

ETUDE POUR LA GESTION DES SEDIMENTS DU LITTORAL D'OCCITANIE

CAS PARTICULIER DU SECTEUR DU GRAU-DU-ROI ET DE LA FLECHE DE L'ESPIGUETTE







PLAN LITTORAL 21
MÉDITERRANÉE

Rapport n°Cl-19027-C Juillet 2020

rev01

INFORMATIONS GENERALES SUR LE DOCUMENT

Contact	CASAGEC INGENIERIE
Contact	18 rue Maryse Bastié
	Z.A. de Maignon
	64600 Anglet - FRANCE
	Tel : + 33 5 59 45 11 03
	Web : http://www.casagec.fr
Titre du rapport	Etude pour la gestion des sédiments du littoral d'Occitanie
	Phase 1
Maître d'Ouvrage	DREAL OCCITANIE
Auteur(s)	Rémi BUR – Julien BAILLS
Responsable du projet	Didier RIHOUEY – rihouey@casagec.fr
Rapport n°	CI-19027-C

SUIVI DU DOCUMENT

Rev.	Date	Description	Rédigé par	Approuvé par
00	09/07/2020	Première version communiquée au maitre d'ouvrage	RBR/JBS	DRY
01	30/07/2020	Version prenant en compte les remarques du maitre d'ouvrage	RBR/JBS	DRY
02				



TABLE DES MATIERES

1.	Contexte et objectif de l'étude	6
1.1.	Contexte général	6
1.2.	Objectif et organisation de l'étude	8
1.3.	Organisation du document	8
2.	Diagnostic du fonctionnement du littoral	9
2.1.	Concepts généraux	9
2.1.1.	Systèmes morphodynamiques	9
2.1.2.	Situation géographique	10
2.1.3.	Géomorphologie littorale	11
2.1.4.	Sédimentologie	12
2.2.	Analyse du contexte physique du littoral	14
2.2.1.	Agents météo-marins	14
2.2.2.	Modélisation de la propagation des houles à la côte et génération des courants	20
2.2.3.	Transport sédimentaire longitudinal	24
2.3.	Evolution sédimentaire à proximité de la Fleche de l'Espiguette	27
2.3.1.	Origines et évolutions historiques de la flèche	27
2.3.2.	Budget sédimentaire global entre 2009 et 2015	31
3.	Enjeux environnementaux	32
3.1.	Zoom sur la colonie d'hippocampes sur la flèche de l'Espiguette	32
3.2.	Autres compartiments biologiques à enjeux forts sur le littoral d'Occitanie	34
3.3.	Protections patrimoniales – Réseau NATURA 2000	35
4.	Scénarios de gestion	36
4.1.	Présentation des scénarios	36
4.1.1.	Scénario 1 : Dragage intégral de la flèche	37
4.1.2.	Scénario 2 : Dragage partiel de la flèche	40
4.1.3.	Scénario 3 : Prélèvement d'avant côte	43
4.1.4.	Scénario 4 : Prolongement de la digue	46
4.2.	Comparaison des scénarios	50
5.	Conclusion	52



TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Typologie de la vulnérabilité aux risques littoraux de la SRGITC Occitanie
Figure 2 : Relation spatio-temporelle des systèmes morphodynamiques côtiers
Figure 3 : Localisation de la zone d'étude par rapport au littoral d'Occitanie (Fond de plan : MNT 250 FRANCE)
Figure 4 : Localisation de la zone d'étude sur la commune du Grau du Roi
Figure 5 : Transport sédimentaire et orientation de la dérive littorale du Racou à l'Espiguette (Kulling et al (2015) LITTOSIS (2015))
Figure 6 : Localisation des cellules sédimentaires et numérotation
Figure 7 : Nature des fonds au 1/500 000 (d'après SHOM)
Figure 8. Statistiques des vents de 1949 à 1998 enregistrés à Sète
Figure 9. Elévation du niveau moyen de la mer selon les différents scénarios issus du GIEC (2019) figure 4.9 du chapitre 4
Figure 10. Corrélogramme Hs / Tp (a) et Hs / Dirp (b) (Données ANEMOC au niveau du point MEDIT_1655) 18
Figure 11. Emprise et maillage du modèle TELEMAC-2D – TOMAWAC20
Figure 12. Epures des hauteurs de houle pour une hauteur de houle au large de 2,5 m à basse mer et les provenances (a) 135 °N (b) 180°N et (c) 225 °N
Figure 13. Epures des vitesses de courant pour une hauteur de houle au large de 2,5 m, une condition de basse mer et les provenances (a) 135 °N (b) 180°N et (c) 225 °N
Figure 14 : 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 (Kulling B. Sabatier F., 2015).
Figure 15 : Schéma du fonctionnement d'Unibest-LT détaillant les données en entrée du modèle (climat de houle et profil de plage)
Figure 16 : Accumulation sédimentaire à la pointe de l'Espiguette déterminée à partir du différentie bathymétrique entre le LiDAR de 2011 et les sondes de 198426
Figure 17 : Atlas du TSL _r en Languedoc Roussillon (Modélisation du TSL _r , DREAL Kulling et Sabatier, 2015) 26
Figure 18. Crochons sableux naturels au niveau de l'actuelle flèche sous-marine de l'Espiguette et de Port Camargue (IGN, 1960)27
Figure 19 : Partie émergée de la flèche de l'Espiguette (2019)28
Figure 20 : Evolution de la largeur de plage au Sud de la digue d'arrêt des sables depuis 193528
Figure 21 : Carte du Lidar de 2009 [a], 2011 [b], 2015 [c] (sources SHOM) et bathymétrie de 2018 [d] (sources DREAL Occitanie)
Figure 22 : Différences des bathymétries entre 2018 et 2009
Figure 23 : Atlas du budget sédimentaire 2009-2015 à proximité de la Flèche de l'Espiguette (PGS Occitanie CASAGEC 2020).
Figure 24 : Localisation des points de suivi des Syngnathidés entre 2012 et 2015 sur la flèche de l'Espiguette (ASCONIT/ARTELIA, 2018)



Figure 25 : Zone de dragage exploitée dans le cadre de la seconde tranche des travaux de protection d Frontignan (ASCONIT/ARTELIA, 2018)	
Figure 26 : Espèces à enjeux forts présentent sur le littoral Méditerranée au niveau des petits fonds littoral sableux.	
Figure 27 : Carte des habitats élémentaires du site « FR9102014-Bancs sableux de l'Espiguette » (PNR C 2013).	_
Figure 28 : Localisation des scénarios étudiés.	36
Figure 29 : Localisation du scénario 1	37
Figure 30 : Modélisation des hauteurs de houle du scénario 1.	38
Figure 31 : Différence des hauteurs de houle entre l'état actuel et le scénario 1	38
Figure 32 : Modélisation des courants du scénario 1.	39
Figure 33 : Différence des courants entre l'état actuel et le scénario 1	39
Figure 34 : Localisation du scénario 2.	40
Figure 35 : Modélisation des hauteurs de houle du scénario 2.	41
Figure 36 : Différence des hauteurs de houle entre l'état actuel et le scénario 2	41
Figure 37 : Modélisation des courants du scénario 2.	42
Figure 38 : Différence des courants entre l'état actuel et le scénario 2.	42
Figure 39 : Localisation du scénario 3.	43
Figure 40 : Profil en travers simplifié au droit de la plage de l'Espiguette	43
Figure 41 : Modélisation des hauteurs de houle du scénario 3.	44
Figure 42 : Différence des hauteurs de houle entre l'état actuel et le scénario 3	44
Figure 43 : Modélisation des courants du scénario 3.	45
Figure 44 : Différence des courants entre l'état actuel et le scénario 3.	45
Figure 45 : Localisation du scénario 4.	46
Figure 46 : Schématisation du profil en long de la digue projetée.	46
Figure 47 : Schématisation du profil en travers de la digue projetée.	47
Figure 48 : Modélisation des hauteurs de houle du scénario 4.	48
Figure 49 : Différence des hauteurs de houle entre l'état actuel et le scénario 4	48
Figure 50 : Modélisation des courants du scénario 4	49
Figure 51 : Différence des courants entre l'état actuel et le scénario 4.	49



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des modes de gestion appliqués aux typologies des espaces littoraux	6
Tableau 2. Niveau de la marée astronomique au niveau du port secondaire de Port Camargue (SHOM - RA 2019).	
Tableau 3. Estimation des niveaux marins horaires au niveau du marégraphe de Sète (cm NGF) avec une loi Gumbel	
Tableau 4. Elévation du niveau moyen de la mer par rapport au niveau de 2000 (ONERC, 2010)	16
Tableau 5. Elévation du niveau moyen de la mer par rapport au niveau de 2000 (GIEC, 2013)	17
Tableau 6. Estimation des climats extrêmes des états de mer au large au point MEDIT_2809 (ANEMOC)	19
Tableau 7. Estimation des climats extrêmes des états de mer à l'houlographe de Sète (CANDHIS)	19
Tableau 8. Cas de calcul pour la propagation de la houle à la côte	21
Tableau 9 : Représentation des volumes positifs, négatifs et nets (en m³) de chaque différence bathymétriq étudiée hors prise en compte des volumes prélevés	
Tableau 10 : Synthèse des caractéristiques principales des scénarios de prélèvements en sable (scénarios 1 à	
Tableau 11 : Estimatif des coûts du scénario 4.	47
Tableau 12 : Synthèse des caractéristiques principales des scénarios étudiés	51



1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

1.1. CONTEXTE GENERAL

Résultat d'un chantier mené par la DREAL Occitanie/DRN, la Stratégie Régionale de Gestion Intégrée du Trait de Côte Occitanie a été validée en comité d'action régionale le 29 juin 2018.

L'objectif de cette stratégie régionale de gestion intégrée du trait de côte (SRGITC) est de porter à la connaissance des collectivités, de manière pédagogique et étayée par des données, le constat fait par les services de l'État sur les phénomènes d'évolution du trait de côte.

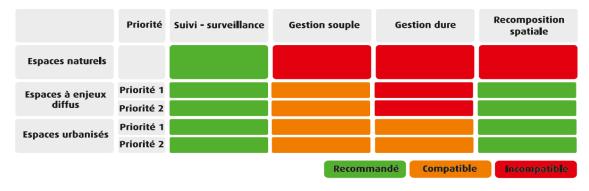
D'un point de vue opérationnel, la SRGITC préconise le retour au fonctionnement naturel du littoral, notamment par l'utilisation de modes de protection doux (rechargement en sable, bypass, restauration ou recréation de cordons dunaires et gestion de la fréquentation...) qui impliquent une utilisation accrue de sédiments.



En fonction des typologies d'espaces littoraux (Figure 1) définies via l'analyse croisée de l'occupation du sol, de la configuration des espaces, de leur dynamique sédimentaire, de la connaissance et de l'observation des territoires, trois catégories d'espaces et deux niveaux de priorité d'actions, ont été retenus :

- Les espaces naturels : n'ont pas vocation à faire l'objet d'aménagements mais le suivi de leur évolution s'impose afin d'anticiper les impacts du changement climatique.
- Les espaces à enjeux diffus et/ou déplaçables :
 - Avec un niveau de priorité d'actions, noté « priorité 1 »,
 - o Avec un moindre niveau de priorité d'actions, noté « priorité 2 ».
- Les espaces urbanisés :
 - Avec un niveau de priorité d'actions, noté « priorité 1 »,
 - Avec un moindre niveau de priorité d'actions, noté « priorité 2 ».

Tableau 1 : Synthèse des modes de gestion appliqués aux typologies des espaces littoraux.



Face aux nombreux enjeux présents sur le littoral régional, notamment techniques, environnementaux, économiques et administratifs, la DREAL et la Région Occitanie, en accord avec les objectifs portés par le plan Littoral 21, ont décidé de porter cette étude afin de disposer d'un plan de gestion des sédiments qui doit permettre :

- D'identifier les gisements de sédiments potentiels et les secteurs en érosion ;
- De prioriser les actions à mener en accord avec les principes et recommandations de la SRGITC.



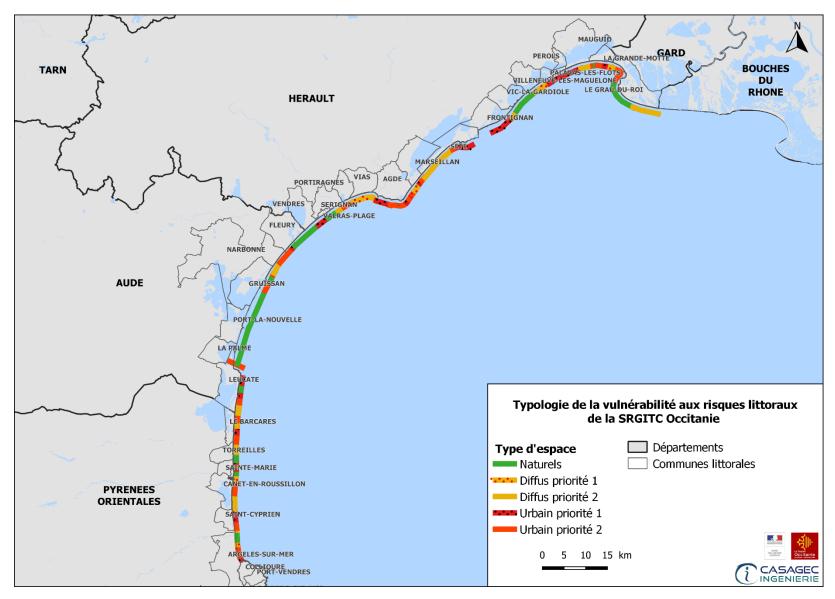


Figure 1 : Typologie de la vulnérabilité aux risques littoraux de la SRGITC Occitanie.



1.2. OBJECTIF ET ORGANISATION DE L'ETUDE

La présente étude a pour objectif de regrouper l'ensemble des données utiles à la Gestion des Sédiments du Littoral de la région Occitanie. Elle comprend la synthèse de toutes les études concernant l'érosion et les gisements de sables ainsi que l'élaboration de projets de rechargement des plages en déficit sableux.

L'étude s'articule en 4 phases :

- Phase 1 Synthèse et recensements :
 - Recenser les gisements de sable (ponctuel, permanent, au large, dragage d'embouchures, dragages portuaires, carrière, autre) avec une caractérisation de la qualité du sable;
 - o Recenser les plages nécessitant un apport de sable avec une caractérisation de la qualité du sable en place, en accord avec la spatialisation des espaces définis dans la SRGITC;
 - Effectuer une synthèse des études précédentes de recensement des gisements et des études de suivi du trait de côte;
- Phase 2 Étude de projets de rechargement :
 - Etablir les projets (niveau étude AVP) de rechargement en sable de chaque plage recensée en croisant les enjeux techniques, financiers et environnementaux;
- Phase 3 Économie et gouvernance :
 - o Optimiser les coûts des scénarios de rechargement de la phase 2 en proposant des groupements de commande générant des économies d'échelle et en étudier la gouvernance.
- Phase 4 Présentation et diffusion de l'étude :
 - Présentation par le titulaire de l'ensemble de l'étude, au Pouvoir Adjudicateur, aux Préfectures de la Région Occitanie concernées, puis aux Maîtres d'Ouvrages potentiels d'aménagements du littoral (communes ou agglomérations).

Le présent document constitue une étude spécifique du secteur du Grau du Roi et de la Flèche de l'Espiguette en lien avec la phase 2.

1.3. ORGANISATION DU DOCUMENT

Une attention particulière est portée sur l'analyse de l'évolution du secteur du Grau-du-Roi et de la Flèche de l'Espiguette. D'une part, des phénomènes d'accumulation de sable sont observés dans la baie et commencent à poser des problèmes au niveau de certains usages de navigation (débouché du grau et de son port de pêche et sortie du port de Port-Camargue ...), et d'autre part, la flèche de l'Espiguette constitue un gisement massif déjà exploité à plusieurs reprises.

Le présent document s'articule de la façon suivante :

- Dans une première partie, un diagnostic du fonctionnement du littoral est réalisé. Il permet de décrire le fonctionnement hydrosédimentaire spécifique à la zone d'étude sur la base de la bibliographie et des résultats de modélisation hydrodynamique mise en œuvre dans le cadre de l'étude.
- Les enjeux environnementaux sont présentés dans une deuxième partie.
- Enfin, des scénarios de gestion, permettant de répondre aux problématiques évoquées, sont présentés et comparés avant de conclure.



2. DIAGNOSTIC DU FONCTIONNEMENT DU LITTORAL

2.1. CONCEPTS GENERAUX

2.1.1. Systèmes morphodynamiques

Les environnements côtiers sont des milieux dynamiques contrôlés par un large spectre spatio-temporel de forçages :

- La tectonique, responsable de la dynamique des bassins, contrôle l'évolution du littoral à l'échelle géologique;
- L'eustasie, évolution d'ensemble du niveau marin, contrôle l'évolution du littoral à l'échelle « pluriséculaire » ;
- L'hydrodynamique, caractérisée par les processus côtiers (vagues, courants) et fonction de la climatologie locale (vents dominants, fréquence des tempêtes), contrôle l'évolution du littoral à l'échelle du « temps historique ».

Les évolutions des environnements côtiers considérées à cette échelle du « temps historique » sont fonction des flux sédimentaires. Ces flux entraînent des réponses du milieu qui se manifestent également à différentes échelles de temps et d'espace :

- Phénomènes à micro-échelle et instantanés, tels que l'évolution des rides sédimentaires au passage d'une vague ou la construction de figures sédimentaires par les courants;
- Phénomènes à méso-échelle et moyen terme, tels que l'évolution des barres littorales qui répondent à des processus de type événementiel (tempête) ou périodique (cycle météorologique saisonnier) ;
- Phénomènes à macro-échelle, annuel à pluriannuel, tels que l'évolution du trait de côte incluant les variations environnementales long terme et l'action anthropique.

A chaque échelle de temps est associée une échelle spatiale fonction de l'amplitude des morphologiques changements considérés. En supposant que les échelles de temps et d'espace sont liées par des relations linéaires croissantes (De Vriend, 1991), on peut conceptualiser les systèmes côtiers et leurs évolutions comme un emboîtement (Figure 2) de compartiments spatio-temporels (Kroon, 1994).

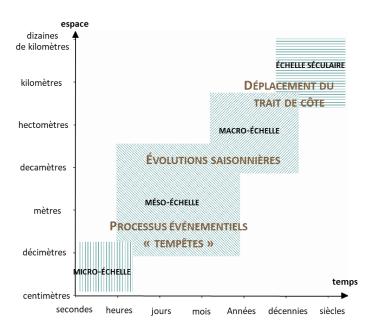


Figure 2 : Relation spatio-temporelle des systèmes morphodynamiques côtiers.



2.1.2. Situation géographique

Le littoral Occitan se situe entre les communes de Cerbère, à l'extrémité Sud-Est des Pyrénées-Orientales, et celle du Grau du Roi dans le département du Gard. Il s'étend sur plus de 200 km un littoral entrecoupé de nombreux fleuves (Hérault, Aude, Orb, Agly, Têt, Tech). Ce littoral majoritairement sableux, présente plusieurs caps rocheux qui renferment de nombreux étangs littoraux. En effet, sous l'effet de la dérive littorale, des cordons sableux ont isolés de nombreuses lagunes (Certain, 2002). Coté Méditerranée, le plateau continental est large et s'étend jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de la côte. La zone d'étude du présent rapport est située à proximité de la commune du Grau du Roi au niveau de la Flèche de l'Espiguette (zone en rouge, Figure 3 et Figure 4)

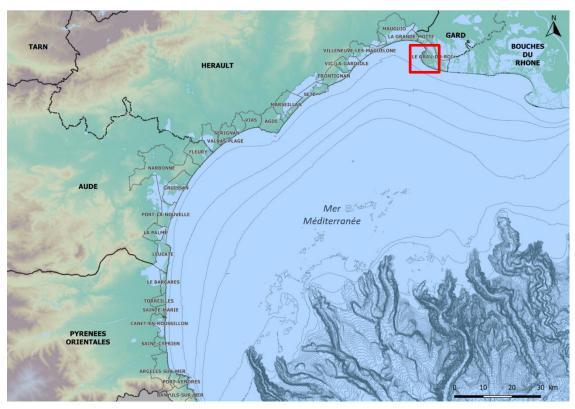


Figure 3 : Localisation de la zone d'étude par rapport au littoral d'Occitanie (Fond de plan : MNT 250 FRANCE).



Figure 4 : Localisation de la zone d'étude sur la commune du Grau du Roi.



2.1.3. Géomorphologie littorale

La dynamique sédimentaire littorale traduisant l'ensemble des déplacements de sédiments explique la répartition actuelle des barres sédimentaires le long du littoral (LITTOSIS, 2015). Ces déplacements sont en majorité dus à la dérive littorale (Figure 5) et vont entraîner la présence de zones d'érosion, d'accrétion ou de stabilité des plages à l'intérieur de cellules sédimentaires. Le courant de dérive littorale est principalement dû à la direction de la houle dominante et à sa composante longitudinale (LITTOSIS., 2015).

Compte tenu de la direction des houles et la présence de caps rocheux, différents grands compartiments sédimentaires ont été identifiés. Ces compartiments sont définis soit par des limites de convergence ou de divergence des dérives littorales (ex.: Golfe d'Aigues-Mortes-Espiguette) soit par des limites morphologiques (Cap Leucate, Cap d'Agde...), créant ainsi les principales unités géomorphologiques du littoral Occitan (Durand, 1999; Certain, 2002; CEREMA, 2017).

La zone d'étude est située à proximité des unités géomorphologiques suivantes (Figure 5) :

- L'unité du golfe d'Aigues Mortes, de Sète au Grau du Roi : le littoral du golfe d'Aigues Mortes s'étend sur 38 km. La côte est ici une succession de lagunes côtières séparées de la mer par un cordon dunaire très étroit généralement constitué de sables fins.
- L'unité de l'Espiguette s'étend sur l'intégralité du littoral de la commune du Grau du Roi et se caractérise par la présence de la flèche sableuse de l'Espiguette, formée par les dépôts d'alluvions des anciens bras Ouest du Rhône.

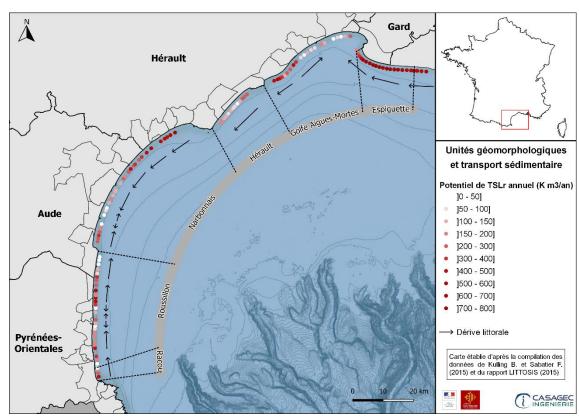
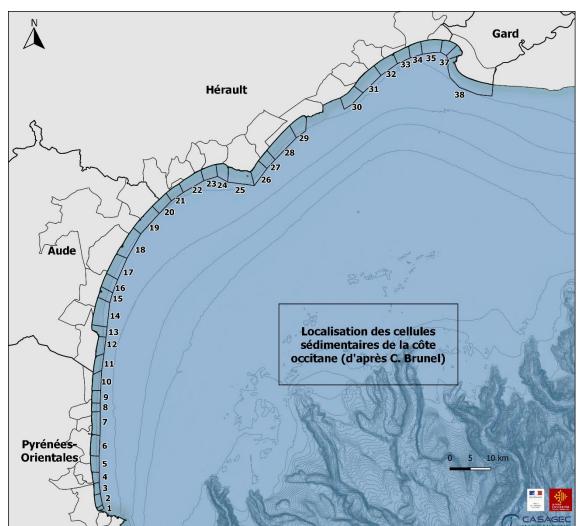


Figure 5 : Transport sédimentaire et orientation de la dérive littorale du Racou à l'Espiguette (Kulling et al (2015) ; LITTOSIS (2015)).

A plus petite échelle, les travaux de Brunel et al. (2013), ou encore de Raynal et al., (2013) ont défini 38 cellules hydro-sédimentaires. Ces cellules sont définies en fonction du budget sédimentaire et de limites structurales qui contraignent le comportement morphodynamique de l'avant-côte (LITTOSIS, 2015). Ces limites peuvent être naturelles (caps rocheux, embouchures de fleuves) ou anthropiques (jetées portuaires, linéaire côtier aménagé).





La Figure 6 localise les 38 cellules sédimentaires définies sur le littoral occitan.

Figure 6 : Localisation des cellules sédimentaires et numérotation.

La zone d'étude est située au niveau des cellules sédimentaires suivantes :

- Cellule 37 : Le Boucanet Port Camargue, de la fin du secteur aménagé jusqu'à la digue d'arrêt des sables de l'Espiguette ;
- Cellule 38 : Port Camargue Saintes-Maries-de-la-Mer, de la digue de l'Espiguette à la digue du port.

2.1.4. Sédimentologie

2.1.4.1. Golfe du Lion

La carte de la nature des fonds produites par le SHOM donne une idée générale de la nature des fonds marins dans le golfe du Lion (Figure 7).

Globalement, une bande plus ou moins uniforme se distingue sur les cinq premiers kilomètres au plus près de la côte (jusqu'aux isobathes -30 et -40 m CM). A ce niveau, les sédiments marins sont pour la plupart des sables ou des sables vaseux au sein desquels des zones rocheuses peuvent apparaître ponctuellement.

Entre les isobathes -30 et -90 m CM, les sédiments deviennent plus fins et une vasière circalittorale composée de silts (ou limons de granulométrie inférieure à 60 μ m) et autres vases argileuses riches en eau est alors bien représentée.



Enfin, le rebord du plateau continental est composé de sables hétérogènes déposés au cours du dernier bas niveau de la mer, il y a plusieurs milliers d'années.

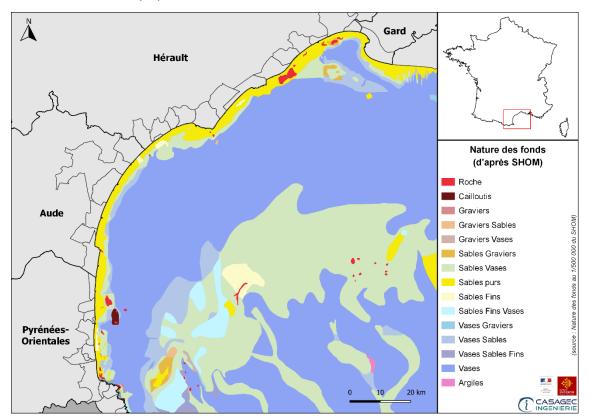


Figure 7: Nature des fonds au 1/500 000 (d'après SHOM).

2.1.4.2. Zone d'étude

D'après Brunel (2010), la granulométrie des particules sableuses dans la zone de déferlement du Golfe du Lion est relativement liée au sens des dérives littorales dominantes. En règle générale les sédiments les plus grossiers se situent au départ des zones de dérive, à proximité des embouchures, aux alentours des zones rocheuses et s'affinent vers les zones de dépôts. Ainsi, selon les unités morphosédimentaires liées à la zone d'étude il apparait que :

- Au niveau du golfe d'Aigues Mortes, de Sète à la pointe de l'Espiguette : les sédiments de la plage émergée et immergée sont relativement fins, sauf sur les plages des Aresquiers et de Palavas-Maguelone où les sédiments sont beaucoup plus grossiers sur la plage émergée. Ces plages présentent des graviers et des galets sur la partie haute touchée par les tempêtes, ainsi que des fractions grossières hétérogènes sur le talus et sur la berme de beau temps. Toutes ces fractions grossières proviennent de l'érosion des plateaux rocheux gréseux/conglomératiques du large, décrits comme d'anciennes plages fossiles indurées (« beachrock ») ;
- Au niveau de l'Espiguette : afin de construire le port de plaisance de Port-Camargue, le secteur de l'Espiguette a été modifiée par l'ajout d'une grande digue d'arrêt du sable en 1968, interrompant la progression naturelle de la flèche et favorisant d'autant le dépôt massif de sables venant du delta (ou des prodeltas) du Rhône. Le sable de la flèche de l'Espiguette est très fin et très homogène. Sa taille de grain se situe autour de 0,2 mm sur la plage émergée et 0,18 mm sur la plage immergée (Sabatier, Provansal, 2000 ; Aleman, 2013).



2.2. Analyse du contexte physique du littoral

2.2.1. Agents météo-marins

2.2.1.1. Vents

Les grands vents qui affectent le Languedoc-Roussillon sont le mistral, la tramontane, le marin et l'autan. Le mistral et la tramontane sont des vents d'origine similaire : leur déclenchement est lié à la présence d'un anticyclone sur le proche Atlantique, prolongement de celui des Açores, induisant un flux de Nord-Ouest à Nord-Est sur la France, et créant une dépression sur le golfe de Gênes.

Cette situation engendre des flux de masse d'air froid canalisés par le relief (couloir rhodanien pour le mistral et les Pyrénées pour la tramontane) qui provoquent un important renforcement. Très souvent la tramontane se déclenche avant le mistral. Elle est orientée au Nord-Ouest sur l'Hérault. Elle se renforce sur l'Aude où elle prend une composante Ouest plus marquée.

Les dépressions sur le Golfe de Gascogne provoquent l'établissement d'un régime marin sur le Languedoc-Roussillon. Vent assez fort à fort, de secteur Sud-Est dominant, il est très humide, doux et souffle sur l'ensemble de la région.

Un traitement de séries statistiques de vents de 1949 à 1998 enregistrées à Sète permet de dégager une individualisation selon trois secteurs (Figure 8) :

- Des flux de Nord-Ouest avec pour vent dominant la tramontane (froid et sec de secteur 300° à 340°). Ce vent violent représente 36 % des observations à Sète avec une résultante orientée au Nord/Nord-Ouest. Il peut atteindre 135 à 153 km/h lors des phénomènes paroxysmaux;
- Des flux de Nord-Est avec le mistral (20° à 30°) pouvant atteindre 100 km/h à Sète. Il représente 15 % des vents de terre sur le secteur d'étude ;
- Des flux de Sud-Est, dont le marin (120° à 140°) représente 15 % des observations. Ce vent, chaud et humide, peut soulever des mers fortes en se conjuguant avec des houles venues du large.

Les vents de terre sont constants sur l'ensemble de l'année climatique (50 % des observations). Ces vents s'opposent au vent marin généralement plus faible en fréquence et en intensité.

Azimut	2 à 4 m/s	5 à 8 m/s	> 8 m/s	total
20	1,25	1,59	1	3,85
40	1,72	2,85	0,82	5,4
60	2,2	3,73	1,24	7,19
80	2,26	3,08	0,68	6,03
100	1,76	2,21	0,79	4,77
120	2,29	2,88	2,1	7,28
140	0,37	0,46	0,27	1,12
160	0,96	1,03	0,65	2,66
180	1,26	1,18	0,58	3,03
200	1,26	1,42	0,22	2,91
220	1,08	1,56	0,52	3,16
240	1,11	1,27	0,15	2,54
260	1,06	1,56	0,52	3,16
280	1,14	2,07	1,57	4,79
300	1,18	4,15	4,42	9,77
320	1,49	5,51	8,42	15,43
340	1,42	3,1	4,13	8,66
360	1,15	1,88	1,72	4,76
Total	25,06	41,64	29,59	96,29

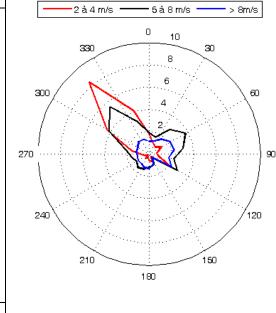


Figure 8. Statistiques des vents de 1949 à 1998 enregistrés à Sète.



2.2.1.2. Niveaux d'eau

2.2.1.2.1. Systeme planimetrique et altimetrique

Le référencement planimétrique utilisé est le Lambert 93. Le référencement altimétrique retenu est le système de Nivellement Géographique de la France (NGF IGN 69) qui sera indiqué NGF dans la suite du document. Sauf mention contraire, ces deux référencements seront toujours utilisés dans le présent document.

2.2.1.2.2. MAREE ASTRONOMIQUE

Dans le Golfe du Lion, la marée est de type micro-tidale semi-diurne à inégalité diurne. Le Tableau 2 donne les informations des niveaux de marée au port secondaire de Port Camargue en cote marine (CM) et en cote terrestre relative au nivellement général de la France (NGF). La différence entre le zéro hydrographique et le zéro NGF est de 0,282 m (SHOM – RAM, 2019).

Tableau 2. Niveau de la marée astronomique au niveau du port secondaire de Port Camargue (SHOM - RAM 2019).

Marée	Cotes Marines (m CM)	Cotes Terrestres (m NGF)	
РВМА	+ 0,35 m + 0,068 m		
NM	+ 0,53 m	+ 0,248 m	
РНМА	+ 0,76 m	+ 0,478 m	

Avec:

■ PBMA : niveau des plus basses mers astronomiques (coefficient 120) ;

NM : niveau moyen ;

■ PHMA: niveau des plus hautes mers astronomiques (coefficient 120).

2.2.1.2.3. NIVEAUX EXTREMES

Le phénomène de surcote consiste en une variation locale et temporaire du niveau de la mer provoquée par les variations du vent et de la pression atmosphérique. Les analyses réalisées par le CEREMA en 2019 au niveau du marégraphe du port secondaire de Sète donnent les informations suivantes sur les niveaux extrêmes (Tableau 3).

Tableau 3. Estimation des niveaux marins horaires au niveau du marégraphe de Sète (cm NGF) avec une loi de Gumbel.

Période de retour	Niveau marin instantané	Intervalle de confiance à 70 %
5 ans	83	80 – 86
10 ans	91	87 – 95
20 ans	99	94 – 104
50 ans	110	103 – 116
100 ans	117	110 - 124

À Sète, le niveau marin maximum enregistré est de 1,105 m NGF le 28/11/2014.

NB : À Sète, le niveau marin maximum enregistré est de 1, 402 m en ZH (valeur validée SHOM). En 2014, à SETE le ZF/REF était de - 0,297 ce qui correspond à un niveau de 1, 105 m NGF. Ce n'est qu'en 2019 que le ZF/REF a été revu et passé par le SHOM a -0,307.



2.2.1.2.4. CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (en abrégé ONERC) a publié en février 2010 des recommandations pour la prise en compte du changement climatique pour les projets de France métropolitaine. Ces recommandations sont basées sur le 4^{ième} rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) de 2007. Elles sont reprises dans la circulaire du 27 juillet 2011 du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux et dans le guide méthodologique pour les plans de prévention des risques littoraux établi par le MEDDE en mai 2014.

Ces recommandations se basent sur 3 hypothèses :

- L'hypothèse « optimiste » correspond au scénario B1 qui est le scénario d'émissions de gaz à effet de serre le plus bas présenté par le GIEC en 2007 ;
- L'hypothèse « pessimiste » correspond au scénario A1FI qui est un scénario intermédiaire ;
- L'hypothèse « extrême » prend en compte une possible accélération de la perte de masse de glace au Groenland et en Antarctique.

Les valeurs données dans le tableau suivant correspondent aux recommandations de l'ONERC. Elles sont à considérer par rapport au niveau moyen de la mer sur un site donné en 2000.

Date	Hypothèse optimiste	Hypothèse pessimiste	Hypothèse extrême	
2025	+ 0,08 m	+ 0,11 m	+ 0,18 m	
2030	+ 0,10 m	+ 0,14 m	+ 0,22 m	
2040	+ 0,13 m	+ 0,19 m	+ 0,31 m	
2050	+ 0,17 m	+ 0,25 m	+ 0,60 m	
2065	+ 0,23 m	+ 0,34 m	+ 0,56 m	
2100	+ 0,40 m	+ 0,60 m	+ 1,00 m	

Tableau 4. Elévation du niveau moyen de la mer par rapport au niveau de 2000 (ONERC, 2010).

Ces recommandations n'ont cependant pas été actualisées au regard des nouvelles tendances données par le 5^{ème} rapport du GIEC de 2013. Dans ce rapport, les tendances à venir sont estimées sur la base de 4 scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) qui décrivent des évolutions possibles des émissions et concentrations des gaz à effets de serre, des émissions de polluants et d'usages des terres au cours du 21^{ième} siècle :

- RCP2.6 : représentatif d'un scénario permettant de garder le réchauffement climatique en-dessous de 2°C, au-dessus des températures de l'époque pré-industrielle. Il s'agit du scénario le plus optimiste en termes de réchauffement climatique (ce scénario ne possède pas d'équivalent dans les scénarios du GIEC 2007) ;
- RCP4.5 : scénario intermédiaire (équivalent au scénario B1 du GIEC 2007) ;
- RCP6.0 : scénario intermédiaire (équivalent au scénario B2 du GIEC 2007) ;
- RCP8.5 : scénario à très forte augmentation des émissions de gaz à effet de serre (équivalent au scénario A2/A1FI du GIEC 2007).



Les courbes d'élévation du niveau moyen de la mer selon ces nouveaux scénarios issus du GIEC 2013 sont données ci-dessous avec le tableau affichant les valeurs numériques.

Date	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
2025	+ 0,10 m	+ 0,10 m	+ 0,10 m	+ 0,11 m
2030	+ 0,13 m	+ 0,13 m	+ 0,12 m	+ 0,13 m
2040	+ 0,17 m	+ 0,17 m	+ 0,16 m	+ 0,19 m
2050	+ 0,22 m	+ 0,23 m	+ 0,21 m	+ 0,25 m
2065	+ 0,28 m	+ 0,32 m	+ 0,30 m	+ 0,37 m
2100	+ 0,44 m	+ 0,53 m	+ 0,55 m	+ 0,73 m

En prenant en compte le scénario le plus défavorable présenté ci-avant ainsi que la borne haute de l'intervalle de confiance associée aux incertitudes des modèles, les surélévations pour les échéances 2030 et 2060 sont les suivantes :

- A horizon 2030 : 13 cm + 5 cm soit 18 cm ;
- **A horizon 2060**: 33 cm + 11 cm soit 44 cm.

Le dernier rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique (GIEC, 2019) fait suite à deux autres rapports spéciaux du GIEC et répond aux propositions thématiques issues des gouvernements et des observateurs, en évaluant les publications scientifiques récentes. Les estimations les plus pessimistes sont estimées à une élévation du niveau moyen des océan à 1,10 à horizon 2100 (élévation médiane de 0,84).

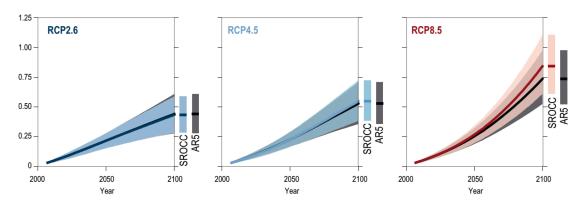


Figure 9. Elévation du niveau moyen de la mer selon les différents scénarios issus du GIEC (2019) figure 4.9 du chapitre 4.



2.2.1.3. Climatologie des états de mer

2.2.1.3.1. CLIMATOLOGIE MOYENNE DES ETATS DE MER

Les données A.N.E.M.O.C. (Atlas Numérique d'Etats de mer Océanique et Côtier) au plus près du domaine d'étude (Point MEDIT_1655 – 3°53,928' E / 43°25,122' N) permettent de caractériser les conditions d'états de mer à une profondeur d'environ 30 m. Cette base de données a été construite à partir de simulations rétrospectives (Hindcast) sur une période de 30 ans (du 01/01/1979 au 31/12/2008) avec le logiciel de modélisation des états de mer TOMAWAC, développé par EDF - LNHE avec le soutien du CETMEF.

Les Figure 10(a) et Figure 10(b), qui représentent la probabilité d'occurrence des couples Hs¹/Tp² et des couples Hs/Dirp³, mettent en évidence trois grands types d'états de mer :

- Des houles résiduelles faiblement énergétiques (Hs < 1 m) de secteur Sud-Est à Sud-Ouest qui sont les plus fréquentes ;
- Des houles de vents de terre de direction Nord-Ouest à Nord-Est, assez fréquentes mais de faible amplitude (Hs < 1 m et Tp < 5 s) en raison du fetch limité ;
- Les houles énergétiques (Hs > 1,5 m et Tp > 7 s) de secteur Sud à Sud-Est. Ces états de mer sont plus rares et liés aux vents marins soutenus à forts, à l'origine des tempêtes les plus agressives.

	Corrélogramme Hm0 / Tpic - ANEMOC_MEDIT_1655 - annuel														
Hm0 (m)	Hm0 (m) Tpic (Secondes)														
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Total
0.5			66.81	95.57	120.62	85.48	33.01	58.51	15.67	2.73	0.58	0.14	0.04	0.03	479.19
1			10.28	161.78	62.85	51.22	33.70	8.88	0.73	0.05					329.49
1.5				2.26	25.97	44.63	22.74	12.43	2.66	0.04	0.00				110.73
2					0.59	10.01	24.53	10.60	2.94	0.18	0.03				48.88
2.5					0.01	0.10	6.11	12.18	2.90	0.22					21.52
3						0.01	0.04	4.28	3.47	0.23					8.03
3.5							0.00	0.07	1.50	0.24					1.81
4								0.01	0.09	0.07	0.00				0.17
4.5								0.00	0.02	0.00	0.02				0.04
5										0.02	0.02				0.04
5.5										0.01	0.03				0.04
6											0.05				0.05
Total			77.09	259.60	210.04	191.45	120.13	106.97	29.98	3.78	0.74	0.14	0.04	0.03	
	Les valeurs du tableau sont exprimées en "pour mille (%)" - Les valeurs 0.00 % correspondent à des fréquences comprises entre 0 % et 0.01 % - Les case vides correspondent à des fréquences nuiles.														
	Code des co	uleurs													
>= 10 %	>= 30 %	。 >= 5	0 %。												

	Corrélogramme Hm0 / DirMoy - ANEMOC_MEDIT_1655 - annuel																								
Hm0 (m)	m0 (m) DirMoy (degrés)																								
0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	Tot
0.5	10.47	4.46	2.59	1.91	1.85	2.97	6.55	107.18	44.99	50.63	65.29	62.67	74.56	11.62	5.01	5.22	3.29	1.58	1.09	1.10	1.27	1.81	3.08	7.35	478.
1	31.60	22.90	8.31	3.72	2.40	1.99	2.21	8.39	13.86	27.09	30.37	34.43	29.34	9.13	6.72	6.74	5.23	4.43	5.47	6.87	8.30	11.15	17.81	28.59	327.
1.5	2.13	3.94	1.68	0.86	0.96	1.38	1.78	4.53	8.90	13.81	16.26	19.77	13.77	5.50	4.53	4.02	2.63	1.60	0.78	0.26	0.07	0.07	0.39	1.02	110.6
2	0.13	0.18	0.04	0.12	0.09	0.24	0.66	1.91	6.39	7.86	9.61	10.28	5.82	2.78	1.61	1.01	0.09	0.02	0.00					0.03	48.8
2.5			0.03	0.02	0.02	0.02	0.17	1.14	4.05	4.64	4.18	3.67	2.51	0.82	0.21	0.02		0.01							21.5
3						0.00	0.01	0.21	1.56	2.55	1.54	1.29	0.79	0.07			0.01								8.0
3.5							0.01	0.00	0.35	0.63	0.35	0.30	0.16			0.01	0.00								1.81
4									0.01	0.07	0.07	0.02				0.01									0.1
4.5										0.01	0.01	0.02				0.01									0.04
5										0.01	0.01	0.02													0.04
5.5										0.02	0.01	0.01													0.04
6										0.02	0.03														0.0
Total	44.34	31.48	12.65	6.63	5.32	6.61	11.40	123.37	80.10	107.33	127.74	132.48	126.94	29.91	18.08	17.04	11.25	7.63	7.35	8.23	9.64	13.03	21.27	37.00	
		Les valeu	ırs du tab	leau sont	exprimé	es en "po	ur mille (‰)" - Les	valeurs (0.00 ‰ co	rrespond	ent à des	fréquenc	es comp	rises entr	e 0 ‰ et	0.01 ‰ -	Les case	vides co	rrespond	ent à des	fréquenc	es nulles		
Code des couleurs				1																					
>= 1		>= 3		>= 5	0 ‰																				

Figure 10. Corrélogramme Hs / Tp (a) et Hs / Dirp (b) (Données ANEMOC au niveau du point MEDIT_1655).

² Tp : Période de pic (s) ³ Dirp : Direction de pic (°)



¹ Hs : Hauteur significative des vagues (m)

2.2.1.3.2. CLIMATOLOGIE EXTREME DES ETATS DE MER AU LARGE

Les données du point ANEMOC MEDIT_2809 permettent de fournir les statistiques des houles extrêmes au large. Sa position est 4°3,198′ E / 43°6,750′N et il est situé à une profondeur de 97,90 m. Le Tableau 6 présente les statistiques de houles extrêmes calculées sur un échantillon d'environ 30 ans avec deux lois d'ajustement :

- GPD (Generalized Pareto Distribution) avec un seuil de 3,25 m soit 66 événements sélectionnés ;
- EXP (Exponentiel) avec un seuil de 3,25 m soit également 66 événements sélectionnés.

Tableau 6. Estimation des climats extrêmes des états de mer au large au point MEDIT_2809 (ANEMOC).

Période de retour	l'intervalle de	érieure de confiance à 70 ₀ (en m)	Estimation	H _{m0} (en m)	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70 % de H _{m0} (en m)			
	GPD	EXP	GPD	EXP	GPD	EXP		
1 an	3,50	3,55	3,58	3,62	3,65	3,70		
10 ans	4,53	4,52	4,86	4,71	5,18	4,91		
30 ans	5,04	4,97	5,69	5,23	6,33	5,49		
50 ans	5,27	5,18	6,14	5,47	7,00	5,76		
100 ans	5,55	5,47	6,82	5,80	8,08	6,13		

En compléments des données ANEMOC, les données de l'houlographe de Sète sont disponibles. Il est localisé à 30 m de profondeur aux coordonnées suivantes : 3°46,777′E / 43°22,261′N. Le Tableau 7 présente les statistiques de houles extrêmes calculées sur un échantillon d'environ 12,87 ans avec deux lois d'ajustement :

- GPD (Generalized Pareto Distribution) avec un seuil de 2,75 m soit 75 événements sélectionnés ;
- EXP (Exponentiel) avec un seuil de 3,25 m soit 39 événements sélectionnés.

Tableau 7. Estimation des climats extrêmes des états de mer à l'houlographe de Sète (CANDHIS).

Période de retour		érieure de confiance à 70 ₇₃ (en m)	Estimation	H _{1/3} (en m)	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70 % de H _{1/3} (en m)			
	GPD	EXP	GPD	EXP	GPD	EXP		
1 an	4,04	3,96	4,19	4,15	4,34	4,34		
10 ans	4,91	5,31	5,21	5,74	5,50	6,17		
30 ans	5,10	5,95	5,53	6,50	5,95	7,06		
50 ans	5,16	6,25	5,65	6,86	6,13	7,47		

Les extrêmes définis au niveau de la bouée sont globalement plus forts que ceux estimés à partir de la modélisation. Cette différence peut être due à plusieurs facteurs tels que :

- La localisation et la profondeur sont différentes ;
- Le pas de calcul ou d'extraction des données dans le modèle peuvent expliquer une mauvaise prise en considération des pics de tempête ;
- La durée de l'échantillon au niveau de la bouée est faible ce qui rend moins fiable la définition des conditions extrêmes.

Pour la suite des études, la borne supérieure de l'intervalle de confiance de la loi GPD appliquée à la base de données ANEMOC sera retenue. Ce choix permet de prendre en considération une possible sous-estimation des valeurs issues de la modélisation.



2.2.2. Modélisation de la propagation des houles à la côte et génération des courants

2.2.2.1. Code de calcul

Les états de mer sont propagés jusqu'à la côte grâce au couplage des codes de calcul TELEMAC 2D et TOMAWAC faisant partie de la suite de logiciels Telemac-Mascaret de © EDF.

TELEMAC-2D résout les équations de Saint-Venant régissant les écoulements bidimensionnels à surface libre. La méthode des éléments finis sur laquelle repose TELEMAC, associée à un maillage de calcul constitué de facettes triangulaires de tailles et de formes variables, permet un découpage adapté de la topographie et donc la prise en compte des géométries complexes de la zone d'étude. Elle autorise de densifier le maillage et donc d'affiner les résultats fournis par le modèle dans les zones d'intérêt (par exemple au droit des ouvrages et des zones sensibles).

Afin de prendre en compte le phénomène de houle, le code de calcul TELEMAC-2D utilisé est couplé avec celui de TOMAWAC. Ce logiciel de modélisation des états de mer 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. Ce couplage de code de calcul permet la prise en compte d'un grand nombre de phénomènes physiques comme la marée astronomique, le déferlement, le moutonnement ou la dissipation par frottement sur le fond de la houle.

2.2.2.2. Emprise, maillage et données topo-bathymétrique

L'emprise du modèle correspond au golfe d'Aigues-Mortes allant jusqu'à une profondeur de - 35 m NGF. L'emprise du modèle permet d'inclure la pointe de l'Espiguette qui a une influence sur la réfraction des houles notamment celles de provenance Sud-Est.

Différentes sources de données topo-bathymétriques ont été utilisées pour constituer le Modèle Numérique de Terrain :

- Bathymétrie générale réalisée dans le cadre du projet HOMONIM. Elle couvre l'intégralité de la façade métropolitaine méditerranée avec une grille de résolution de l'ordre de 100 m;
- LiDAR 2015 pour la plage et les petits fonds.

Le maillage (Figure 11) se compose de 39 960 nœuds de calcul et de 79 060 éléments triangulaires. La dimension des mailles est de 250 m au large et de 10 m à la côte.

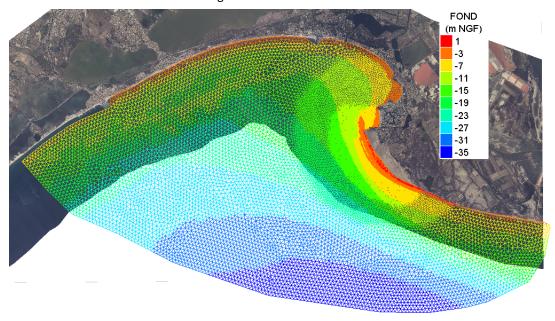


Figure 11. Emprise et maillage du modèle TELEMAC-2D - TOMAWAC.



2.2.2.3. Données de marée et de houle

Les conditions maritimes (niveaux d'eau et houle) sont imposées sur la frontière ouverte en mer. Les données de marée sont issues du modèle de prévision de marée TPXO. Pour chaque calcul, un cycle complet de marée est considéré.

Les houles entrées dans le modèle sont caractérisées par les paramètres réduits suivants :

■ H_{m0} (m): Hauteur de houle significative ;

TP (s): Période de pic de la houle;

Dir (°N): Direction de provenance principale de la houle.

Dans le cadre de ce projet, les 9 cas de houle suivants ont été propagés à la côte.

Tableau 8. Cas de calcul pour la propagation de la houle à la côte

Cas n°	H _{m0} (m)	T _p (s)	Dir (°N)
1	0,5	5	135
2	0,5	5	180
3	0,5	5	225
4	1,5	6	135
5	1,5	6	180
6	1,5	6	225
7	2,5	8	135
8	2,5	8	180
9	2,5	8	225

2.2.2.4. Résultats (houle et courants côtiers)

La mise en œuvre du couplage des 2 codes de calcul TELEMAC 2D et TOMAWAC permet d'obtenir des résultats concernant les hauteurs de houle ainsi que les courants.

Les résultats concernant la hauteur de houle sont les suivants :

- Les houles de Sud-Est arrivent très atténuées et tournent en arrivant à la côte ;
- Les houles de Sud sont légèrement atténuées du fait de l'orientation de la côte ;
- Les houles de Sud-Ouest arrivent frontalement à la côte et sont également peu-atténuées ;
- La flèche sableuse du fait des faibles profondeurs entraine un déferlement des houles ;
- Pour des houles classiques (Sud et Sud-Est), la digue entraine une diffraction des houles qui sont alors fortement atténuées en fond de baie.



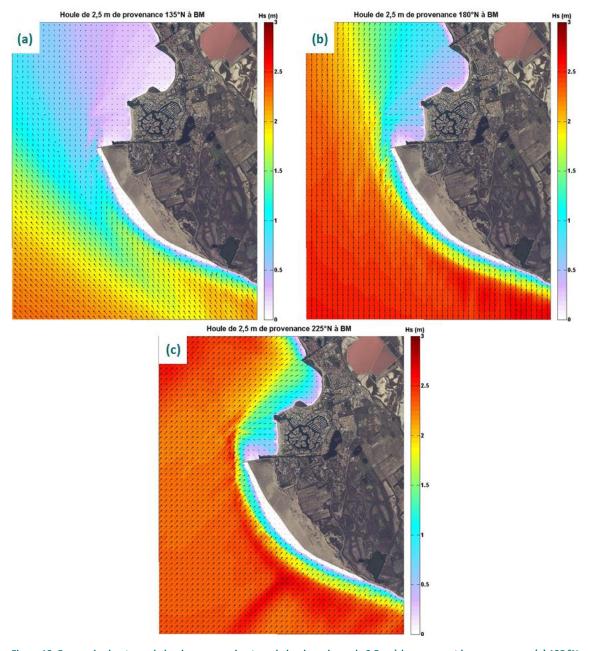


Figure 12. Epures des hauteurs de houle pour une hauteur de houle au large de 2,5 m à basse mer et les provenances (a) 135 °N (b) 180°N et (c) 225 °N.

Les résultats concernant les courants sont les suivants :

- Les vitesses des courants restent inférieures ou égales à 1 m/s, quelles que soient les conditions de houle au large;
- Les courants les plus forts sont observés sur les différentes zones de déferlement au large de la plage de l'Espiguette et sur la flèche sableuse ;
- La direction de la houle, au large, influence fortement l'intensité et le cheminement des courants :
 - o Pour la provenance 135 °N, les circulations sont Est-Ouest et Sud-Nord le long de la plage avec des vitesses maximales de l'ordre de 1 m/s pour une hauteur de houle au large de 2,5 m;



- Pour la provenance 180 °N, les circulations le long de la plage sont également Est-Ouest et Sud-Nord avec des vitesses de l'ordre de 1 m/s dans la zone de déferlement pour une hauteur de houle au large de 2,5 m;
- o Pour la provenance 225 °N, un courant Ouest-Est est observé au droit de la plage au niveau de l'étang des Baronnets alors que le courant est Sud-Nord au droit de la plage de l'Espiguette. Les vitesses les plus fortes sont observées pour une houle de 2,5 m au niveau de la digue et de la flèche sableuse avec des valeurs de l'ordre de 1 m/s.

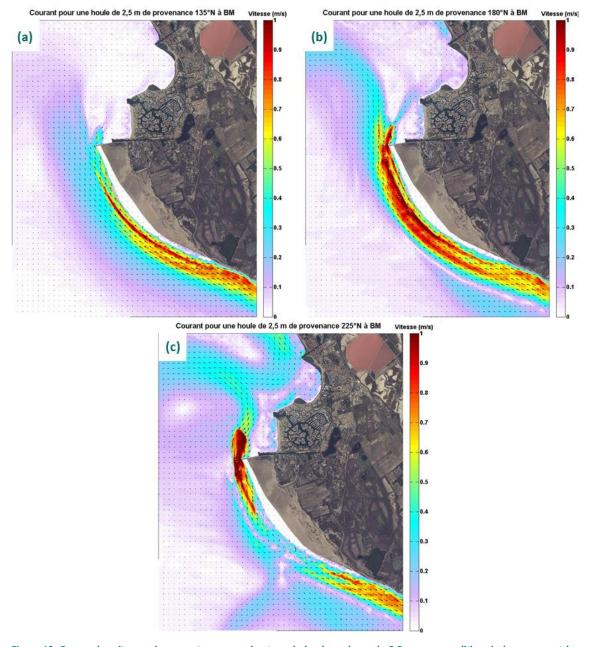


Figure 13. Epures des vitesses de courant pour une hauteur de houle au large de 2,5 m, une condition de basse mer et les provenances (a) 135 °N (b) 180°N et (c) 225 °N.

Les résultats du modèle mettent en évidence des zones de calme où les faibles courants et hauteurs significatives sont favorables à une accumulation sédimentaire :

- En arrière de la flèche de l'Espiguette (à l'Est);
- Sur l'ensemble de la baie au droit du Grau du Roi entre le grau et la flèche de l'Espiguette, sauf dans le cas d'un scénario avec une houle de provenance 225°N.



2.2.3. Transport sédimentaire longitudinal

2.2.3.1. Préambule

Le Transport Sédimentaire Longitudinal (TSL) est un processus connu et étudié depuis la fin du 19ème siècle. Différentes études se sont penchées sur le transport sédimentaire au niveau du littoral d'Occitanie dont les résultats sont schématisés en Figure 14.

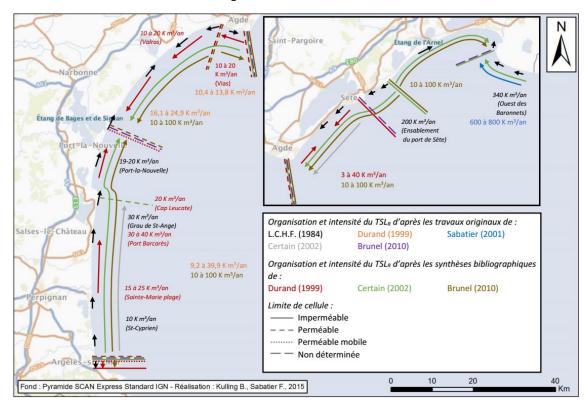


Figure 14 : Schéma de synthèse de l'organisation et de l'intensité du transport longitudinal en Languedoc-Roussillon, d'après les travaux originaux et les synthèses bibliographiques de différents auteurs (Kulling B., Sabatier F., 2015).

Des travaux récents dans le cadre de la thèse sur la « Déformation du rivage et dérive littorale des plages du Golfe du Lion » par Benjamin Kulling (2017) ont contribué à actualiser le potentiel de transport sédimentaire du littoral (TSL) sur la Région Occitanie. Une répartition spatiale du potentiel de TSL Résultant (TSL_R) annuel a été évaluée à l'aide d'un modèle d'ingénierie côtière et représentée sous forme d'Atlas cartographique (Kulling B. & Sabatier F., 2015.). Ces travaux ont été réalisés en partenariat avec la DREAL Occitanie, l'Université Aix-Marseille, Le CEREGE, le CNRS et le réseau GLADYS.

2.2.3.2. Méthodologie mise en œuvre dans l'étude Kulling et Sabatier, 2015

La méthodologie mise en œuvre est décrite dans le rapport de Modélisation du potentiel de transport sédimentaire longitudinal résultant annuel de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon (Kulling et Sabatier, 2015). Les résultats ont été calculés à partir du modèle numérique Unibest-CL+ (Uniform Beach Sediment Transport) édité par la société hollandaise Deltare. Seul le premier module, Unibest-LT (Longshore Transport), de la suite logicielle Unibest-CL+ a été utilisé.

Les étapes présentées ci-après ont été suivies pour le calcul :

- Réalisation de profils topo bathymétriques perpendiculaires au rivage ;
- Application de climats de houle et propagation depuis le large jusqu'au rivage (Figure 15);



- Prise en compte des principaux processus affectant la houle (réfraction induite par le fond, friction sur le fond, gonflement et déferlement) et calcul de valeurs significatives moyennées sur la hauteur d'eau pour chaque nœud du modèle 1D (hauteur significative de la houle, intensité et direction du courant);
- Combinaison de ces valeurs aux caractéristiques granulométriques de la zone de déferlement permettant d'appliquer un modèle de transport sédimentaire et d'interaction vague-courant ;
- Estimation de la valeur de potentiel de TSLR annuel.

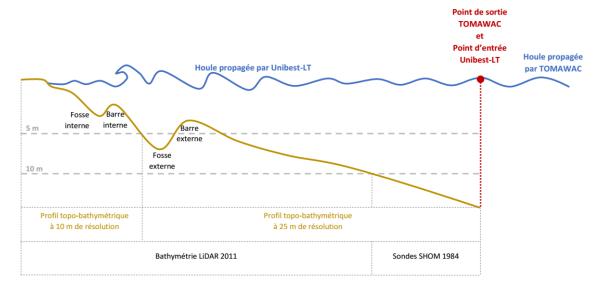


Figure 15 : Schéma du fonctionnement d'Unibest-LT détaillant les données en entrée du modèle (climat de houle et profil de plage).

A la suite de l'estimation du TSL_R annuel, des tests de sensibilité ont été réalisés. Ils ont permis de caractériser le poids et la robustesse de chaque paramètre du modèle dans les calculs numériques.

Puis, une étape de calibration a été réalisée afin de paramétrer finement le modèle afin que les résultats obtenus soient proches des mesures réalisées *in situ*. La calibration du modèle menée par le CEREGE a permis d'identifier une configuration permettant de reproduire les volumes cibles avec des écarts inférieurs ou égaux à 10 %.

Les mesures expérimentales ont été issues des données de topo bathymétriques de la zone d'accumulation sédimentaire de la flèche de l'Espiguette.

Les calculs de différentiel sédimentaire entre 1984 et 2011 au niveau de la Flèche de l'Espiguette ont aboutis aux résultats d'accumulation sédimentaire annuelle suivants (Figure 16 et Figure 17) :

- Sur la zone étudiée : 730 K m³/an (± 260 K m³/an) ;
- Au Sud de la digue d'arrêt des sables : 570 K m³/an (± 210 K m³/an) ;
- Au Nord de la digue d'arrêt des sables : 160 K m³/an (± 50 K m³/an).



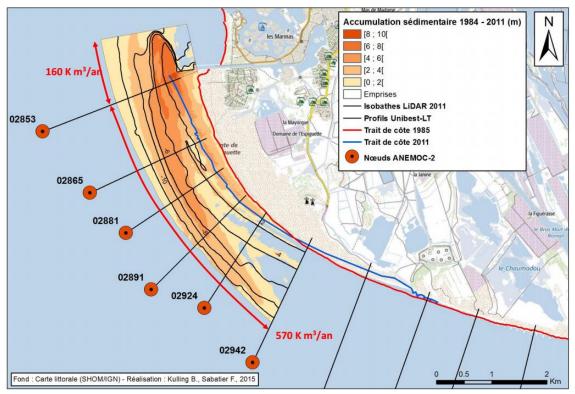


Figure 16 : Accumulation sédimentaire à la pointe de l'Espiguette déterminée à partir du différentiel bathymétrique entre le LiDAR de 2011 et les sondes de 1984.

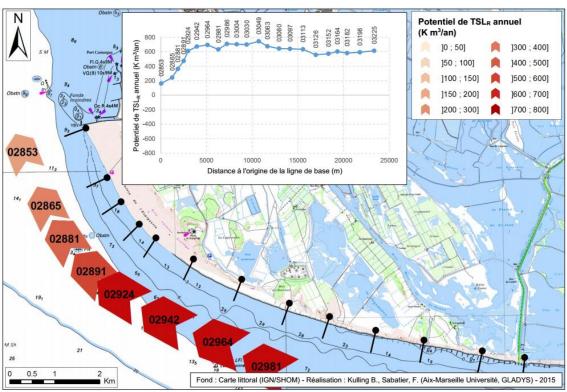


Figure 17: Atlas du TSL, en Languedoc Roussillon (Modélisation du TSL, DREAL Kulling et Sabatier, 2015).



2.3. EVOLUTION SEDIMENTAIRE A PROXIMITE DE LA FLECHE DE L'ESPIGUETTE

2.3.1. Origines et évolutions historiques de la flèche

La flèche sédimentaire sous-marine de l'Espiguette est située au Nord-Ouest immédiat de l'extrémité de la digue portant le même nom et au Sud-Ouest de l'entrée du port de Port-Camargue.

La formation de cette flèche est la résultante des transits sableux naturels orientés d'Est en Ouest sur cette zone et du blocage opéré par la digue. Historiquement, la zone de la pointe de l'Espiguette, alors sans aucun aménagement, était caractérisée par la présence continue et successive de flèches sédimentaires (ou crochons) émergeantes (Figure 18a).

La création de Port-Camargue a nécessité la réalisation de digues de manière à bloquer les transports sableux et sécuriser l'entrée du port (Figure 18b et c).

Une fois la saturation de la plage contre la digue atteinte (Figure 18e), les sables ont contourné son musoir pour venir progressivement développer une flèche sédimentaire sous-marine (Figure 18f).

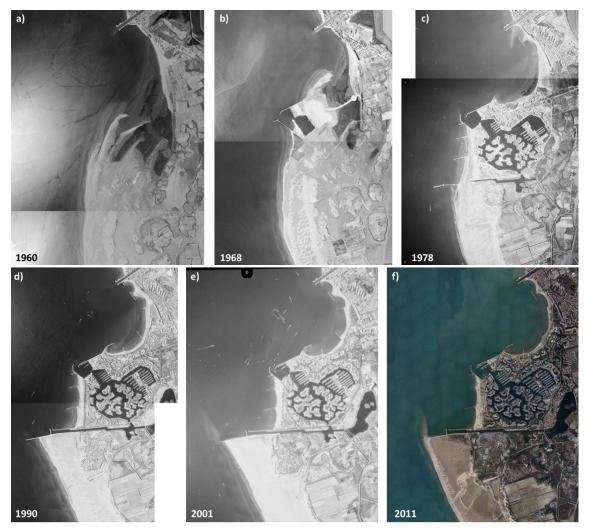


Figure 18. Crochons sableux naturels au niveau de l'actuelle flèche sous-marine de l'Espiguette et de Port-Camargue (IGN, 1960).

La flèche de l'Espiguette a commencé à émerger autour de 2010, à proximité de la digue. Aujourd'hui la flèche est émergée sur plus de 300m linéaires (Figure 19).





Figure 19 : Partie émergée de la flèche de l'Espiguette (2019)

L'évolution de la largeur de plage au Sud de la digue d'arrêt des sables (Figure 20) est un bon indicateur des impacts des aménagements anthropiques sur le fonctionnement hydrosédimentaire du site :

- Avant la fin des années 60, la plage évolue à une vitesse d'environ 8 m/an. Cette période correspond à l'évolution naturelle du site avant les aménagements de Port-Camargue.
- A partir de la fin des années 60 jusqu'au milieu des années 90, l'élargissement de la plage s'accélère drastiquement (41 m/an). Le début de cette phase concorde avec la création de la première digue liée à l'aménagement de Port-Camargue (digue d'entrée du port actuelle) visible en 1968 (Figure 18a).
- A partir de la fin des années 90, la vitesse d'élargissement de la plage ralentie fortement (41 m/an) pour atteindre l'extrémité de la digue et ne plus évoluer depuis 2010 environ. L'accumulation sédimentaire sous-marine à l'aval de l'ouvrage s'intensifie pendant cette période (Figure 18e) et le banc de sable émerge depuis une dizaine d'année.

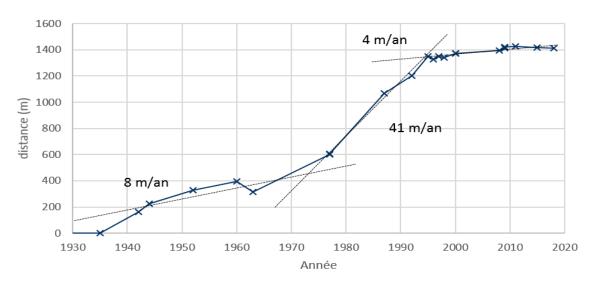


Figure 20 : Evolution de la largeur de plage au Sud de la digue d'arrêt des sables depuis 1935.



L'analyse de l'évolution récente des fonds est réalisée sur la base des données disponible (Figure 21) :

- Litto3D (source SHOM) de 2009, 2011 et 2015 (réalisé post prélèvements) ;
- Bathymétrie de 2018 (source DREAL Occitanie).

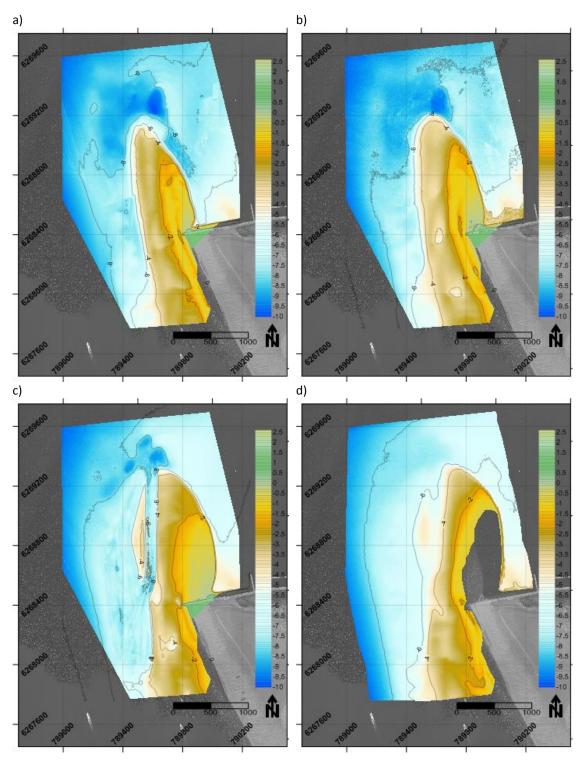


Figure 21 : Carte du Lidar de 2009 [a], 2011 [b], 2015 [c] (sources SHOM) et bathymétrie de 2018 [d] (source DREAL Occitanie)

À la suite du prélèvement massif de 2015 (Figure 21c), un comblement progressif de la zone d'extraction s'observe en 2018 (Figure 21d), témoin d'une bonne résilience du site.



Afin de quantifier l'évolution du stock sédimentaire sur la flèche de l'Espiguette, des différentiels bathymétriques ont été calculés à partir des données 2009, 2011, 2015 et 2018.

Entre 2009 et 2018 (Figure 22), une accrétion moyenne de 142 000 m³/an est observée (Tableau 9).

Le volume net de sable est excédentaire quelle que soit la période considérée et hors prise en compte dans le calcul des volumes prélevés.

D'une manière générale, l'accumulation de la flèche tend à augmenter la surface de la partie émergée et à engraisser la partie Est du flanc.

La zone sans donnée de la Figure 22 correspond à la surface émergée en 2018 non inclue dans la bathymétrie. Elle représente une surface d'environ 4 500 m².

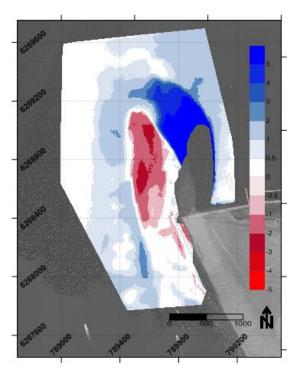


Figure 22 : Différences des bathymétries entre 2018 et 2009

Tableau 9 : Représentation des volumes positifs, négatifs et nets (en m³) de chaque différence bathymétrique étudiée hors prise en compte des volumes prélevés.

Volumes (m³)	Volume Positif	Volume Négatif	Volume Net (m³)	Net annuel (m³/an)
2011-2009	+ 657 714	- 200 576	+ 457 138	+ 152 379
2015-2011	+ 1 183 973	- 694 510	+ 489 463	+ 97 893
2018-2015	+ 1 039 251	- 69 724	+ 969 526	+ 242 382
Global 2018-2009	+ 1 682 832	- 263 153	+ 1 419 678	+ 141 968

La flèche sous-marine a été régulièrement draguée afin de procéder à des opérations majeures de rechargement des plages littorales. L'historique des prélèvements est présenté ci-après :

- 2008: 1 070 000 m³ pour le rechargement des plages de la Baie d'Aigues Mortes (Palavas : 300 000 m³ / Carnon Est : 205 000 m³ / Petit et Grand Travers : 410 000 m³ / Boucanet : 155 000 m³);
- Fin 2014 : 350 000 m³ pour le rechargement du Lido de Sète ;
- Avril 2015 : 221 150 m³ pour la tranche 1 du rechargement du Lido de Frontignan ;
- 2019-2020 : 200 000 m³ pour la tranche 2 du rechargement du Lido de Frontignan.

Le volume total prélevé depuis 2008 correspond à 1,8 M m³.

En considérant le volume prélevé entre 2009 et 2018, soit 571 000 m³, le volume net annuel sur cette période est proche de + 200 000m³/an, ce qui corrobore les calculs de flux sédimentaire de Kulling et Sabatier (2015) sur le secteur.



2.3.2. Budget sédimentaire global entre 2009 et 2015

Dans la première phase de l'étude du Plan de Gestion des Sédiments à l'échelle de la Région Occitanie, une actualisation de l'Atlas de l'évolution morpho-sédimentaire et du budget sédimentaire a été réalisée entre 2009 et 2015.

La zone de calcul prend en compte l'évolution du volume de sable entre le pied de dune et la profondeur de fermeture (-10 m NGF). Le budget sédimentaire à proximité de Port Camargue (Figure 23) met en évidence une accumulation de sable de part et d'autre de la digue d'arrêt des sables :

- Au Nord de la digue d'arrêt des sables (Z39-SZ01) (cette zone inclue la Flèche de l'Espiguette) : l'accumulation de sable est proche de 800 000 m³. Ce volume représente une accumulation annuelle de près de 130 000 m³/an sur l'ensemble de cette sous zone. Cette valeur est calculée à partir des données brutes et ne tient pas compte des différents prélèvements réalisés ;
- Au Sud de la digue d'arrêt des sables (Z39-SZ02 et Z39-SZ03) : l'accumulation de sable est proche d'un total de 350 000 m³, soit environ 58 000 m³/an.

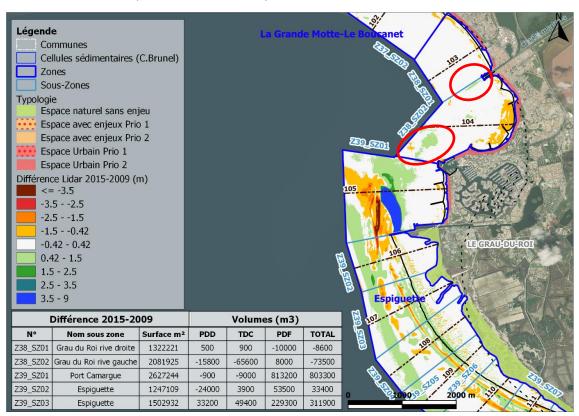


Figure 23 : Atlas du budget sédimentaire 2009-2015 à proximité de la Flèche de l'Espiguette (PGS Occitanie, CASAGEC 2020).

On note également la présence de deux lentilles d'accumulation sédimentaires sur la carte de différence entre les années 2015 et 2009 (polygones rouges sur la Figure 23) :

- Au droit du grau du Roi : l'accumulation sableuse avoisine les 10 000 m³. Au regard des différentes bathymétries analysées, l'origine de cette accumulation semble provenir des apports sédimentaires du grau.
- Au droit de l'entrée du port : l'accumulation a été estimé à environ 70 000 m³ ce qui représente une élévation moyenne des fonds de 43 cm. Si cette accumulation semble traduire une dynamique d'ensablement du fond de baie, cette valeur est tout de même à mettre au regard des incertitudes de calculs (+/- 42 cm).



3. Enjeux environnementaux

La flèche de l'Espiguette et ses abords présentent des enjeux environnementaux forts. Une présentation de ces enjeux est réalisée ci-après en vue de les prendre en considération dans les phases de travaux et études réglementaires préalables à leur réalisation.

3.1. ZOOM SUR LA COLONIE D'HIPPOCAMPES SUR LA FLECHE DE L'ESPIGUETTE

La Flèche de l'Espiguette abrite, le long de la face intérieure du banc de sable et jusqu'à au moins 400 m de la digue, une colonie d'hippocampes sédentaires. Cette population, majoritairement composée d'hippocampes à museau court (*Hippocampus hippocampus*), espèce protégée au niveau international, a été suivie sur un cycle annuel en 2012-2013 par le Seaquarium du Grau du Roi et les associations Peau bleue et Stellaris. Elle a par ailleurs fait l'objet de suivis mensuels, entre mars et août 2014 puis entre février et octobre 2015, dans le cadre des études naturalistes menées lors des travaux de protection du Lido de Frontignan où les sables du gisement de l'Espiguette ont été utilisés pour le rechargement des plages.



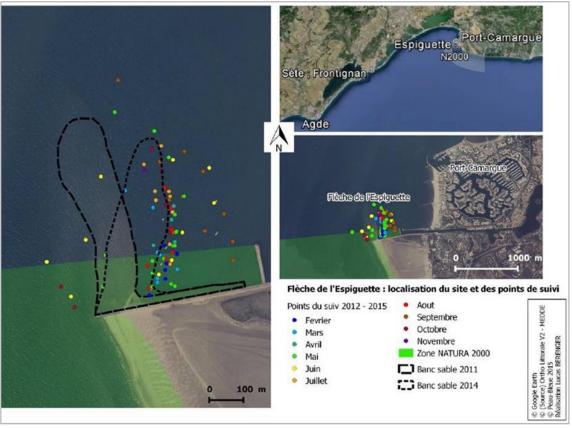


Figure 24 : Localisation des points de suivi des Syngnathidés entre 2012 et 2015 sur la flèche de l'Espiguette (ASCONIT/ARTELIA, 2018).

Ces études ont permis de décrire une certaine saisonnalité de la population. Les premiers résultats signalaient une population dense, localisée et sédentaire. Ils soulignaient la présence de :

- Adultes toute l'année ;
- Mâles gravides en fin de printemps et été ;
- Très jeunes individus (à partir de 3 cm) dès la fin de l'été sur la zone.



Les suivis mis en œuvre dans le cadre des travaux de protection du Lido de Frontignan, ont quant à eux mis en avant une chute des densités en lien avec un phénomène d'envasement progressif du site en début d'été d'origine biogénique locale.

Au regard de ces éléments de connaissances naturalistes, il apparait néanmoins que la présence de cette espèce protégée au niveau du gisement exploitable de l'Espiguette devra nécessairement être prise en considération lors de la définition des modalités techniques d'extraction. A l'instar des travaux d'extraction menés pour la seconde tranche de l'opération de protection du Lido de Frontignan, ce compartiment faunistique devra faire l'objet de mesure d'évitement voire de réduction ou de compensation.

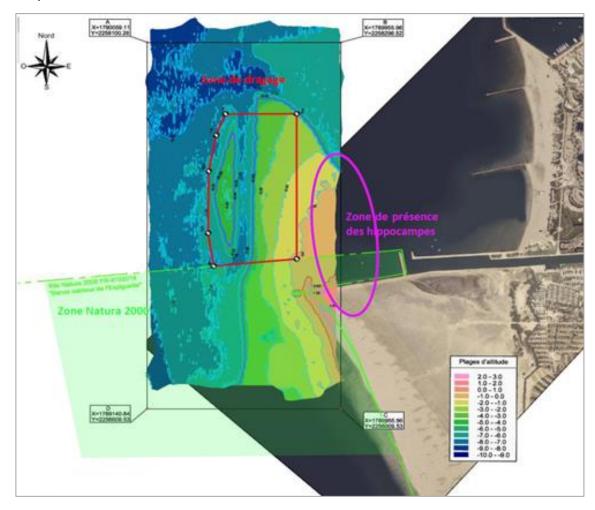


Figure 25 : Zone de dragage exploitée dans le cadre de la seconde tranche des travaux de protection du Lido de Frontignan (ASCONIT/ARTELIA, 2018).



3.2. AUTRES COMPARTIMENTS BIOLOGIQUES A ENJEUX FORTS SUR LE LITTORAL D'OCCITANIE

Au regard des retours d'expériences des opérations antérieures d'aménagements, d'autres compartiments floristiques et faunistiques à enjeux sont présents sur les plages du littoral d'Occitanie. De prime abord et sans que la liste ne soit exhaustive, peuvent être cités :

- Sur les petits fonds :
 - o Herbiers de posidonies ;
 - o Habitat rocheux à algues photophiles ;
 - Grandes nacres.
- Du haut de plage à la crète de dune :
 - Flore protégée ;
 - Avifaune et notamment les espèces nicheuses comme le Gravelot à Collier Interrompu ou la Sterne naine;
 - Herpétofaune et notamment le Psammodrome d'Edwards ;
 - o Entomofaune et notamment les orthoptères tels que le Criquet des dunes.



Figure 26 : Espèces à enjeux forts présentent sur le littoral Méditerranée au niveau des petits fonds et sur le littoral sableux.



3.3. Protections patrimoniales - Reseau NATURA 2000

Outre la présence des hippocampes, le gisement de l'Espiguette se situe pour partie au sein de la Zone Spéciale de Conservation « FR9102014-Bancs sableux de l'Espiguette ». Le périmètre de ce site (Figure 27) englobe l'ensemble de la dune hydraulique immergée de l'Espiguette. Il se limite au Nord à la Digue de l'Espiguette et à l'entrée de Port-Camargue ; à l'Est, à la limite géographique de la Région LR ; en amont, à la laisse de haute mer ; et en aval, au pied de dune.

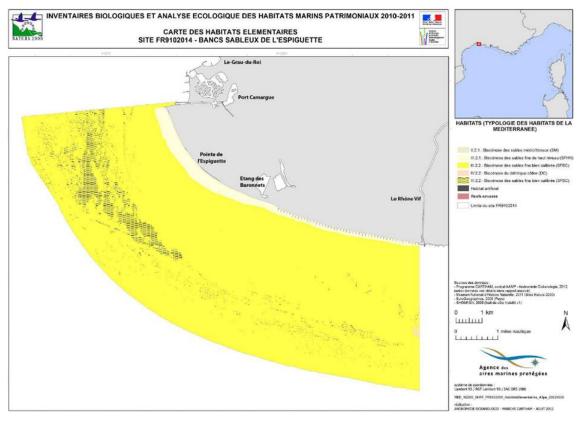


Figure 27 : Carte des habitats élémentaires du site « FR9102014-Bancs sableux de l'Espiguette » (PNR Camargue, 2013).

Ce site a été proposé à l'inscription au réseau Natura 2000 au titre de l'Habitat « 1110 - Bancs de sable à faible couverture d'eau marine » qui couvre 98,8 % de sa superficie. On retrouve ainsi sur ce site différents faciès de cet habitat : les sables fins de haut niveau (1110-5) et les sables bien calibrés (1110-6). Les pêcheurs connaissent depuis longtemps la richesse biologique de ces habitats et y concentrent d'ailleurs une importante partie de leur exploitation. Ce site est sans doute l'un des plus intéressant de Méditerranée pour cet habitat, avec le site voisin de la pointe de Beauduc en région PACA.

Les principales sources de vulnérabilité de cet espace, fléchées au DOCOB, sont la forte fréquentation touristique et de loisirs, l'importante activité de pêche côtière aux arts traînants et l'exploitation des sables sous-marins en vue des rechargements de plage.



4. SCENARIOS DE GESTION

La synthèse sur le fonctionnement sédimentaire à proximité de la Flèche de l'Espiguette met en évidence une augmentation du volume de la flèche et un transport sédimentaire latéral positif de part et d'autre de la digue d'arrêt des sables. Cet apport de sable engendre des problématiques d'ensablement sur le secteur de port Camargue et la flèche constitue un gisement opérationnel en vue de recharger les plages déficitaires identifiées dans le cadre du PGS. Il est proposé d'étudier ici différents scénarios en vue de trouver une solution cohérente au regard des problématiques, du fonctionnement hydrosédimentaire et des contraintes environnementales.

4.1. Presentation des scenarios

Parmi les scénarios proposés (Figure 28), les scénarios 1 à 3 reposent sur des prélèvements de sédiment (Tableau 10) et le scénario 4 s'appuie sur la construction d'un ouvrage en dur :

- Scénario 1 : Dragage intégral de la flèche (volume équivalent à 2,5 Mm³) ;
- Scénario 2 : Dragage partiel de la flèche sur son flanc Ouest (volume équivalent à 1,4 Mm³);
- Scénario 3 : Prélèvement d'avant côte au Sud de la digue (volume équivalent à 2,5 Mm³) ;
- Scénario 4 : Prolongement de la digue d'arrêt des sables (allongement d'environ 200 ml).

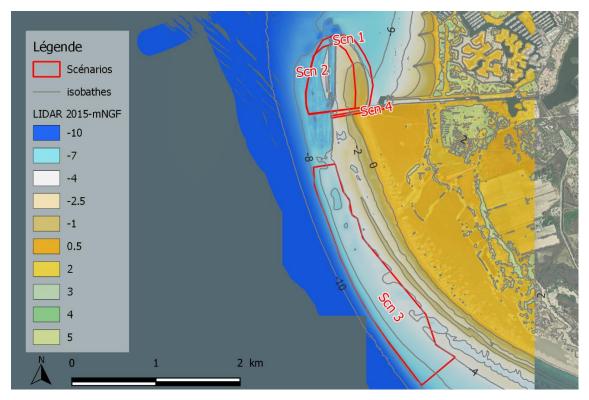


Figure 28 : Localisation des scénarios étudiés.

Tableau 10 : Synthèse des caractéristiques principales des scénarios de prélèvements en sable (scénarios 1 à 3).

Scénario	Volume de dragage potentiel (Mm3)	Surface (Ha)	rface (Ha) Epaisseur moyenne (m)	
Scn 1	2,5	59	4,3	
Scn 2	1,4	40	3,5	
Scn 3	2,5	120	2,1	



4.1.1. Scénario 1 : Dragage intégral de la flèche

Description :

Ce scénario prévoit le dragage de l'ensemble de la Flèche de l'Espiguette (Figure 28).

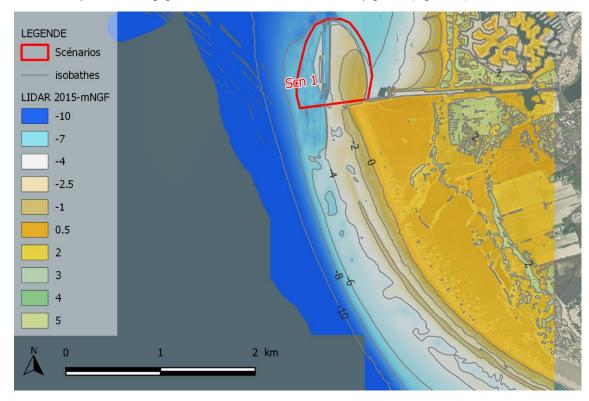


Figure 29 : Localisation du scénario 1.

Caractéristiques techniques :

La zone de dragage s'étendrait sur 850 m de long et environ 750 m de large sur une surface proche de 60 ha au-dessus de la cote -8 m NGF (en raison des caractéristiques granulométriques). Le volume dragué atteindrait environ 2,5 Mm³.

Résultats issus des modélisations si ce scénario était mis en œuvre :

- o Diminution de la réfraction de la houle au niveau de la flèche (Figure 30) qui engendre une augmentation (rouge) des hauteurs de houle en fond de baie au Nord de Port Camargue et une diminution (bleu) des hauteurs de houle au niveau de Port Camargue (Figure 31);
- Diminution significative du courant (bleu) localisée à l'emplacement de la flèche actuelle (Figure 33).

Conséquences envisageables :

- Le retrait de la flèche aura un impact temporaire sur le fonctionnement hydro-sédimentaire qui se rapprochera du fonctionnement passé avant le début de l'accumulation sédimentaire sousmarine. Cependant, le transit sédimentaire latéral est tel que la flèche se reformera naturellement.
- o Sur le point de vue environnemental, ce scénario aura un impact non négligeable sur les colonies d'hippocampes présentes principalement sur la partie Est de la flèche.



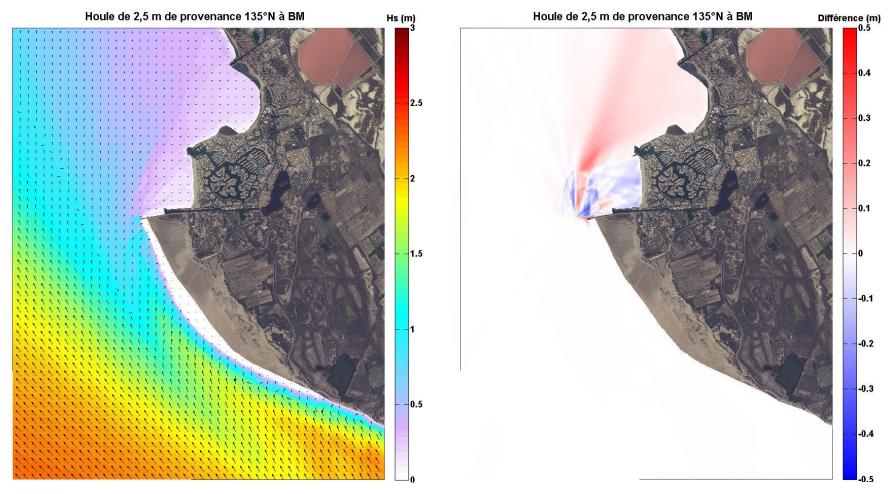


Figure 30 : Modélisation des hauteurs de houle du scénario 1.

Figure 31 : Différence des hauteurs de houle entre l'état actuel et le scénario 1.



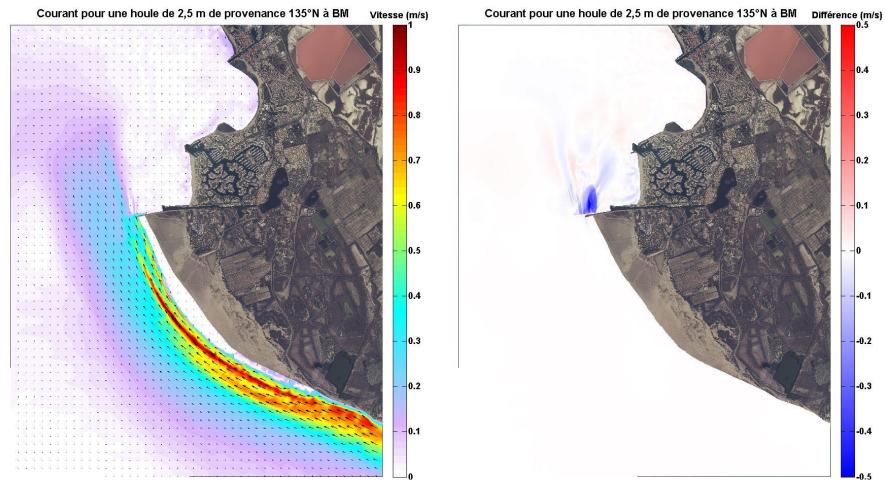


Figure 32 : Modélisation des courants du scénario 1.

Figure 33 : Différence des courants entre l'état actuel et le scénario 1.



4.1.2. Scénario 2 : Dragage partiel de la flèche

Description :

Ce scénario prévoit le dragage d'une partie de l'Espiguette (Figure 28), hors zone de présence des Hippocampes.

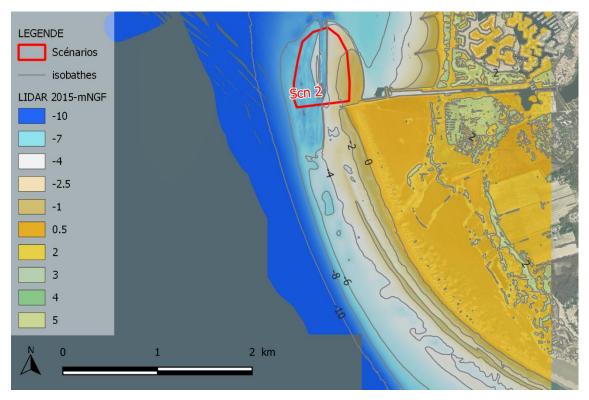


Figure 34 : Localisation du scénario 2.

Caractéristiques techniques :

En raison des contraintes granulométriques le sable serait dragué au-dessus de la côte - 8 m NGF. La zone de dragage s'étendrait sur 850 m de long et environ 550 m de large sur une surface proche de 40 ha.

Le volume de dragage potentiel est estimé à 1,4 Mm³.

Résultats issus des modélisations si ce scénario était mis en œuvre :

- Diminution de la réfraction de la houle au niveau de la flèche (Figure 35) qui engendre une augmentation peu significative (rouge clair) des hauteurs de houle en fond de baie au Nord de Port Camargue et une diminution peu significative (bleu clair) des hauteurs de houle au niveau de Port Camargue (Figure 36);
- o Diminution du courant (bleu) localisée à l'emplacement de la flèche actuelle (Figure 38).

Conséquences envisageables :

- o Le retrait de la flèche aura un impact négligeable sur le fonctionnement hydro-sédimentaire en fond de baie. Les conditions seront favorables à une accumulation de sable. La flèche continuera d'être alimentée par le transport sédimentaire marin et éolien.
- o Sur le point de vue environnemental, ce scénario aura un impact limité sur les hippocampes puisque la zone de dragage sera située hors zone de présence des colonies.



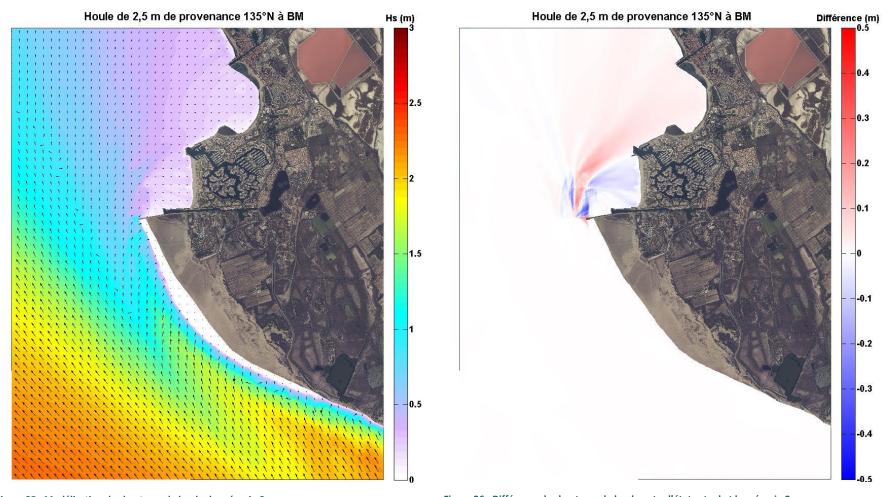


Figure 35 : Modélisation des hauteurs de houle du scénario 2.

Figure 36 : Différence des hauteurs de houle entre l'état actuel et le scénario 2.



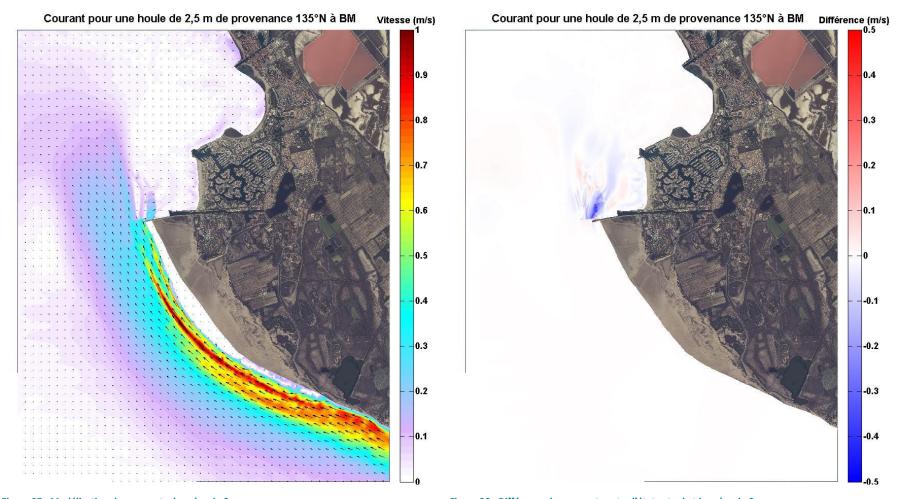


Figure 37 : Modélisation des courants du scénario 2.

Figure 38 : Différence des courants entre l'état actuel et le scénario 2.



4.1.3. Scénario 3 : Prélèvement d'avant côte

Description :

Ce scénario prévoit le dragage d'une partie de l'avant côte, au Sud de la digue d'arrêt des sables (Figure 28).

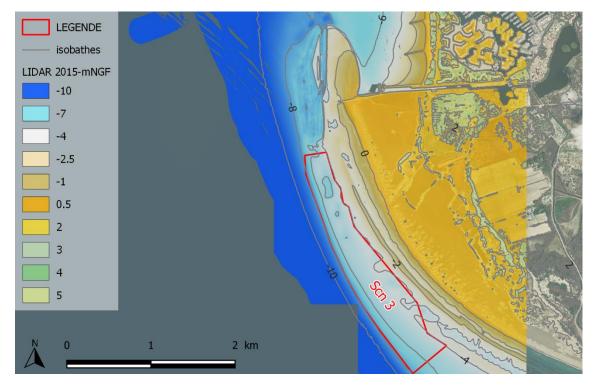


Figure 39 : Localisation du scénario 3.

■ Caractéristiques techniques :

Au regard de la morphologie de l'avant côte, la partie draguée pourrait se restreindre au-dessus de la cote - 8m NGF (Figure 40). Dans ces conditions un dragage de la zone sur 2 600 m linéaire permettrait d'atteindre un volume d'environ 2,5 Mm³.

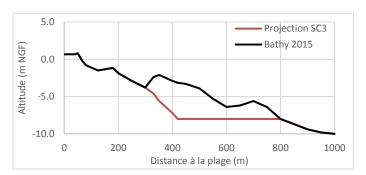


Figure 40 : Profil en travers simplifié au droit de la plage de l'Espiguette.

Résultats issus des modélisations si ce scénario était mis en œuvre :

- o Diminution de la réfraction de la houle (Figure 41) sur les petits fonds dont résulte une diminution des hauteurs de houle (bleu) dans la zone draguée (Figure 42) ;
- Augmentation de la propagation de la houle (Figure 41) dans la baie et augmentation minime (rouge clair) des hauteurs résiduelles (Figure 42);
- o Diminution légère (bleu) des courants au niveau de la zone de déferlement et le long de la flèche de l'Espiguette (Figure 43 et Figure 44).

Conséquences envisageables :

Le prélèvement de sédiment en avant côte pourrait diminuer temporairement la vitesse d'accumulation de la flèche sableuse.



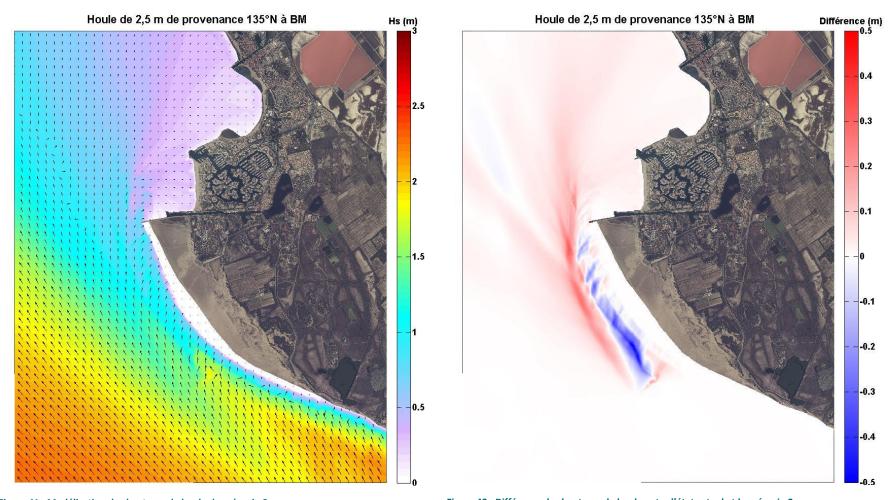


Figure 41 : Modélisation des hauteurs de houle du scénario 3.

Figure 42 : Différence des hauteurs de houle entre l'état actuel et le scénario 3.



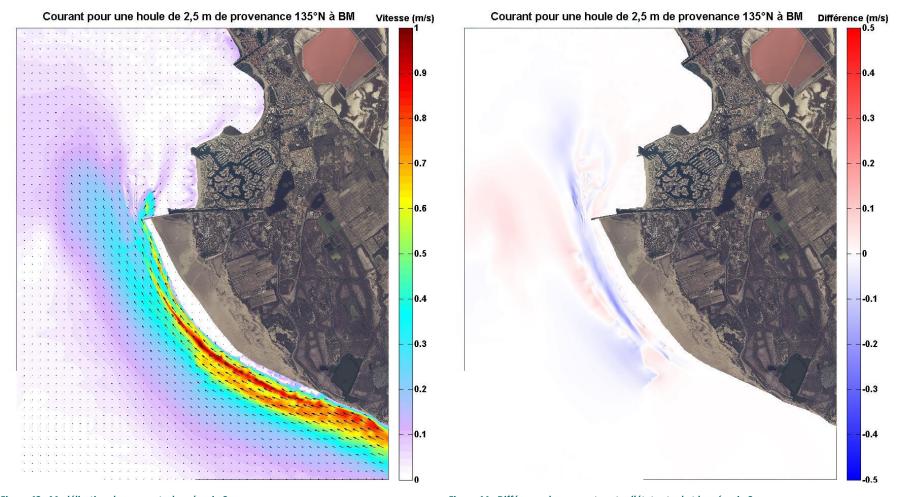


Figure 43 : Modélisation des courants du scénario 3.

Figure 44 : Différence des courants entre l'état actuel et le scénario 3.



4.1.4. Scénario 4 : Prolongement de la digue

Description :

Ce scénario envisage le rallongement de la digue d'arrêt des sables en vue de limiter le transit. L'objectif est de diminuer l'engraissement de la flèche et le comblement progressif de la baie et des accès aux ports de Port Camargue (Figure 45).

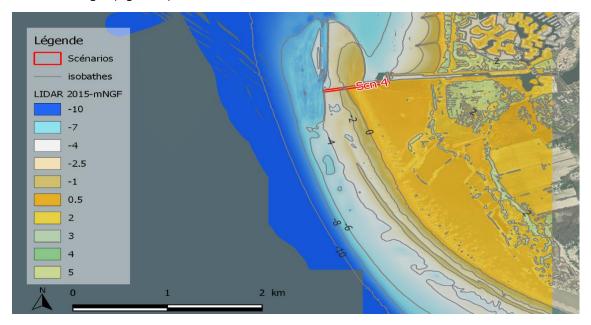


Figure 45 : Localisation du scénario 4.

■ Caractéristiques techniques :

Au regard de la morphologie de la digue actuelle et de la bathymétrie du fond à proximité, un prolongement jusqu'à la cote – 4 m NGF serait techniquement réalisable (Figure 46).

Il correspondrait à la réalisation d'une digue en enrochement d'un linéaire de 200 m, avec une pente de 2 pour 1 et une largeur de crête de 3,5 m (Figure 47). Un estimatif du coût de l'opération a été réalisé avec ces caractéristiques (Tableau 11). Le montant estimé correspond à un coût d'environ 1,4 M€.

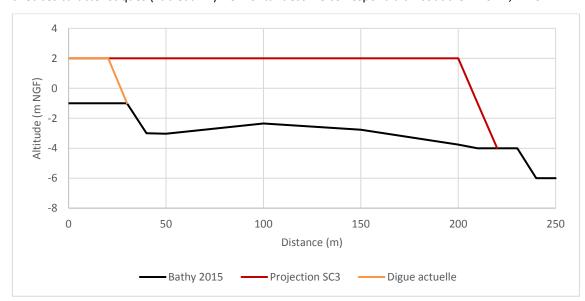


Figure 46 : Schématisation du profil en long de la digue projetée.



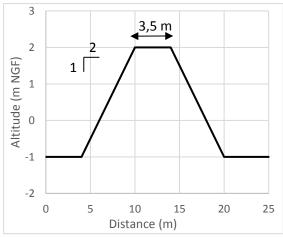


Figure 47 : Schématisation du profil en travers de la digue projetée.

Tableau 11 : Estimatif des coûts du scénario 4.

Détail	Unité	Valeur	
Crête	m NGF	2	
Pied	m NGF	-4	
Largeur crête	m	3.5	
Pente	H/V	2	
Volume matériaux	m³	93	
Prix/m3	€/m³	60	
Total 1	€HT	5580	
Etudes	10 %	558	
Frais généraux	15 %	837	
Total 2	€ HT/ml	7000	
Linéaire	m	200	
Total 32	€HT	1 395 000	

Résultats issus des modélisations si ce scénario était mis en œuvre :

- o Diminution significative (bleu foncé) des hauteurs de houle en aval de la digue (Figure 48 et Figure 49) ;
- Déviation par la digue du courant (Figure 50) qui engendre une diminution des vitesses (bleu) au Nord de l'ouvrage et une augmentation dans le sens du courant (rouge) vers le Nord-Ouest (Figure 51).

Conséquences envisageables :

Le prolongement de la digue aura pour conséquence une diminution temporaire du rechargement de la flèche de l'Espiguette et un élargissement rapide de la plage de l'Espiguette, probablement jusqu'à l'extrémité de l'ouvrage.

Une nouvelle flèche se reformerait très probablement à terme.



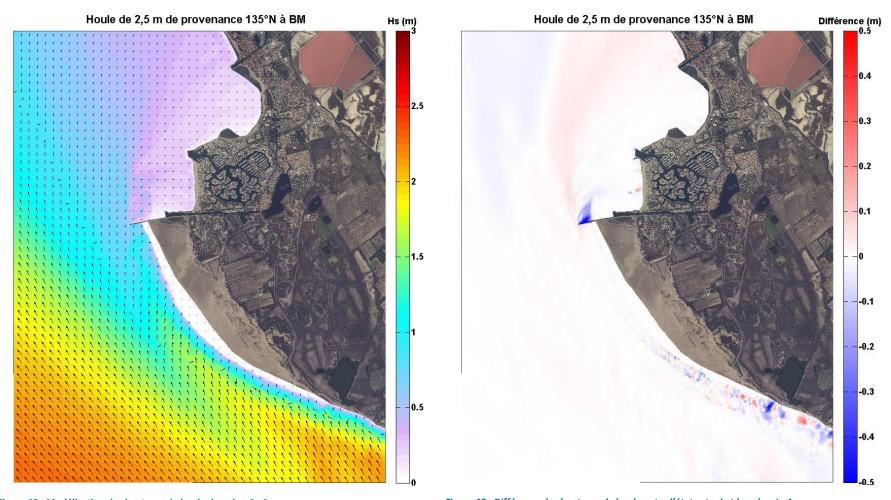


Figure 48 : Modélisation des hauteurs de houle du scénario 4.

Figure 49 : Différence des hauteurs de houle entre l'état actuel et le scénario 4.



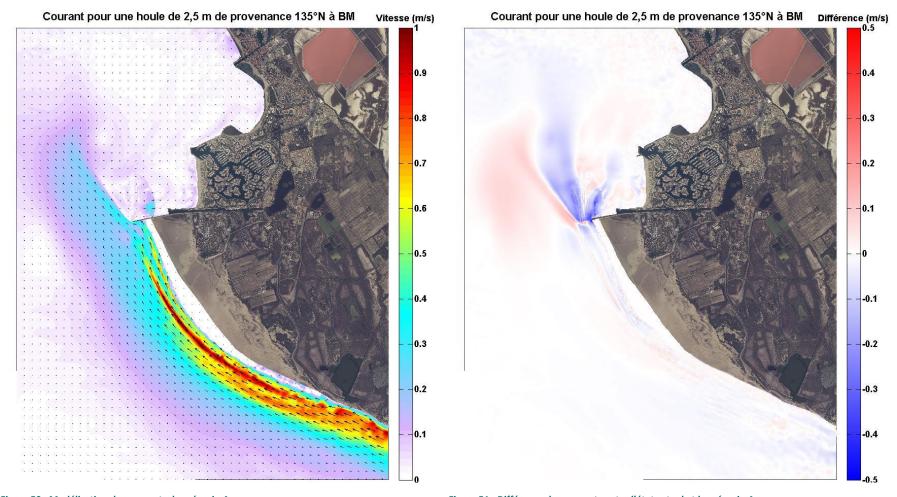


Figure 50 : Modélisation des courants du scénario 4.

Figure 51 : Différence des courants entre l'état actuel et le scénario 4.



4.2. COMPARAISON DES SCENARIOS

La comparaison des scénarios synthétisée dans le Tableau 12 met en évidence les points suivants :

- Scénario 1: le dragage du sable en application de ce scénario permettrait d'une part de freiner temporairement la problématique d'ensablement de la baie jusqu'à la création d'une nouvelle flèche sableuse. D'autre part le volume dragué pourrait répondre aux besoins en sédiments des plages identifiées en zone de rechargement prioritaires 1 et 2 dans le PGS jusqu'à la commune de Sète. En revanche, une destruction de l'habitat de l'hippocampe (espèce protégée) rendrait ce scénario difficilement envisageable ;
- Scénario 2 : ce scénario permettrait de draguer du sable pour correspondre à une partie des volumes de besoin en sédiments des plages identifiées en zone de rechargement prioritaires 1 et 2 dans le PGS jusqu'à la commune de Sète. Sur le plan hydrosédimentaire il permettrait de limiter sensiblement la problématique d'ensablement de la baie, tout de même dans une moindre mesure que le scénario 1. Par rapport à ce dernier, il n'y aurait pas de destruction d'habitat d'espèces protégées ;
- Scénario 3 : ce scénario permettrait de draguer une quantité relativement importante de sable sans impacter l'habitat de l'hippocampe au niveau de la flèche. Sur le plan hydrosédimentaire les dragages auraient pour effet d'augmenter de manière peu significative la hauteur de et de diminuer sensiblement les courants le long de la plage de l'Espiguette et de la flèche. La zone de dragage serait cependant située en zone Natura 2000 ;
- Scénario 4: la mise en œuvre de ce scénario aurait pour effet de dévier le courant et de créer une zone calme en aval de l'ouvrage. Le fond de baie serait mieux protégé des houles. En revanche, il aurait pour conséquences de décaler le problème actuel d'ensablement de la flèche et d'engraissement de la plage de l'Espiguette.
- Inaction: le scénario d'inaction ne peut pas être étudié en détail (cartographie, modélisation) en raison des difficultés de prévisions de l'évolution de la flèche sableuse. Dans le cas d'un fonctionnement similaire de la dynamique littorale, une projection de l'accumulation d'environ 200 000m³/an peut être envisagée. En 10 ans la zone aurait ainsi accumulé 2 millions de mètre cubes supplémentaires. Cette accumulation engendrerait probablement un développement important du lobe dans le prolongement de la flèche actuelle et un ensablement de la baie. Cette situation aurait pour conséquence une aggravation des problématiques d'ensablement du port de Port Camargue et de ses accès et pourrait également perturber l'écoulement hydraulique au niveau du grau.

Au regard des différentes caractéristiques techniques, hydrosédimentaires et réglementaires, il semblerait que la mise en œuvre du scénario 2 soit à privilégier. Ce dernier pourrait être éventuellement combiné avec le scénario 3 afin d'augmenter si nécessaire les volumes dragués en cohérence avec les volumes de besoin identifiés dans le PGS.



Tableau 12 : Synthèse des caractéristiques principales des scénarios étudiés.

Scénario	Description technique	Hydrodynamique	Dynamique morpho- sédimentaire	Environnement / Réglementaire	Compatibilité PGS
Scénario 1	Dragage intégral de la flèche de l'Espiguette au- dessus de la cote -8 m NGF. Volume de 2,5 Mm³.	Diminution du courant à l'emplacement de la flèche actuelle. Augmentation des hauteurs de houle en fond de Baie au Nord de Port Camargue.	Modification temporaire proche d'un fonctionnement entre les années 2000 et 2010. Progressivement une nouvelle flèche se formera alimentée par le transport sédimentaire marin et éolien.	Opération soumise à autorisation au titre de la loi sur l'eau, impliquant une dégradation/destruction de l'habitat d'hippocampes, espèce protégée.	Compatible avec les volumes de besoin du PGS des zones de rechargement prioritaires 1 et 2 des EPCI à proximité du gisement.
Scénario 2	Dragage partiel de la flèche de l'Espiguette au- dessus de la cote -8 m NGF. Volume de 1,4 Mm³.	Diminution peu significative du courant à l'emplacement de la flèche actuelle. Augmentation peu significative des hauteurs de houle en fond de baie au Nord de Port Camargue.	Impact négligeable en fond de baie. La flèche continuera d'être alimentée par le transport sédimentaire marin et éolien.	Opération soumise à autorisation au titre de la loi sur l'eau. Impact limité sur les hippocampes dont la zone de dragage sera située hors zone de présence des colonies.	Compatible avec les volumes de besoin du PGS des zones de rechargement prioritaires 1 des EPCI à proximité du gisement.
Scénario 3	Dragage de l'avant côte au-dessus de la côte -8 m NGF le long de la plage de l'Espiguette sur 2 500 m. Volume de 2,5 Mm ³ .	Augmentation peu significative des hauteurs de houle dans la baie au droit de la zone draguée et au niveau de la flèche de l'Espiguette Diminution des courants au niveau de la zone de déferlement de la zone draguée et le long de la flèche de l'Espiguette	Le prélèvement de sédiment en avant côte peut diminuer temporairement la vitesse d'accumulation de la flèche sableuse.	Opération soumise à autorisation au titre de la loi sur l'eau et située en zone Natura 2000.	Compatible avec les volumes de besoin du PGS des zones de rechargement prioritaires 1 et 2 des EPCI à proximité du gisement.
Scénario 4	Allongement de la digue d'arrêt des sables sur 200 m de long.	Déviation du courant transversal vers le Nord- Ouest et création d'une zone calme au Nord de l'ouvrage.	Diminution temporaire du rechargement de la flèche de l'Espiguette, élargissement de la plage de l'Espiguette, et formation ultérieure d'une nouvelle flèche	Opération soumise à autorisation au titre de la loi sur l'eau située en limite de zone Natura 2000.	Pas d'intérêt pour le PGS.



5. CONCLUSION

Dans le cadre du Plan de Gestion des Sédiments du littoral d'Occitanie, une attention particulière a été portée sur l'analyse de l'évolution du secteur du Grau-du-Roi et de la Flèche de l'Espiguette. En effet, des phénomènes d'accumulation de sable sont observés dans la baie et commencent à poser des problèmes au niveau de certains usages de navigation (débouché du grau et de son port de pêche et sorties du port de Port-Camargue ...). Par ailleurs, la flèche de l'Espiguette constitue un gisement massif déjà exploité à plusieurs reprises.

L'étude du fonctionnement hydrosédimentaire, qui s'appuie sur l'analyse des données existantes et sur la mise en œuvre d'un modèle numérique 2DH houle/courant, permet d'appréhender les processus responsables des évolutions observées et de les quantifier.

Globalement, il est apparu que les houles dominantes de provenance Est-Sud-Est à Sud-Sud-Ouest engendrent des circulations longitudinales responsables d'un transit littoral moyen de l'ordre de 160 000 m³/an au droit de la flèche dont l'origine résulte de la construction de Port-Camargue et des ouvrages attenant (notamment la digue d'arrêt des sables).

Avant la fin des années 60, la plage située au Sud de la digue actuelle progradait à une vitesse d'environ 8 m/an. Cette période correspond à l'évolution naturelle du site caractérisée par la présence continue et successive de flèches sédimentaires (ou crochons) émergeantes. A partir de la fin des années 60 (début de la construction de Port-Camargue) jusqu'au milieu des années 90, l'élargissement de la plage s'accélère fortement (environ 40 m/an). La vitesse d'élargissement de la plage ralentie ensuite drastiquement (4 m/an) pour atteindre l'extrémité de la digue et ne plus évoluer depuis 2010 environ. La flèche de l'Espiguette a commencé à émerger à proximité de la digue à cette date en dépit du prélèvement de 1 M m³ pour le rechargement des plages de la Baie d'Aigues Mortes en 2008. Entre 2009 et 2018, plus de 1,5 M m³ se sont accumulés à l'aval de la digue en dépit des 571 000 m³ prélevés pour les rechargements de Sète et de Frontignan.

Dans le but de limiter la problématique d'ensablement à l'Est de la baie d'Aigues Mortes tout en étant cohérant avec les besoins en sables identifiés dans le Plan de Gestion des Sédiments du littoral d'Occitanie, plusieurs scénarios ont été étudiés en considérant différentes zones de dragage de sable (scénarios 1 à 3) et un scénario d'allongement de la digue d'arrêt des sables actuelle (scénario 4).

L'analyse et la comparaison des différents scénarios met en évidence que le scénario 2 (dragage partiel de la flèche de 1,5 M m³ hors zone de présence des hippocampes) est à privilégier par rapport au scénario 1 (dragage intégral de la flèche). Dans le cas où ce volume de sédiments ne serait pas suffisant pour satisfaire les projets de rechargement, le scénario 2 pourrait éventuellement être combiné avec le scénario 3 (dragage d'avant côte de la plage de l'Espiguette). Concernant le scénario 4 (prolongement de la digue), ce dernier aurait finalement pour conséquence de décaler la problématique actuelle sans apporter de solutions complémentaires au PGS Occitanie.



BIBLIOGRAPHIE

GIEC, 2019 L'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique - Rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat- Chapitre 4 . IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer.

SHOM – RAM, 2019 Références Altimétriques Maritimes Ports de France métropolitaine et d'outre-mer Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. Etabli par le SHOM.

ASCONIT/ARTELIA, 2018. Sofianos A., Lhuillier G., Rodriguez L., Jean-Ramis M., Reck L.M., Redoute M., 2018. Rapport ASCONIT Consultats / ARTELIA. Protection et mise en valeur du lido de Frontignan. Pièce E: Etude d'impact et document d'évaluation des incidences Natura 2000. Reprise suite à l'examen du dossier de demande d'autorisation environnementale par les Services de l'Etat. 763p.

Kulling B. & Sabatier F., 2016. Modélisation historique (1895) du potentiel de transport longitudinal résultant annuel sur l'avant-côte du Languedoc-Roussillon. 24p.

Kulling B. & Sabatier F., 2016. Modélisation du potentiel de transport sédimentaire longitudinal résultant annuel (1979 - 2010) de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon. 46p.

Kulling B. & Sabatier F., 2015. Modélisation du potentiel de transport sédimentaire longitudinal résultant annuel de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon.

LITTOSIS, **2015**. Raynal O., Certain R., Brunel C., Aleman N., Robin N., Guerinel B., Montel L., 2015. LITTOSIS - Analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux littoral du Languedoc Roussillon. 47p.

MEDDE, 2014. guide méthodologique pour les plans de prévention des risques littoraux

CEFREM, 2012. Brunel C., Certain R., Robin N., Aleman N., Raynal O., Barusseau J.P., Sabatier F., 2012. Rapport CEFREM. Atlas de l'évolution des fonds et des budgets sédimentaires séculaires de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon. 27p.

MEDDE, 2011. Circulaire du 27 juillet 2011 du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux

GIEC, 2007. 4^{ième} rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) de 2007

