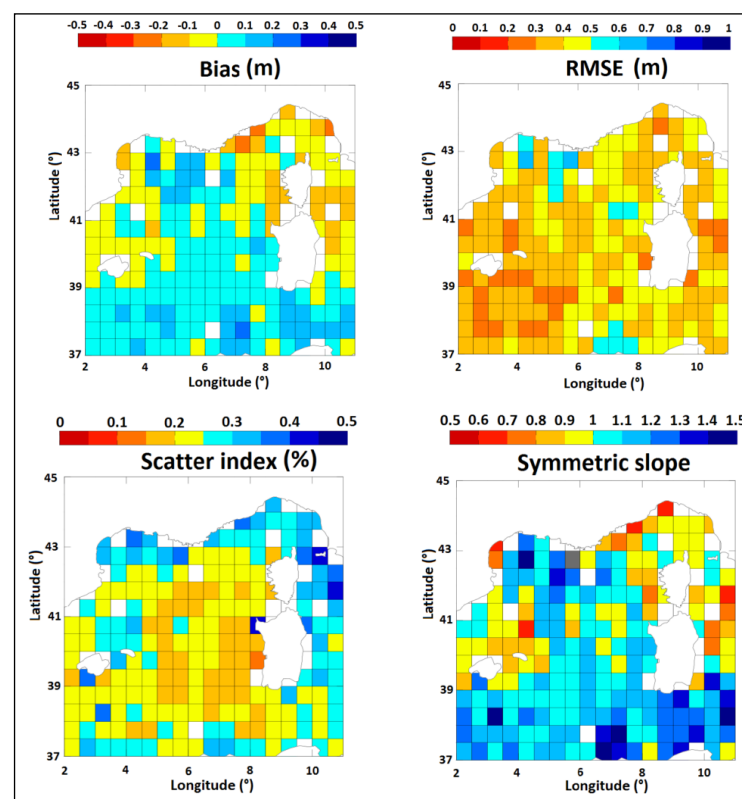


Figure 2-4 - Biais, erreur quadratique moyenne, indice de dispersion et asymétrie entre ANEMOC-2 et les mesures d'altimétrie spatiale, pour la période 2003 - 2005 - Tiberi-Wadier et al. 2014.

2.2.2.2 Schématisation des données

Unibest-LT accepte des climats de houle comprenant au maximum 1100 conditions. Cette contrainte implique un travail colossal de simplification de la donnée puisque chaque série temporelle ANEMOC-2 comprend 280513 conditions. La solution retenue consiste à discrétiser les climats selon des classes de 0,25 m pour les hauteurs significatives de houle et 5° pour les directions de provenance. Pour chaque classe est calculé le nombre d'heure totalisés par les conditions de houle (entre 1979 et 2010), ainsi qu'une valeur moyenne pour la hauteur, la direction et la période. Les climats comportent en moyenne 500 classes (max. : 724 ; min. : 331).

A partir de données de houle de 1979 à 2010 nous établissons donc des climats de houle moyens annuels, comme le réalisent d'autres travaux sur le TSL. De plus, ce niveau de détail est à notre connaissance unique dans la mise en œuvre d'Unibest-LT puisque les autres auteurs schématisent plus grossièrement les climats de houle (Boeyinga et al. 2010; Ruggiero et al. 2010; Dan et al. 2009).

	Hs - Moyenne		Hs - Q10		Hs - Q90		Hs - Ecart-type		Theta - Médiane	
	Original	Discrétisé	Original	Discrétisé	Original	Discrétisé	Original	Discrétisé	Original	Discrétisé
02853	0.45	0.44	0.10	0.12	0.89	0.86	0.41	0.39	127.78	127.00
02865	0.47	0.46	0.11	0.13	0.92	0.86	0.42	0.39	129.29	127.00
02881	0.48	0.47	0.11	0.13	0.95	0.86	0.43	0.40	129.94	127.00
02891	0.50	0.49	0.12	0.14	0.99	0.87	0.45	0.42	135.82	137.00
02924	0.50	0.50	0.12	0.14	0.99	0.87	0.45	0.41	126.89	127.00
02942	0.52	0.51	0.13	0.14	1.02	1.09	0.46	0.43	127.21	127.00
02964	0.53	0.52	0.13	0.14	1.04	1.10	0.47	0.43	121.48	122.00
02981	0.52	0.51	0.13	0.15	1.03	1.09	0.47	0.43	112.73	112.00

Tableau 2-2 - Indicateurs statistiques pour une série de climats ANEMOC-2 originaux et discrétisés en Petite Camargue

La résolution élevée des climats schématisés de cette étude confère un bon réalisme aux conditions aux limites et, surtout, nous épargne un choix difficile quant à la méthodologie à mettre en pratique pour réduire le

nombre de conditions de houle. La comparaison d'indicateurs statistiques calculés pour les climats originaux et discrétisés montre une bonne conservation des caractéristiques initiales dans les climats schématisés (Tableau 2-2). Les nœuds 02853 à 02942 sont notamment impliqués dans la calibration du modèle.

2.2.3 Granulométrie

A chaque profil topo-bathymétrique utilisé en entrée du modèle est associé la granulométrie de la zone de déferlement. Du Racou (66) au Grau-du-Roi (30), la granulométrie est issue des travaux du CEFREM (Aleman 2013) et (Raynal et al. 2015), où un échantillonnage est réalisé selon un intervalle kilométrique, perpendiculairement au rivage. Pour la pointe de l'Espiguette, la granulométrie provient des travaux du CEREGE (Sabatier 2001). L'intervalle longitudinal d'échantillonnage varie de 500 à 2000 m.

Pour chaque profil topo-bathymétrique, l'échantillon le plus proche spatialement est retenu. Si le profil est à équidistance de deux échantillons, une valeur moyenne est calculée. Par exemple sur la Figure 2-5, la granulométrie pour le profil topo-bathymétrique correspondant au nœud ANEMOC-2 01589, les déciles D10, D50 et D90 correspondent aux moyennes établies à partir des 4 échantillons GR-11-45BI, GR-11-45BE, GR-11-46BI et GR-11-46BE. Pour le profil du nœud 01541, seuls les échantillons GR-11-45BI et GR-11-45BE seront retenus.

Le programme GRADISTAT (Blott & Pye 2001) permet le calcul des déciles D10, D50 et D90 à partir des valeurs de refus de tamis du CEFREM. Pour toute la zone d'étude, des valeurs moyennes pour le D10, le D50 et le D90 sont calculées à partir des différentes unités de la zone de déferlement.

Dans la mesure où Unibest-LT calcule le transport sédimentaire dans la zone de déferlement, seuls les prélèvements sur les barres et dans les fosses sont retenus.

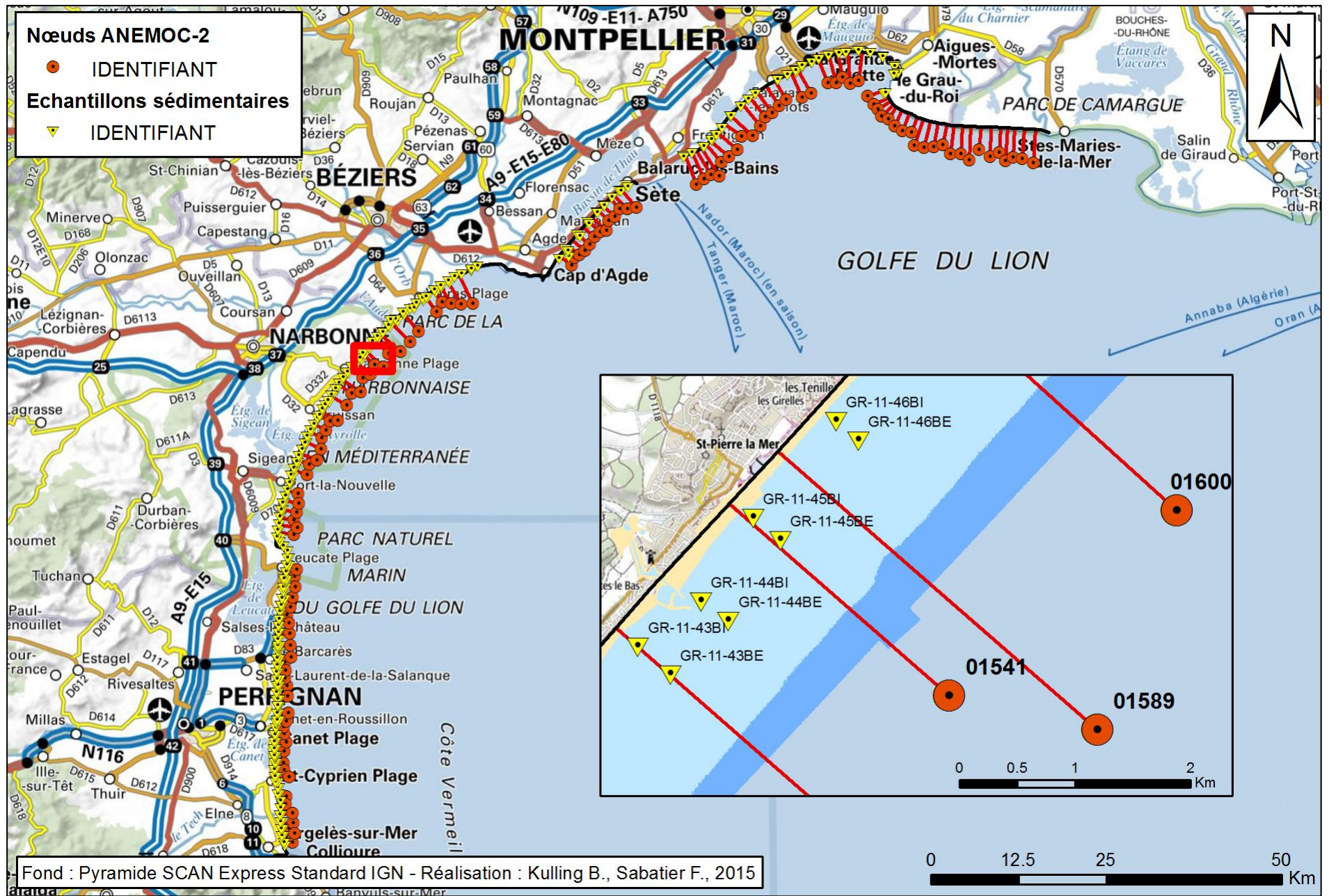


Figure 2-5 - Localisation des échantillons sédimentaires et des profils topo-bathymétriques : exemple du secteur de Saint-Pierre-la-Mer (11).

2.2.4 Profils topo-bathymétriques

Pour chaque profil topo-bathymétrique, l'extrémité au large doit correspondre à la position de mesure de la houle – ensuite propagée jusqu'au rivage par Unibest-LT le long de ce profil (Figure 2-9). La DREAL Languedoc-Roussillon a émis le souhait de voir utilisé dans cette étude les levés topo-bathymétriques LiDAR de 2011. Or, la majorité des nœuds ANEMOC-2 sont situés hors de son emprise (Figure 2-6). Pour résoudre ce problème, le LiDAR de 2011 est combiné avec des sondes du SHOM de 1984 (Figure 2-7). La jointure entre les données LiDAR et les sondes s'effectue généralement entre -10 et -20 m. A partir de ces deux semis de points, une surface raster est ensuite calculée par interpolation selon la méthode *voisins naturels*.

La méthode d'interpolation *voisins naturels* est ici retenue car c'est « la garantie que les hauteurs interpolées se situent dans la plage des échantillons utilisés. Il ne déduit aucune tendance et ne produit pas de sommets, dépressions, crêtes ou vallées autres que ceux déjà représentés par les échantillons en entrée. La surface passe par les échantillons en entrée (...) »⁵.

Dans un SIG, la ligne de rivage est digitalisée, lissée et déplacée jusqu'à la limite terrestre du LiDAR de 2011 : dénommée ci-après « ligne de base », cette entité sert ensuite à calculer l'azimut du rivage. Par ailleurs, chaque nœud ANEMOC-2 retenu pour l'étude est relié à la ligne de base par une droite tracée manuellement, et le plus perpendiculairement à la ligne de base. Elle constitue la trace, l'emprise, qui permet ensuite d'extraire le profil topo-bathymétrique de la bathymétrie composite générée précédemment (Figure 2-8).

Cette extraction est réalisée dans ArcGIS à l'aide du script Python *extractionProfilsUnibestLT*. En sortie de script, chaque profil est composé

de points avec coordonnées X, Y et Z et écrit dans un fichier .CSV. Sur une distance de 500m depuis l'extrémité à terre du profil, l'intervalle entre les points est de 10 m ; il est ensuite de 25 m (Figure 2-9). Soit 50 points dans les 500 m initiaux et 200 points au maximum pour le reste du profil. La longueur maximale de profil possible est de 5500 m (10 m x 50 points + 25 m x 200 points). Aucun nœud ANEMOC-2 n'excède cette distance au rivage sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette double résolution permet de conserver les objets morphologiques significatifs de l'avant-côte (barres) et d'atteindre la position en mer des nœuds ANEMOC-2, tout en demeurant sous la limite des 250 points par profil imposée par Unibest-LT.

2.3 Découpage spatial des simulations

Le script Python *LTinputs* permet de formater et d'assembler les données évoquées dans les paragraphes précédents. Il en résulte un jeu de données constituant une simulation prête à être exécutée *via* l'interface graphique d'Unibest-LT ou en ligne de commande.

Afin de faciliter la mise en œuvre d'Unibest-LT et de réduire les temps de calcul, les 200 km de littoral concernés par cette étude sont divisés en cinq secteurs (Figure 2-10) :

- Roussillon (Le Racou – Cap Leucate) ;
- Narbonnais (Cap Leucate – Cap d'Agde) ;
- Lido de Sète (Cap d'Agde – Sète) ;
- Golfe d'Aigues-Mortes (Sète – Le-Grau-du-Roi) ;
- Petite Camargue (Espiguette – Petit Rhône).

Ce découpage correspond essentiellement aux ruptures induites par les caps rocheux dans la continuité du littoral de la région Languedoc-Roussillon. Inclure les caps serait contraire aux recommandations du

⁵ Aide d'ArcGIS 10.2.2

manuel d'Unibest-CL+, spécifiant que ce modèle est dédié aux plages dont le rivage est uniforme. En outre, cela autorise l'exécution simultanée de plusieurs simulations : une instance d'Unibest-LT consomme au maximum 25% de la ressource processeur globale de la station de travail, quelque que soit la taille du modèle. Ainsi, 4 simulations peuvent être exécutées simultanément pour maximiser l'usage de la ressource processeur.

Enfin, des nœuds ANEMOC-2 ont pu être exclus de nos simulations lorsque le profil topo-bathymétrique est perturbé par des ouvrages longitudinaux ou transversaux ou lorsque la position trop au large des nœuds ne reflètent pas fidèlement les conditions hydrodynamiques locales. C'est pourquoi nos simulations ne couvrent pas le rivage entre Argelès et le Racou, entre Portiragnes et le cap d'Agde et dans le fond du golfe d'Aigues-Mortes.

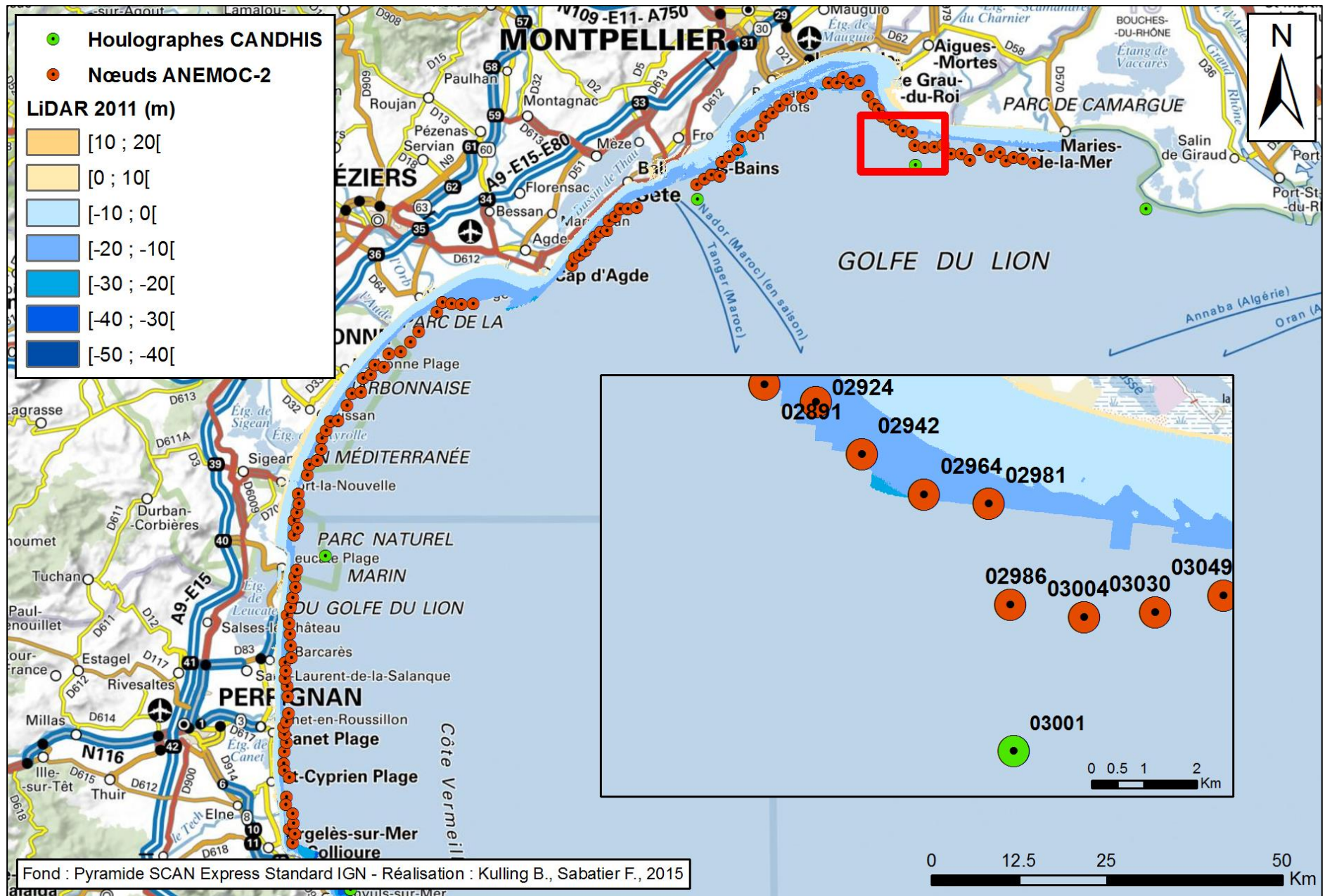


Figure 2-6 - Localisation des nœuds ANEMOC-2 et LiDAR de 2011.

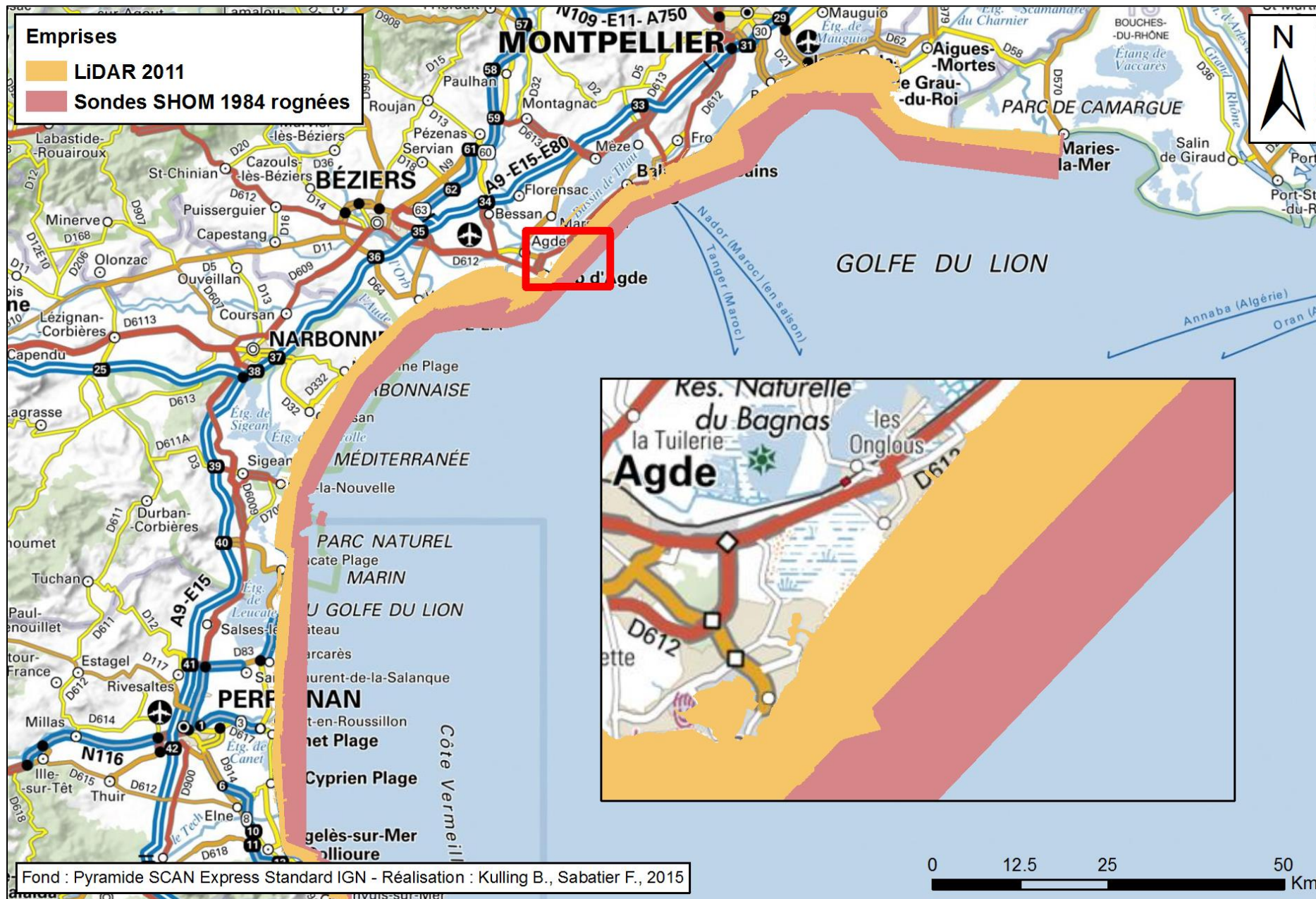


Figure 2-7 - Emprises du LiDAR de 2011 et des sondes SHOM de 1984.

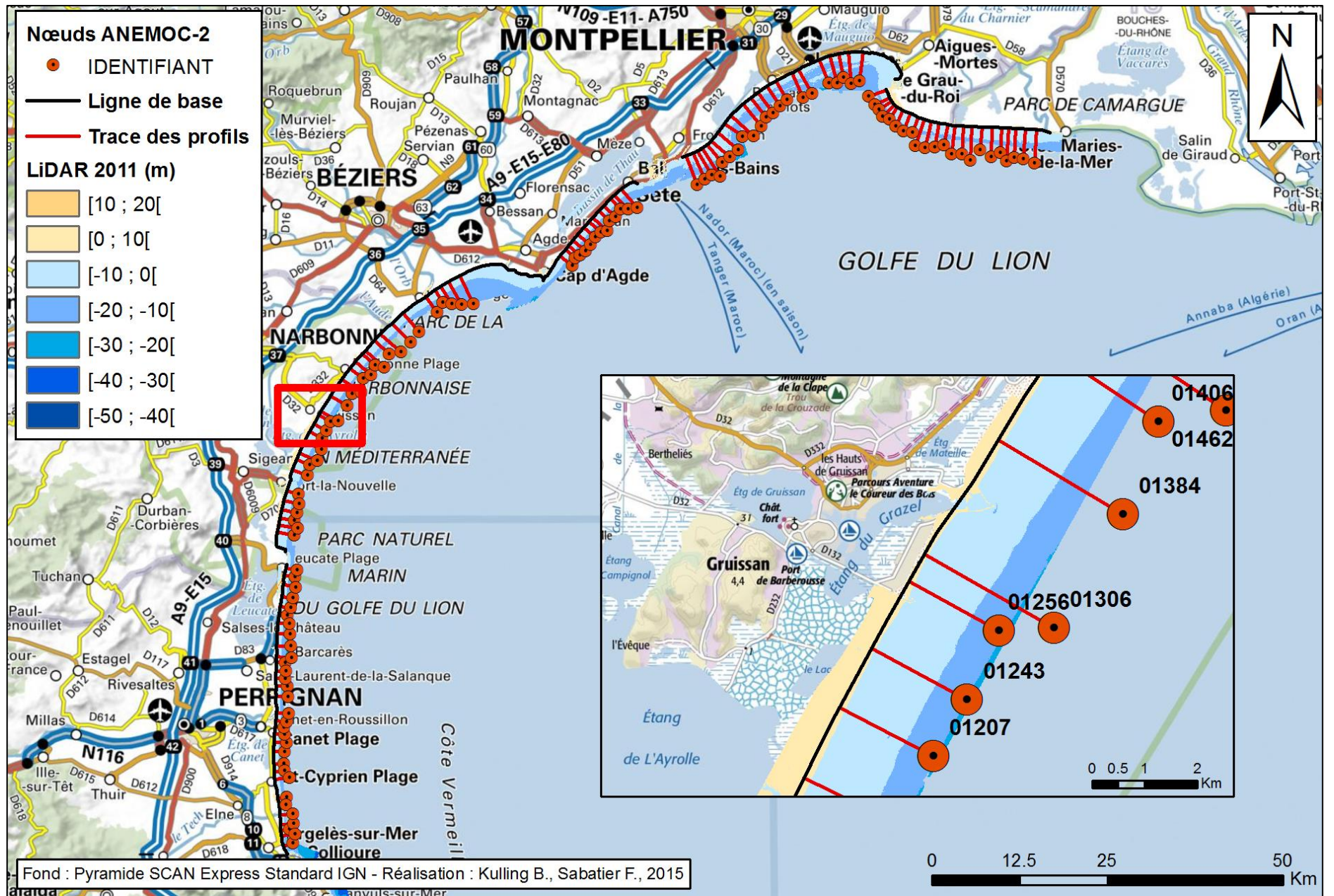


Figure 2-8 - Localisation des nœuds ANEMOC-2 avec les traces des profils topo-bathymétriques et la ligne de base : exemple du secteur de Gruissan (11).

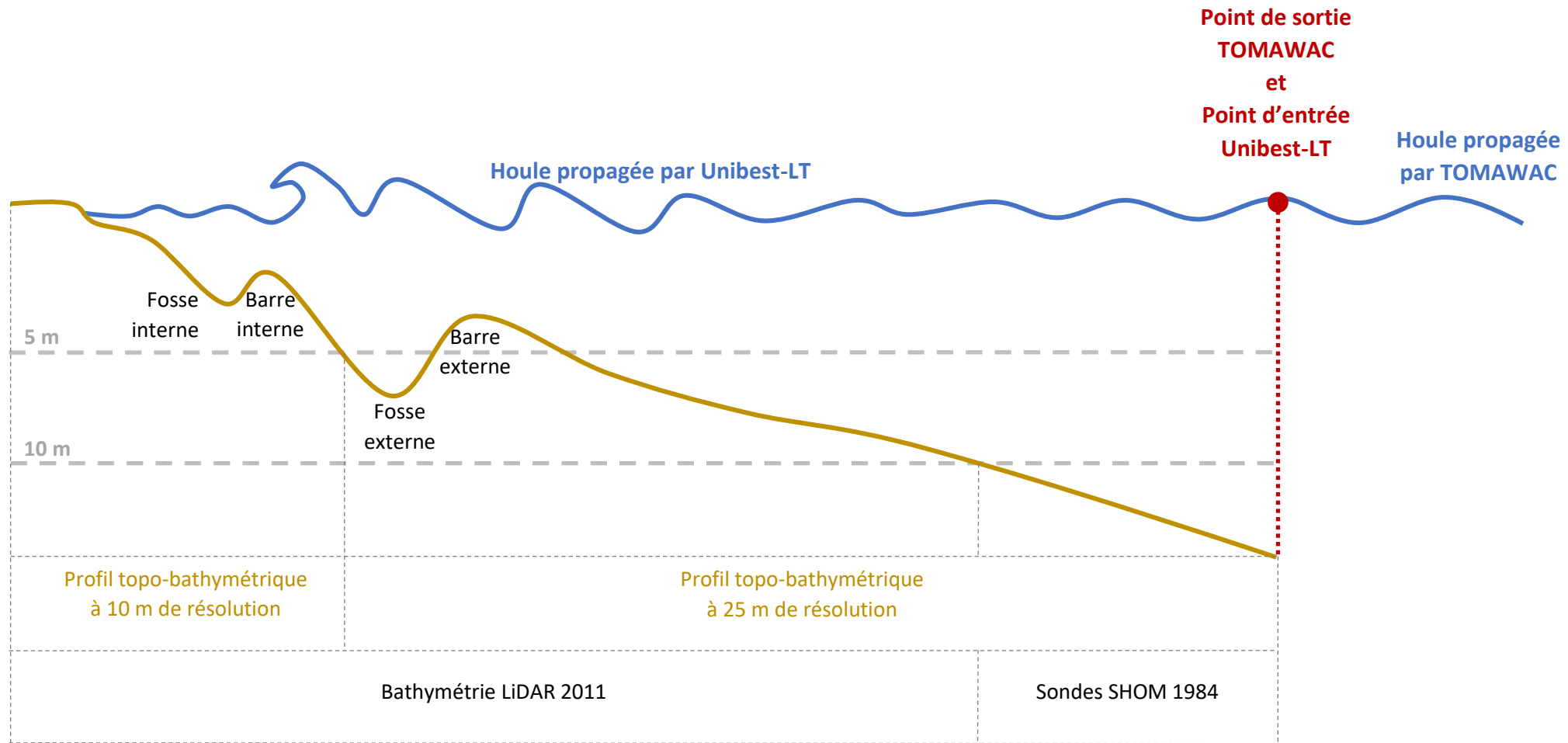


Figure 2-9 - Schéma du fonctionnement d'Unibest-LT détaillant les données en entrée du modèle (climat de houle et profil de plage).

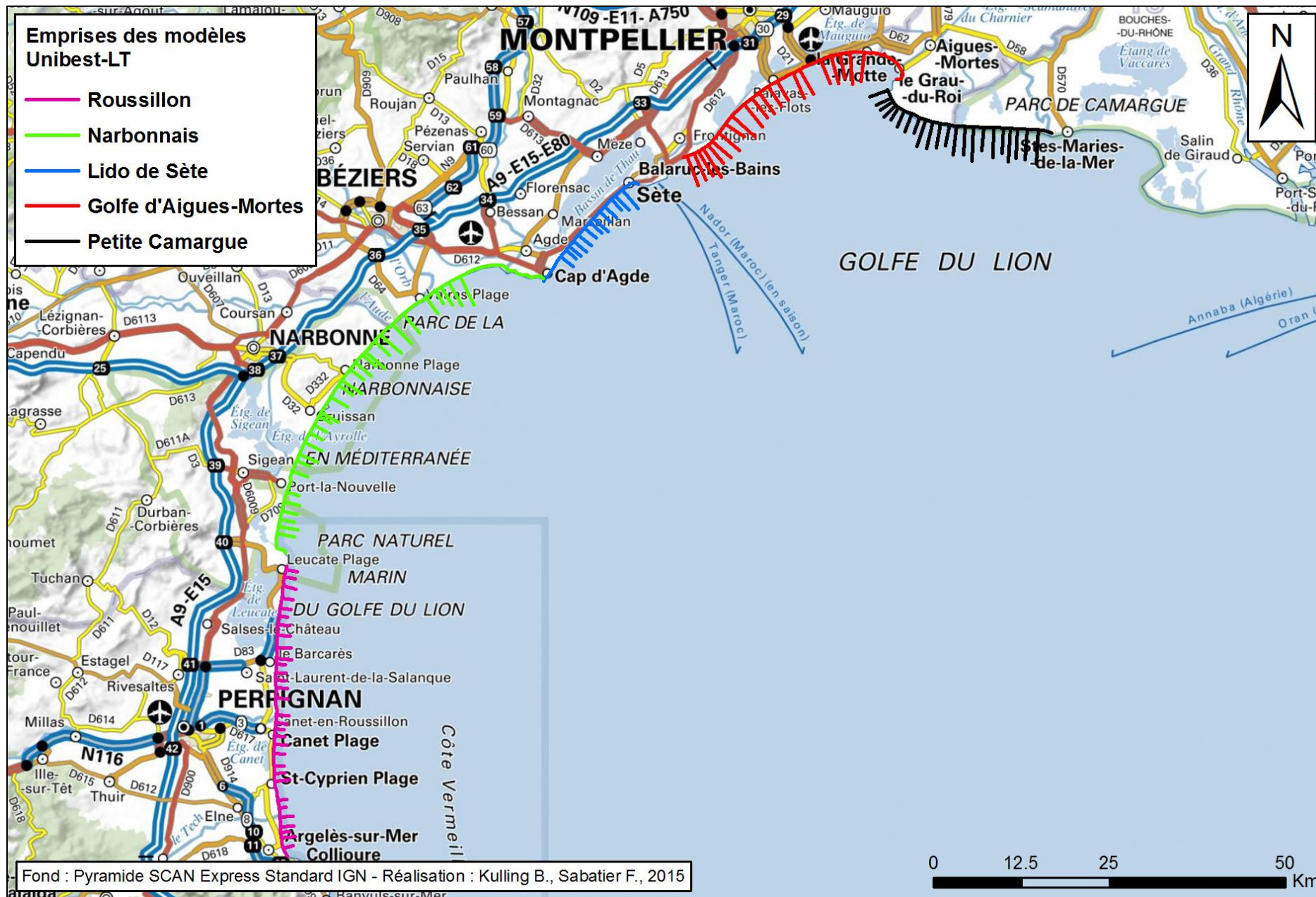


Figure 2-10 - Etendue spatiale des simulations Unibest-LT de l'étude.

2.4 Calibration

Les tests de sensibilité menés par le CEREGE ont permis de caractériser le poids et la robustesse de chaque paramètre du modèle dans les calculs numériques. Les enseignements tirés de cette étape excessivement laborieuse et chronophage ont ensuite permis de caler finement le modèle de façon à ce qu'il reproduise des mesures *in situ*.

2.4.1 Principe de la calibration

Unibest-CL+ est couramment calibré par une confrontation entre les sorties du modèle à des mesures *in situ* : les taux d'évolution du rivage, calculés par application de la théorie linéaire dans Unibest-CL, sont confrontés à ceux estimés empiriquement (Boeyinga et al. 2010; Ruggiero et al. 2010; Dan et al. 2009). Or, Unibest-CL n'étant pas mis en œuvre pour ce rapport, il convient alors de mettre en confrontation les volumes potentiels simulés par Unibest-LT à des données de terrain.

Il a été montré en introduction que la notion de cellule littorale est intimement liée au transport sédimentaire longitudinal. L'organisation du transport au sein d'une cellule répond à un schéma largement admis par la communauté scientifique où la dérive littorale permet le transfert de matériel entre un secteur en érosion et une zone de stockage de ce même matériel (Tanner 1987; Carter et al. 1990; Bray et al. 1995). Par application de la loi de conservation de la masse aux sédiments côtiers, le volume moyen annuel de sédiments en transit en amont-dérive d'une zone de stockage sédimentaire et l'accumulation sédimentaire moyenne annuelle de cette dernière doivent partager le même ordre de grandeur (U.S.A.C.E. 2002). Autrement dit, les sorties d'Unibest-LT en amont-dérive d'une zone d'accumulation doivent théoriquement correspondre aux volumes accumulés.

Par conséquent, l'approche adoptée dans cette étude consiste donc à identifier les zones de stockage sédimentaire puis à calculer leur volume moyen annuel d'accrétion sur la base de bathymétries suffisamment précises. Ensuite, ce volume est confronté :

- 1) D'une part au volume moyen annuel potentiel de sédiments en transit le long du rivage estimé sur un profil unique en amont-dérive de la zone de stockage ;
- 2) Et d'autre part à la différence entre le volume moyen annuel potentiel de sédiments en transit le long du rivage estimé sur un profil unique en amont et en aval-dérive de la zone de stockage.

Dans ce dernier cas, une décroissance du transit doit être constatée entre l'amont et l'aval afin de permettre le dépôt de sédiments et donc l'existence de la zone d'accumulation.

2.4.2 Mesures expérimentales

A notre connaissance, le transport sédimentaire longitudinal en Languedoc-Roussillon n'a fait l'objet que d'une seule et unique mesure *in situ* d'octobre 1980 à mars 1981, à l'aide de traceurs radioactifs immergés dans l'avant-côte du lido de Sète (L.C.H.F. 1984). Toutefois, ces mesures n'ont pas abouti à une estimation de la direction et de l'intensité du transport sédimentaire longitudinal dans ce secteur. Plusieurs travaux du CEFREM ont permis d'observer lors de tempêtes l'intensité et la direction du courant parallèle au rivage (Akouango 1997; Certain 2002; Robin et al. 2010) mais encore une fois le transport sédimentaire n'a pas été mesuré.

Il existe plusieurs jeux de données bathymétriques de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon, étudiés par différents auteurs (Sabatier et al. 2006; Brunel et al. 2012; Brunel et al. 2014). Dans ces travaux, des différentiels bathymétriques permettent d'identifier clairement une seule et unique zone d'accumulation sédimentaire au niveau de la pointe de l'Espiguette. Elle est par ailleurs alimentée par une zone d'érosion en amont-dérive, à

l'est du massif des Baronnets (Sabatier et al. 2006). Ailleurs il existe d'autres zones d'accumulations souvent contre des digues portuaires mais la zone en érosion en aval-dérive est souvent mal identifiée et/ou les ouvrages qui induisent cette accumulation ne sont pas encadré dans le temps par des bathymétries ce qui rend caduque une éventuelle comparaison des volumes accumulés avec nos calculs.

Les différentiels volumiques de la flèche de l'Espiguette sont recalculés entre les sondes du SHOM de 1984 et le LiDAR de 2011 (Figure 2-11), afin de maîtriser les emprises spatiales et la méthode de construction des modèles numériques de terrain (MNT). Cela nous permet notamment d'incorporer le LiDAR de 2011, conformément au souhait de la DREAL Languedoc-Roussillon. La période temporelle couverte par les différentiels (1984 – 2011) est donc proche de celle des climats de houle ANEMOC-2 (1979 – 2010). La limite au large est donnée par l'isobathe 11 m des sondes de 1984, cette profondeur correspond de plus à la profondeur de fermeture connue à moyen terme de la pointe de l'Espiguette (Sabatier et al. 2004). Le trait de côte de 2011 borne les différentiels côté terre. Latéralement, l'estimation du volume accumulé est contraint par l'emprise du modèle Unibest-LT, c'est-à-dire par les profils correspondants aux nœuds ANEMOC-2 02942 (amont-dérive) et 02853 (aval-dérive). Un différentiel supplémentaire est calculé entre le profil 02853 et l'extrémité nord de l'accumulation sédimentaire située en aval-dérive de la digue de l'Espiguette. Les variations bathymétriques inférieures à $\pm 0,50$ m sont ignorées : cette valeur correspond à la marge d'erreur verticale du LiDAR - 0,30 m - additionnée à celle des sondes du SHOM - 0,20 m (Brunel et al. 2012).

L'accumulation sédimentaire annuelle nette entre 1984 et 2011 (Figure 2-11) est de 730 K m³/an (± 260 K m³/an) dont :

- 570 K m³/an (± 210 K m³/an) entre les profils 02942 et 02853 ;
- 160 K m³/an (± 50 K m³/an) au-delà de la digue de l'Espiguette.

2.4.3 Comparaison mesures - calculs

Pour que la calibration soit validée, Unibest-LT doit satisfaire les trois exigences suivantes :

- 1) Le potentiel de TSL_R annuel en amont-dérive de la zone de stockage (profil 02942) doit être approximativement de 730 K m³/an : nous obtenons 673 K m³/an ;
- 2) La différence entre le potentiel de TSL_R annuel en amont (profil 02942) et en aval (profil 02853) dérive de la zone de stockage doit indiquer un dépôt sédimentaire d'environ 567 K m³/an : nous obtenons 511 K m³/an ;
- 3) Le potentiel de TSL_R annuel en aval-dérive de la zone de stockage doit atteindre près de 160 K m³/an : nous obtenons 162 K m³/an.

La calibration menée par le CEREGE a donc permis d'identifier une configuration d'Unibest-LT permettant de reproduire les volumes cibles définis précédemment avec des écarts inférieurs ou égaux à 10 % :

- Modèle de transport : Bijker (Bijker 1967; Bijker 1971) ;
- Modèle d'interaction vague-courant : Davies et al. (Davies et al. 1988);
- Coefficient de friction sur le fond : 0.01 ;
- Coefficient de rugosité du fond : 0.01.
- Discrétisation des climats de houle : 5° pour les directions et 25 cm pour les hauteurs.

En outre, notre choix est conforté par les conclusions de Ruggiero et al. (2010) où Bijker (1967, 1971) est préféré à d'autres modèles de transport. Dan et al. (2009) ont également recours au modèle de transport Bijker (1967, 1971).

Le calage d'Unibest-LT sur les mesures *in-situ* à l'Espiguette repose sur des paramètres induisant un potentiel de TSL_R annuel plus élevé que celui

obtenu avec la configuration par défaut du modèle. Ce résultat s'explique tout d'abord par des coefficients réalistes de friction sur le fond et de rugosité du fond qui doublent les potentiels de TSL_R . Ensuite, parmi tous les modèles de transport proposés par Unibest-LT, Bijker (1967, 1971) produit en général les potentiels les plus élevés, mais au contraire des autres modèles, les résultats sont stables longitudinalement et il reproduit correctement la décroissance du transport le long de la flèche. Enfin, le modèle d'interaction vague-courant de Davies et al. (1988) agit comme un levier supplémentaire orienté à la hausse, en plus d'accroître le réalisme de la simulation par la prise en compte d'un processus physique important.

Avec ce jeu de paramètres, les intensités du transport sédimentaire longitudinal à la pointe de l'Espiguette sont alors correctement reproduites, de même que la décroissance du transport sédimentaire longitudinal permettant la sédimentation de la flèche de l'Espiguette.

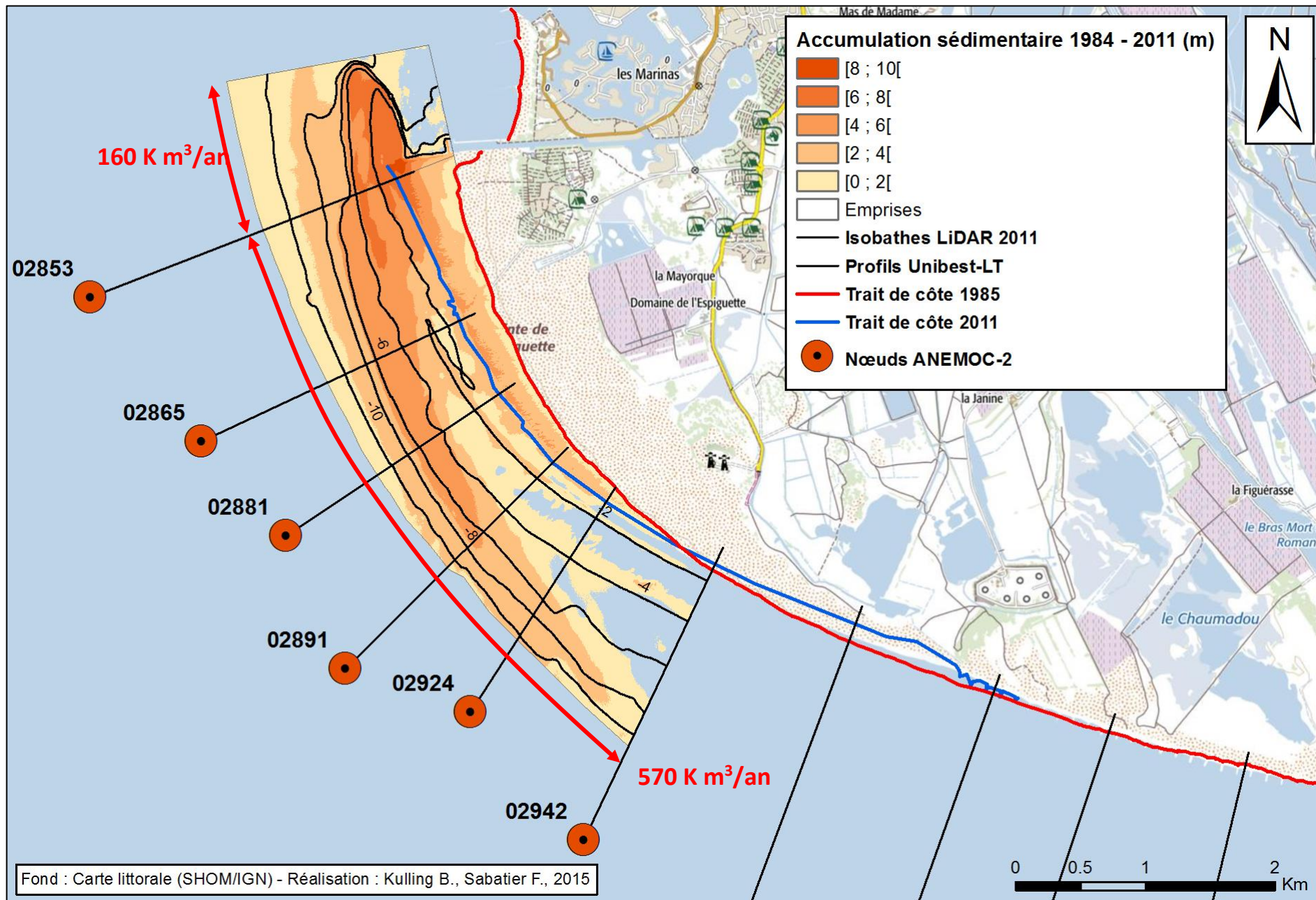


Figure 2-11 - Accumulation sédimentaire à la pointe de l'Espiguette déterminée à partir du différentiel bathymétrique entre le LiDAR de 2011 et les sondes de 1984.

2.5 Mises en garde

La calibration d'Unibest-LT pour cette étude doit être considérée avec soins. Elle repose sur la capacité du modèle à reproduire l'accumulation sédimentaire de l'unique zone d'accrétion clairement identifiable par différentiel bathymétrique dans le Languedoc-Roussillon, la pointe de l'Espiguette. Ceci nous contraint à conserver les mêmes paramètres de calibration pour l'ensemble de la zone d'étude. Or, les dynamiques littorales sur la marge occidentale du delta du Rhône sont différentes de celles du Roussillon. Dans ce sens, il a été démontré que l'évolution du rivage et de l'avant-côte est relativement synchrone et linéaire en Petite Camargue mais qu'il est en revanche soumis à des dynamiques plus chaotiques dans le reste du Languedoc-Roussillon (Brunel et al. 2014). De plus, des différences morphologiques importantes dans la zone de déferlement (barres rectilignes ou en croissant) ont été clairement démontré à l'aide de données topo-bathymétriques LiDAR (Aleman 2013).

L'ensemble des tests de sensibilité menés par le CEREGE ont permis de caractériser la forte sensibilité d'Unibest-LT aux paramètres numériques ainsi qu'aux données en entrée du modèle. Nous avons pu constater que la configuration topo-bathymétrique et la granulométrie ont des effets significatifs, mais préférentiellement avec les autres modèles de transport non utilisés. De plus, ces effets sont variables en fonction du secteur géographique considéré. La configuration que nous avons retenue pour son aptitude à reproduire les mesures de terrain à l'Espiguette s'est montrée très peu sensible aux tests sur la bathymétrie en Petite Camargue : les potentiels de TSL_R calculés avec un jeu de profils topo-bathymétriques alternatif ont montré des écarts maximums de $\pm 1\%$. L'impact des climats utilisés en entrée de modèle est particulièrement important. L'influence de l'orientation du rivage, jamais caractérisée auparavant à notre connaissance, s'avère également significative. L'ensemble des tests de

sensibilité nous amène à conclure sur un point qui ne fait aucun doute : l'organisation et l'intensité du potentiel de TSL_R annuel cartographié dans ce rapport reflète profondément les conditions de houles des climats ANEMOC-2 et la configuration morphologique du rivage à l'échelle du golfe du Lion. Néanmoins à ce jour, il nous semble difficile de posséder des données et une méthodologie significativement plus performante. L'utilisation de données de houle et d'une ligne de base différentes mènerait sans aucun doute à un potentiel de transport distinct. Bien que nos résultats correspondent souvent à la connaissance empirique des dérives littorales, en particulier pour les directions, nous devons rester prudent sur les interprétations des volumes potentiels calculés.

3 Organisation et intensité du TSL

3.1 Rappels

Le TSL résultant (TSL_R) est la différence entre le TSL dirigé vers la gauche (TSL_G , valeurs négatives par convention) et la droite (TSL_D , valeurs positives par convention) de la normale au rivage, lorsque l'observateur fait face au rivage (U.S.A.C.E. 2002).

En outre, comme cette étude repose sur l'utilisation de séries de houle pluri-décennales schématisées afin de construire une année moyenne type, nous choisissons en conséquence de désigner les volumes potentiels estimés numériquement par potentiel de TSL_R annuel.

Enfin, les identifiants des profils ainsi que les potentiels de TSL_R évoqués dans la description ci-après de l'organisation et de l'intensité du TSL en Languedoc-Roussillon figurent dans *l'Atlas du potentiel de transport sédimentaire longitudinal annuel de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon* (Kulling & Sabatier 2015).

3.2 Roussillon

Entre le port d'Argelès et le cap Leucate, le potentiel de TSL_R annuel est dirigé vers le nord. En aval-dérive du port d'Argelès, le potentiel de TSL_R annuel s'élève à $400 \text{ K m}^3/\text{an}$ (profil 01056) mais décroît jusqu'à s'annuler au sud de l'embouchure du Tech (01036). Il augmente ensuite pour atteindre à nouveau $400 \text{ K m}^3/\text{an}$ à Saint-Cyprien Plage (01010). Au-delà, le potentiel de TSL_R annuel est moindre, autour de $200 \text{ K m}^3/\text{an}$ et faiblit jusqu'à $50 \text{ K m}^3/\text{an}$ environ, au niveau de la digue sud du port du Canet (00980). Au nord de ce dernier, une première inversion est constatée (00991), avec un potentiel de TSL_R annuel approchant les $150 \text{ K m}^3/\text{an}$. A l'embouchure de la Têt, il franchit à nouveau les $200 \text{ K m}^3/\text{an}$ (01008) puis chute jusqu'à être quasiment nul à hauteur de l'exutoire du Bourdigoul 5

km plus au nord (00984). On remarque ici une seconde inversion du transport. Sur une distance d'à peine 3,5 km, entre Toreilles Plage et la rive nord de l'embouchure de l'Agly, l'intensité du potentiel de TSL_R annuel se renforce jusqu'à dépasser les $550 \text{ K m}^3/\text{an}$ (00988). Elle s'écroule au niveau de l'ancien phare de Barcarès (01034), avec un potentiel de TSL_R annuel inférieur à $200 \text{ K m}^3/\text{an}$. *A contrario*, au nord du port de Barcarès, le potentiel de TSL_R annuel atteint un maximum proche de $600 \text{ K m}^3/\text{an}$ (01017). 1,5 km après, il est ramené à environ $250 \text{ K m}^3/\text{an}$ (01011) et se renforce progressivement à plus de $300 \text{ K m}^3/\text{an}$ à hauteur du parc aquatique (01005). Par la suite, il est inférieur à $100 \text{ K m}^3/\text{an}$ jusqu'à la plage de Leucate (01058). Nos résultats montrent également qu'au nord de Port-Leucate (01038) les transits de direction contraires (c'est-à-dire les potentiels de TSL_D et TSL_G) sont pratiquement proportionnels (Figure 3-1) : le TSL est sans doute bidirectionnel ici.

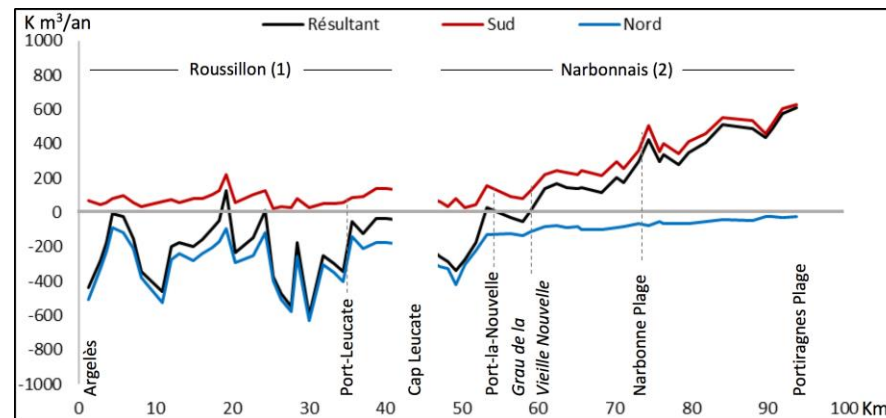


Figure 3-1 - Potentiel de TSL_D (sud), TSL_G (nord) et TSL_R , d'Argelès (66) à Portiragnes Plage (34).

3.3 Narbonnais

L'intensité du potentiel de TSL_R annuel est 2 fois plus élevée au nord du cap Leucate (01068) qu'au sud (01058), avec respectivement plus de 200 $K m^3/an$ contre moins de 100 $K m^3/an$. Entre le cap Leucate et Port-la-Nouvelle, le potentiel de TSL_R annuel est dirigé vers le nord et atteint 300 $K m^3/an$ en moyenne, avec un pic à 350 $K m^3/an$ à 5 km au sud de Port-la-Nouvelle (01065). Il s'effondre ensuite à hauteur de celle-ci (01080). Cette direction du TSL_R s'explique par un potentiel de TSL dirigé vers le nord (potentiel de TSL_G) en moyenne 5 fois supérieur à celui de sens opposé (potentiel de TSL_D) (Figure 3-1). Au-delà de Port-la-Nouvelle, le potentiel de TSL_R annuel reste faible, inférieur à 50 $K m^3/an$ jusqu'au sud du grau de la Vieille Nouvelle (01192).

Le potentiel de TSL_R annuel entre Portiragnes Plage (01862) et le grau de la Vieille Nouvelle (01192) est dirigé vers le sud. Nos résultats montrent une diminution régulière de celui-ci, passant de presque 600 $K m^3/an$ au niveau de Portiragnes (01862), à 150 $K m^3/an$ environ au nord du grau de la Vieille Nouvelle (01212). Entre Portiragnes (01862) et Vendres (01703), les volumes potentiels sont compris entre 600 et 400 $K m^3/an$. A partir du grau de Vendres (01665), ils diminuent progressivement jusqu'à être inférieurs à 200 $K m^3/an$ environ au nord de Gruissan (01384). Enfin, entre Gruissan (01384) et le grau de Vieille Nouvelle (01212), le potentiel de TSL_R annuel oscille autour de 150 $K m^3/an$. Dans le détail, le transport vers le sud (potentiel de TSL_D) est 2 à 30 fois supérieur à celui dirigée vers le nord (potentiel de TSL_G).

La zone de convergence, entre Port-la-Nouvelle (01080) et le grau de la Vieille Nouvelle (01192), est marquée par un équilibre entre les dérives de direction opposées (potentiels de TSL_G et TSL_D) (Figure 3-1) : le TSL est sans doute bidirectionnel ici aussi.

3.4 Lido de Sète

Le lido de Sète est caractérisé par un potentiel de transport sédimentaire longitudinal net annuel relativement uniforme en intensité et dirigé vers le sud. Il est plus élevé entre le sud de la plage de la corniche (02293) et le parking des trois digues (02261), à plus de 200 $K m^3/an$. En moins de 2 km, il décroît jusqu'à être quasiment nul (02232), puis les volumes potentiels augmentent progressivement jusqu'à l'extrémité sud-ouest du lido (02127), sans dépasser toutefois les 200 $K m^3/an$. Cependant, le sens du potentiel de TSL_R annuel s'explique par une légère prédominance du TSL dirigé vers le sud (potentiel de TSL_D) qui est en moyenne 2 fois supérieur à celui orienté vers le nord (potentiel de TSL_G) (Figure 3-2). Par conséquent, le lido de Sète doit connaître un TSL bidirectionnel (surtout dans sa partie centrale), probablement en relation avec l'orientation générale du rivage et l'angle d'incidence des houles qui sont ici quasiment perpendiculaires au rivage.

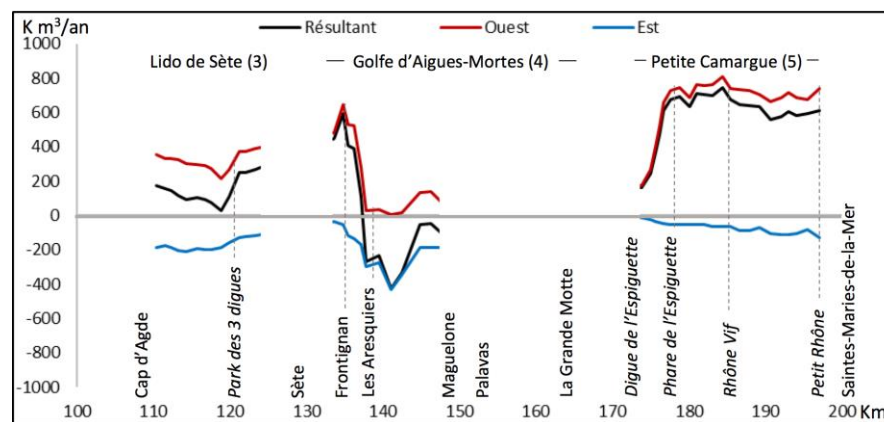


Figure 3-2 - Potentiel de TSL_D (ouest), TSL_G (est) et TSL_R , du cap d'Agde (34) au Petit Rhône (30).

3.5 Sète - Maguelone

Une divergence dans les directions des transits potentiels est observée aux Aresquiers. L'un est dirigé vers Sète (ouest), avec des intensités comprises entre 150 et 600 K m³/an, tandis que l'autre est orienté vers l'est (Maguelone). Cette dernière oscille en intensité entre 250 et 400 K m³/an, de l'est de Frontignan (02485) jusqu'au lieu-dit « Mas d'Angoulême » (02560). Le potentiel de TSL_R est ensuite inférieur à 150 K m³/an jusqu'à Maguelone (02605). De part et d'autre de Palavas-les-Flots (02623, 02642, 02687), le sens du potentiel de TSL_R annuel est inversé par rapport aux connaissances empiriques. Ces résultats s'expliquent par le caractère abrité aux houles (réfraction) du fond du golfe que ne reproduisent pas les sorties ANEMOC-2 situées trop au large. Par conséquent, nous pensons que nos calculs sont ici biaisés et ne doivent pas être utilisés : à l'ouest de Maguelone, ils seront donc ignorés. A l'est des Aresquiers, l'organisation du TSL_R est principalement causée par le potentiel de TSL_G dirigé vers le fond du golfe d'Aigues-Mortes, en étant 2 à 30 fois supérieur au potentiel de TSL_D (Figure 3-2). Alors qu'à l'inverse, à l'ouest de cette limite le transit dirigé vers Sète domine, jusqu'à 14 fois supérieur à celui orienté dans le sens contraire.

3.6 Petite Camargue

Le potentiel de TSL_R annuel s'accroît progressivement entre l'embouchure du Petit Rhône et l'est du massif des Baronnets, passant de 600 K m³/an (03225) à un peu plus de 700 K m³/an (03049). Bien que l'on note une légère baisse à la perpendiculaire du bois des Baronnets (02981), il est ensuite relativement constant jusqu'au phare de l'Espiguette (02942) autour de 700 K m³/an. Enfin, les volumes potentiels déclinent jusqu'à 160 K m³/an environ au niveau de la digue de l'Espiguette (02853). La direction du TSL_R s'explique par la proportion largement plus élevée du transport

dirigé vers l'ouest (potentiel de TSL_D) car ce dernier est en moyenne 12 fois supérieur à celui dirigé vers l'est (potentiel de TSL_G) (Figure 3-2).

3.7 Remarques

Si globalement nos résultats conduisent à des potentiels de TSL_R unidirectionnels, dans certains cas (lido de Sète, au nord de Port-Leucate) ils révèlent des potentiels de transport longitudinal vers la droite et la gauche d'intensité relativement proche. En conséquence, un potentiel de TSL_R a priori faible et unidirectionnel peut en réalité masquer des mouvements sédimentaires importants le long du rivage. En outre, à partir de nos estimations du transport longitudinal à l'échelle régionale, nous pouvons réaliser une première caractérisation des limites des cellules de dérive littorale. Ainsi, la digue de l'Espiguette constitue une limite bien localisée et fixe, mais poreuse, puisque nos résultats montrent un transport non nul au-delà de celle-ci. Tandis que dans le Narbonnais, la limite entre les dérives nord et sud est plus floue, située entre Port-la-Nouvelle et le grau de la Vieille Nouvelle. Le transport bidirectionnel au nord de Port-Leucate suggère une perturbation du transport entre le Roussillon et le Narbonnais lorsque celui-ci est dirigé vers le sud. Néanmoins, l'analyse prochaine des variations interannuelles des potentiels de TSL_R amènera à mieux caractériser la nature mobile ou fixe, poreuse ou perméable de ces limites.

4 Cartographie des cellules potentielles de dérive littorale

La schématisation des cellules potentielles de dérive littorale proposée dans la Figure 4-1 se base sur la cartographie au 1/50000^{ème} ainsi que sur la description des résultats.

Toutefois, la nature des limites des cellules n'est pas représentée ici car Unibest-LT ne permet pas de modéliser le transport sédimentaire le long des caps rocheux. En outre, un prochain rapport analysera la variabilité interannuelle des directions et des intensités du potentiel de TSL_R en Languedoc-Roussillon et permettra de caractériser les limites des cellules potentielles de dérive littorale.

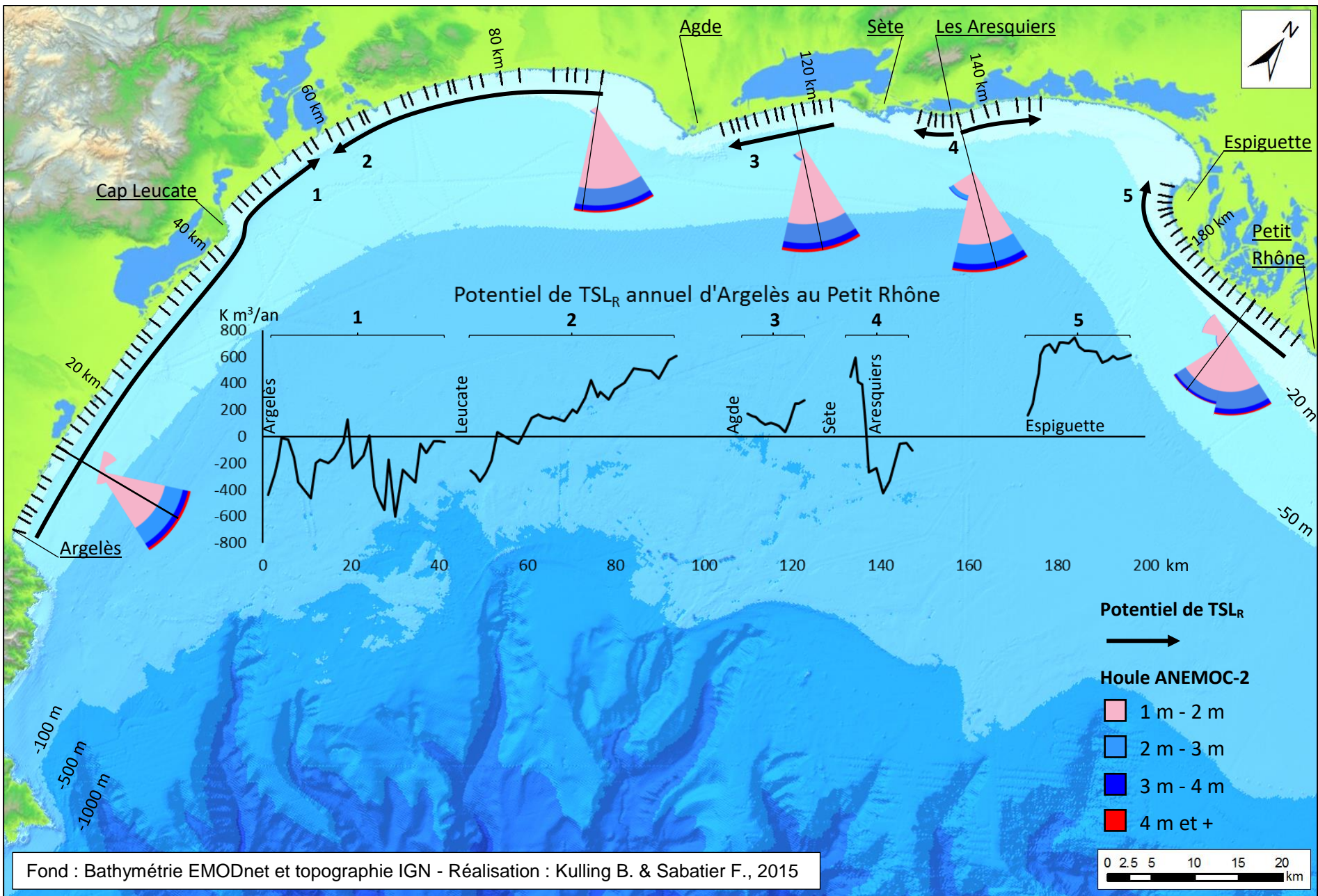


Figure 4-1 - Schéma des cellules potentielles de dérive littorale en Languedoc-Roussillon et Camargue occidentale.

5 Conclusion

La mise en œuvre d'Unibest-LT à l'échelle des 250 km de littoral de la région Languedoc-Roussillon fut un véritable challenge à plus d'un titre.

Les données en entrée du modèle, exceptionnellement détaillées (LiDAR, climats de houle issus de modèles), ont nécessité l'adoption de nouvelles méthodes de travail (scripts Python, IDE, contrôle de version...). L'intégration de ces données dans Unibest-LT a soulevé plusieurs problèmes, d'autant plus que le comportement du modèle avec ces données n'a pu être clairement évalué qu'après l'exécution de nombreux tests de sensibilité.

La cartographie finale au 1/50000^{ème} du potentiel de transport longitudinal net annuel est globalement satisfaisante. Les directions du transport modélisé concordent bien avec celles définies empiriquement. Les intensités sont fidèlement reproduites en Petite Camargue, l'accumulation sédimentaire à la pointe de l'Espiguette entre 1984 et 2011 ayant servi de référence pour la calibration du modèle. Ailleurs, les intensités sont surestimées par rapport à celles déterminées empiriquement, mais les données antérieures à notre étude souffrent de méthodologies reproductibles. Probablement en raison de l'application à l'ensemble du Languedoc-Roussillon de paramètres calibrés à l'Espiguette uniquement, contrainte liée à l'absence de mesures expérimentales du transport longitudinal annuel sur les plages du golfe du Lion. Néanmoins, à ce jour il n'existait pas de modélisation du transport longitudinal à cette échelle.

Il apparaît important de souligner que le potentiel de transport proposé dans ce rapport reflète avant tout la « structure » des climats de houle ANEMOC-2.

La présence d'une seule zone d'accumulation sédimentaire clairement identifiable sur les différentiels bathymétriques (Sabatier et al. 2006;

Brunel et al. 2012) suggère que le poids des échanges sédimentaires transversaux est aussi très important pour la région. On pourrait s'interroger sur l'importance du transport longitudinal dans les processus qui contrôlent l'évolution des plages du Languedoc-Roussillon au profit des mouvements transversaux aux profils.

La pertinence des modèles de transport longitudinal est vivement critiquée par certains auteurs, comme Pilkey et Cooper (Pilkey & Cooper 2002). Si ces derniers prêchent pour une remise à plat des acquis dans le domaine et l'abandon des modèles actuels, ils émettent une recommandation intéressante qui s'applique à cette étude : considérer les intensités données par ces modèles uniquement comme des ordres de grandeur.

Notre étude démontre également la dangerosité qu'il y aurait à mettre en œuvre un modèle numérique de transport sans calibration. En effet, les paramètres par défaut produisent des résultats qu'il serait tentant de considérer comme plausibles. Mais il est absolument impératif de les crédibiliser par une confrontation à des mesures *in-situ* : sans cela, il ne s'agit que de spéculations. Il existe néanmoins des applications calibrées et réussies d'Unibest-CL+, telle que la modélisation historique menée sur le littoral californien par Ruggiero et al. (2010) et qui se rapproche de notre mise en œuvre par la qualité des données en entrée du modèle.

Enfin, comparer ces dérives modélisées à celles déterminées empiriquement n'est pas sans difficultés : les méthodes empiriques ne permettent pas de distinguer avec certitude ce qui relève des dynamiques longitudinales ou transversales et présentent aussi une simplification des processus. Or, ici, seul le transport sédimentaire longitudinal est simulé. De fait, la prise en compte des transferts transversaux amènerait sans aucun doute à moduler les intensités et directions du potentiel de transport longitudinal proposées dans ce rapport, mais à ce jour cela reste encore un défi difficile que doivent relever les géomorphologues et les modélisateurs.

6 Bibliographie

- Akouango, E., 1997. *Morphodynamique et dynamique sédimentaire dans le golfe du Lion - Contribution à l'étude de la zone côtière dans l'actuel et le quaternaire récent*. Université de Perpignan Via Domitia.
- Aleman, N., 2013. *Morphodynamique à l'échelle régionale d'une avant-côte microtidale à barres sédimentaires*. Université de Perpignan Via Domitia.
- Bagnold, R.A. & Taylor, G., 1946. Motion of Waves in Shallow Water. Interaction between Waves and Sand Bottoms. In *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. pp. 1–18.
- Battjes, J.A. & Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In *Coastal Engineering 1978*. pp. 569–587.
- Bijker, E.W., 1971. Longshore Transport Computations. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 97(4), pp.687–701.
- Bijker, E.W., 1967. *Some Considerations about scales for Coastal Models with movable Bed*. Delft University of Technology.
- Blott, S.J. & Pye, K., 2001. GRADISTAT: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, pp.1237–1248.
- Boeyinga, J. et al., 2010. The effects of a bypass dunefield on the stability of a headland bay beach: A case study. *Coastal Engineering*, 57, pp.152–159.
- Bray, M.J., Carter, D.J. & Hooke, J.M., 1995. Littoral Cell Definition and Budgets for Central Southern England. *Journal of Coastal Research*, 11(2), pp.381–400.
- Brunel, C. et al., 2014. 20th century sediment budget trends on the Western Gulf of Lions shoreface (France): An application of an integrated method for the study of sediment coastal reservoirs. *Geomorphology*, 204, pp.625–637.
- Brunel, C. et al., 2012. *Atlas de l'évolution des fonds et des budgets sédimentaires séculaires de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon - 1895 / 1984 / 2009*.
- Brunel, C., 2010. *Evolution séculaire de l'avant-côte de la méditerranée française, impact de l'élévation du niveau de la mer et des tempêtes*. Université de Provence Aix-Marseille I.
- Brunel, C. et al., 2014. *REVOLSED - Relation entre l'évolution du trait de côte et le bilan sédimentaire de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon. Rapport final*, Perpignan.
- C.E.R.C., 1984. *Shore Protection Manual - Volumes I et II*, Washington, D.C.
- C.E.T.E. Méditerranée & I.P.S.E.A.U., 1997. *Evolution du littoral du Languedoc-Roussillon de 1945 à nos jours*.
- Cahill, B. & Lewis, T., 2014. Wave period ratios and the calculation of wave power. In *2nd Marine Energy Technology Symposium*. pp. 1–10.
- Carter, R.W.G., 1988. *Coastal Environments - An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*.
- Carter, R.W.G., Jennings, S.C. & Orford, J.D., 1990. Headland erosion by waves. *Journal of Coastal Research*, 6(3), pp.517–529.
- Certain, R., 2002. *Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le Golfe du Lion (Languedoc-Roussillon)*. Université de Perpignan Via Domitia.
- Dan, S. et al., 2009. Wave climate, coastal sediment budget and shoreline changes for the Danube Delta. *Marine Geology*, 262, pp.39–49.
- Davies, A.G., Soulsby, R.L. & King, H.L., 1988. A Numerical Model of the Combined Wave and Current Bottom Boundary Layer. *Journal of Geophysical Research*, 93, pp.491–508.
- Durand, P., 1999. *L'évolution des plages de l'ouest du golfe du lion au XXème siècle. Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire, analyse prévisionnelle*. Université Lumière Lyon 2.
- Elie de Beaumont, L., 1845. *Leçons de géologie pratique, professées au Collège de France, pendant l'année scolaire 1843-1844 - Tome premier* P. Bertrand, ed., Paris.
- Inman, D.L. & Bagnold, R.A., 1963. *Littoral processes: The Sea: Ideas and*

- Observations, vol. 3 The Earth Beneath The Sea*, New-York: Interscience.
- Inman, D.L. & Frautschy, J.D., 1965. Littoral Processes and the Development of Shorelines. In *Coastal Engineering: Santa Barbara Specialty Conference*. pp. 511–536.
- Kulling, B. & Sabatier, F., 2015. *Atlas du potentiel de transport sédimentaire longitudinal résultant annuel de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon*, Aix-en-Provence.
- L.C.H.F., 1984. *Catalogue sédimentologique des côtes françaises - Côtes de la Méditerranée de la frontière espagnole à la frontière italienne*.
- Longuet-Higgins, M.S. & Stewart, R.W., 1964. Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep Sea Research*, 11(4), pp.529–562.
- Pelnaud-Considère, R., 1956. Essai de théorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. In *4èmes journées de l'hydraulique - Les énergies de la mer*. pp. 289–301.
- Pilkey, O.H. & Cooper, J.A.G., 2002. Longshore Transport Volumes: A Critical View. *Journal of Coastal Research*, (36), pp.572–580.
- Raynal, O. et al., 2015. *LITTOSIS - Analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux littoral du Languedoc-Roussillon. Rapport final*, Perpignan.
- Robin, N. et al., 2010. Caractérisation des profils de courants pendant des événements de tempête sur une plage à barre rectiligne en milieu microtidal. In *XIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Les Sables d'Olonne*. pp. 113–120.
- Ruggiero, P. et al., 2010. Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change. *Marine Geology*, 273, pp.127–140.
- Sabatier, F., 2001. *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône*. Université de Provence Aix-Marseille I.
- Sabatier, F. et al., 2006. Sediment budget of the Rhône delta shoreface since the middle of the 19th century. *Marine Geology*, 234(1-4), pp.143–157.
- Sabatier, F., Stive, M.J.F. & Pons, F., 2004. Longshore variation of depth of closure on a micro-tidal wave-dominated coast. In *Coastal Engineering 2004*.
- Samat, O., 2007. *Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône*. Université de Provence.
- Suarez, S., 1997. *Dynamiques sédimentaires actuelles et récentes de la frange littorale orientale du Delta du Rhône*. Université de Provence.
- Tanner, W.F., 1987. Where Is the "River of Sand"? *Journal of Coastal Research*, 3(3), pp.377–386.
- Tiberi-Wadier, A.-L., Laugel, A. & Benoit, M., 2014. Construction of the numerical wave databases ANEMOC-2 on the Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean through hindcast simulations over the period 1979-2010. In *SimHydro 2014: Modelling of rapid transitory flows*.
- U.S.A.C.E., 2002. *Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100*, Washington, D.C.