

Elaboration de la carte locale d'exposition
au recul du trait de côte aux horizons 30 ans et 100 ans
sur le littoral de Villeneuve-lès-Maguelone

Rapport technique et
Synthèse de fonctionnement du littoral
Septembre 2023



Sommaire

Sommaire	1
1 Démarche générale de la cartographie prospective du recul du trait de côte	3
1.1 Encadrement de l'étude et objet du rapport	3
1.2 Contexte géographique général	3
1.2.1 Une côte sédimentaire en perpétuel mouvement	3
1.2.2 Un secteur naturel abritant un important patrimoine écologique	6
1.3 Anticiper l'élévation du niveau marin	8
1.3.1 Un contexte global aggravant le recul du trait de côte	8
1.4 Attributs réglementaires de la cartographie	9
2 Synthèse du fonctionnement du littoral de Villeneuve-lès-Maguelone	11
2.1 Rappel de la notion de transit sédimentaire	11
2.2 Climat et régimes des vents :	12
2.3 Marée, surcote, régime des houles et tempêtes :	14
2.4 Bathymétrie et dynamiques littorales	19
2.5 Evolution historique du lido	25
2.6 Gestion récente et interventions contemporaines sur le lido :	29
3 Elaboration des cartes locales d'exposition au recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans à partir du guide de recommandations Cerema-BRGM	33
3.1 La tendance d'évolution annuelle moyenne du trait de côte : le paramètre « Tx »	34
3.1.1 Recommandations et disponibilité de la donnée	34
3.1.2 Calcul et projections de la valeur « Tx »	36
3.2 Prise en compte de l'évolution du niveau marin et application de la loi de Bruün	40
3.2.1 Principes et critique de la loi de Bruün :	40
3.2.2 Application de la loi de Bruün (1962) : calcul des limites du profil de plage	41
3.2.3 Application de la loi de Bruün (1962) : scénarios d'élévation du niveau marin	43
3.2.4 Application de la loi de Bruün (1962) : Résultats	45
3.3 Estimer un recul événementiel : la valeur « Lmax »	49
3.3.1 Etude des événements extrêmes connus :	49
3.3.2 Traitement SIG et photo-interprétation	50
3.4 Adaptation aux réalités du terrain :	55
3.4.1 Prise en compte des ouvrages :	55



3.4.2	Inondation de zones basses et ouverture d'un grau permanent.....	56
3.4.3	Lisser les traits de côtes	59
4	Scénarios retenus pour la cartographie	62
	Bibliographie	69
	Table des illustrations	73
	Table des tableaux.....	77



1 Démarche générale de la cartographie prospective du recul du trait de côte

1.1 Encadrement de l'étude et objet du rapport

Les dispositions relatives à la loi n°2021-1104 du 22 août 2021, dites loi Climat & Résilience, établissent comme principe que le recul du trait de côte est un phénomène naturel irréversible, qui relève d'une dynamique progressive et anticipable à l'échelle temporelle des documents de planification urbaine¹.

A ce titre, elle prévoit la réalisation de cartes locales d'exposition au recul du trait de côte, identifiant les zones menacées aux horizons 30 ans et 100 ans, pour les communes concernées par cet aléa.

Par décret du 30 avril 2022, la commune de Villeneuve-lès-Maguelone est désignée, en application de l'article L. 321-15 du code de l'environnement, comme faisant partie des communes dont l'action en matière d'urbanisme et de politique d'aménagement doivent être adaptées aux phénomènes hydro-sédimentaires entraînant le recul de la ligne de rivage.

Cette inscription est entérinée par la collectivité à la suite de la délibération favorable datée du 14 février 2022.

En parallèle, la décision de Montpellier Méditerranée Métropole d'engager la procédure d'élaboration du Plan Local d'Urbanisme intercommunal (PLUi), implique d'y intégrer les zones exposées au recul du trait de côte prévues par la loi Climat & Résilience.

Dans ce cadre, *SaVE : "Sable, Vague, Environnement"* a été mandatée par les Maîtres d'Ouvrages pour réaliser cette prestation.

L'objet du présent rapport est la présentation et la justification de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte sur le territoire de Villeneuve-lès-Maguelone. Leur réalisation est encadrée par les dispositions du CCTP rédigé sur la base du document technique « Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte » (Cerema-BRGM, 2022).

Actuellement, l'exposition au recul du trait de côte et l'adaptation des documents d'urbanisme sont principalement régis par les articles L121-22-1 à L121-22-12 du Code de l'urbanisme. Aussi, la commune de Villeneuve-lès-Maguelone est couverte par un PPRi approuvé par arrêté préfectoral en février 2002 et est inscrite dans un dispositif de PAPI sur le bassin versant du Lez, animé par l'EPTB Lez.

1.2 Contexte géographique général

1.2.1 *Une côte sédimentaire en perpétuel mouvement*

Villeneuve-lès-Maguelone est l'unique commune de la métropole de Montpellier² à disposer d'un rivage maritime. Elle est ainsi la seule à être concernée par la cartographie locale d'exposition au recul du trait de côte.

Ce territoire s'inscrit dans le périmètre du golfe d'Aigues-Mortes, qui est une côte d'accumulation sédimentaire composée de grandes surfaces lagunaires et de cordons littoraux étroits et peu élevés, appelés « lidos » (*Illustration 1*).

¹ Cerema-BRGM. *Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte*, 2022

² Montpellier Méditerranée Métropole



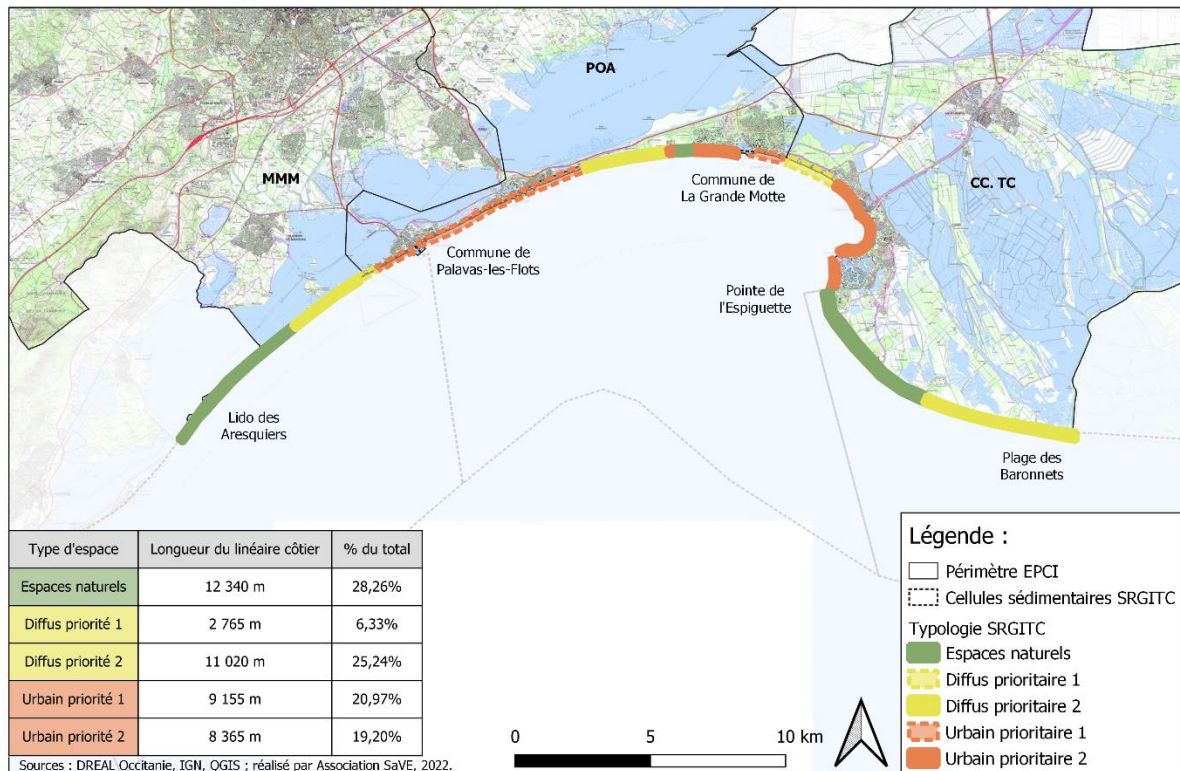


Illustration 1 : Carte du Golfe d'Aigues-Mortes selon la typologie de l'espace littoral. Des zones urbanisées succèdent à des zones naturelles (SaVE, 2022).

Cette portion du littoral présente un aménagement hérité de la Mission Racine³, où des zones densément urbanisées succèdent à des zones naturelles dont fait partie le lido de Maguelone (Illustration 1).

Les massifs dunaires sont globalement peu développés et forment un unique rempart, souvent en pente douce où l'arrière-dune est régulièrement suivie d'une zone humide⁴.

Plus particulièrement, le lido de Maguelone sépare la mer Méditerranée et deux lagunes littorales : l'étang de Pierre Blanche et l'étang de Vic. Il s'étire sur un linéaire très légèrement inférieur à 9 km, et se délimite par le site des Aresquiers à l'Ouest et le site du Prévost à l'Est (Illustration 2, page suivante).

³ Aussi appelée Mission Interministérielle d'Aménagement Touristique du Littoral du Languedoc-Roussillon.

⁴ Gouguet L (Dir). *Guide de gestion des dunes et des plages associées*. Editions Quae, 2018.





Illustration 2 : Carte de situation du littoral de la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

Le lido présente la particularité d’être constitué de sables grossiers et de galets, ce qui est assez rare sur la portion du golfe du Lion située entre Leucate et la Camargue⁵.

Le cordon littoral est étroit, avec une largeur comprise entre 70 m et 350 m, tandis que les formations dunaires sont discontinues et peu développées. L’altitude est donc globalement faible, avec des maximums autour de 2,50 m voire 3 m, et des secteurs sur la partie centrale marqués par une altitude plutôt comprise entre 1 m et 1,50 m.

Les zones planes correspondent à des *overwash*, ou cônes de débordement, issus de forçages et de franchissements marins lors d’épisodes tempétueux. Notons que sur ce lido des graus temporaires peuvent s’ouvrir lors d’événements extrêmes, comme lors des tempêtes de 1982, de 1997, ou de 2003 illustrée ci-dessous (Illustration 3).

⁵ Cerema, *Dynamiques et évolution du littoral fascicule 8 : Synthèse des connaissances de la frontière espagnole à Port-de-Bouc*, 2020





Illustration 3 : Submersion du cordon littoral et ouverture d'un grau lors de la tempête du 4 décembre 2003 (Source : DRE-LR).

C'est donc une côte particulièrement meuble où l'action de la houle, de la dérive littorale et du vent, provoque des évolutions quotidiennes et sur laquelle des événements extrêmes génèrent régulièrement des mouvements importants ; la rendant particulièrement vulnérable aux aléas littoraux (création de brèches et de cônes de débordements, ouvertures de graus, etc.)^{6 7}.

1.2.2 Un secteur naturel abritant un important patrimoine écologique

Le site ne présente actuellement aucune habitation, et les seules rares constructions se situent autour de l'île de Maguelone avec un petit réseau routier et quelques installations destinées aux activités de loisirs estivaux.

Le lido comprend deux sites Natura 2000 : « posidonies de la côte palavasienne » et « lagunes palavasiennes et Estagnol » ; et est intégré au plan de gestion du Conservatoire du Littoral « Etang de Vic et de Pierre Blanche », dont la mise en œuvre est confiée au Conservatoire d'Espaces Naturels d'Occitanie, à la Métropole de Montpellier et à Sète Agglopôle Méditerranée.

A l'arrière du lido, se trouvent toutefois deux enjeux économiques et culturels majeurs : le Canal du Rhône à Sète et la Cathédrale de Maguelone.

Ces deux installations sont relativement éloignées du rivage (environ 500 m du rivage pour la Cathédrale de Maguelone, et 350 m au minimum pour la Canal du Rhône à Sète) et semblent protégées (Illustration 4).

⁶ Heurtefeux H et Richard P (2005), cités dans Cerema. *Dynamiques et évolution du littoral fascicule 8 : Synthèse des connaissances de la frontière espagnole à Port-de-Bouc*, 2020.

⁷ Durand P et Heurtefeux H. *Impact de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un cordon littoral lagunaire : une méthode d'évaluation*, 2006.





Illustration 4 : Illustration du lido de Villeneuve-lès-Maguelone, avec au premier plan le Canal du Rhône à Sète et la Cathédrale de Maguelone (Sources : Montpellier Méditerranée Métropole).

Ainsi, le principal enjeu directement installé sur le lido, outre le tourisme estival, est finalement d'ordre écologique et paysager. De nombreuses espèces d'oiseaux laro-limicoles fréquentent le site, notamment des espèces protégées comme le gravelot à collier interrompu (*Charadrius alexandrinus*) et les sternes naines (*Sternula albifrons*). Le lido est aussi particulièrement réputé pour sa richesse floristique : c'est une station où se développe une importante population d'euphorbes peplis (*Euphorbia peplis*) et un des rares endroits de la région où pousse le diotis blanc (*Otanthus maritimus*) (Illustrations 5 et 6).



Illustration 5 : Une euphorbe peplis (*Euphorbia peplis*) sur le lido de Maguelone (Photo : SaVE, juin 2023).



Illustration 6 : Panneaux de signalisation d'une zone protégée pour la nidification d'espèces d'oiseaux sur le lido de Maguelone (Photo : SaVE, avril 2023).



1.3 Anticiper l'élévation du niveau marin

1.3.1 Un contexte global aggravant le recul du trait de côte

En Occitanie, les volumes de sable disponibles pour alimenter les plages diminuent (23% du linéaire côtier naturel est en érosion, et sur l'avant-côte, 85% du littoral présente un bilan sédimentaire négatif) (Source : SRGITC, 2018⁸).

De plus, les estimations du GIEC sur l'élévation du niveau marin à l'horizon 2100 sont toujours plus élevées d'années en années et tendent à montrer une accélération du phénomène : en 2007, les prévisions se situaient entre 18 cm et 59 cm ; en 2013, elles étaient revues à la hausse avec un fourchette prévue entre 30 cm et 90 cm, aujourd'hui il faudrait s'attendre à une élévation de 60 cm à 110 cm^{9 10} (Illustration 7).

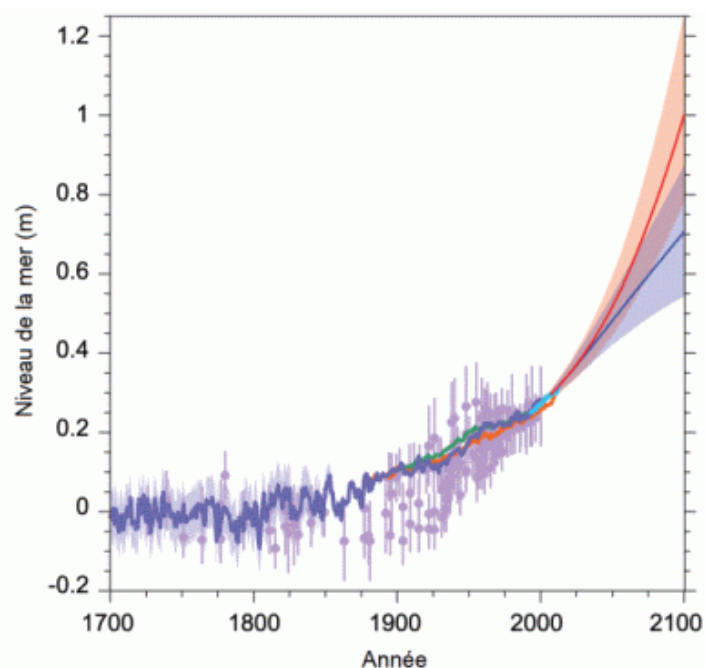


Illustration 7 : Evolution du niveau de la mer moyen global, sur la période 1700-2100. Document Météo-France (scénario RCP2.6 en bleu, et RCP8.5 en rouge).

Cette élévation du niveau marin expose les espaces littoraux à un risque plus important de submersion marine et d'érosion, entraînant une modification durable de la position du trait de côte dans les années à venir.

Les études prospectives répondent à un besoin d'anticipation des gestionnaires, permettant de mettre en lumière les dynamiques en cours, leurs conséquences possibles sur la position du trait de côte et sur l'exposition aux risques naturels des infrastructures et de l'économie des territoires.

⁸ Stratégie Régionale de Gestion Intégrée du Trait de Côte, Littoral Occitanie 2018-2050. DREAL Occitanie, 2018.

⁹ Beynet, JM. (2020) « Habiter ou abandonner le littoral d'ici 2100 : Prospective et propositions pour l'Occitanie. » Essai.

¹⁰ Réseaux marégraphiques français, et Services Hydrographique et Océanographique de la Marine. http://refmar.shom.fr/fr/sea_level_news_2013/t3/hausse-niveau-mer-rapport-groupe-experts-giec-ipcc-septembre-2013



En considérant le recul du trait de côte comme irréversible, progressif et anticipable, la loi Climat & Résilience se veut une étape importante de l'intégration de l'évolutions de la ligne de rivage dans les documents d'urbanisme.

Ainsi, cette planification passe par la réalisation de cartes locales d'exposition au recul du trait de côte, identifiant une zone menacée par cet aléa à horizon 30 ans et une autre à horizon 100 ans.

1.4 Attributs réglementaires de la cartographie

Un règlement est associé à chaque zone. L'objectif annoncé est d'encadrer l'aménagement et la construction pour réduire l'exposition et la vulnérabilité des territoires¹¹.

Pour ce qui concerne la zone exposée à horizon 30 ans, la plus proche du rivage, les nouvelles constructions seront interdites sauf exceptions ; tandis que sur l'existant, les extensions devront être démontables et les adaptations possibles à condition de ne pas augmenter la capacité du logement. Un droit de préemption sera confié à l'instance compétente en matière d'urbanisme lors de la vente d'un bien récent se situant dans cette zone (*Illustration 8*, ci-dessous).

La zone exposée à horizon 100 ans, plus éloignée, comprendra une consignation prévoyant la démolition d'un bien lors de chaque projet de construction, et la possibilité d'appliquer un droit de préemption lors de la vente d'un bien récent (*Illustration 8*, ci-dessous).

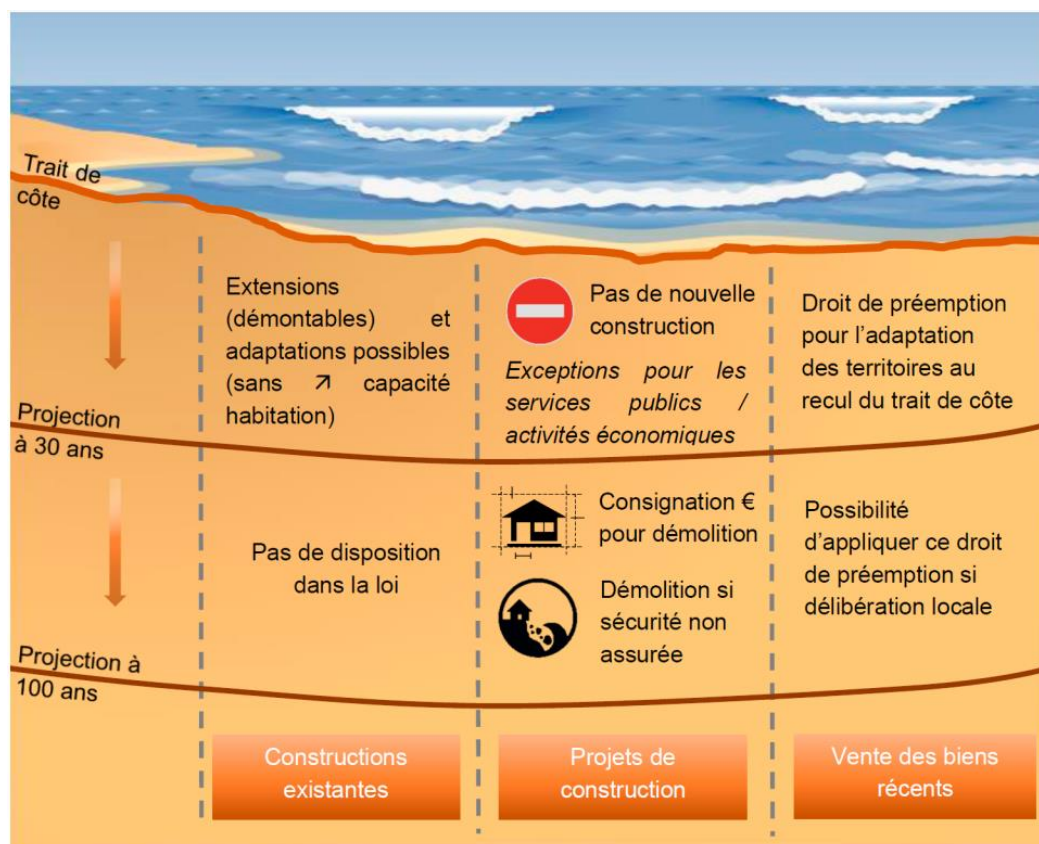


Illustration 8 : Schéma des dispositions de la loi dite "Climat & Résilience" selon la cartographie de l'exposition locale au recul du trait de côte (document Cerema-BRGM, 2018).

¹¹ LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

La réalisation de ces cartes à Villeneuve-lès-Maguelone intervient dans un contexte de réorganisation des questions littorales à l'échelle intercommunale.

Ces dernières années, l'adoption de divers documents stratégiques (SNGITC, 2012¹² ; SRGITC, 2018 ; SRADDET, 2019¹³), ont permis d'initier une dynamique d'anticipation et d'adaptation au changement climatique, rappelant l'importance des milieux naturels dans l'atténuation des risques, et préconisant une recomposition spatiale du littoral.

Cet élan, porté par les pouvoirs publics et insufflé par le Plan Littoral 21¹⁴, prévoit une gouvernance du littoral au sein d'unités territoriales plus larges, encourageant les mutualisations et partages d'expériences, appelées Stratégies Locales de Gestion Intégrée du Trait de Côte (SLGITC) (*Illustration 9*).

C'est ainsi que Montpellier Méditerranée Métropole s'est associée aux intercommunalités adjacentes au sein du Golfe d'Aigues-Mortes pour créer une SLGITC : l'Entente du Golfe d'Aigues-Mortes¹⁵.

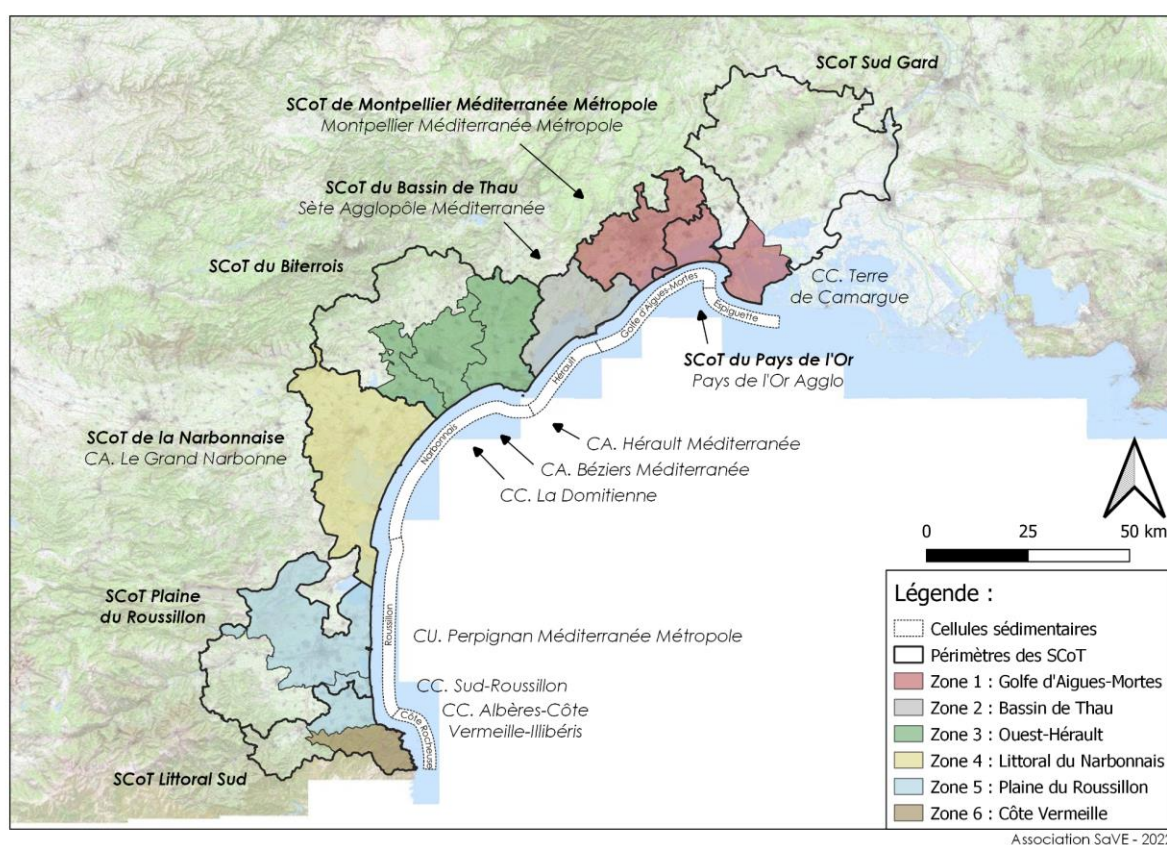


Illustration 9 : Composition des Stratégies Locales de Gestion Intégrées du Trait de Côte en Occitanie (SaVE, PL21, 2022).

¹² Stratégie Nationale du Gestion Intégrée du Trait de Côte, Ministère de la Transition Ecologique, 2012.

¹³ Schéma régional d'aménagement et de développement durable du territoire, Région Occitanie, 2019.

¹⁴ Le Plan Littoral 21 est un programme d'investissement associant les services de l'Etat en région, la Région Occitanie, et la Caisse des Dépôts et Consignations.

¹⁵ L'Entente du Golfe d'Aigues-Mortes associe la Communauté d'Agglomération Sète Agglopolie Méditerranée, Pays de l'Or Agglo, la Communauté de Communes Terre de Camargue, et Montpellier Méditerranée Métropole.



2 Synthèse du fonctionnement du littoral de Villeneuve-lès-Maguelone

2.1 Rappel de la notion de transit sédimentaire

Notre secteur d'étude est une côte d'accumulation sédimentaire, dont l'évolution obéit à une logique de transport, avec des départs et des apports, et dont la différence permet d'estimer un bilan.

Sur la zone littorale, le transport de sédiments organise sa dispersion entre la zone émergée et la zone sous-marine, de façon à définir une évolution du trait de côte sous forme d'avancée et de recul.

Deux agents sont principalement responsables de ce transit sédimentaire : la mer, avec les houles et les courants, et le vent.

Ainsi, les sédiments suivent deux axes de déplacements au rythme des dynamiques littorales dominantes : une dynamique longitudinale, parallèle au trait de côte, et une dynamique transversale, perpendiculaire à la ligne de rivage (*Illustrations 10 et 11*).

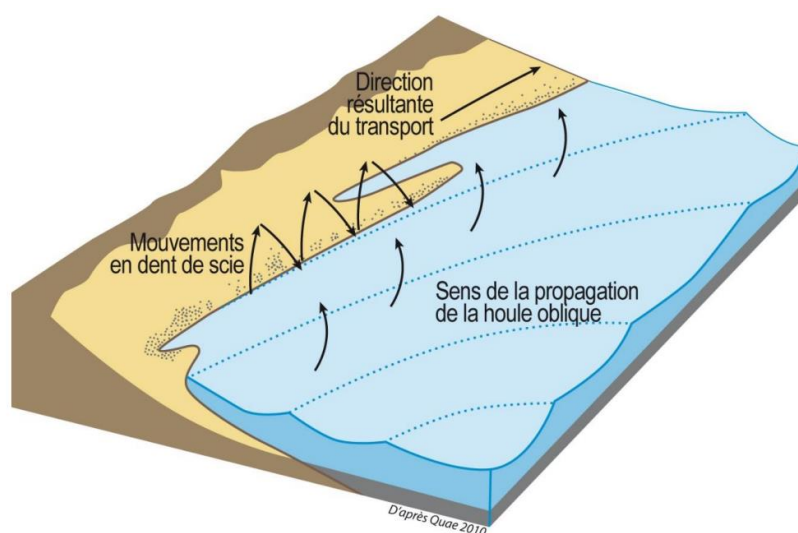


Illustration 10 : Schéma de présentation du transit sédimentaire parallèle à la côte (Source : Obscat, d'après Quae 2010).

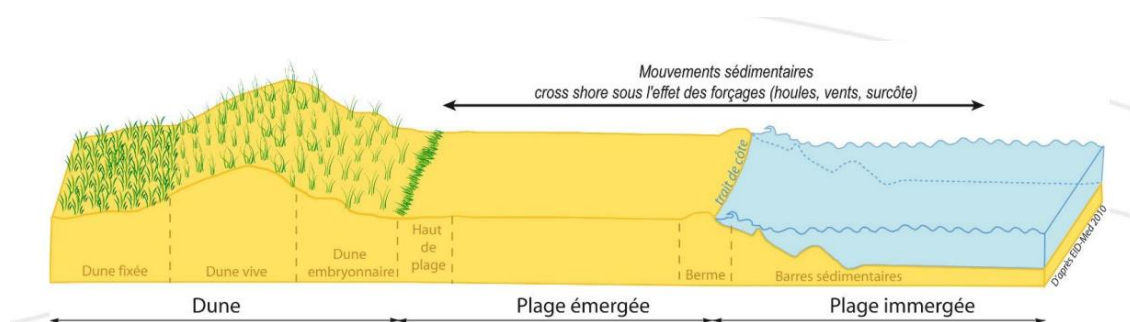


Illustration 11 : Schéma de représentation du transit sédimentaire sur le profil de plage (Source : Obscat, d'après EID-Méditerranée 2010).

Notons, que les notions d'avancées et de recul du trait de côte ne sont pas synonymes d'érosion et d'accrétion. Une plage émergée peut présenter une dynamique de recul malgré un bilan sédimentaire positif (et donc une accrétion), et vice-versa. Ce phénomène s'observe notamment dans le cas d'une importante dynamique transversale.



En guise d'exemple, une photographie des dunes de la Slack sur la côte Atlantique (département du Pas-de-Calais). Ce secteur est en érosion, avec une tendance au recul¹⁶, cependant le glissement du massif dunaire provoque une avancée du pied de dune (et donc du trait de côte) sur la mer (*Illustration 12*).



Illustration 12 : Exemple de secteur en érosion mais où le pied de dune avance sur la mer. La dune de la Slack est en érosion d'après l'indicateur national du trait de côte du Cerema, mais sur l'illustration, un glissement rotationnel a permis un gain sur la mer (Image Google ; SaVE, 2023).

2.2 Climat et régimes des vents :

La zone d'étude est couverte par un climat Méditerranéen : les étés sont chauds et secs tandis que les hivers sont doux. Les précipitations sont très irrégulières, avec des périodes orageuses et des pluies torrentielles au printemps et surtout à l'automne (*Tableau 1*).

Tableau 1 : Climat de Villeneuve-lès-Maguelone, sur la période 1981-2020 (Source : Météo France, fiche 34337001).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Tot
Température minimale moyenne en °C	3	3,6	6,2	8,8	12,4	15,9	18,5	18,3	14,8	11,8	7	4	10,4
Température maximale moyenne en °C	11,5	12,5	15,5	17,8	21,4	25,7	28,6	28,3	24,6	20,3	15,2	12,2	19,5

¹⁶ L'indicateur national d'érosion côtière du Cerema indique un recul supérieur à 0,5 m/an sur ce secteur (Cerema, 2018).



Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Tot
Record de froid en °C	-11,5	-9,3	-7	0,1	4,2	6	10,5	9,8	5,5	-0,3	-5,7	-7	-11,5
Record de chaleur en °C	22,1	24,5	28,1	30,7	34,4	43,4	37,6	38,9	35,4	32,1	25,6	21,7	43,4
Précipitations en mm	50,6	50,9	35,5	48,2	40,1	29,2	16,2	30,4	72,6	91,9	65,5	61,1	592,2

Les épisodes cévenols sont des phénomènes bien connus, qui concentrent la majeure partie des précipitations annuelles. Ils apparaissent à l'automne, lors d'entrées maritimes et de vents marins. Des masses d'air chaudes et humides provenant de la mer Méditerranée sont alors confrontées à un changement brutal d'altitude au contact de la côte et des massifs arrière-littoraux (notamment des Cévennes), provoquant un effet de Foehn (*Illustrations 13 et 14*).

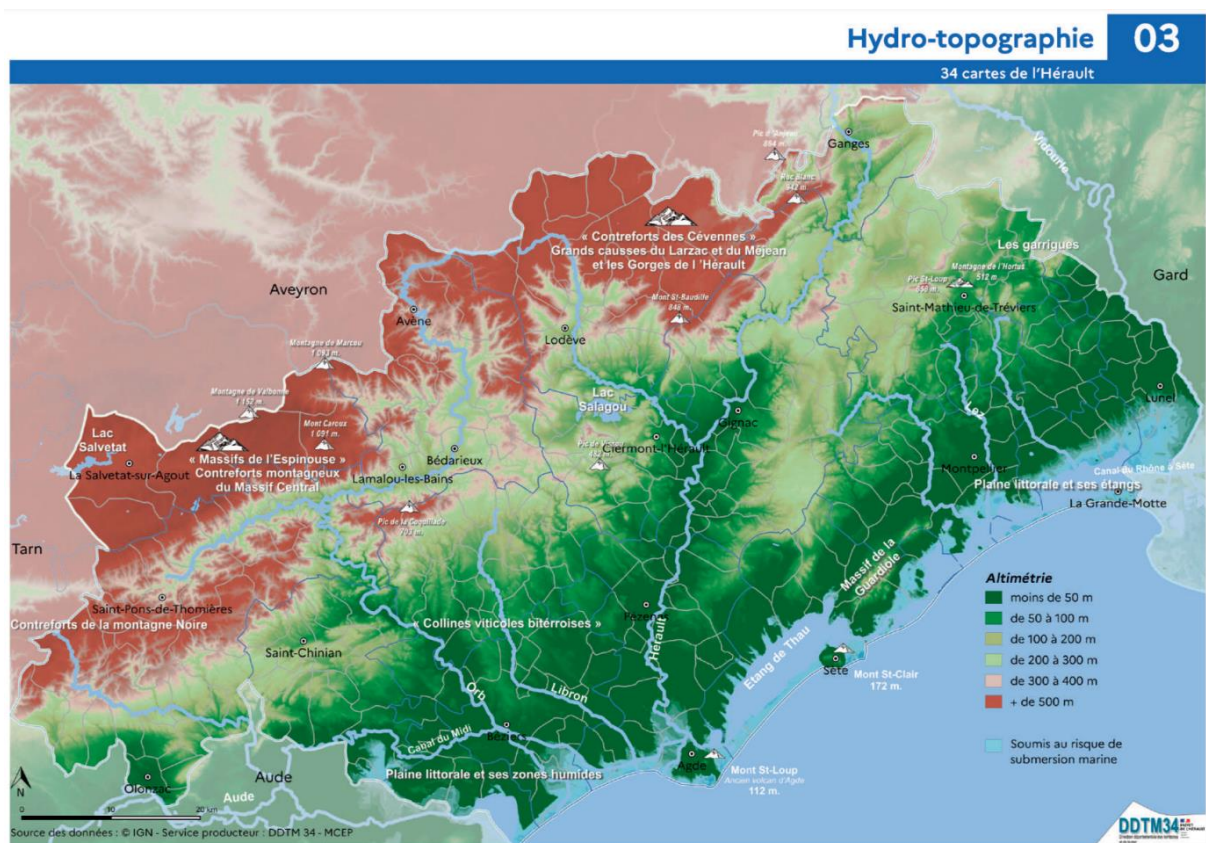


Illustration 13 : Topographie du département de l'Hérault. En seulement 35 km, le relief se transforme soudainement d'une plaine littorale (niveau de la mer) au contrefort des Cévennes (altitude supérieure à 1000 m) (Source : DDTM 34).

Ces phénomènes d'orages, de pluies torrentielles et de dépressions atmosphériques génèrent des instabilités notables et brutales sur le littoral : gonflement important des cours d'eau et des lagunes, apports massifs de sédiments et effet de chasse provoqué par les crues, surcotes marines et houles



importantes, impacts de débris charriés par les fleuves et projetés sur les plages par les vagues, etc. (Pardé, 1941¹⁷ ; Gervais, 2012¹⁸ ; Cerema, 2020).

La majorité du temps, les pressions atmosphériques sont assez élevées, et les perturbations sont généralement de courtes durées (Cerema, 2020).

Le littoral d'Occitanie est principalement battu par de forts vents de terre, froids et secs, notamment le Mistral et la Tramontane. Le Mistral suit la vallée du Rhône ; tandis que la Tramontane provient de la vallée de l'Aude, et emprunte le couloir entre les Pyrénées et le Massif central. Ces vents génèrent un transport éolien important, projettent les sédiments vers la mer, et ne permettent pas un développement dunaire optimal (*Illustration 15*) (Gouguet, 2018).

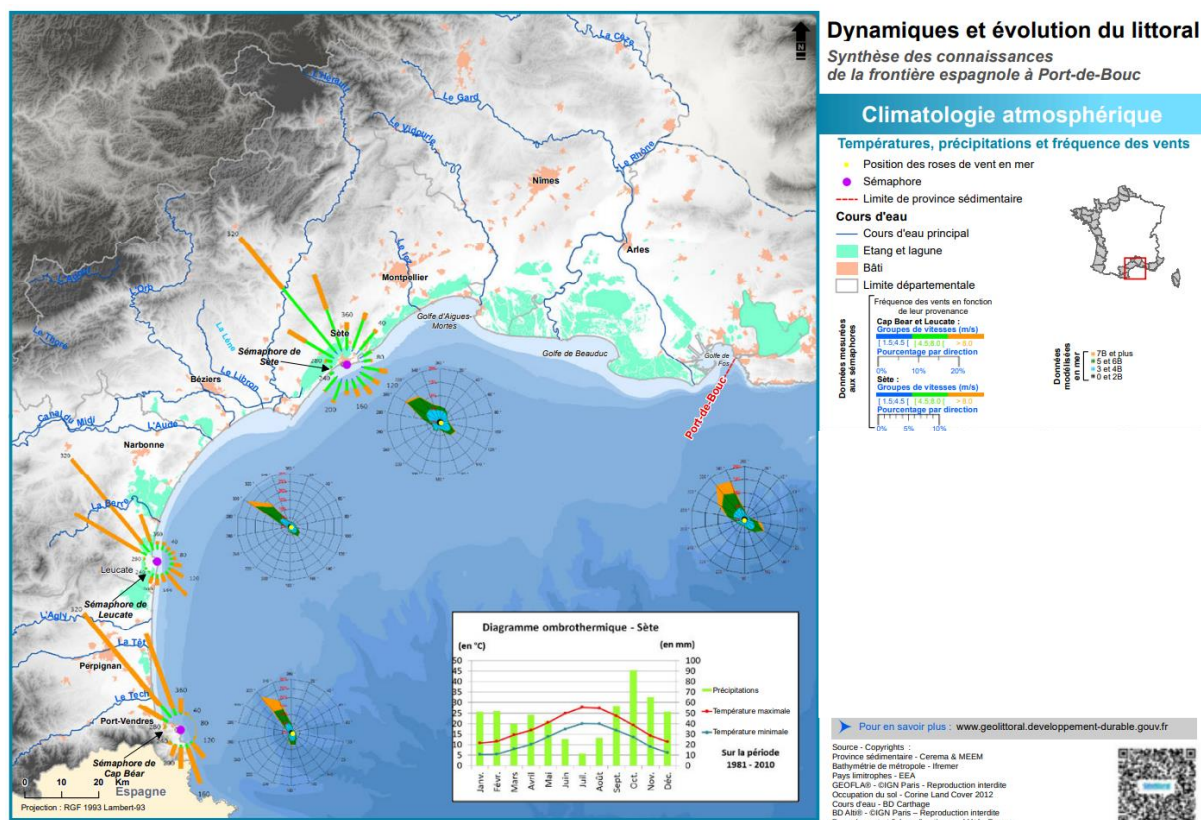


Illustration 14 : Carte climatique et rose des vents sur le littoral du Golfe du Lion (Source : Cerema, 2020).

2.3 Marée, surcote, régime des houles et tempêtes :

Le secteur s'inscrit dans un régime micro-tidal : dans le golfe du Lion, le marnage est faible et ne dépasse pas 45 cm. La marée est semi-diurne et souvent masquée par la météo et les coups de vent (Cerema, 2020).

Toutefois, des phénomènes de surcotes et de décotes sont bien perceptibles sur les secteurs particulièrement bas tels que la Camargue ou le lido de Maguelone. Les évolutions atmosphériques

¹⁷ Pardé M. La formidable crue d'octobre 1940 dans les Pyrénées-Orientales. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest Européen*, 12-3, pp 237-279.

¹⁸ Gervais, M, « Impact morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen ». Thèse de doctorat en Océanologie, sous la direction de Serge Bergé et de Yann Balouin, Université de Perpignan Via Domitia, 2012, 399p.



provoquent des modifications de la hauteur d'eau par effets barométriques (élévation de 1 cm pour un gain de 1 Hpa) (Cerema, 2020).

Ces phénomènes sont aussi accentués par les vents : les vents marins poussent les masses d'eau vers la côte, créant une élévation de la surface maritime à cet endroit, tandis que les vents de terre poussent la mer au large, provoquant une décote (Gervais, 2012 ; Cerema, 2020).



Illustration 15 : l'estran est particulièrement large sur le lido de Villeneuve-lès-Maguelone, notamment en lien avec ces mouvements quotidiens de la hauteur d'eau (Photo : SaVE, avril 2023).

Sur le littoral, les vagues ont une hauteur significative¹⁹ peu élevée : 80% ne dépassent pas 1 m, avec une médiane d'environ 60 cm, tandis que leur fréquence moyenne²⁰ d'entre 3 s et 5 s (Durand et Heurtefeux, 2003²¹ ; Gervais, 2012 ; Cerema, 2020).

Le littoral de la région connaît une orientation dominante des houles d'origine Sud-Est/Est-Sud-Est. La partie centrale du Golfe du Lion, dont fait partie le lido de Maguelone, est particulièrement exposée

¹⁹ La hauteur significative (Hs) correspond à la moyenne du tiers des vagues les plus hautes sur une période donnée.

²⁰ Temps moyen entre chaque vague.

²¹ Durand P et Heurtefeux H. Impacts du changement climatique sur l'intervention du Conservatoire du Littoral. Site des étangs de Vic et de Pierre Blanche. Juillet 2003.



puisque le déferlement des vagues de tempêtes s'effectuera de façon frontale (Durand, 1999²² ; Durand et Heutefeu, 2003 ; Balouin et al, 2011²³ ; Gervais, 2012).

En lien avec le climat, la saisonnalité des houles est marquée et prend la forme d'une accalmie estivale avec des perturbations hivernales. Les phénomènes les plus énergiques se situent d'octobre à mars, avec des hauteurs de houles significatives pouvant dépasser 3 m, et des maximums allant jusqu'à plus de 6 m lors de phénomènes exceptionnels (Durand, 1999 ; Durand et Heutefeu, 2003 ; Balouin et al, 2011 ; Gervais, 2012).

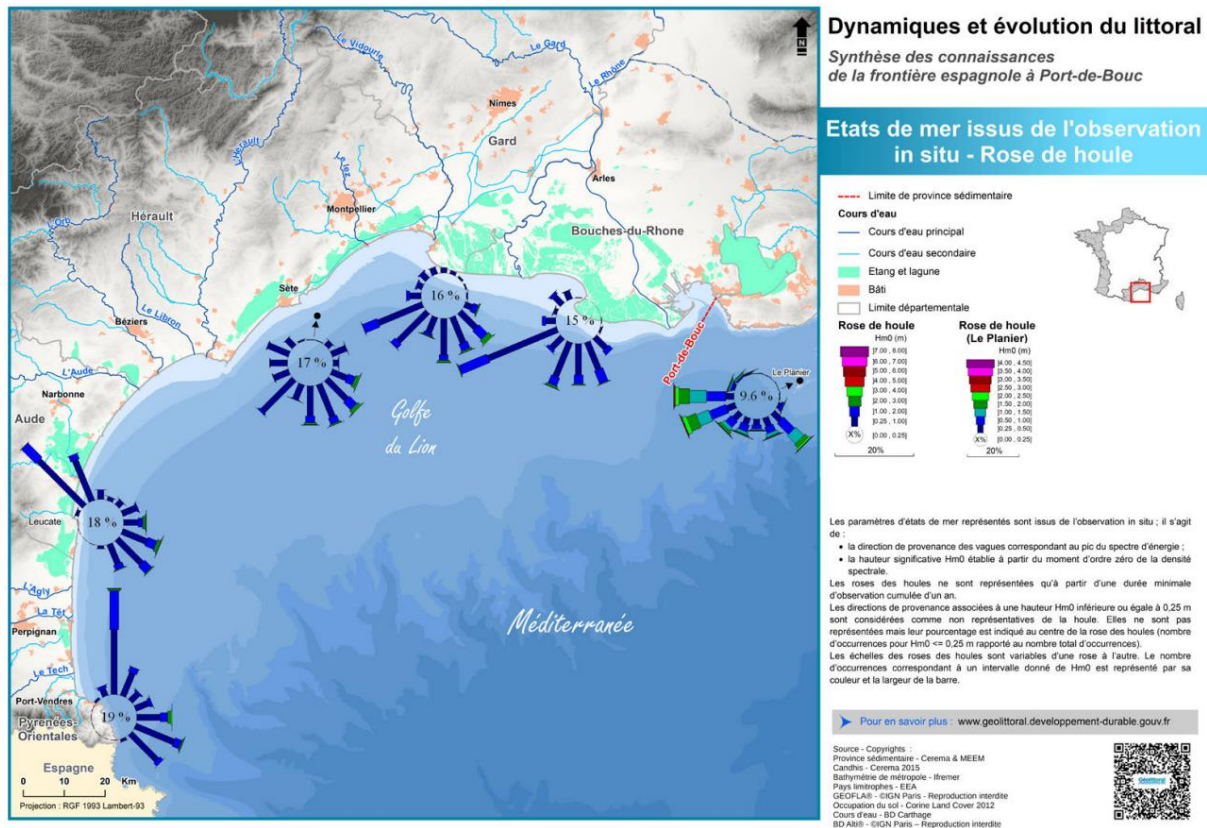


Illustration 16 : Rose des houles dans le golfe du Lion (Source : Cerema, 2020).

Les houles de tempêtes vont générer des impacts particulièrement importants sur notre site d'étude. En mer, d'après Gervais (2012), trois types de courants vont se manifester :

- Des courants de retour : ils correspondent à une compensation de l'afflux des vagues en surface par un reflux de fond en direction du large ;
- Des courants longitudinaux : ils sont générés par l'angle de déferlement des vagues sur le rivage (courant de dérive littorale) ;

²² Durand P, « L'évolution des plages de l'ouest du golfe du Lion au 20ème siècle. Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire et analyse prévisionnelle ». Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon II, 2 vol., 461 p.

²³ Balouin Y, De La Torre Y, et Tirard E. Les tempêtes marines sur le littoral du Languedoc-Roussillon. Caractérisation et faisabilité d'un réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts. Rapport BRGM/RP-59516-FR ; 65 p. 2011.



- Des courants d'arrachement : évacuation locale et puissante vers le large de masses d'eau apportées par des vagues (« *rip current* »).

Le comportement des tempêtes a été schématisé au sein d'un modèle conceptuel en quatre types de régimes (*Illustration 18*) (Sallenger, 2000²⁴) :

- Le régime de *swash*, ou de jet-de-rive : lorsque l'élévation du jet-de-rive (ou « *run-up* ») ne dépasse pas le niveau du pied de dune, seule la plage est impactée par le déferlement des vagues de tempêtes et peut subir une érosion ;
- Le régime de collision : lorsque le jet-de-rive atteint le pied de dune, il impacte le cordon dunaire et la dune est érodée jusqu'à la formation d'une falaise dunaire ;
- Le régime d'*overwash* : l'élévation du jet-de-rive est supérieure du sommet de dune. Le cordon dunaire est alors submergé et des franchissements par paquets de mer apparaissent. Le processus d'érosion s'actionne sur toute la hauteur de dune, et des brèches peuvent se former. Les sédiments sont alors projetés en arrière-dune par les flots, et des *overwash* (ou cônes de débordements) s'étendent sous formes de grands lobes sableux ;
- Le régime d'inondation : le niveau de la tempête submerge totalement le cordon dunaire, et une inondation généralisée ou locale se produit sur le cordon littoral. Les lidos disparaissent temporairement et les lagunes s'ouvrent sur la mer.

²⁴ Sallenger A.H. Jr. Storm impact scale for barrier islands. 2000.



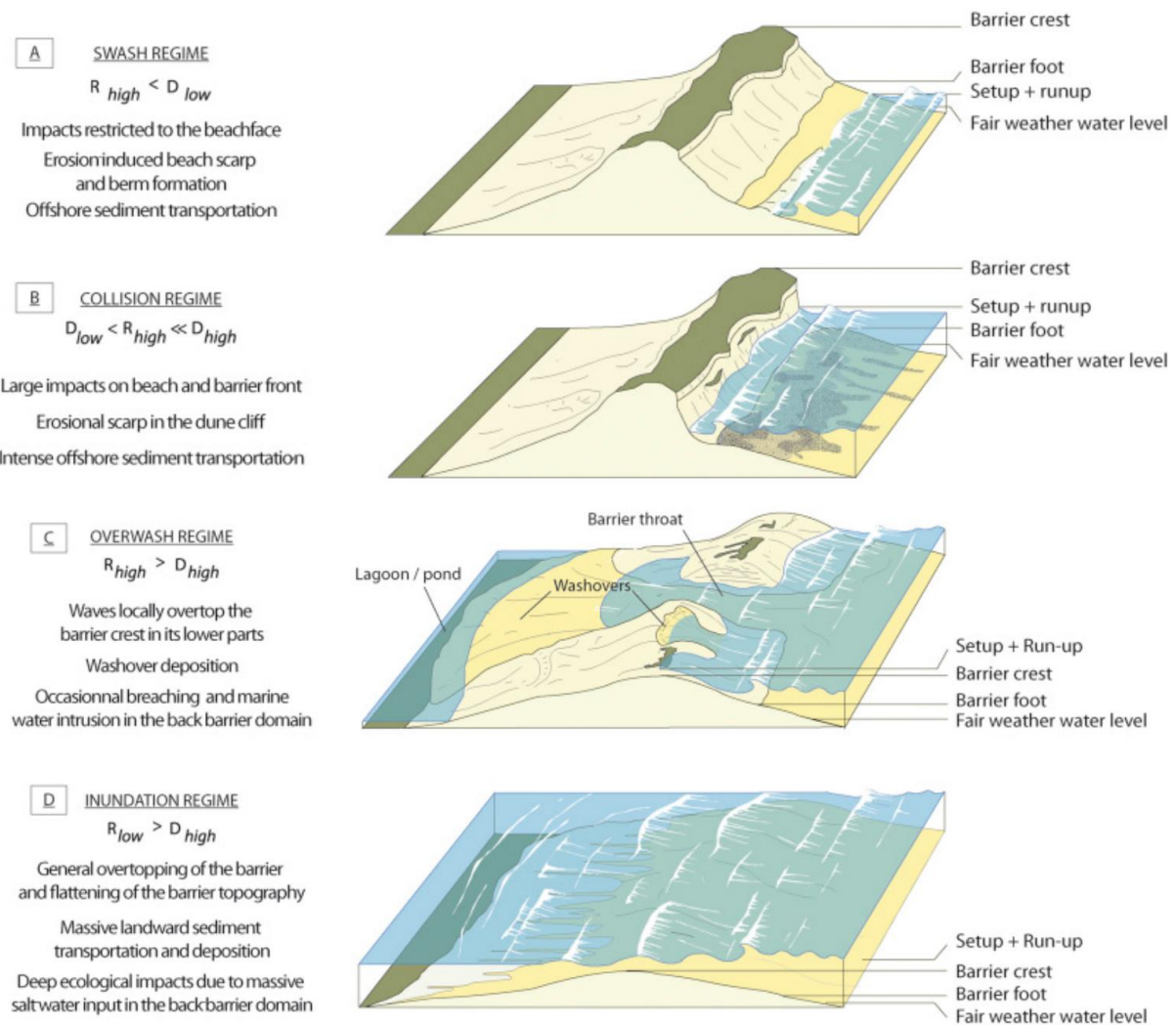


Illustration 17 : Types de régimes de tempêtes selon Sallenger (2000), d'après Valentini et Balouin (2020)²⁵.

Le Réseau Tempête Occitanie, observateur des phénomènes extrêmes sur la région, considère que les impacts notables des tempêtes sur le cordon dunaire se corrélaient plutôt bien aux hauteurs de houles (Balouin et al, 2011). Ainsi, il a été possible d'identifier des seuils morphogènes à partir desquels des impacts sont constatés sur le golfe du Lion :

- Lorsque $H_s \geq 3$ m : le jet-de-rive franchit la berme et impacte la plage (abaissement de l'élévation de la plage et risque de décaissement), tandis que les houles modifient la morphologie et le positionnement des barres d'avant-côtes (migration vers le large) ;
- Lorsque $H_s \geq 4$ m : inondation partielle ou totale de la plage, le jet-de-rive entre impacte le haut de plage occasionnant d'importants reculs ;

²⁵ Valentini N, et Balouin Y. Amélioration des connaissances et sensibilisation à la vulnérabilité du littoral d'Occitanie - Étude du rôle de l'érosion événementielle sur la vulnérabilité du littoral aux phénomènes de submersion marine. BRGM/RP-70384-FR, 115 p. 2020.



- Lorsque $H_s \geq 5$ m : les ondes de tempêtes entrent en collision avec le pied de dune, des reculs dunaires peuvent être importants avec l'apparition de brèches et de franchissements sur les secteurs inférieurs à 3 m (possibilité de créations de graus, arasement dunaire, etc.).



Illustration 18 : Recul du pied de dune et formation d'une falaise dunaire à la suite d'une tempête sur le littoral du golfe du Lion, ici à Frontignan-Plage en février 2022 (Source : SaVE, 2022).

2.4 Bathymétrie et dynamiques littorales

L'avant-côte de notre secteur d'étude présente une spécificité relativement rare dans la région d'être dotée de formations rocheuses. Constituées de grès, de galets et de graviers agglomérés, elles s'étendent de façon parallèle au rivage, à une profondeur comprise entre -7 m et -15 m et une distance de 600 m à 1 km du rivage sur 30 km² (CEPREL, 1989²⁶ ; Durand et Heurtefeux, 2003 ; Cerema, 2020). Ces remparts sont prolongés au Sud-Ouest par une formation plus imposante : le môle des Aresquiers au large de Frontignan-Plage (CEPREL, 1989 ; Durand et Heurtefeux, 2003 ; Cerema, 2020).

Ces barres rocheuses ont permis de créer des points d'appuis, sur lesquels les sédiments ont pu se fixer lors de la formation du lido durant l'Holocène (7 500 BP d'après Raynal, 2008²⁷). Les apports

²⁶ Schéma directeur pour la protection, la restauration et la gestion du littoral du département de l'Hérault. Deuxième partie, Tome 1. CEPREL, Conseil Général de l'Hérault, 1988-1989.

²⁷ Raynal, O., « Architecture de dépôts et facteurs de contrôle d'un système côtier à faibles apports sédimentaires – le littoral languedocien (Golfe du Lion, Sud de la France) ». Thèse de doctorat en Sciences de la Terre et de l'univers, sous la direction de Michel Séranne et de Frédéric Bouchette, Université de Montpellier II, 2008, 187p.



sédimentaires du delta du Rhône ont permis de générer une flèche sableuse se développant selon la dérive littorale longitudinale, jusqu'à isoler une lagune. A l'origine, le lido se serait développé directement au niveau des formations rocheuses, et aurait lentement reculer vers sa position actuelle en suivant l'action mécanique des vagues (*Illustration 20*) (Raynal, 2008 ; Raynal et al, 2010²⁸ ; Certain, 2017²⁹).

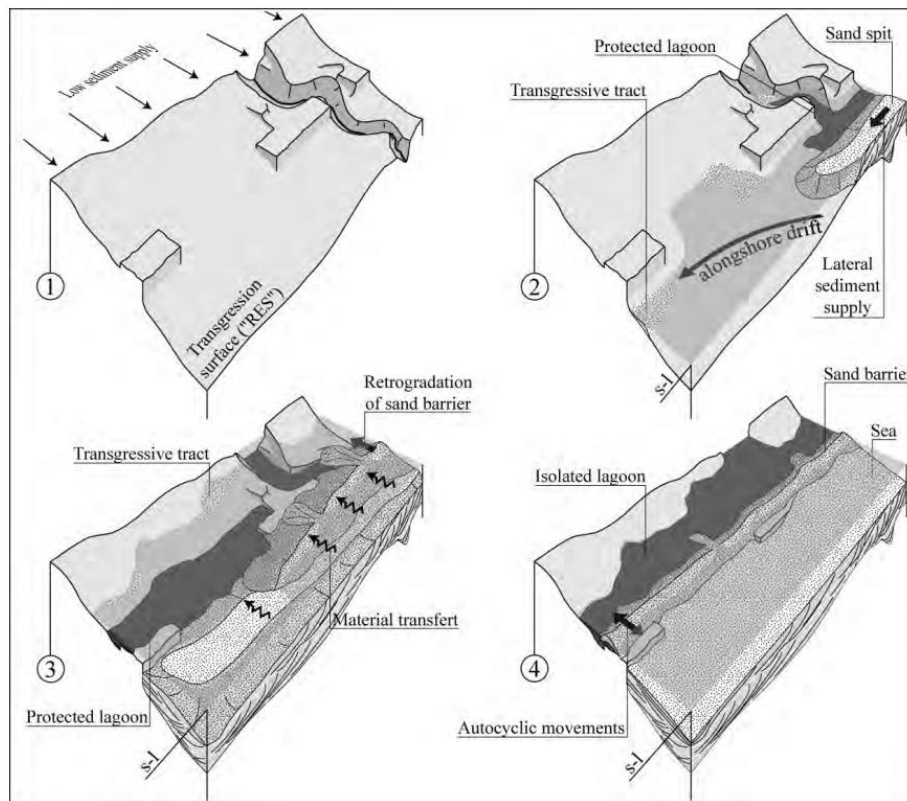


Illustration 19 : Formation du lido de Maguelone, avec le développement d'une flèche sableuse autour du substrat rocheux d'avant-côte et rétrogradation vers le continent (d'après Raynal, 2008).

Aujourd'hui, ces formations jouent un rôle important dans la dynamique littorale et le transit sédimentaire. Dans un premier temps, elles impactent la dynamique transversale en créant une sorte d'atténuateur de houle naturel, qui va protéger des secteurs du lido des ondes de tempêtes mais aussi en piégeant des sédiments au sein de crevasses et d'aspérités au large (CEPREL, 1989 ; EID-Méditerranée, 2020³⁰). Dans un second temps, en entrant au contact du Môle des Aresquiers, les houles sont réfractées ce qui génère une divergence du courant de dérive littorale (*Illustration 21*) (Durand et Heurtefeux, 2003).

²⁸ Raynal, O., Bouchette, F., Certain, R., Séranne, M., Sabatier, P., Lofi, J., Dezileau, L., Briquet, L., Ferrer, P., Courp, T., Tessier, B., 2010. Holocene evolution of languedocian lagoonal environment controlled by inherited coastal morphology (Northern Gulf of Lions, France). *Société Géologique Fr.* 181, 211–224.

²⁹ Certain, R., « Morphodynamique des littoraux sableux microtidaux à multi-échelle spatio-temporelles : de leur mise en place à l'échelle millénaire aux évolutions des corps sableux actuels ». HDR en Océanologie, Université de Perpignan Via Domitia, préparée au sein de l'école doctorale E² et de l'unité de recherche CEFREM, 2017, 143p.

³⁰ Dynamique côtière du secteur des Aresquiers, Approche paysagère et prospective. EID-Méditerranée, Conservatoire du Littoral, Atelier Claude Chazelle et Olivier Martin. Mars 2020.



Ainsi, au Sud des Aresquiers, sur la commune de Frontignan, le courant de dérive littorale transporte le sable en direction du Sud-Ouest ; tandis qu’au Nord, sur le lido de Maguelone, le courant de dérive littorale déplace les sédiments vers le Nord-Est.

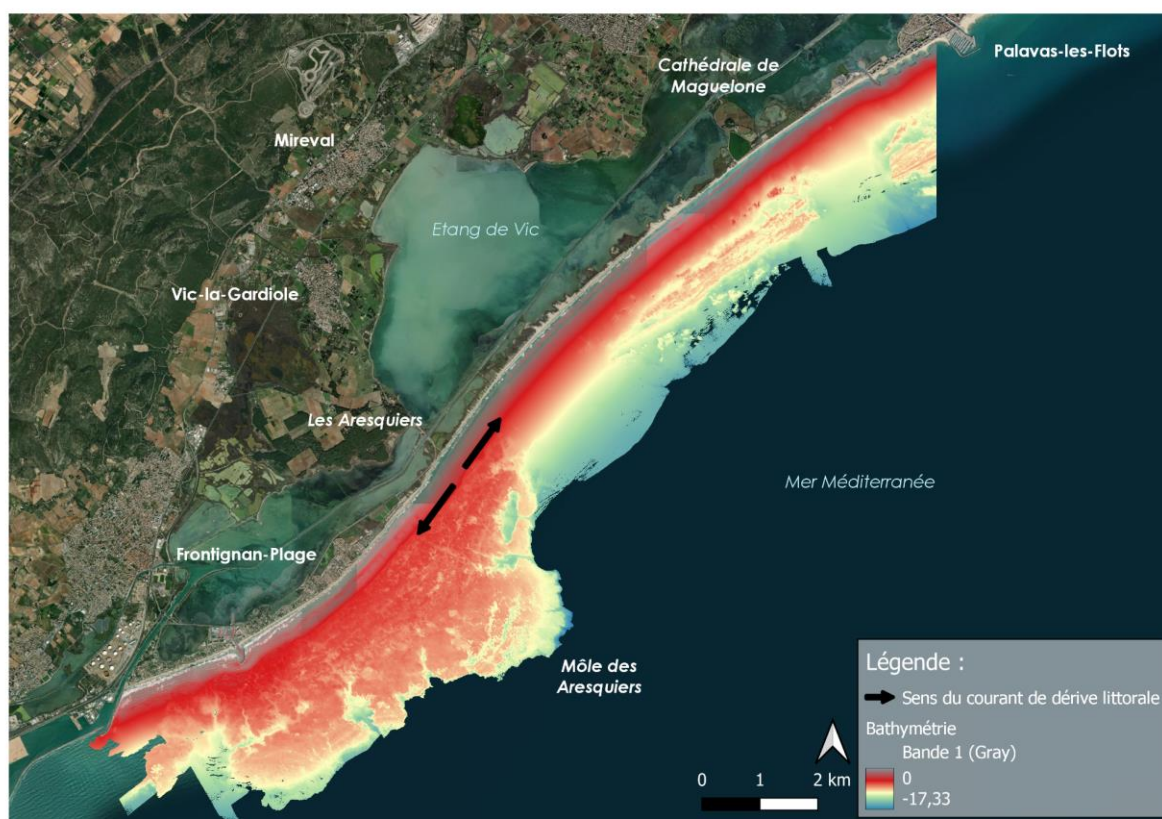


Illustration 20 : Modèle numérique de terrain illustrant la bathymétrie au droit du lido de Frontignan et de Maguelone, et notamment les barres rocheuses à l’avant-côte (SaVE, 2023 d’après Durand et Heurtefeux, 2003).

En conséquence, le lido de Maguelone ne bénéficie pas d’apports de sable des plages adjacentes et l’arrivée de sédiments par la dérive littorale se trouve quasiment nulle (Durand et Heurtefeux, 2003 ; Cerema, 2020). La dynamique longitudinale ainsi réduite, le transport transversal devient dominant sur notre secteur d’étude, engendré par la houle et les vagues de tempêtes.

Cette dynamique se manifeste dans le paysage par la présence d’une quantité importante de galets et de *beachrocks* sur la plage, par la formation d’*overwash* et d’un profil de plage bien particulier avec la présence de talus.

En mobilisant les sédiments essentiellement sur l’axe du profil de plage, le déferlement de la houle provoque un transit entre l’avant-côte et la plage émergée. Ainsi, des zones d’accumulation apparaissent et forment des talus, ou ruptures de pente, perpendiculaires à la ligne de rivage et signalent la variation fréquente de la limite du jet de rive (Illustration 22).





Illustration 21 : Des galets et un profil de plage en talus ou « en escalier » sur le lido de Maguelone (Source : SaVE, avril, 2023).

La granulométrie du secteur d'étude est particulièrement élevée. Sur l'avant-côte, les barres interne et externe présentent des grains de sables compris entre 0,151 mm et 0,174 mm ce qui est globalement semblable aux secteurs adjacents (Durand et Heurtefeux, 2003 ; Raynal et al, 2015³¹). Toutefois, la plage émergée connaît une granulométrie plus importante avec des sédiments plus grossiers (D50 entre 0.258 mm et 0.342 mm). Ce phénomène est bien visible sur cette carte avec un pic granulométrique sur le lido de Maguelone, qui le distingue des plages voisines (Illustration 23 et 24) (Raynal et al, 2015).

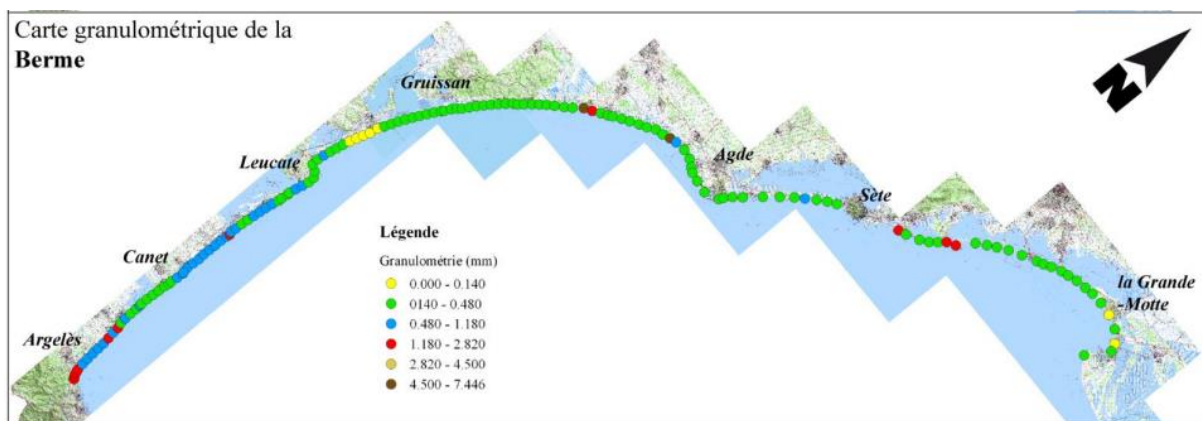


Illustration 22 : Carte granulométrique de la berme des plages du golfe du Lion d'après Raynal et al, 2015.

³¹ Raynal, O., Certain, R., Brunel, C., Aleman, N., Robin, N., Guérinel, B. et Montel, L., 2015. LITTOSIS - Analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux littoral du Languedoc-Roussillon. Rapport final LITTOSIS, pp. 46.



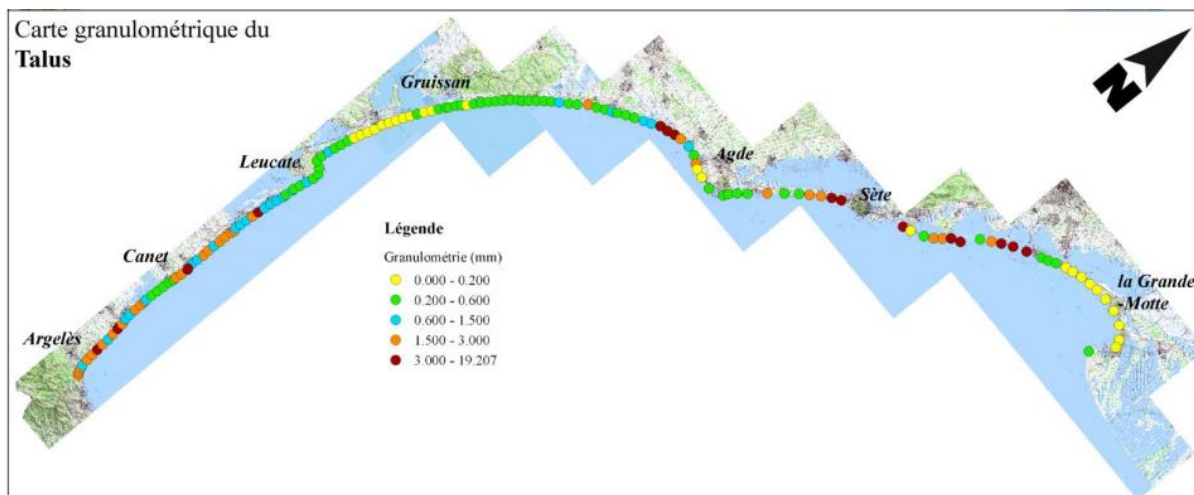


Illustration 23 : Carte granulométrique du talus (en bas) des plages du golfe du Lion d'après Raynal et al, 2015.

La portion littorale entre Leucate et la Camargue est marquée par des alluvions provenant du delta du Rhône, ayant subi un long processus de météorisation. Le lido de Maguelone bénéficie de ces apports de sables fins, mais se caractérise aussi par la présence de sables grossiers et d'une quantité particulièrement importante de graviers, de galets, de *beachrocks* et de coquillages (Illustration 25).

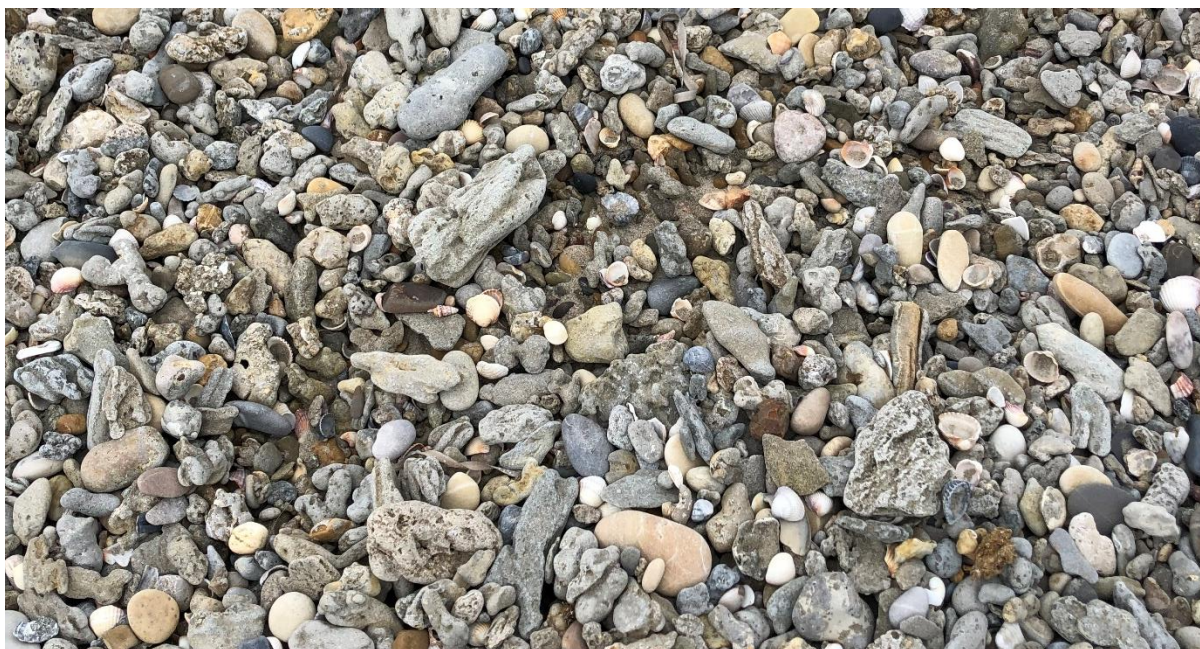


Illustration 24 : Extrait de sédiments présents sur le lido de Maguelone (graviers, coquillages, galets, beachrocks, etc.) (SaVE, 2023).

Les galets proviennent de l'érosion des fonds rocheux, en grès, présents au large (Durand et Heurtefeux, 2003 ; Cerema, 2020). La formation des houles racle les barres rocheuses et arrache des morceaux de roches qui vont être transportés sur la plage. Cette dynamique s'inscrit sur un temps suffisamment long pour permettre aux morceaux arrachés de se polir et de présenter une forme sphérique ou ellipsoïdale. Dans un procédé relativement similaire, les *beachrocks* viennent de substrats sableux agglomérés et solidifiés, affleurant le plancher sous-marin. Arrachés par l'énergie de la mer et les vagues de tempêtes, ce substrat est transporté dans la foulée jusque sur le rivage ; d'où



une forme anguleuse, cassante, témoignant d'un procédé de formation plus court et brutal (Cerema, 2020).

Lors d'épisodes de coups de mer, ou de tempêtes, cette dynamique transversale devient paroxysmale et se manifeste par la formation fréquente d'*overwash* (cf. régime d'*overwash* des tempêtes) : le cordon littoral est transpercé par le déferlement des vagues, la mer et l'étang se rejoignent et le sable d'avant-côte est projeté à l'arrière du cordon dunaire, dans la lagune (*Illustrations 26, 27 et 28*).



Illustration 25 : Lido de Maguelone en avril 1982, le cordon est bien constitué (Sources : IGN Remonterletemps, SaVE, 2023)



Illustration 26 : Lido de Maguelone en juin 1996, des brèches et lobes d'overwash sont bien visibles à l'arrière du cordon (Sources : IGN remonterletemps, SaVE, 2023).

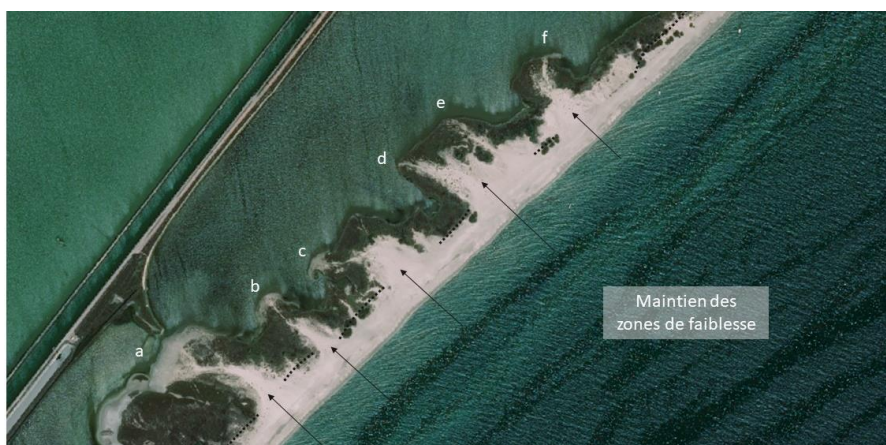


Illustration 27 : Lido de Maguelone en 2021, les éléments de 1996 sont toujours présents et des gorges sont toujours empruntées lors des tempêtes (signalées par des lettres) (Sources : Pléiades 2021, SaVE, 2023).



Cette dynamique transversale provoque donc un transit sédimentaire important le long du profil de plage : depuis l'avant-côte jusqu'à la lagune. Ce mécanisme entraîne une mobilité générale du lido, par à-coups, avec un fort accent mis sur la projection de sable vers l'arrière.

2.5 Evolution historique du lido

Les parties précédentes de ce rapport évoquent une dynamique générale de recul du lido vers les terres, impulsée par un déplacement des sédiments le long du profil de plage avec une formation originelle sur les barres rocheuses et une position actuelle à l'arrière de celles-ci.

En entrant plus dans le détail, les données historiques appuient cette thèse et permettent de poser des valeurs et apportent plus de précision.

La comparaison des représentations historiques du lido sur les cartes anciennes permet de constater un recul généralisé depuis le début du XIXe siècle. Sur les 200 dernières années, depuis 1819, le lido a connu une translation vers la lagune allant de 100 m à 200 m selon les secteurs à un rythme irrégulier (CEPREL, 1989 ; Durand et Heurtefeux, 2006 ; Castaings, 2012 ; Boulet et al, 2020³²).

Toutefois, ce recul n'est pas suivi d'une réduction de la surface émergée du lido : en comparant les documents cartographiques, le lido occupe une surface de 158 ha en 1819, 157 ha en 1960, 169 ha en 1982 et 159 ha en 2018 (CEPREL, 1989 ; EID-Méditerranée, 2020).

Le lido évolue alors à volume constant, sous la forme d'une translation parallèle vers la lagune, en "roulant sur lui-même".

Lors des phénomènes tempétueux extrêmes, qui ont un impact majeur sur l'évolution et le recul du lido, l'instauration d'un régime d'*overwash* permet une certaine conservation des sédiments sur le lido. Le sable d'avant-côte est projeté en arrière à défaut d'être propulsé au large par le courant de retour des vagues de tempête. Ainsi, au fur et à mesure des tempêtes, les sédiments sont déplacés par à-coups en arrière, dans la lagune, et instaurent ce mouvement de roulement (*Illustration 29*) (CEPREL, 1989 ; Durand et Heurtefeux, 2006 ; Boulet et al, 2020.)

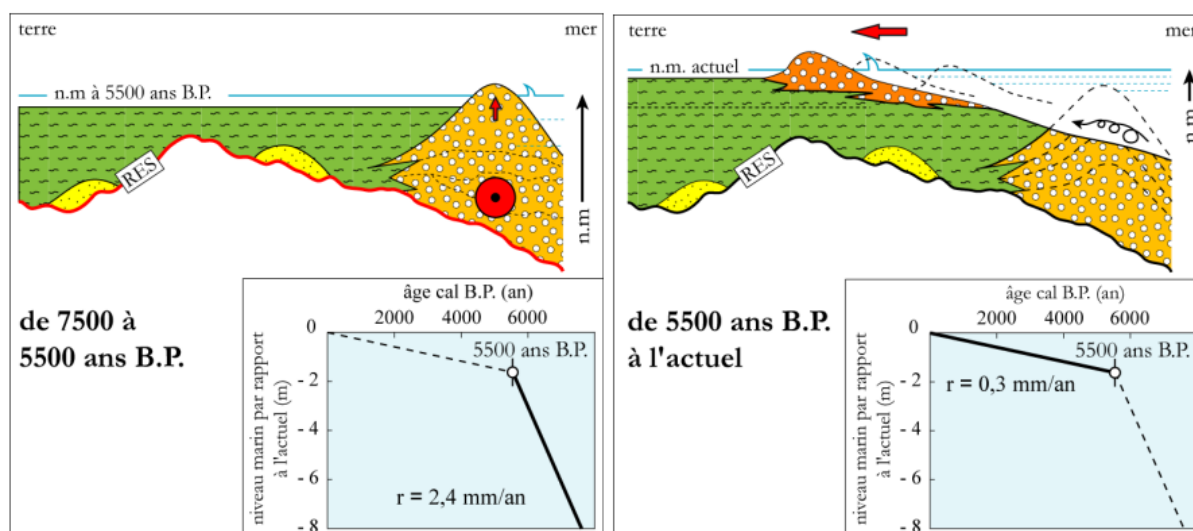


Illustration 28 : Schéma représentant l'émergence d'un lido et sa migration à volume constant en roulant sur lui-même (d'après Certain, 2017 et Raynal et al, 2010).

³² Boulet D., Gervais M., Heurtefeux H., Loste C., Beullier M. Aménagement et changement climatique sur un lido en érosion : approche prospective et paysagère sur le secteur des Aresquiers. 2020.

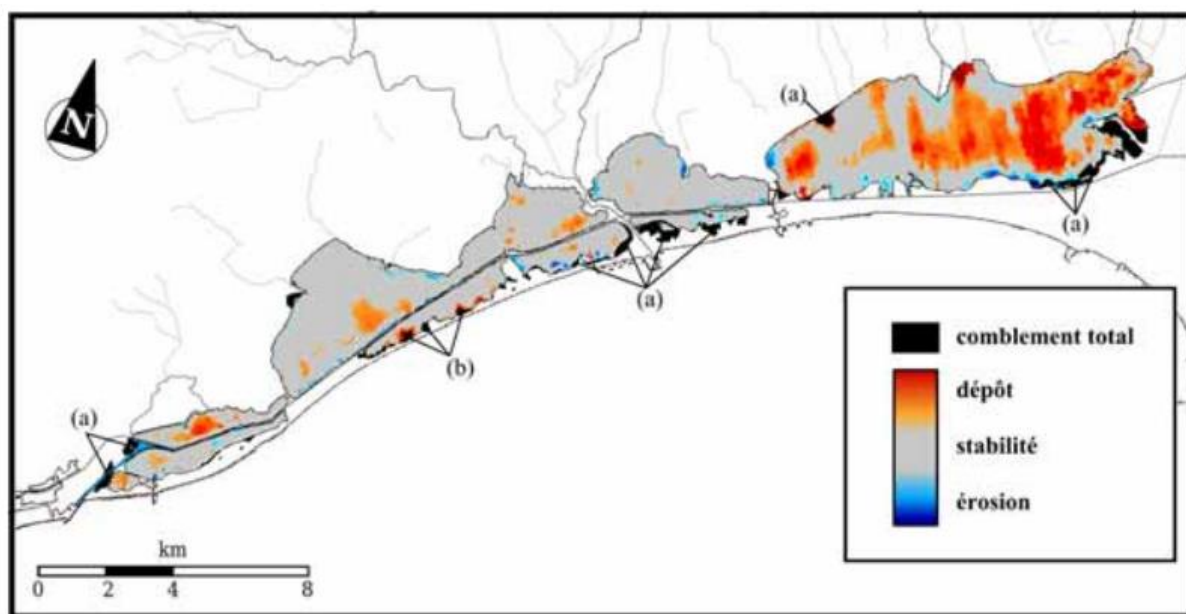


La formation d'*overwash* et l'ouverture régulière de brèches lors des tempêtes fragilisent le développement d'un cordon dunaire, déjà affaibli par les vents de terre.

Le cordon est donc peu élevé, avec une altitude du lido rarement supérieure à 3 m, et discontinu. Les nombreuses brèches constituent des zones de faiblesses qui s'entretiennent avec le temps, puisqu'une fois creusées elles présentent un couloir privilégié par les houles de tempêtes suivantes (Gervais, 2012).

La partie centrale du lido est particulièrement sujette à ce phénomène, qui s'explique en partie par la présence d'incisions au sein des barres rocheuses d'avant-côte à ces endroits, les laissant sans protection face aux assauts de la mer (*Illustration 21*).

En conséquence, la lagune de Pierre Blanche, située directement à l'arrière du lido présente une dynamique récente de comblement progressif par l'apport de sédiments marins issus de ces *overwash* (*Illustration 30*) (Castaings et al, 2011³³ ; Castaings, 2012³⁴).



*Illustration 29 : Evolution des bilans sédimentaires des lagunes palavasiennes entre 1965 et 2005. La lagune de Pierre Blanche présente une dynamique de comblement naturel par intrusions marines et lobes d'*overwash* (« b ») (d'après Castaing et al, 2011).*

Ces créations de brèches et de jonctions entre la mer et l'étang ont donné lieu, par le passé, à la formation de graus plus ou moins temporaires sur le lido.

Dans l'histoire moderne, l'exemple le plus récent est l'ouverture d'un grau sur une période légèrement supérieure à 17 mois à la suite de la tempête du 6 au 8 novembre 1982.

Des images aériennes d'archives permettent de constater que le lido présentait un profil pré-tempête équilibré : en avril 1982, le couvert végétal est particulièrement important et les *overwash* sont

³³ Castaings J., Dezileau L., Fiandrino A., Verney R. 2011. Evolution morphologique récente d'un complexe lagunaire méditerranéen : le système des étangs Palavasiens (France). *Revue Paralia*, Vol. 4, pp 7.1–7.12.

³⁴ Castaings J., « Etude du fonctionnement hydro-sédimentaire d'un écosystème lagunaire sur des échelles de temps multiples. Application au complexe lagunaire « étangs Palavasiens – étang de l'Or – canal du Rhône à Sète ». Thèse de doctorat en Sciences de la Terre et de l'univers, sous la direction de Laurent Dezileau, Université de Montpellier II, 2012, 204p.



absents (*Illustration 31*) (Sabatier et al, 2008³⁵). La tempête de novembre 1982, particulièrement violente, perturbe cet équilibre, ouvre plusieurs brèches et des graus se creusent sur la partie centrale (*Illustration 32*). Enfin, une image d'avril 1984, soit 17 mois plus tard, montre que le grau est toujours présent mais en voie de comblement (*Illustration 33*).

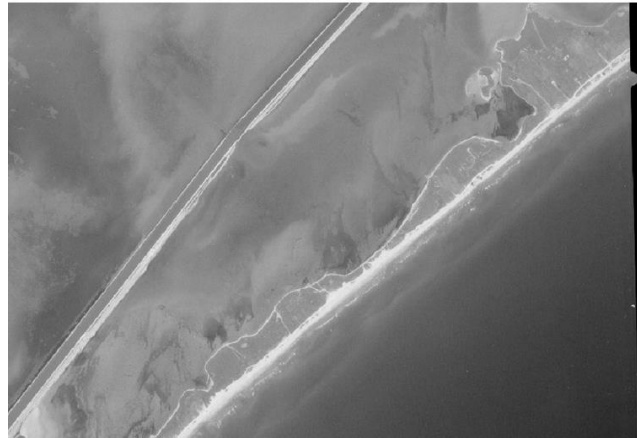


Illustration 30 : Lido de Maguelone en avril 1982, le cordon est bien constitué (Sources : IGN remonterletemps, SaVE, 2023).

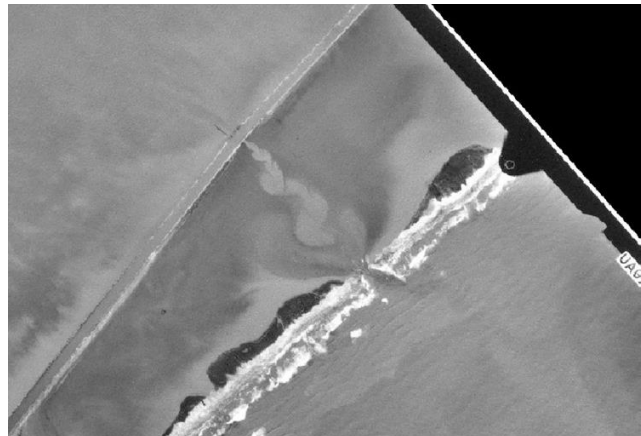


Illustration 31 : Lido de Maguelone en novembre 1982, la tempête a ouvert un grau (Sources : DREAL Occitanie, SaVE, 2023).

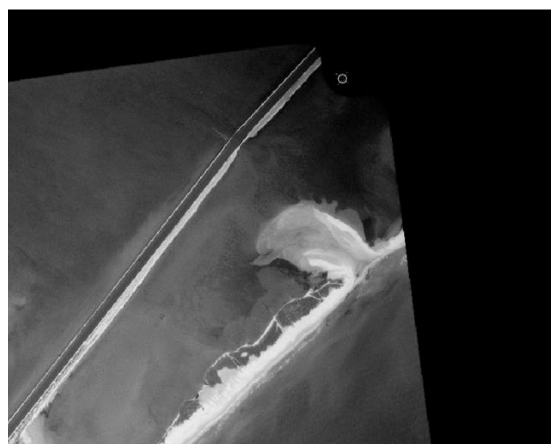


Illustration 32 : Lido de Maguelone en avril 1984, le grau est toujours présent mais en voie de comblement ; notons une quantité importante de dépôts à l'arrière par le courant de flot (Sources : IGN remonterletemps, SaVE, 2023).

³⁵ Sabatier P., Heurtefeux H., Hanot B., Dépôts d'*overwash* et tempêtes à moyen terme sur deux lidos méditerranéens. 2008.



Ces éléments présentent une situation assez instable sur le temps long, avec des brèches et des creusements de graus fréquents, en fonction des tempêtes. Toutefois, ces graus s'inscrivent finalement rarement sur la durée, avec à la place une succession de brèches s'ouvrant et se comblant les unes après les autres. Il semble également que ces graus soient rarement simultanés, et qu'il s'agit plutôt d'une alternance de grau unique à divers endroits du lido.

Une hypothèse face au comblement rapide de ces ouvertures, est la topographie de la lagune de Pierre Blanche. Cette lagune fait partie des moins profondes de la région : sa profondeur maximale se situe autour de 1 m, tandis que sa profondeur moyenne est d'environ 0,50 m. En conséquence, il y a une relative continuité topographique entre l'arrière-dune et la lagune. Le sable projeté à l'arrière du cordon lors des ouvertures de grau se retrouve aisément émergé ; si la profondeur était plus importante, et que les sédiments d'*overwash* se retrouvaient noyés en profondeur, l'instauration d'un grau permanent serait sûrement facilitée. En l'état, lors du creusement d'une passe entre la mer et la lagune, la faible variation topographique permet à la dérive littorale de rapidement restaurer la continuité du cordon et de la plage émergée.

2.6 Gestion récente et interventions contemporaines sur le lido :

Compte-tenu de l'absence d'enjeux humains ou économiques sur le cordon dunaire, le lido de Maguelone n'a pas connu d'interventions de protection lourdes depuis les années 1990. Il s'agit d'un site en évolution naturelle, essentiellement dans un objectif de conservation du patrimoine paysager et écologique.

De fait, les principales interventions d'ingénieries actuelles consistent en l'installation d'ouvrages doux (types ganivelles) de mise en défens afin de canaliser la fréquentation du site.

Quelques ouvrages durs, des merlons de gravas et de tout-venant, ont été installés à la fin des années 1980 (CEPREL, 1989 ; Durand et Heurtefeux, 2003). L'objectif de ces manœuvres était de protéger le lido des intrusions marines et de l'ouverture de grau consécutifs à la tempête de novembre 1982. Les gestionnaires de l'époque craignaient alors un déséquilibre trop important qui aurait pu mettre en péril la stabilité du lido et sa dislocation en îles barrières (CEPREL, 1989).

Ces ouvrages n'ont jamais fait l'objet d'un entretien particulier depuis et témoignent d'importantes dégradations. Toutefois, ils ont joué un rôle sur le transit sédimentaire en créant des zones de dépôts plus ou moins importantes à leur pied (*Illustration 36*).





Illustration 35 : Exemple d'un ouvrage dégradé de la fin des années 1980 (à gauche), et de lobes de dépôts de galets marins (à droite), sur le lido de Maguelone (SaVE, avril 2023).

En corrélation avec le fonctionnement hydro-sédimentaire du lido, installer des ouvrages en dur provoquerait une perturbation du transit sédimentaire sur le profil de plage (Durand et Heurtefeux, 2003 ; Samat, 2007³⁶ ; EID-Méditerranée, 2020).

Le lido évolue à volume constant grâce à l'expression des dynamiques naturelles : les sédiments restent sur le cordon. Un ouvrage dur parallèle au rivage impliquerait que l'énergie des vagues de tempêtes soient réfléchies vers le large, créant un courant de retour aux conséquences connues et visibles sur d'autres sites : affouillement au pied de l'ouvrage, abaissement du plancher sous-marin et création d'une fosse, translation vers le large des barres d'avant-côte jusqu'à leur disparition, et érosion des stocks sédimentaires sur le rivage (barres d'avant-côte, plage et cordon dunaire) (*Illustration 37*).

En conséquence, installer des ouvrages durs sur le lido pourraient stabiliser le recul à court terme mais provoqueraient une érosion du lido plus importante qu'actuellement.

³⁶ Samat O., « Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages micro-tidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône ». Thèse de doctorat en Géographie physique et humaine, aménagement, urbanisme, sous la direction de Mireille Provansal et de François Sabatier, Université d'Aix-Marseille 1, 2007, 376p.



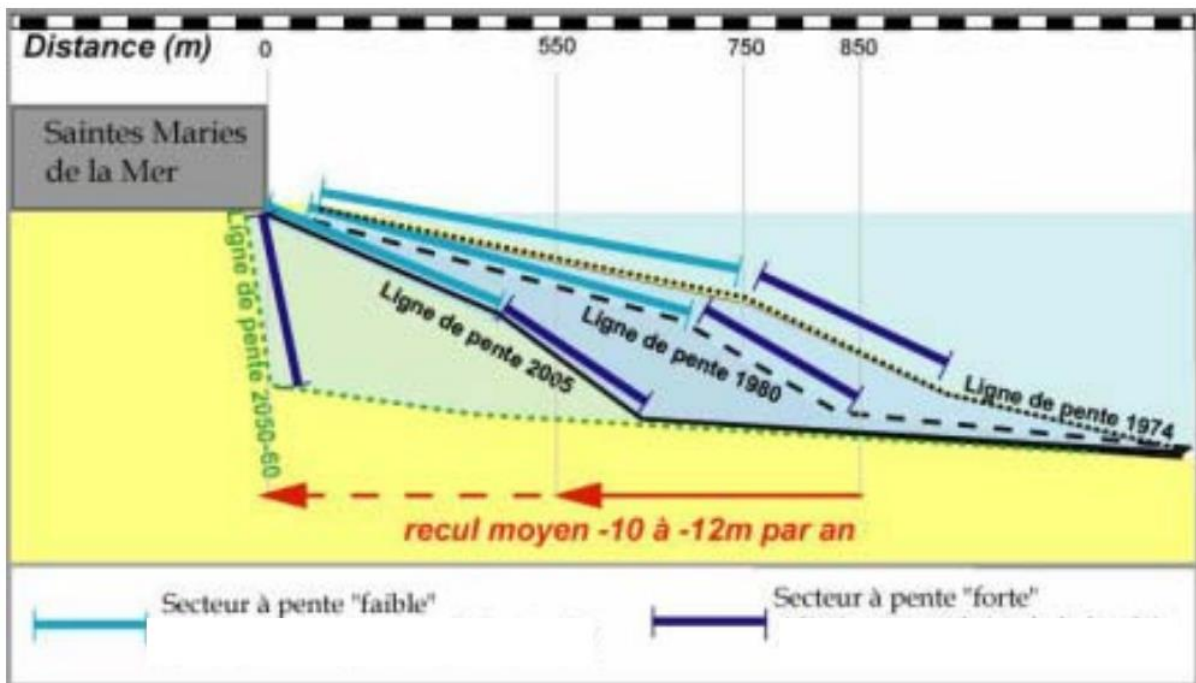


Illustration 36 : Impact d'un ouvrage longitudinal sur la pente de plage, d'après Samat, 2007.

Les dernières opérations d'ampleur sur le lido sont les délocalisations progressive des installations humaines. Dès le début des années 2010, au niveau des Aresquiers, sur la commune de Frontignan, deux restaurants de plage ont été démontés : l'Escale et le Mayflower.

Ces deux restaurants, installés à l'origine à une distance raisonnable du rivage, ont été rattrapés par le recul du trait de côte et étaient directement impactés par les aléas littoraux : recul du trait de côte, déferlement des vagues, etc. (Illustration 38).



Illustration 37 : Les deux restaurants sur la plage des Aresquiers à Frontignan-Plage en 1997 (Image : DREAL Occitanie).



Quelques années plus tard, des bâtiments utilisés par des colonies de vacances, également situés au niveau des Aresquiers mais sur la commune de Villeneuve-lès-Maguelone, étaient démontés. Cette opération était motivée par une volonté des pouvoirs publics et du Conservatoire du Littoral, propriétaire du site, de réfléchir à une recomposition paysagère du lido (*Illustration 39*).



Illustration 38 : Photo aérienne des anciennes colonies de vacances sur le lido de Maguelone aujourd'hui démontées (Sources : EID-Méditerranée, 2019).

Enfin, plus récemment, sur le secteur situé entre le grau du Prévost et la cathédrale de Maguelone, des travaux de restauration et de protection du cordon dunaire ont été déployés. Cette opération a concerné un linéaire total de 1 400 m, et a permis de reprofiler le cordon afin de protéger des zones à enjeux (parking du Prévost et route d'accès à la cathédrale notamment), tout en proposant un renouvellement paysager : plantation de végétation dunaire, révision des accès plages, etc.

Une importante opération concernant le trait de côte a été la suppression des anciens bassins aquacoles et des prises d'eaux auxquelles ils étaient reliés. Ce travail a été le socle d'une opération de recomposition spatiale de l'espace côtier au niveau de la cathédrale : déplacement d'enjeux, consolidation d'un cordon dunaire sur l'espace auparavant occupé par l'étang de la Sarrazine, etc.



3 Elaboration des cartes locales d'exposition au recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans à partir du guide de recommandations Cerema-BRGM

La réalisation des cartes s'appuie sur les recommandations du guide Cerema-BRGM prévu à cet effet, publié en 2022.

La méthode recommandée décrit une série de paramètres responsables du recul du trait de côte, à calculer et additionner afin d'obtenir la localisation des traits de côte projetés. Cette méthode se veut générale et applicable sur l'ensemble du littoral français. Il convient donc de la manipuler avec précaution, afin de l'adapter aux spécificités locales.

Compte-tenu du défi scientifique et technique que représente le positionnement d'un trait de côte projeté sur le temps long, et de la pluralité des trajectoires et combinaisons imaginables, l'élaboration de ces cartes sera précédée par la production de deux scénarios issus d'une concertation entre l'équipe technique, le maître d'ouvrage, et un comité technique composé des services de l'Etat, du Cerema et du BRGM.

Le scénario « médian » consiste en un calcul classique des facteurs de recul, tandis que le scénario « sécuritaire » prévoit l'utilisation de marge haute de façon à maximiser les facteurs de recul. Ces deux scénarios doivent être produits pour chaque projection : la projection à 30 ans ainsi que la projection à 100 ans.

Ce consortium veillera à la bonne conduite de l'étude, au respect de l'application de la méthode et de la vraisemblabilité des scénarios retenus.

La méthode suit une logique présentée sur le tableau ci-dessous (*Illustration 40*), dont chaque étape est détaillée dans la suite de ce rapport.

Notons que l'élaboration de ces cartes ne constitue en aucun cas une prédiction définitive et immuable du recul du trait de côte sur les 100 prochaines années. A l'inverse, il s'agit d'un document ayant vocation à être mis à jour et enrichi, afin de tenir compte de l'occurrence d'événements extrêmes, de l'évolution des choix de gestion et d'aménagement, de l'amélioration éventuelle de la méthode et des techniques de projection, ainsi que de l'affinement des données et connaissances hydro-sédimentaires.

Projection : principaux éléments	Méthodes	Principaux paramètres	Scénario médian	Scénario sécuritaire
1) Évolution chronique	2 approches (§ 2.4)	Taux de recul Tx (m/an)	Tx médian	Tx (marge haute)
2) Reculs majeurs événementiels	2 approches (§ 2.5)	Recul Lmax (m)	Recul Lmax (m)	Recul Lmax (m)
3) Ouvrages	1 approche (§ 2.6)	Pérennité	Au cas par cas	Non pérenne
4) Élévation du niveau de la mer	2 approches (§ 3.3)	Niveau de la mer	Valeurs minimales : 30 ans : + 20 cm 100 ans : + 60 cm ou projections locales basées sur GIEC SSP2-4.5	Valeurs minimales : 30 ans : + 20 cm 100 ans : + 100 cm ou projections locales basées sur GIEC SSP5-8.5
5) Incertitudes sur les résultats	2 approches (§2.7)	Marges d'erreur	Valeurs médianes	Marges hautes

Illustration 39 : Récapitulatif de la méthode de projection du recul du trait de côte décrite dans au sein du Guide de recommandation pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte du Cerema et du BRGM, 2022.



3.1 La tendance d'évolution annuelle moyenne du trait de côte : le paramètre « Tx »

L'élément fondateur de l'étude du recul du trait de côte repose sur le rythme d'évolution annuel moyen du trait de côte observé appelé « Tx ».

3.1.1 *Recommandations et disponibilité de la donnée*

Le calcul de l'évolution annuelle moyenne est encadré par plusieurs critères, afin de garantir la justesse de la donnée :

- Le calcul doit être effectué sur une comparaison d'au minimum cinq traits de côte, couvrant une période passée équivalente à la période de projection ;
- La comparaison des traits de côtes se fera à partir de profils perpendiculaires, espacés de 25 à 100 mètres ;
- Il convient de tenir compte de la méthode avec laquelle les relevés ont été effectués (DGPS, orthophotographie, tracés automatiques, etc.) ainsi que la date associée (des traits de côte d'été ne peuvent être comparés à des traits de côte d'hiver).

Sur la zone d'étude de Villeneuve-lès-Maguelone, l'information concernant les traits de côtes et les orthophotographies n'est pas centralisée au sein d'un observatoire membre du Réseau National des Observatoires du Trait de Côte (RNOTC). La donnée existe mais nécessite de contacter plusieurs structures afin de rassembler un grand inventaire des données disponibles. La recherche s'organise autour des traits de côtes et des orthophotographies mobilisables en essayant de remonter le plus loin possible dans le temps.

Les principales structures ressources étaient le Département de l'Hérault qui missionne l'EID-Méditerranée pour réaliser des campagnes de suivi du trait de côte tous les ans ; la DREAL Occitanie qui détient également une base de données intéressantes avec un grand nombre de traits de côte téléchargeables sur le portail cartographique « Picto Occitanie » ; et l'IGN qui possède des orthophotographies mobilisables.

L'analyse sur les données « traits de côte passés » devra accorder une attention particulière sur les paramètres qui pourraient influencer les résultats, notamment la date de relevé de la donnée. Les évolutions du rivage sont quotidiennes avec une saisonnalité marquée, l'hiver est une période propice aux tempêtes et au recul, tandis que l'été est davantage une période de réalimentation de la plage en sable. C'est donc un critère majeur à respecter lors d'une comparaison diachronique : ils doivent impérativement être relevés à la même période, idéalement en fin d'été, pour pouvoir être comparés sans fausser les résultats.

Il faudra également veiller à retenir des traits de côte les plus précis possibles issus de méthode DGPS, de méthode par orthophotographie et d'images aériennes ou satellites géoréférencées, de méthode par télédétection laser ou lidar, etc. A titre d'exemple, le Cerema fournit des traits de côte à la DREAL Occitanie produits à partir d'une chaîne de traitement d'images satellites à très haute résolution spatiale du satellite Pléiades. Ainsi, ils sont précis et tous issus de la même méthode et du même opérateur, ce sont des données précieuses dans le cadre de notre étude.

Enfin, pour convenir d'une meilleure couverture temporelle, des orthophotographies de bonnes résolutions ont été géoréférencées par nos soins, puis le trait de côte, digitalisé à son tour. Cette technique nous a permis de remonter jusqu'en 1977 avec une continuité de la donnée sur la période. Les traits de côte concernés sont ceux de 1989, 2008, 2012 et 2015. Cette technique est certes moins



précise qu'un trait de côte issu de DGPS mais permet de pallier le manque de données sur certaines périodes, en évitant d'exploiter des traits de côte trop proches entre eux et donc de surreprésenter les tendances de certaines décennies.

Le tableau ci-dessous récapitule les données utilisées pour le calcul de la tendance d'évolutions annuelle moyenne :

Tableau 2 : Traits de côtes utilisés pour calculer la valeur « Tx ».

Dates	Méthodes	Sources	Précision
18/07/1977	Orthophotographie	DREAL – CEREGE	< 10 m
12/06/1989	Orthophotographie	EID-Méditerranée (géoréférencé et numérisé par SaVE)	< 10 m
01/07/1997	Géodimétrie	DREAL	3 m
01/09/2000	DGPS	DREAL – SMNLR	3 m
/10/2008	Orthophotographie	EID-Méditerranée (numérisé par SaVE)	< 5 m
03/07/2012	Orthophotographie	IGN (numérisé par SaVE)	< 5 m
29/06/2015			
10/10/2017	Orthophotographie	DREAL-Cerema	3 m
12/09/2019			
02/09/2020			

Au total, ce travail a permis de rassembler 10 traits de côte sur une période allant de 1977 à 2020 pour calculer une tendance d'évolution avec une précision satisfaisante (*Illustration 41*).

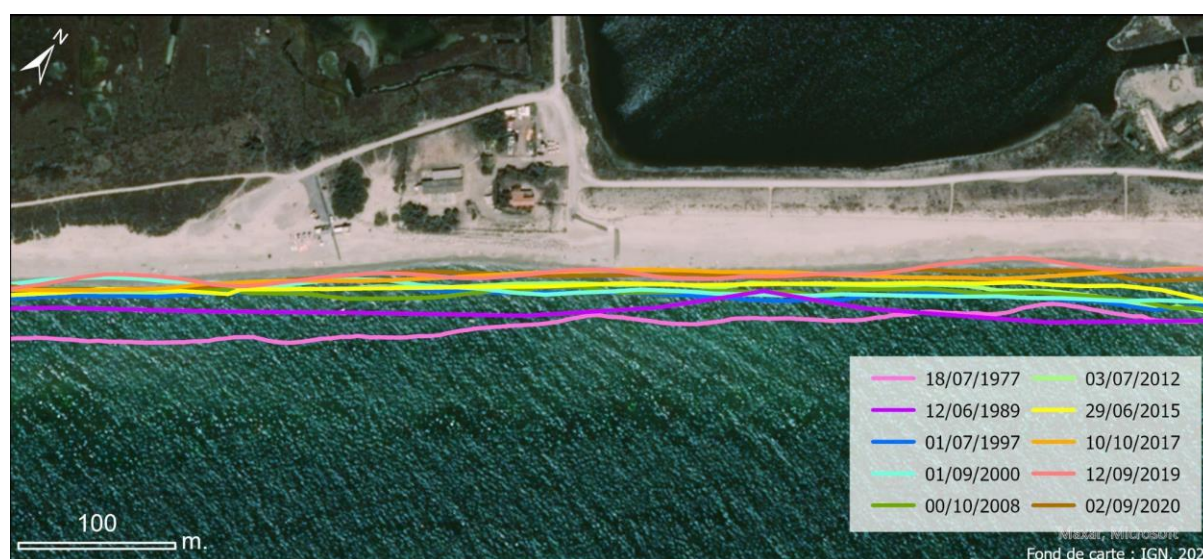


Illustration 40 : Représentation des traits de côte sélectionnés pour le calcul du « Tx » sur le lido de Maguelone.



3.1.2 Calcul et projections de la valeur « Tx »

Une fois les traits de côte sélectionnés et validés, il convient de passer au calcul de la valeur « Tx ». Pour mémoire, ce calcul doit être réalisé sur la base de profils espacés de 25 m à 100 m. Le module DSAS, une extension développée par l'USGS³⁷ pour le logiciel SIG ArcMap. Ce module permet de générer automatiquement des transects perpendiculaires à intervalles réguliers, spécialement pour le calcul des tendances d'évolutions annuelles moyennes du rivage (la valeur « Tx »).

Techniquement, les différents traits de côtes mobilisés se confrontent aux transects générés, et le logiciel mesure les écarts entre ces différents « points de passage » pour calculer « Tx » en m/an (voir *Illustration 42*, ci-dessous).

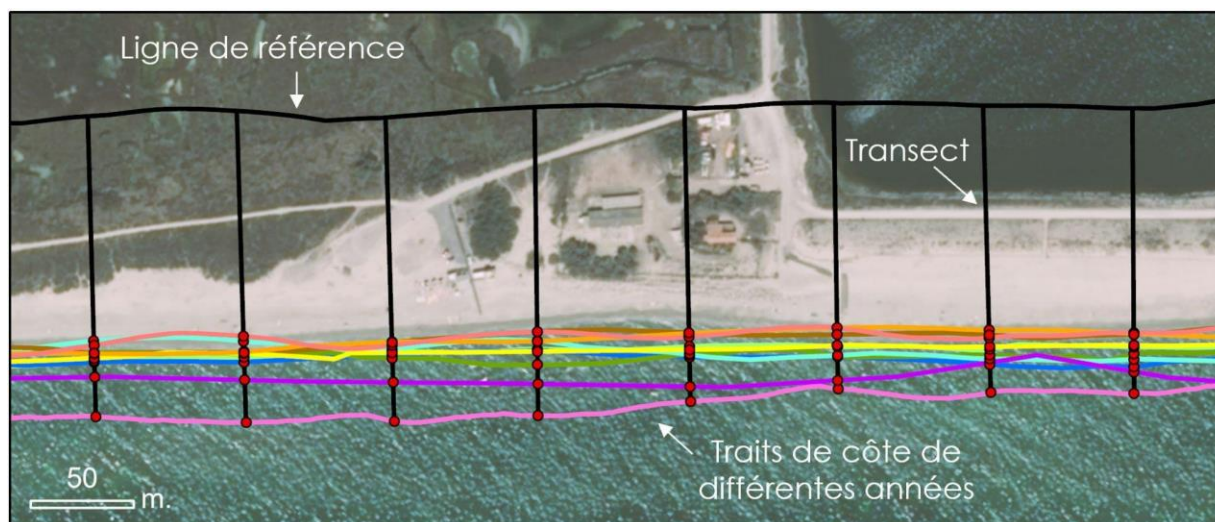


Illustration 41 : Représentation du calcul effectué à partir de profils de plage sur le lido de Maguelone (SaVE, 2023).

Ici, les transects sont espacés de 100 m puisque le littoral de notre zone d'étude est linéaire, n'est pas perturbé par des ouvrages, et présente un profil très homogène. Les résultats ne permettent pas de signaler de réelles différences entre des transects espacés de 100 mètres et de 25 mètres.

Une fois DSAS exécuté et la couche des transects générées, les calculs sont effectués automatiquement. Parmi les nombreux éléments calculés, celui qui nous intéresse est le « LRR » pour *Linear Regression Rate*, indice de régression linéaire.

Ainsi, pour 99 transects créés, le logiciel a permis de calculer 99 valeurs de « Tx » associées (*Illustration 43*). Ces différentes valeurs « Tx » vont pouvoir être projetées sur chaque transect linéaire, afin d'obtenir la tendance de recul correspondante.

³⁷ Pour *United States Geological Survey*, l'institut d'études géologiques des Etats-Unis.

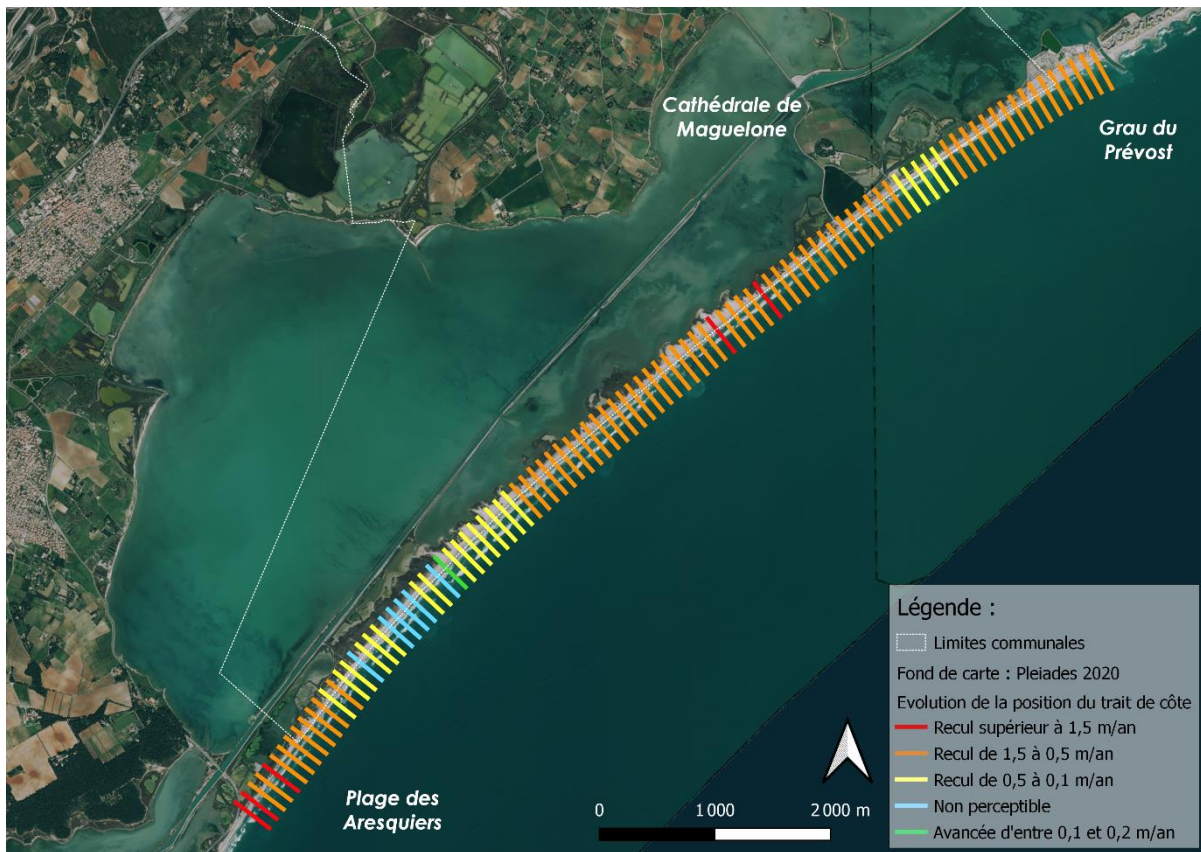


Illustration 42 : Résultats de la tendance annuelle moyenne d'évolution du trait de côte sur chaque transect, en m/an (SaVE, 2023).

A Villeneuve-lès-Maguelone, le trait de côte recule en moyenne de 0,8 m/an avec un recul pouvant être supérieur à 1,5 m/an sur le secteur central où se trouvent les *overwash*. Un recul important est également constaté sur le secteur des Aresquiers. Ces résultats sont conformes à ceux observés par l'indicateur national de l'érosion côtière du Cerema.

La projection du trait de côte commencera à partir de l'année de référence (2020). La tendance d'évolution « Tx » sera multipliée par 30 afin d'obtenir une valeur de recul à horizon 30 ans. Pour l'horizon 100 ans, cette valeur sera multipliée par 70, car l'année de référence correspondra à l'année 2050.

Lors de l'élaboration du scénario sécuritaire, des marges d'erreurs « hautes » seront additionnées à la valeur « Tx » afin de prendre en compte des incertitudes associées.

A l'aide du degré de précision des traits de côte analysés (5 m en moyenne), le module DSAS évalue un intervalle de confiance de 90% pour ses calculs de projection, nommée « LCI90 » ; cette valeur sera ajoutée à la marge d'erreur des traits de côte sélectionnés pour construire le scénario « sécuritaire ».

L'intervalle de confiance de DSAS est en moyenne de 38 cm/an. Ce chiffre est multiplié par 30 pour 2050 puis par 100 pour 2120. Ainsi, l'intervalle de confiance est de +/- 11 m pour 2050 et de +/- 38 m pour 2120. De plus, une marge d'erreur du trait de côte final de 3 m est ajoutée pour tenir compte de possibles imprécisions.

Pour construire le scénario « sécuritaire », et tenir compte des marges hautes à appliquer, le résultat du « Tx » sera donc majoré d'un recul de 7 m pour 2050 et de 20,5 m pour 2120.



Notons toutefois que sur notre période d'observation, le niveau marin a aussi évolué. Ainsi, d'après le Labex OT-Med et Aix-Marseille Université, le niveau marin s'est élevé d'entre 15 et 20 cm sur le XXe siècle, soit entre 0,15 cm/an et 0,2 cm/an sur la période ; cette tendance s'accélère depuis l'an 2000 et serait plutôt de 0,3 cm/an (EID-Méditerranée, 2021³⁸). En suivant ces tendances, la mer se serait élevée de 9,5 cm entre 1977 et 2020.

En appliquant la loi de Bruün (voir partie suivante), une telle augmentation du niveau marin impliquerait un recul moyen de 7 m du trait de côte sur l'ensemble des transects, qu'il faudrait déduire de la valeur « Tx ». Toutefois, ce calcul convient si les paramètres du profil de plage sont restés les mêmes qu'aujourd'hui sur la période (profondeur de fermeture, longueur du profil et hauteur du sommet de dune), ce qui est largement contestable. Cette mesure tient donc davantage de l'ordre de l'indicateur que d'une donnée exacte.

Tableau 3 : Synthèse des résultats des projection obtenues et de la construction des scénarios après le paramètre « Tx ».

		Horizon 30 ans	
		Scénarios « médian »	Scénario « sécuritaire »
« Tx » Recul annuel moyen		- 0,8 m - 23 m En moyenne	0,8 m + marges hautes - 30 m En moyenne
			Horizon 100 ans
		Scénarios « médian »	Scénario « sécuritaire »
« Tx » Recul annuel moyen		- 0,8 m - 76 m En moyenne	0,8 m + marges hautes - 96,5 m En moyenne

Résultats, le paramètre « Tx » est responsable d'un recul maximal de 48 m pour 2050 et de 160 m pour 2120 dans le cas de scénarios « médian », et de 55 m pour 2050 et 180 m pour 2120 dans le cas d'un scénario « sécuritaire » (*Illustrations 44, 45, 46 et 47*).

³⁸ Synthèse des données sur l'érosion du trait de côte pour l'ensemble du département de l'Hérault. Taux d'évolution du trait de côte sur la période 2009-2020 et projection à l'horizon 2050-2100 sur le littoral hérault. Convention annuelle EID-Méditerranée et CD34, 2021.





Illustration 43 : Résultats du recul causé par le paramètre "Tx" sur la partie Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

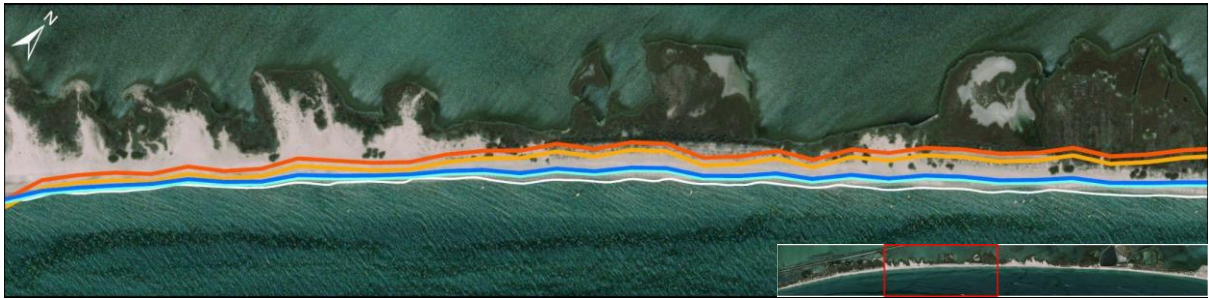


Illustration 44 : Résultats du recul causé par le paramètre "Tx" sur la partie Centrale-Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).



Illustration 45 Résultats du recul causé par le paramètre "Tx" sur la partie Centrale-Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

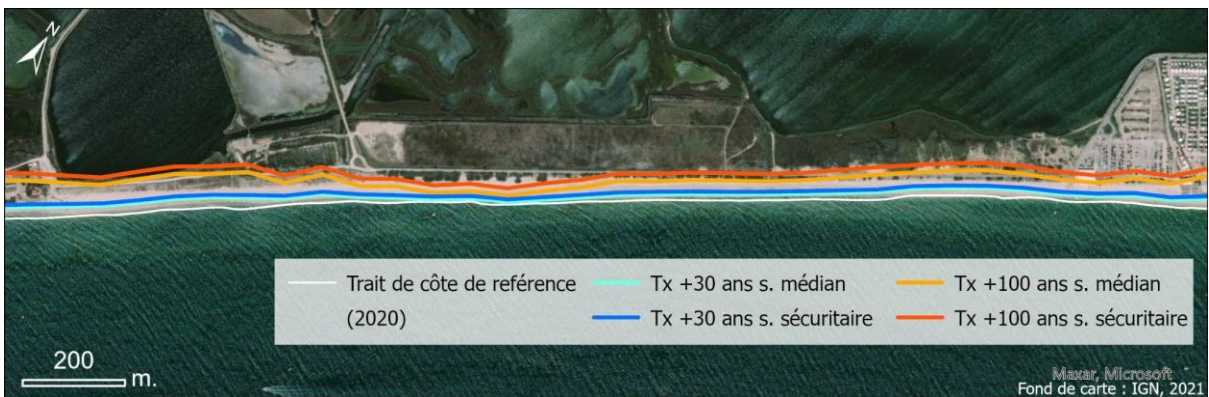


Illustration 46 Résultats du recul causé par le paramètre "Tx" sur la partie Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).



3.2 Prise en compte de l'évolution du niveau marin et application de la loi de Bruün

Au recul lié seulement à « Tx », un recul supplémentaire doit être ajouté afin de tenir compte de l'effet de l'élévation du niveau marin.

3.2.1 *Principes et critique de la loi de Bruün :*

La loi de Bruün est un modèle mathématique développé par Per Møller Bruün, ingénieur civil danois, en 1962. Cette loi cherche à théoriser l'effet de l'évolution du niveau marin sur la répartition des sédiments sur le rivage, et par extension sur l'évolution de la ligne de rivage.

Le concept de Bruün repose sur un principe général qui est que la répartition des sédiments sur le rivage repose sur un profil d'équilibre (la pente de Bruün). Ainsi, en connaissant la hauteur du profil (de la profondeur de fermeture au sommet de dune) et sa longueur, il est possible de connaître de la pente du profil associé à un niveau marin donné (*Illustration 48*). En modifiant le niveau marin, le modèle permet d'estimer une nouvelle pente et donc un recul du trait de côte associé.

Concrètement, l'hypothèse est que l'élévation du niveau marin érode le cordon dunaire et que les sédiments sont transférés en mer.

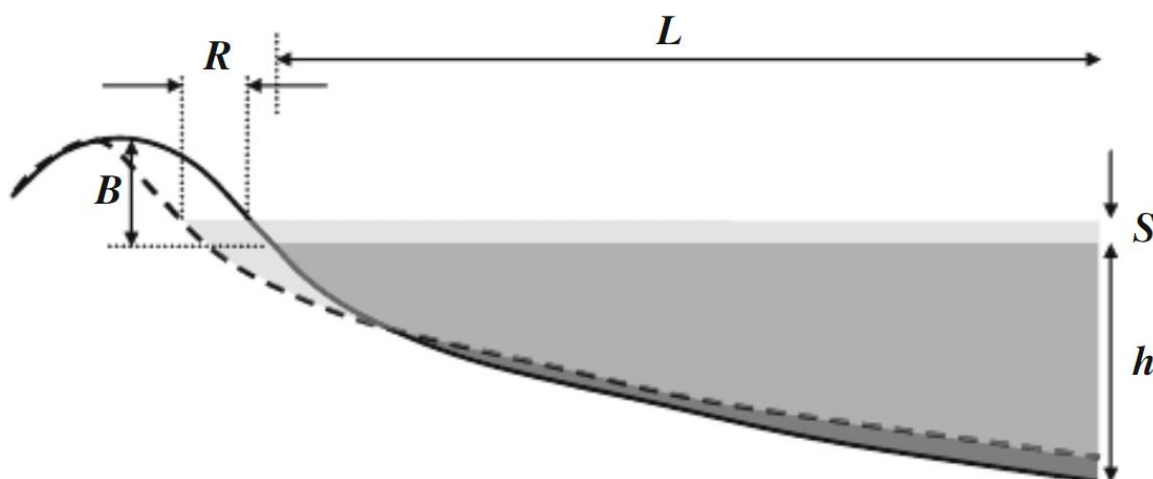


Illustration 47 : Schéma représentant un profil de plage et le principe de la loi de Bruün (1962) ; avec « h » pour la profondeur de fermeture, « S » pour le niveau marin, « L » pour la longueur du profil, « B » pour la hauteur du sommet de dune, et « R » pour le recul du trait de côte (d'après Ranasinghe et al, 2012³⁹).

Pour calculer le recul du trait de côte en fonction de l'élévation du niveau marin, la loi de Bruün (1962) propose les deux formules suivantes qui se vérifient :

$$R = \frac{SL}{h + B} = \frac{S}{\tan \beta}$$

R : le recul du trait de côte, en mètres ;

S : l'élévation du niveau de la mer, en mètres ;

³⁹ Ranasinghe R., Callaghan D., Stive M. Estimating coastal recession due to sea level rise : Beyond the Bruün rule. *Climatic change*, 110(3) : 561-574. 2012.



L : la longueur du profil, du sommet de la dune à la profondeur de fermeture, en mètres ;

h : la profondeur de fermeture, soit la profondeur à partir de laquelle la houle ne transporte plus les sédiments du plancher marin, en mètres ;

B : la hauteur du sommet de dune, en mètres ;

β : la pente du profil de plage.

Le modèle de Bruün reste néanmoins critiquable : il s'agit d'un calcul simplifié, en deux dimensions (longueur et hauteur de profil), et qui ne prend donc pas en compte des facteurs importants, tel que la dérive littorale, l'impact sur les transferts sédimentaires, la submersion marine et les *overwash*, les ruptures de cordon, etc. (Durand et Heurtefeux, 2002). C'est un concept qui se veut généraliste, permettant de calculer un ordre de grandeur, mais réellement pertinent que dans des situations bien particulières qui ne correspondent pas au lido de Maguelone qui roule sur lui-même plus qu'il ne s'érode vers le large (Brunel, 2010⁴⁰).

Toutefois, prédire avec précision le recul induit par une élévation donnée du niveau marin reste un travail théorique (Dubois, 2002), et l'une des seules méthodes qui permet de le faire est la loi de Bruün (1962). Aucun modèle alternatif ne fait consensus plus de 60 ans après la publication du modèle de Bruün, et le guide Cerema-BRGM prévoit et recommande son utilisation pour l'élaboration des cartes de projection. Il convient donc d'utiliser la loi de Bruün (1962) pour ce qu'elle est, à savoir un calcul qui permet d'obtenir un ordre de grandeur en attendant de développer un modèle plus précis.

3.2.2 Application de la loi de Bruün (1962) : calcul des limites du profil de plage

La loi de Bruün impose de connaître la profondeur de fermeture. Pour cela, deux méthodes peuvent être proposées. La première consiste à exploiter des profils de plage multi-dates, pour cela il faut avoir de la donnée disponible sur une période suffisamment longue. Seulement, peu de travaux se sont intéressés à l'évolution du profil de plage dans le temps à partir de relevés bathymétriques.

La seconde méthode consiste à utiliser des formules empiriques, en particulier celles qui tiennent compte à la fois de la hauteur et de la période des vagues. Les formules empiriques de R.J. Hallermeier (1981) et W.A. Birkemeier (1985) sont les plus présentes dans la bibliographie⁴¹, et leur utilisation est recommandée par le guide Cerema-BRGM.

Sur le lido de Maguelone, les données topo-bathymétriques disponibles sont les suivantes :

- Litto3D 2014/2015 ;
- Litto3D 2011 ;
- Litto3D 2009 ;
- MNT bathymétrique 2015.

⁴⁰ Brunel C., « Evolution séculaire de l'avant-côte de la Méditerranée française, impact de l'élévation du niveau de la mer et des tempêtes ». Thèse de doctorat en Espaces, cultures, sociétés, sous la direction de François Sabatier, Université Aix-Marseille 1 en partenariat avec l'Université de Provence, faculté des lettres et sciences humaines, 2010, 470p.

⁴¹ Exemple de Laouti M., Zargouni F., Modélisation topo-bathymétrique et transit sédimentaire. Exemple des plages sableuses de la baie de Tunis, Nord-Est de la Tunisie. *Géomorphologie*, Vol 15 – n°3, 2009



Dans ce rapport, la formule empirique de R.J. Hallermeier (1981) sera vérifiée par une analyse des données morpho-sédimentaires, pour détecter des frontières naturelles pouvant limiter les transferts sédimentaires.

La formule est décrite comme suit :

$$dl = a_0 H_s + a_2 (H_s^2 / g T_s^2)$$

Avec :

H_s : la hauteur significative des vagues ;

T_s : la période significative des vagues ;

g : la constante gravitationnelle, soit 9,81 m.s⁻² ;

a₀ : 2,28⁴⁴ ;

a₂ : -68,5⁴².

Sur la période 2012-2022, au marégraphe de Sète, la hauteur significative est en moyenne de 3,71 m tandis que la période significative est en moyenne de 8,82 s (*Tableau 4*).

Tableau 4 : Résultats de la période 2012-2022 des campagnes CANDHIS au marégraphe de Sète (Sources : CANDHIS)

Année	Hs (moyenne annuelle)	Ts (moyenne annuelle)
2012	3,14	8,4
2013	4,17	9,3
2014	3,55	8,3
2015	3,13	8,6
2016	4,25	8,9
2017	3,77	9
2018	4,44	9
2019	3,69	9,2
2020	3,02	9,1
2021	3,66	8,5
2022	3,97	8,7
Moyenne de la période	3,71	8,82

Ainsi, la formule devient :

$$dl = (2.28 * 3.71) + (-68.5 * (3.71^2 / (9.81 * 8.82^2)))$$

Où dl = 7,22 m.

Ce résultat est conforme à la bibliographie, où la profondeur de fermeture est placée entre 3 m et 8 m dans le golfe du Lion (Sabatier et al, 2004⁴³), et entre 7 m et 8 m au droit du lido de Maguelone (EID-

⁴² Les valeurs « a₀ » et « a₂ » correspondent à des coefficients de mise en suspension des grains de quartz.

⁴³



Méditerranée, 2021). De plus, ce résultat place la profondeur de fermeture au pied des affleurements rocheux du large (*Illustration 49*).

Le croisement de toutes ces données permet de valider la valeur de 7,22 m pour la suite des calculs.

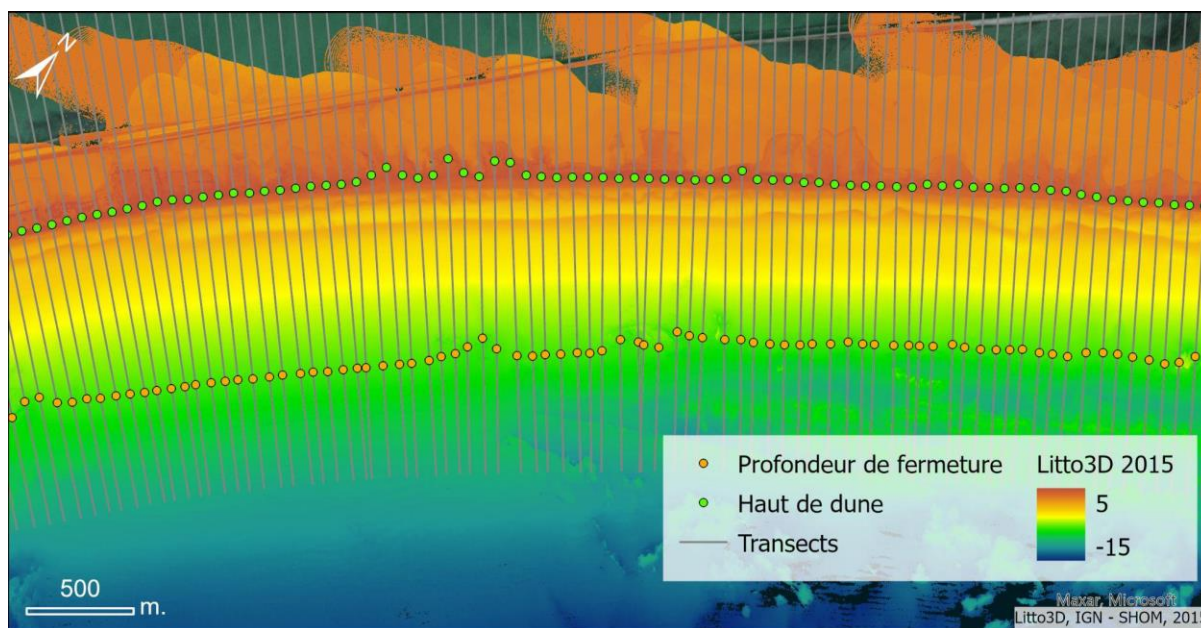


Illustration 48 : Extrait des données topo-bathymétriques issues de Litto3D, où sont cartographiés le sommet de dunes sur chaque transect et la profondeur de fermeture (IGN ; SaVE, 2023).

Les transects utilisés sont le calcul de la distance entre la profondeur de fermeture et le sommet de dune sont ceux générés lors du calcul de « Tx ».

Le sommet de dune a été défini grâce aux mêmes données Litto3D 2015 : un point a été placé sur chaque transect où la dune était la plus haute. Au total, sur les 99 transects définis, le sommet de dunes moyen est 2,69 m ; avec des hauteurs comprises entre 1,18 m et 4,88 m.

En conséquence, ces calculs permettent d'estimer un profil de plage aux limites suivantes :

- La hauteur du profil est moyenne de 9,91 m (entre 8,4 m et 12,1 m) avec un sommet de dune à 2,69 m en moyenne et une profondeur de fermeture à 7,22 m ;
- La longueur du profil, c'est-à-dire la distance entre la profondeur de fermeture et le sommet de dune, est en moyenne de 769,9 m avec des valeurs comprises entre 1222,33 m et 587,5 m.

3.2.3 Application de la loi de Bruün (1962) : scénarios d'élévation du niveau marin

Les valeurs estimées de l'élévation du niveau marin doivent être effectuées pour les deux périodes cibles. Afin d'être le plus précis possible, le guide Cerema-BRGM recommande d'utiliser les estimations régionales calculées sur la base des trajectoires de développement socio-économiques des travaux du GIEC⁴⁴, appliquées aux données des réseaux marégraphiques locaux.

Ces données régionales d'élévation du niveau de la mer peuvent être obtenues sur le portail cartographique du BRGM ou de la NASA. Les données du portail du BRGM permettent d'avoir sur chaque année mais sont issues du cinquième rapport du GIEC (2014) et se limite à l'année 2100 ; tandis que les données de la NASA couvre uniquement une échelle décennale, mais sont issues du sixième

⁴⁴ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.



rapport du GIEC (2021) et s'arrêtent à la décennie 2150. Les données utilisées proviendront donc du portail de la NASA qui sont les seules à nous permettre d'obtenir des données pour l'horizon 100 ans issues des derniers travaux du GIEC.

Les données régionales doivent être obtenues à partir de deux trajectoires de développement produites par le GIEC :

- La trajectoire SSP2-4.5⁴⁵ : est une trajectoire qui correspond à un scénario de développement conforme aux objectifs adoptés lors de la Convention de Paris, qui prévoient une élévation de la température à la surface de la Terre de +2°C à horizon 2100 ;
- La trajectoire SSP5-8.5 : est une trajectoire qui correspond à un scénario de développement équivalent à celui que nous connaissons aujourd'hui, et où l'élévation de la température à la surface de la Terre serait de +4°C à horizon 2100.

Le guide de recommandations Cerema-BRGM conseille de paramétrer le scénario « médian » sur des données régionales issues de la trajectoire SSP2-4.5, et d'utiliser la trajectoire SSP5-8.5 pour produire le scénario « SSP5-8.5 ».

Ainsi, au marégraphe de Sète, le portail de la NASA traduit ces trajectoires de développement par une élévation de 22cm ou de 24 cm du niveau de la mer pour 2050, et une élévation de 69 cm ou de 94 cm pour 2120 (tableau 5).

Tableau 5 : Elévation du niveau marin prévue par les trajectoires de développement socio-économique du GIEC et des projections au marégraphe de Sète par la NASA (Sources : NASA Sea Level Projection Tool, 2023).

	Trajectoire SSP2-4.5	Trajectoire SSP5-8.5
2050	+ 22 cm	+ 24 cm
2120	+ 69 cm	+ 94 cm

Toutefois, les cartes prospectives doivent être réalisées en respectant des seuils minimums d'élévation du niveau marin en fonction des scénarios et des horizons temporels. Ces seuils sont précisés dans le guide de recommandation Cerema-BRGM et sont de 20 cm pour l'horizon 30 ans quel que soit le scénario, et de 60 cm à horizon 100 ans pour le scénario « médian » et de 100 cm pour le scénario « sécuritaire ».

Si pour le premier horizon temporel, les valeurs varient peu et n'entraîneront pas de changement majeur lors de la projection, pour l'horizon 2120, les projections seront très différentes selon l'élévation choisie.

Le choix a été fait de présenter les scénarios d'élévation maximums et minimums pour chaque horizon, ce qui donne des scénarios à 2050 avec +20 et +24 cm et des scénarios à 2120 avec +60 et +100 cm. Ainsi, les décideurs locaux, pourront se réfléchir à partir des marges minimales et maximales sur leur commune.

⁴⁵ SSP pour *Shared Socio-economic Pathway*, qui correspond à une trajectoire de développement socio-économique mondiale.



Ces éléments nous permettent de dresser le tableau suivant (*Tableau 6*) :

Tableau 6 : Eventail des possibilités d'élévation du niveau marin pour l'élaboration des scénarios « médian » et « sécuritaire » pour l'horizon 30 ans et 100 ans.

	Seuils réglementaires minimums	Données régionales
2050	Scénario médian : + 20 cm Scénario sécuritaire : + 20 cm	Scénario médian : + 22 cm Scénario sécuritaire : + 24 cm
2120	Scénario médian : + 60 cm Scénario sécuritaire : + 100 cm	Scénario médian : + 69 cm Scénario sécuritaire : + 94 cm

Notons que pour le scénario « sécuritaire » de la carte de projection 100 ans, la donnée régionale est inférieure au seuil minimum (94 cm < 100 cm). Cette valeur est donc invalidée, et le scénario « sécuritaire » ne pourra être produit qu'à partir d'une élévation du niveau marin de 100 cm pour la projection 100 ans.

3.2.4 Application de la loi de Bruün (1962) : Résultats

Les dispositions précédentes permettent de calculer le recul prévu par la loi de Bruün (1962) en reprenant la formule :

$$R = \frac{SL}{h + B} = \frac{S}{\tan \beta}$$

Avec :

R : le recul du trait de côte, en mètres ;

S : l'élévation du niveau de la mer, en mètres ;

L : la longueur du profil, du sommet de la dune à la profondeur de fermeture, en mètres ;

h : la profondeur de fermeture, soit la profondeur à partir de laquelle la houle ne transporte plus les sédiments du plancher marin, en mètres ;

B : la hauteur du sommet de dune, en mètres ;

β : la pente du profil de plage.

Pour le transect 1, dans le cadre du scénario « médian » basé sur une élévation du niveau marin de 20 cm à horizon 2050, la formule devient :

$$R = \frac{0,20 * 1204,89}{7,22 + 3,38} = \frac{0,20}{\tan (10,6/1204,89)} = 22,73$$

Ainsi, sur le transect 1, avec ce scénario, le recul dû à l'élévation du niveau marin est de 22,73 m.



Ce calcul est dupliqué sur chaque transect en s'adaptant aux mesures qui leurs sont associées (sommet de dune et longueur du profil).

A la suite l'ensemble des calculs, le recul du trait de côte lié à l'élévation du niveau marin en appliquant la loi de Bruün se résume au tableau suivant :

Tableau 7 : Résultats obtenus après l'application de la loi de Bruün sur chaque transect.

Scénario d'élévation du niveau marin	Recul moyen (à titre indicatif)	Recul maximum
+ 20 cm	- 16 m	- 23 m
+ 24 cm	- 19 m	- 27 m
+ 60 cm	- 47 m	- 69 m
+ 100 cm	- 78 m	- 114 m

Les résultats sont relativement hétérogènes, avec au moins deux zones divisées au niveau de la Cathédrale de Maguelone (*Illustration 50*). Cela s'explique par le fait que la partie entre le Grau du Prévost et la Cathédrale est plus aménagée, avec un cordon dunaire renforcé par des ouvrages récents. Le cordon est donc plus développé et la pente de plage plus importante, ce qui est un facteur qui freine le recul selon le modèle de Bruün.

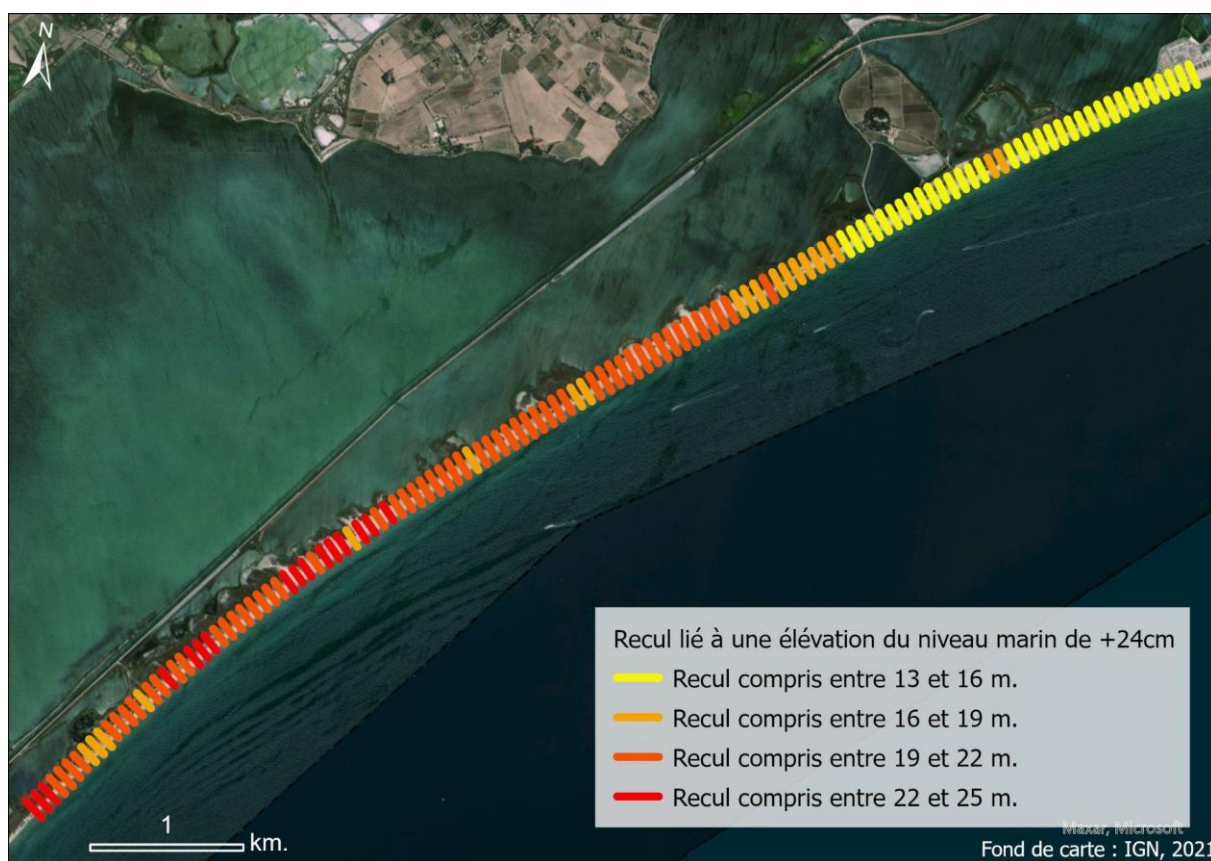


Illustration 49 : Recul associé à une élévation de 24 cm selon le modèle de Bruün (SaVE, 2023).



Ces éléments permettent de nourrir les scénarios de la façon suivante (Tableau 8) :

Tableau 8 : Synthèse des résultats des projection obtenues et de la construction des scénarios après le paramètre « Tx » et « loi de Bruün, 1962 ».

		Horizon 30 ans			
		Scénarios « médian »		Scénario « sécuritaire »	
« Tx » Recul annuel moyen		- 0,8 m/an - 23 m En moyenne		0,8 m/an + marges hautes - 30 m En moyenne	
	Loi de Bruün Elévation du niveau marin	+ 20 cm - 16 m En moyenne	+ 22 cm - 17 m En moyenne	+ 20 cm - 16 m En moyenne	+ 24 cm - 19 m En moyenne
		Horizon 100 ans			
		Scénarios « médian »		Scénario « sécuritaire »	
« Tx » Recul annuel moyen		- 0,8 m/an - 76 m En moyenne		0,8 m/an + marges hautes - 96,5 m En moyenne	
	Loi de Bruün Elévation du niveau marin	+ 60 cm - 47 m En moyenne	+ 69 cm - 54 m En moyenne	+ 100 cm - 78 m En moyenne	

Ces scénarios se traduisent en cartes ci-dessous (Illustrations 51, 52, 53 et 54) :





Illustration 50 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx » et la loi de Bruün sur la partie Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

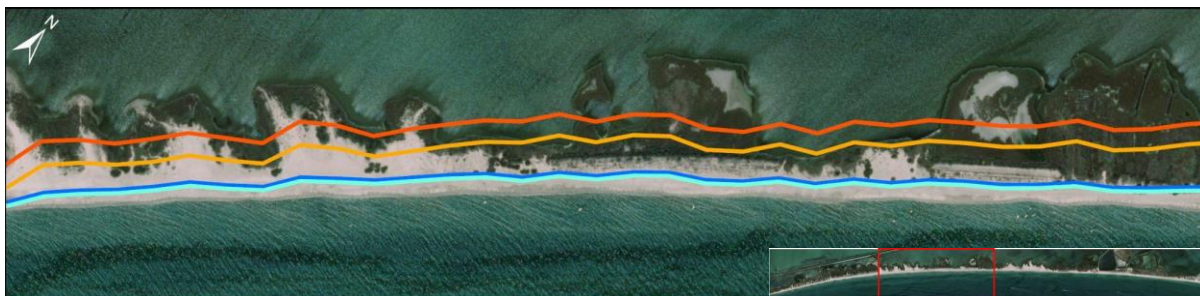


Illustration 51 : Résultats du recul causé par le paramètre « Tx » et la loi de Bruün sur la partie Centrale-Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

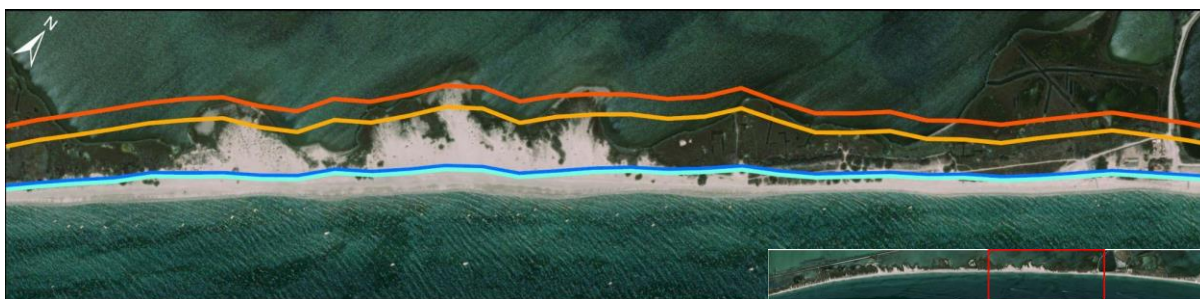


Illustration 52 : Résultats du recul causé par le paramètre « Tx » et la loi de Bruün sur la partie Centrale-Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

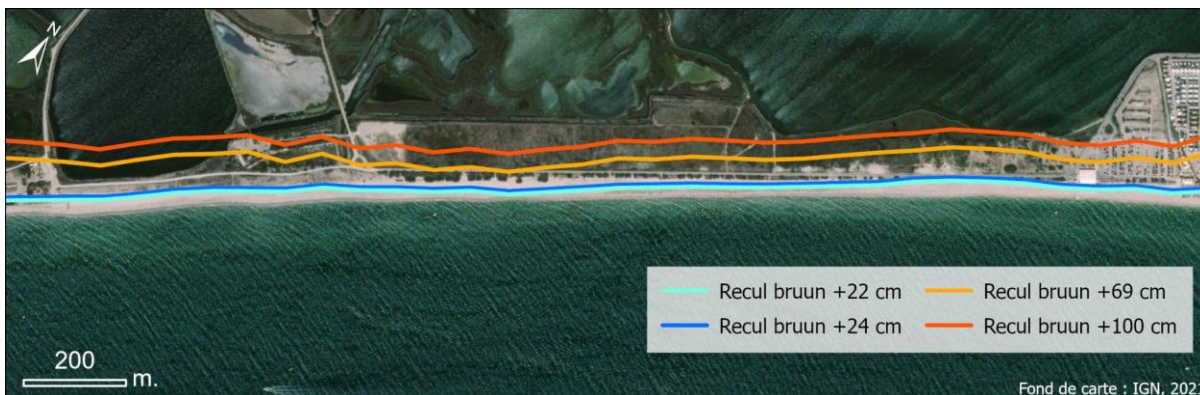


Illustration 53 : Résultats du recul causé par le paramètre « Tx » et la loi de Bruün sur la partie Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).



3.3 Estimer un recul événementiel : la valeur « Lmax »

Le guide Cerema-BRGM encourage à l'application d'une valeur « Lmax » correspondant au recul généré par un événement extrême ponctuel. Sur notre secteur, les événements tempétueux peuvent provoquer des épisodes de submersions marines, lors desquelles l'action mécanique des vagues se répercute directement sur le cordon dunaire. Les conséquences peuvent être le franchissement des dunes par la mer et le développement d'*overwash* dans les étangs ; créant alors ce mouvement de « roulement » et de recul vers le continent.

3.3.1 Etude des événements extrêmes connus :

Les recherches documentaires sur les événements extrêmes anciens ne fournissent généralement pas de valeur mesurée du recul du trait de côte selon un protocole établi et fiable. En l'absence de valeur historique mesurée pour les phénomènes passés, il est recommandé d'associer le dire d'expert à des intervalles d'incertitudes chiffrés.

Pour le premier horizon temporel, il est envisageable de choisir une valeur « Lmax » correspondant à un recul ponctuel maximal pour une période de retour de 30 ans minimum. Pour l'horizon temporel à 100 ans, entre une valeur basée sur les observations et une autre basée sur la période de retour centennale évaluée par analyse statistique des extrêmes, il est recommandé de choisir la plus forte valeur de recul.

Les tempêtes de références qui ont marqué le territoire sont les tempêtes de novembre 1982, de décembre 1997 et de décembre 2003. Une étape bibliographique est une nouvelle fois primordiale pour trouver les informations souhaitées sur ces tempêtes (*Tableau 9*) :

Tableau 9 : Eléments récoltés sur les tempêtes historiques du golfe du Lion et sur lesquelles des données permettent d'estimer un recul « Lmax » :

Evénements	Forçages	Impacts	Sources
6/11/1982	Durée : 143 h 59 Hs : 6,00 m Ts : 9,2 s Hauteur d'eau : 1,35 m	Recul estimé entre 20 m et 30 m ; ouverture de graus ; abaissement des crêtes dunaires d'environ 1 m ; érosion d'entre 500 m ³ /ml et 600 m ³ /ml entre les isobathes 0 et 10 m entre 1981 et 1986.	CEPREL, 1989 ; Durant, 1999 ; Gervais, 2012.
16/12/1997	Durée : 87 h Hs : 6,98 m Ts : 10,37 s Hauteur d'eau : 1,06 m	Contexte pré-tempête instable (hiver 1995 et 1996) ; perte de sédiments estimée à 150m ³ /ml sur l'ensemble du profil ; MétéoFrance évoque un recul de 20m.	Durand, 1999 ; Gervais, 2012 ; Cerema, 2020 ; MétéoFrance
13/10/2016	Durée : 36 h Hs : 5,40 m Ts : 10,10 s Hauteur d'eau : 0,90 m	Modélisation XBeach du BRGM : recul maximal de l'ordre de 13 m aux Aresquiers et 15 m à Frontignan-Plage.	Valentini et Balouin, 2020
20/01/2020	Durée : 113 h 30 Hs : 3,45 m Ts : 9,8 s Hauteur d'eau : 0,41 m	Recul estimé à 10 m par le Réseau Tempête Occitanie.	Fiche tempête Gloria, RTO

Certes, plusieurs travaux bibliographiques traitent le sujet des tempêtes et de leurs impacts sur le littoral. Néanmoins, la fiabilité de ces données peut parfois poser question. Comme préconisé dans le guide Cerema-BRGM, nous ferons donc des analyses complémentaires.



3.3.2 Traitement SIG et photo-interprétation

Le travail de bibliographie et de collecte d'informations sur les événements historiques et donc complété par une étude des images disponibles. L'objectif est de pouvoir estimer un recul événementiel du trait de côte par un travail d'analyse d'images pré et post-tempêtes par un traitement SIG et de la photo-interprétation.

Exemple ci-dessous, avec des images des tempêtes de décembre 1997 et de décembre 2003 (Illustrations 55, 56 et 57).

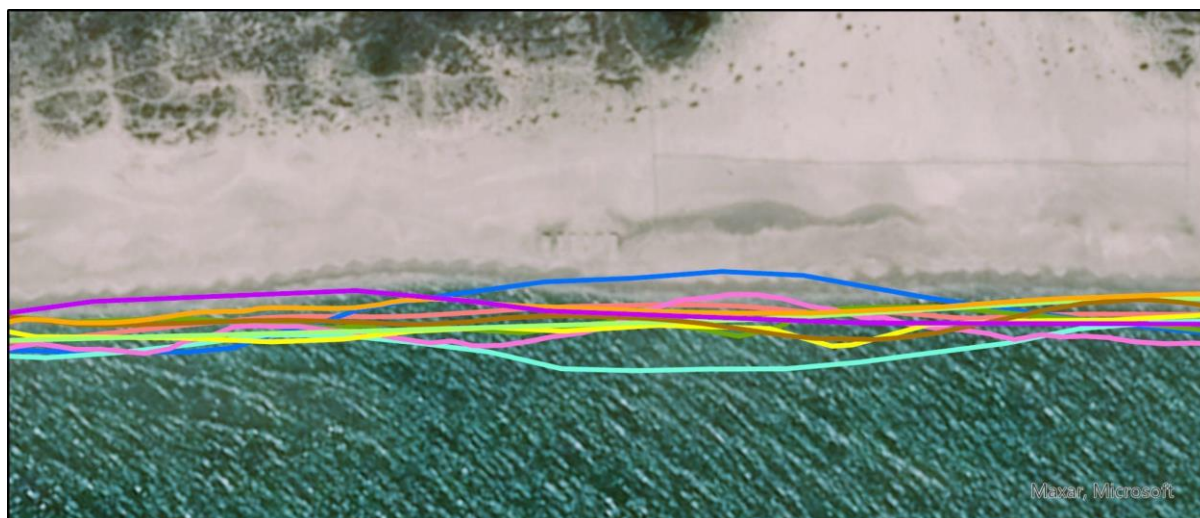


Illustration 54 : Image satellite centrée sur les écluses présentes sur le lido. Aucun des 10 traits de côtes collectés pour cette étude ne se trouve derrière les écluses (SaVE, 2023).



Illustration 55 : Photographie aérienne de janvier 1998, après la tempête de décembre 1997. Sur cette photo, les écluses se trouvent clairement en mer (DREAL Occitanie).



Illustration 56 : Photographie aérienne prise après la tempête de décembre 2003. Ici aussi, les écluses se trouvent largement à l'avant du rivage.

En comparant les photos des illustrations 56 et 57, et la position des traits de côte de l'illustration 55, il est possible d'estimer un recul événementiel local. Toutefois, malgré un recul avéré lors des tempêtes, notons une forte résilience du lido qui retrouve une position du trait de côte similaire à la situation avant la tempête, puisqu'avec le temps les écluses se retrouvent toujours sur la plage.

La tempête de novembre 1982 est la tempête référence sur le golfe du Lion et les résultats serviront à la construction des scénarios à horizon 100 ans ; tandis que les résultats de la tempête 1997 seront utilisés pour les scénarios à horizon 30 ans.



Le travail effectué pour le recul événementiel de la tempête 1982 se base sur des séries de photographies aériennes verticales : juillet 1982 (pré-tempête), novembre 1982 et mars 1983 (post-tempête) sur le secteur du Prévost ; et juillet 1982 (pré-tempête), novembre 1982 et avril 1984 (post-tempête) (*Illustration 58*).

Des traits de côte seront levés sur chaque période, et seront comparés entre eux à partir des transects utilisés précédemment afin d'identifier une régression linéaire sur chaque transect.

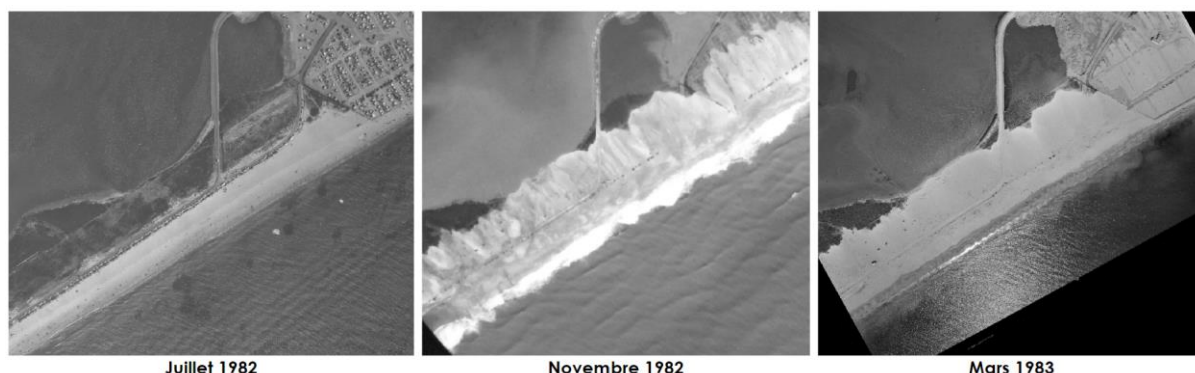


Illustration 57 : Série de photographies aériennes verticales utilisées pour le calcul du recul événementiel lors de la tempête de novembre 1982 (DREAL Occitanie, IGN Remonterletemps, SaVE, 2023).

Le lido est balayé par les vagues avec des projections de sable allant jusqu'à 200 mètres à l'intérieur des terres sur le secteur du Prévost. Cette tempête a donc grandement modifié le paysage. Le recul du trait de côte est beaucoup moins important : notons la difficulté de positionner un trait de côte précis sur les photographies de novembre 1982 (les plus intéressantes). L'objectif est de pouvoir le tracer à la moitié de l'estran, en se servant des formes présentes sur la plage et de la zone de déferlement des vagues.

Le résultat pour la tempête de novembre 1982 correspond à un recul moyen de 28 mètres sur l'ensemble du lido, avec un recul maximum de 67 mètres sur le secteur où un grau s'est ouvert (*Illustration 59*).

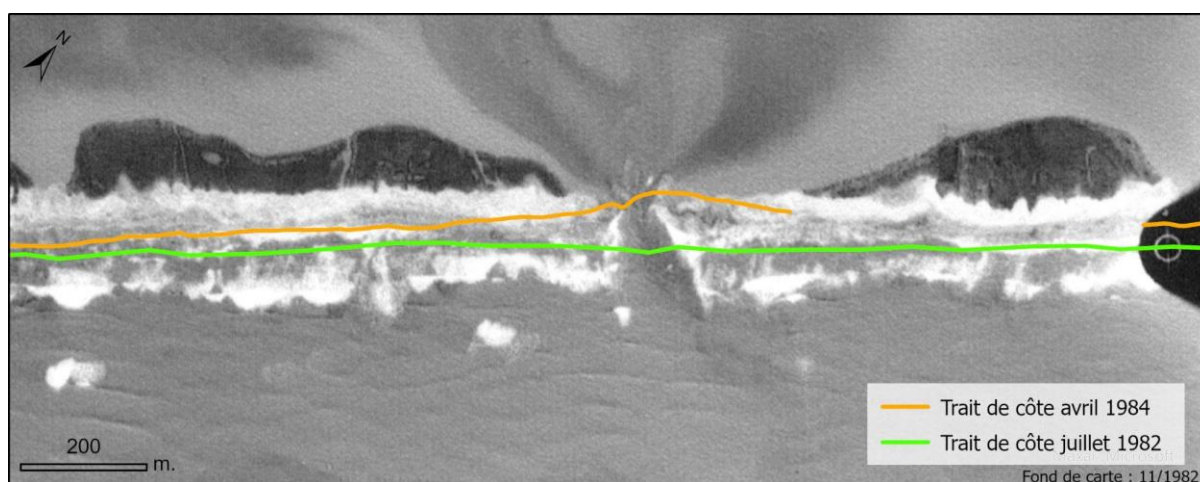


Illustration 58 : Secteur où le recul est le plus important et où un grau s'est ouvert. Sur cette photo, les tracés permettent de comparer les situations pré et post-tempêtes avec un fond de carte de novembre 1982 (DREAL Occitanie, IGN Remonterletemps, SaVE, 2023).



Comme la tempête de novembre 1982, la tempête de décembre 1997 a participé à une modification importante du paysage, notamment par la création de nombreux *overwash*.

Cette tempête intervient après plusieurs années mouvementées puisque sept tempêtes notables ont été constatées entre 1995 et 1996, modifiant la morphologie de l'avant-côte et générant une situation de vulnérabilité exposée par la tempête de décembre 1997 (Durand et Heurtefeux, 2002 ; Brunel, 2010 ; Cerema, 2020).

Pour cette tempête, il n'existe pas de séries de photographies aériennes verticales permettant de travailler de la même façon que pour la tempête de novembre 1982. Ici, il a fallu travailler en exploitant des photographies obliques, et en identifiant des repères sur le rivage nous permettant de mesurer un recul. Ces repères sont essentiellement des ouvrages et constructions humaines à proximité immédiate du rivage : écluse, enrochement, etc. Leur situation vis-à-vis du trait de côte sera ensuite comparée au positionnement par rapport au trait de côte de juillet 1997 relevé par la DREAL Occitanie au moyen d'outils de géodimétrie (*Illustration 60, 61, 62 et 63*).



Illustration 59 : Photo aérienne oblique de janvier 1998, sur le secteur des écluses (DREAL Occitanie).



Illustration 60 : Cartographie du secteur des écluses de l'illustration 59, où est tracés le trait de côte en janvier 1998 en comparaison au trait de côte de juillet 1997.



Illustration 61 : Photo aérienne oblique de janvier 1998, sur le secteur de l'étang de la Sarrazine (DREAL Occitanie).

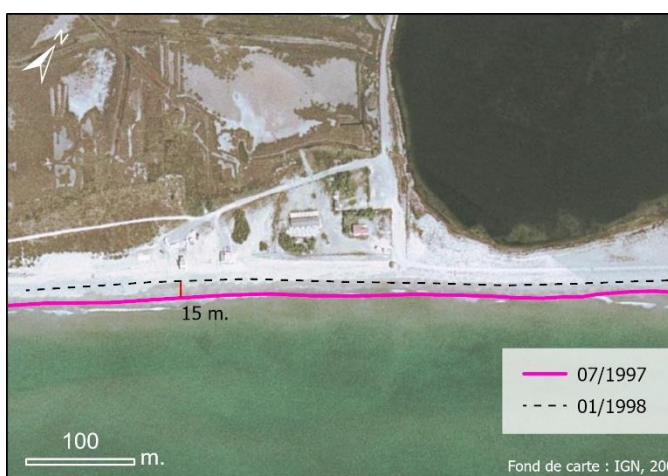


Illustration 62 : Cartographie du secteur de l'illustration 61, où est tracés le trait de côte en janvier 1998 en comparaison au trait de côte de juillet 1997.



A partir de ces observations, le recul moyen sur l'ensemble du lido est d'environ 24,5 m avec un recul maximum d'environ 50 m. Les résultats obtenus avec cette méthode de photo-interprétation des deux tempêtes de 1982 et 1997 sont conformes avec la bibliographie.

Lors de la réunion avec le comité technique où était réuni les services de l'état, le BRGM et le Cerema entre autres, il a été décidé de garder les reculs moyens sur l'ensemble du lido, considérant que le secteur est homogène et réagit de la même façon.

A cette valeur de recul moyen a toutefois été soustrait deux valeurs qui correspondent à la variation saisonnière du rivage, puisque sont comparées des traits de côte d'été avec des traits de côte d'hiver, et à l'élévation anormale de la mer dû aux surcotes des tempêtes. Peu d'informations sont disponibles dans la bibliographie quant à une estimation de cette variation saisonnière. Nous estimons le total à entre 5 et 10 m, avec une soustraction de l'ordre de 7,5 m. Cette décision a été validée par le comité technique.

Nous obtenons alors les valeurs de « Lmax » suivantes :

- « Lmax » pour les projections 30 ans : 17 m ;
- « Lmax » pour les projections 100 ans : 20,5 m.

La construction des scénarios se poursuit en ajoutant ce paramètre de recul (*Tableau 10*) :

Tableau 10 : Synthèse des résultats des projections obtenues et de la construction des scénarios après le paramètre « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax ».

		Horizon 30 ans			
		Scénarios « médian »		Scénario « sécuritaire »	
« Tx » Recul annuel moyen		- 0,8 m/an - 23 m En moyenne		0,8 m/an + marges hautes - 30 m En moyenne	
Loi de Bruün Elévation du niveau marin		+ 20 cm - 16 m En moyenne	+ 22 cm - 17 m En moyenne	+ 20 cm - 16 m En moyenne	+ 24 cm - 19 m En moyenne
« Lmax » Recul événementiel		- 17 m Tempête de décembre 1997		- 17 m Tempête de décembre 1997	
		Horizon 100 ans			
		Scénarios « médian »		Scénario « sécuritaire »	
« Tx » Recul annuel moyen		- 0,8 m/an - 76 m En moyenne		0,8 m/an + marges hautes - 96,5 m En moyenne	
Loi de Bruün Elévation du niveau marin		+ 60 cm - 47 m En moyenne	+ 69 cm - 54 m En moyenne	+ 100 cm - 78 m En moyenne	
« Lmax » Recul événementiel		- 20,5 m Tempête de novembre 1982		- 20,5 m Tempête de novembre 1982	

Les différents scénarios de recul sont ainsi cartographiés de la façon suivante (*Illustrations 64, 65, 66, 67*) :



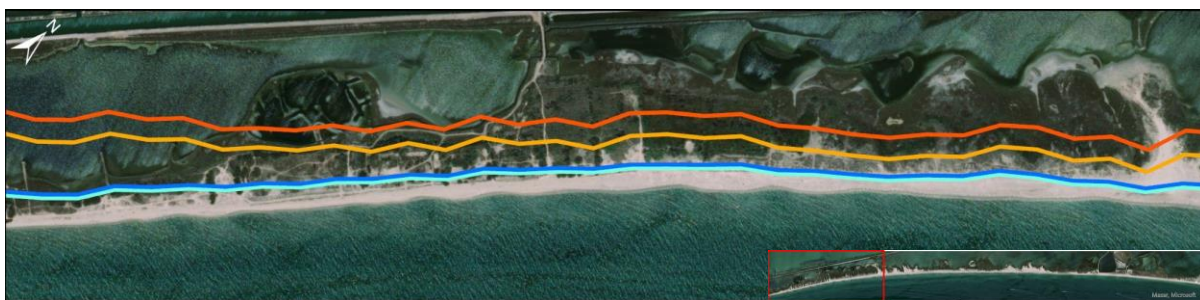


Illustration 63 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax » sur la partie Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

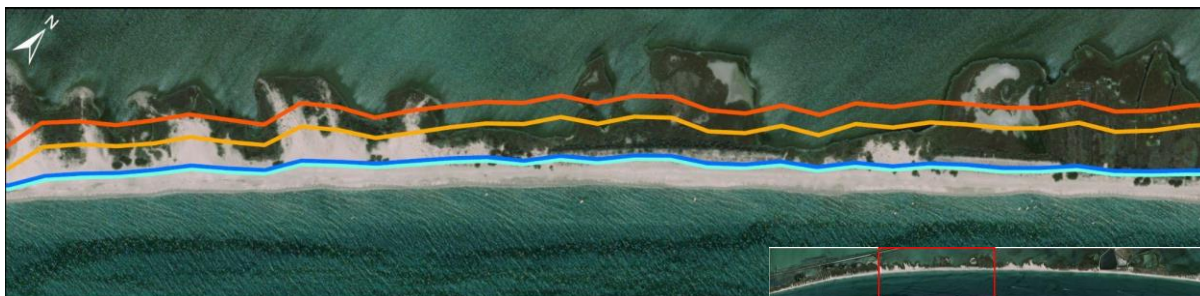


Illustration 64 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax » sur la partie Centrale-Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).



Illustration 65 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax » sur la partie Centrale-Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

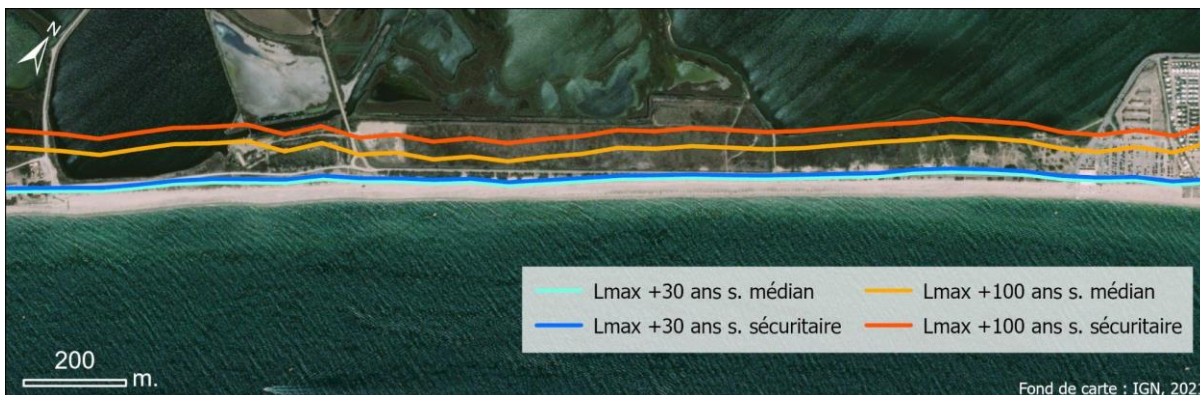


Illustration 66 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax » sur la partie Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).



Le guide méthodologique Cerema-BRGM inscrit l'approche Lmax s'inscrit dans la formulation d'un scénario de projection considérant qu'un événement d'ampleur exceptionnel peut se produire lors de la période à venir. Néanmoins, des difficultés et incertitudes s'ajoutent à ce paramètre.

L'impact du changement climatique modifiera la fréquence et l'intensité des tempêtes, et ainsi pourraient amener à des évolutions morphologiques du lido. Si le lido paraît résilient aujourd'hui, ces nouvelles dynamiques de tempêtes pourraient remettre en question cette résilience. De plus, les incertitudes liées à la montée du niveau marin et les évolutions morphologiques du lido qui en découleraient, ne rendent pas évident d'estimer un Lmax sur notre zone d'étude.

Cependant, toujours selon le guide Cerema-BRGM, si la projection du recul du trait de côte apparaît moins fiable et de qualité incertaine, cette approche présente l'avantage de limiter les risques de sous-évaluation de la zone d'aléa (voir aussi DGPR, 2014⁴⁶).

3.4 Adaptation aux réalités du terrain :

3.4.1 *Prise en compte des ouvrages :*

Les ouvrages doivent évidemment être pris en compte car ils perturbent les dynamiques sédimentaires et influence les évolutions de la position du trait de côte. Tous ces ouvrages et aménagements littoraux sont susceptibles d'influencer la mobilité du trait de côte et ils sont donc à recenser lors de l'étude.

Pour mémoire, le rôle des ouvrages peut être maintenu dans la définition des scénarios prospectifs, sous réserve qu'ils bénéficient d'un gestionnaire bien identifié, soient surveillés, entretenus, et inscrits dans une SLGITC.

Une attention particulière doit être portée aux ouvrages littoraux sans gestionnaire et/ou présentant des dégradations ou un abaissement significatif de l'estran sableux à leur base, susceptibles d'entraîner une ruine de l'ouvrage à l'horizon temporel étudié. Dans ces conditions, il est recommandé que ces ouvrages soient considérés comme inexistant dans la carte locale d'exposition.

Sur le secteur d'étude, aucun ouvrage en mer ou sur la ligne de rivage ne remplis ces conditions. Néanmoins, d'anciens ouvrages en dur affiliés à des merlons sont présents par endroit au niveau du cordon dunaire, et un enrochement se trouve à proximité du centre de loisir. Ils ont été globalement été réalisés dans les années 1980 et 1990 afin de protéger les étangs d'intrusions marines et d'épisodes de franchissement. Cependant, ces ouvrages ne sont plus entretenus depuis plusieurs années, et montrent des signes de dégradation qui permettent à priori de les considérer « inexistant ».

Ce jugement a été discuté et confirmé en concertation avec les décideurs locaux. Aucun ouvrage ne sera compté dans les scénarios. Toutefois, leur présence impliquera forcément un effet de bord par réflexion de l'énergie marine et une perturbation amont-aval du transport sédimentaire déjà visibles par endroits (*Illustrations 68 et 69*).

⁴⁶ Direction Générale de la Prévention des Risques, *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux*, 2014.





Illustration 67 : Un ancien ouvrage ruiné impacte toujours le transport sédimentaire ; ici les sédiments sont accumulés au pied de l'ouvrage jusqu'à ce qu'ils passent par-dessus. (Villeneuve-lès-Maguelone, SaVE, 2023).



Illustration 68 : Autre exemple d'un vieil enrochement sur le lido de Villeneuve-lès-Maguelone, en voie de ruine, et du blocage sédimentaire à ses pieds (SaVE, 2023).

3.4.2 Inondation de zones basses et ouverture d'un grau permanent

Le guide d'élaboration des cartes recommande d'identifier les zones basses, susceptibles d'être progressivement ennoyées de façon permanente par la mer. La commune de Villeneuve-lès-Maguelone est couverte par un PPRL (2002), qui identifie en zone rouge inondation l'ensemble des terres situées sous 2,00 m N.G.F autour de l'étang de l'Arnel et sous 2,50 m N.G.F sur le lido de Maguelone (Illustration 70).

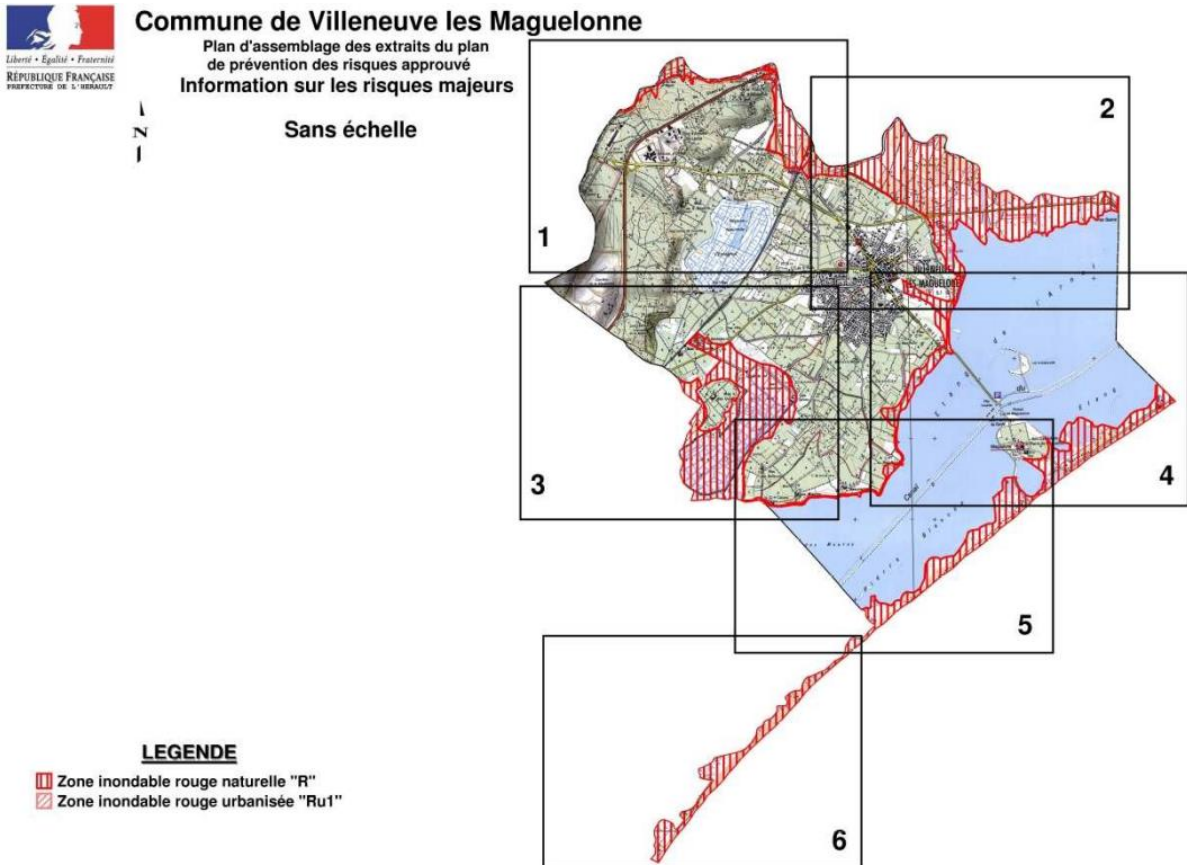


Illustration 69 : Carte d'assemblage du PPRL de Villeneuve-lès-Maguelone (DDTM 34).



Sur ces zones rouges, aucunes utilisations ou occupations nouvelles n'est autorisée. Ces mesures sont largement supérieures à celles prévues pour les projections (entre 0,20 m et 1 m au maximum). Néanmoins, ces démarches permettent d'identifier des zones à risques de submersion et de potentielle connexions permanentes entre la mer et l'étang de Pierre Blanche.

Pour cela, les données Litto3D de 2015 sont utilisées, conformément à la procédure prévue. Deux zones sont calculées : une première limite à + 0,2 m et une autre à + 1 m (*Illustration 71*).

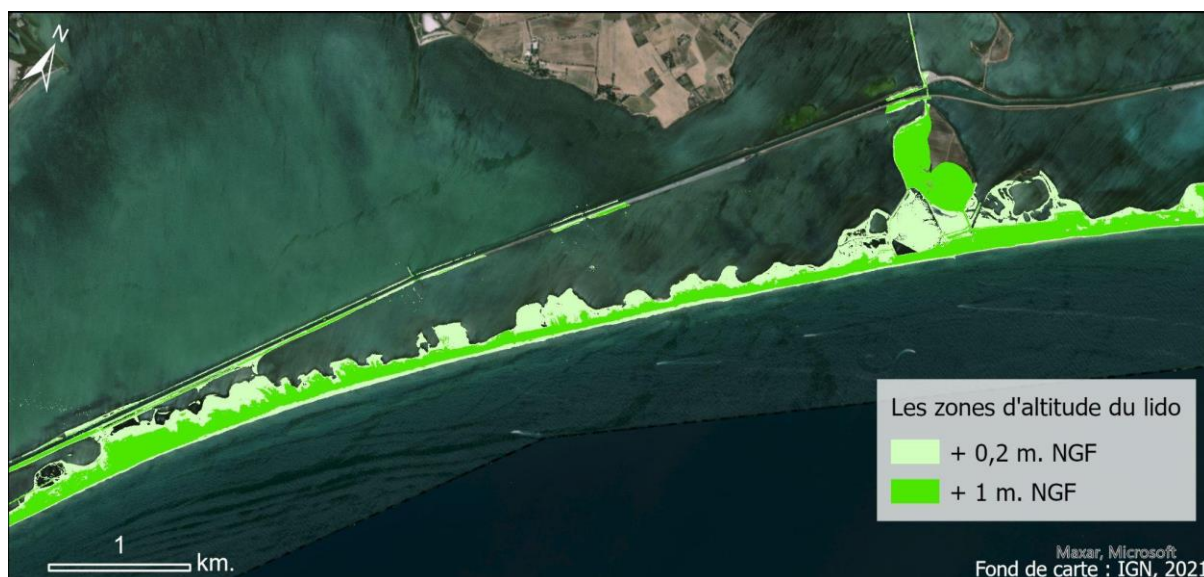


Illustration 70: Carte représentant les zones supérieures à 0,20m d'altitude et 1m d'altitude sur le lido de Maguelone (Litto3D 2014-2015, SHOM, SaVE, 2023).

Pour ce qui est de la face externe du lido, la zone inférieure à 0,20 m correspond à une surface comprise dans l'estran. La surface concernée est toujours inférieure à 2,50 m de large à partir du niveau 0 du Litto3D, et se distingue difficilement du trait de côte (*Illustration 72*).

La zone inférieure à 1 m concerne une surface d'une dizaine de mètres de large, limitée par les premières formes sur la plage. Elle s'apparente à une zone avoisinant la limite du jet de rive et la limite des sables mouillés et du marnage (*Illustration 72*).

Sur la façade extérieure, cette zone basse a finalement relativement peu d'impact, outre celui calculé par la loi de Bruün (1962).

Le lido conserve sur l'ensemble de son linéaire un profil émergé avec largeur minimale de 25 m. Toutefois, la façade interne est fortement impactée. Du côté du rivage lagunaire, le profil est souvent largement plus bas, avec des zones humides marécageuses régulièrement inondées et des lobes d'*overwash* colonisés par la végétation.

Sur cette façade, la surface ennoyée correspond à l'ensemble de la largeur jusqu'à l'amorce dunaire et l'arrière-dune. Là aussi, la zone inférieure à 0,20 m est relativement fine (moins de 10 m) tandis que la zone inférieure à 1 m est parfois très étendue et peut atteindre une largeur supérieure à 150 m (*Illustration 72*).





Illustration 71 : Zoom sur une partie du lido où sont cartographiées les zones inférieures à 20 cm et 1 m, ainsi que le trait de côte 2015 et un fond de carte Pleiades 2015 (année du Litto3D) ; aussi tracé, la limite de la zone inférieure à 0,20 m car quasiment impossible à distinguer sans cette démarcation (SHOM, IGN, Litto3D, SaVE, 2023).

Plusieurs observations peuvent être apportées. Tout d’abord, le lido évolue en roulant sur lui-même, réagissant fortement aux ondes de tempêtes, avec des brèches et des *overwash*, déplaçant les sédiments de l’avant-côte à l’arrière du cordon, dans la lagune. De fait, il n’est pas possible de soustraire les zones identifiées sur le MNT puisque les surfaces ennoyées seront recouvertes de sédiments par à-coups, que la morphologie du lido aura très probablement largement évolué aux horizons 30 ans et 100 ans et ce sera déplacé à l’intérieur de la lagune.

De plus, et malgré les résultats du MNT, il n’est pas possible d’affirmer que le lido ne sera pas percé d’un grau aux deux horizons étudiés. Le linéaire est par nature mobile et il est certain qu’à l’avenir des brèches se formeront. Ces brèches, *overwash*, et graus se forment actuellement de façon très régulière lors de tempêtes. Dans un contexte d’élévation rapide du niveau de la mer et d’augmentation de la fréquence et de l’intensité des tempêtes, le lido est exposé à une augmentation des ouvertures de brèches et au fait qu’elles aient de plus en plus de mal à se combler (Durand et 2006).

Toutefois, positionner un grau sur les cartes de projections ouvre des problématiques nouvelles : notamment justifier de son ouverture permanente, de sa localisation précise, de sa largeur, cartographier une lagune ouverte sur la mer et donc justifier un trait de côte sur la face interne des lagunes en tenant compte des lobes d’*overwash*. L’ensemble de ces paramètres est couvert par une importante incertitude. Une évolution du lido aux horizons étudiés prenant la forme d’un grau permanent créé par l’élévation du niveau de la mer et des lagunes, ajouté à une augmentation des



tempêtes, voire une dislocation en îles barrières est tout à fait envisageable (Durand et Heurtefeux, 2003 ; EID-Méditerranée, 2020), mais non adaptée aux outils actuels.

3.4.3 Lisser les traits de côtes

La dernière étape, avant d’avoir les traits de côte finaux, consiste à lisser les résultats. En effet, les traits de côte projetés ont un aspect « crénelé », or, il est improbable que les futurs traits de côte ressemblent à ça. Ce profil crénelé provient de l’utilisation de transects, sur lesquels des anomalies locales peuvent avoir des répercussions plus ou moins accentuées. Le profil naturel connaîtra un développement naturellement plus linéaire. Pour corriger ce défaut, il est nécessaire d’appliquer un lissage des traits afin d’être plus proche de la réalité.

La méthode de lissage utilisée est la même que celle utilisée par l’EID-Méditerranée lors de leur étude prospective sur la dynamique côtière du secteur des Aresquiers (mars 2020). Rappelons que les traits de côte projetés représentent 99 points espacés de 100 mètres, reliés entre eux. Le lissage sera différent pour les deux horizons temporels et sera calculé grâce à un tableur Excel :

- 2050 : chacun des 99 points sera affecté par les points directement adjacents de chaque côté. Pour un point, une moyenne des trois points voisins : le recul du point en question, le recul du point précédent et le recul du point suivant ;
- 2120 : chacun des 99 points sera moyenné par les deux points adjacents de chaque côté. Soit pour un point, une moyenne de cinq points voisins : le recul du point en question, le recul des deux précédents et le recul des deux suivants.

Le lissage est plus fort pour l’horizon 100 ans car l’effet « cranté » est plus important. Ainsi, les scénarios finaux peuvent être décrit de la façon suivante (*Tableau 11 et 12*) :

Tableau 11 : Tableau récapitulatif des scénarios envisagés pour la projection à horizon 30 ans.

	Horizon 30 ans			
	Scénarios « médian »		Scénario « sécuritaire »	
« Tx » Recul annuel moyen	- 0,8 m/an - 23 m En moyenne		0,8 m/an + marges hautes - 30 m En moyenne	
Loi de Bruün Elévation du niveau marin	+ 20 cm - 16 m En moyenne	+ 22 cm - 17 m En moyenne	+ 20 cm - 16 m En moyenne	+ 24 cm - 19 m En moyenne
« Lmax » Recul événementiel	- 17 m Tempête de décembre 1997		- 17 m Tempête de décembre 1997	



Tableau 12 : Tableau récapitulatif des scénarios envisagés pour la projection à horizon 30 ans.

	Horizon 100 ans		
	Scénarios « médian »		Scénario « sécuritaire »
« Tx » Recul annuel moyen	- 0,8 m/an - 76 m En moyenne		0,8 m/an + marges hautes - 96,5 m En moyenne
Loi de Bruün Elévation du niveau marin	+ 60 cm - 47 m En moyenne	+ 69 cm - 54 m En moyenne	+ 100 cm - 78 m En moyenne
« Lmax » Recul événementiel	- 20,5 m Tempête de novembre 1982		- 20,5 m Tempête de novembre 1982

Avec la traduction cartographique suivante (*Illustrations 73, 74, 75, 76*) :



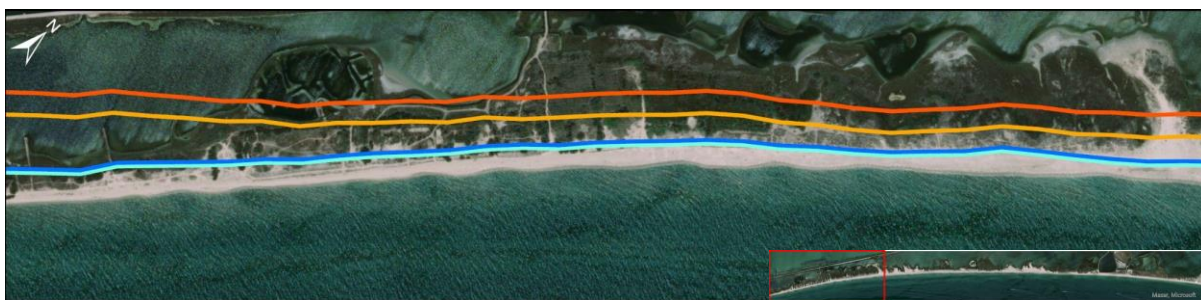


Illustration 72 : Résultats des projections du recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans sur la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

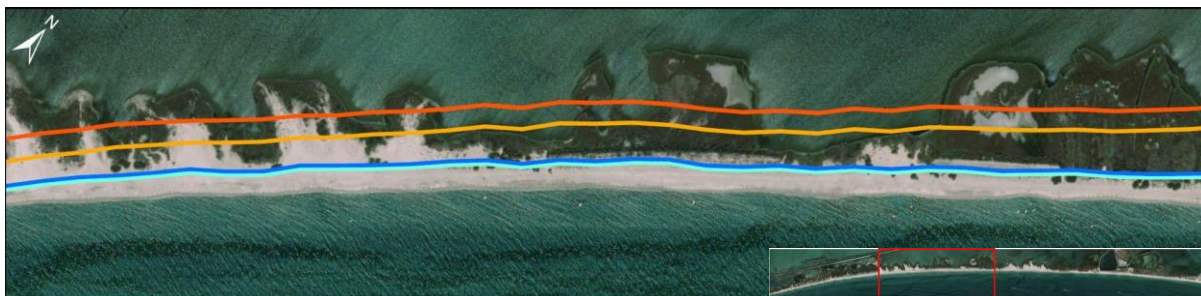


Illustration 73 : Résultats des projections du recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans sur la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).



Illustration 74 : Résultats des projections du recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans sur la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).

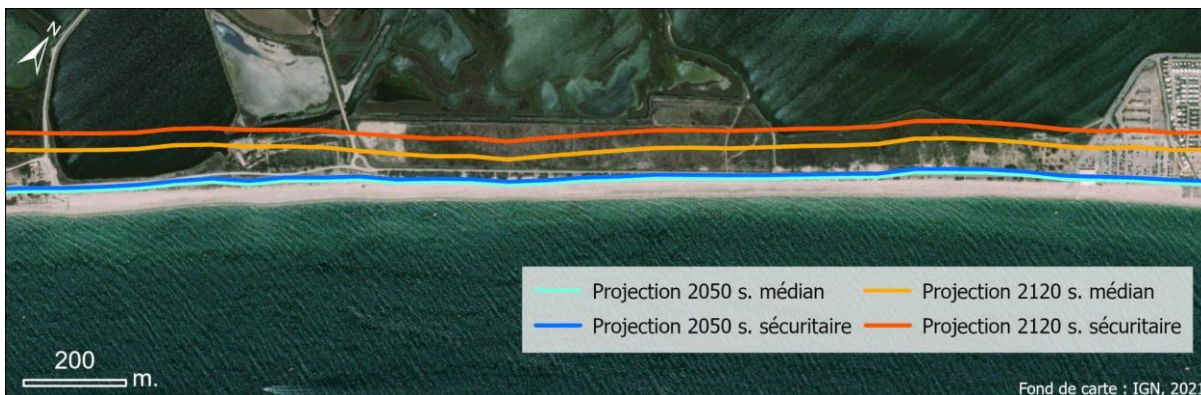


Illustration 75 : Résultats des projections du recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans sur la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).



4 Scénarios retenus pour la cartographie

En concertation avec l'ensemble des parties impliqués dans l'élaboration de ces cartes, il a été décidé d'adopter un scénario médian pour la cartographie du trait de côte aux horizons 30 ans et 100 ans.

Ces cartes sont construites sur les paramètres suivants :

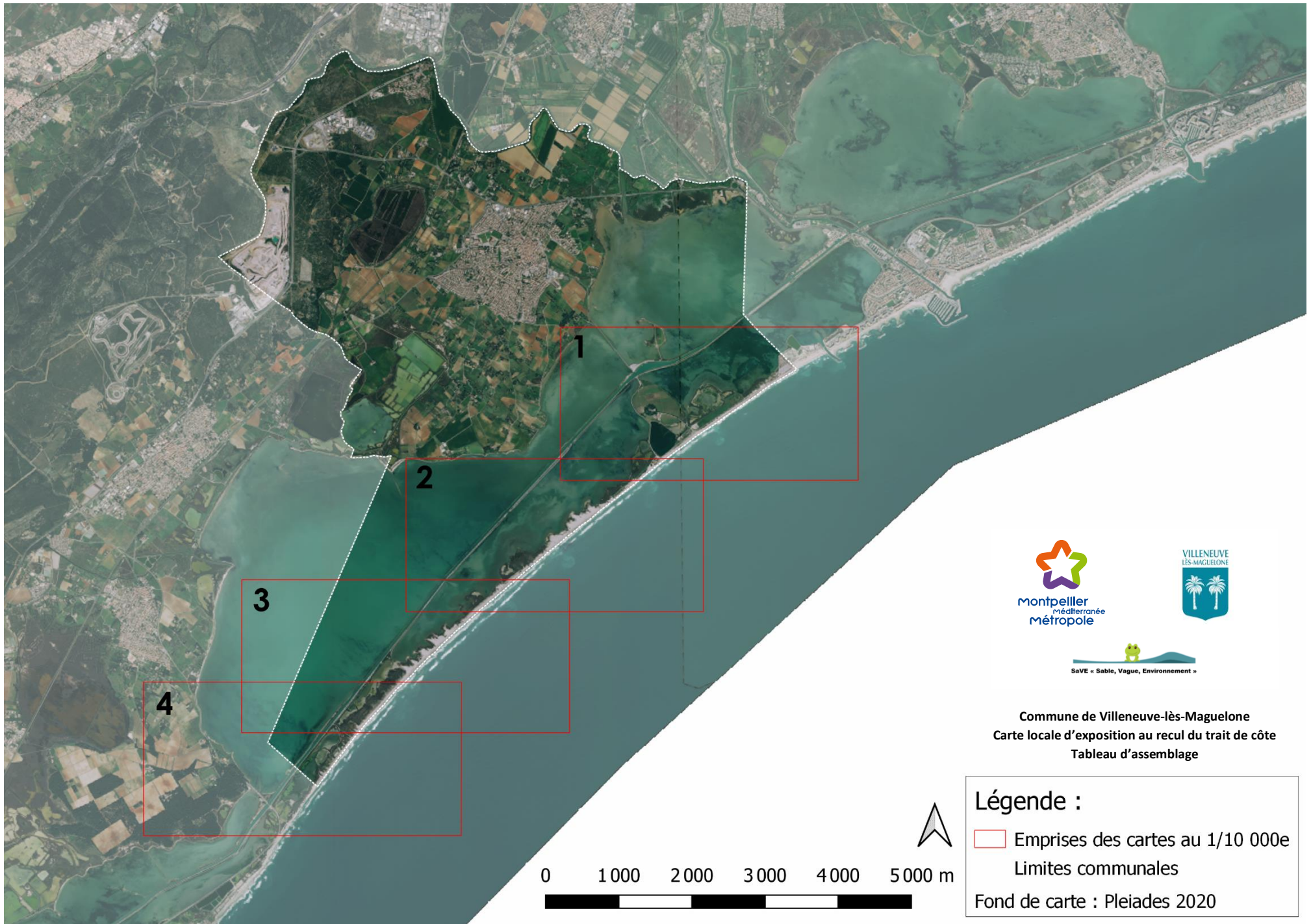
- Une tendance d'évolution annuelle moyenne observée sur une période de 43 ans, de 1977 à 2020, sur laquelle 10 trait de côte ont été comptabilisés ;
- Un recul événementiel égal au recul moyen relatif à la tempête du 16 décembre 1997 pour la projection à horizon 30 ans, et à la tempête du 6 novembre 1982 pour la projection à horizon 100 ans ;
- Une élévation du niveau marin positionné à 20 cm pour la projection à horizon 30 ans, et à 60 cm pour la projection à horizon 100 ans. L'impact de cette élévation est calculé avec la formule de Bruün (1962).

Ces paramètres ont été sélectionnés afin de faciliter la réalisation des cartes locales d'exposition au recul du trait de côte sur les territoires adjacents, favorisant l'adoption de paramètres similaires et l'élaboration d'une carte cohérente et uniforme à l'échelle du golfe d'Aigues-Mortes.

Ces cartes sont produites à l'échelle 1/10 000^e et ont vocation à être mises à jour en fonction d'éventuelles améliorations techniques et de production de données nouvelles.

Ci-dessous, le tableau d'assemblage et les cartes au format 1/10 000^e.





Commune de Villeneuve-lès-Maguelone
 Carte locale d'exposition au recul du trait de côte
 Tableau d'assemblage

Légende :

- Emprises des cartes au 1/10 000e
- Limites communales
- Fond de carte : Pleiades 2020



Commune de Villeneuve-lès-Maguelone
Carte locale d'exposition au recul du trait de côte
1/10 000^e



Légende :

- Trait de côte horizon 100 ans
 - Trait de côte horizon 30 ans
 - Trait de côte de référence (2020)
 - - - Limites communales
- Fond de carte : Pleiades 2020



Légende :

- Trait de côte horizon 100 ans
 - Trait de côte horizon 30 ans
 - Trait de côte de référence (2020)
 - - - Limites communales
- Fond de carte : Pleiades 2020



Montpellier
Méditerranée
Métropole

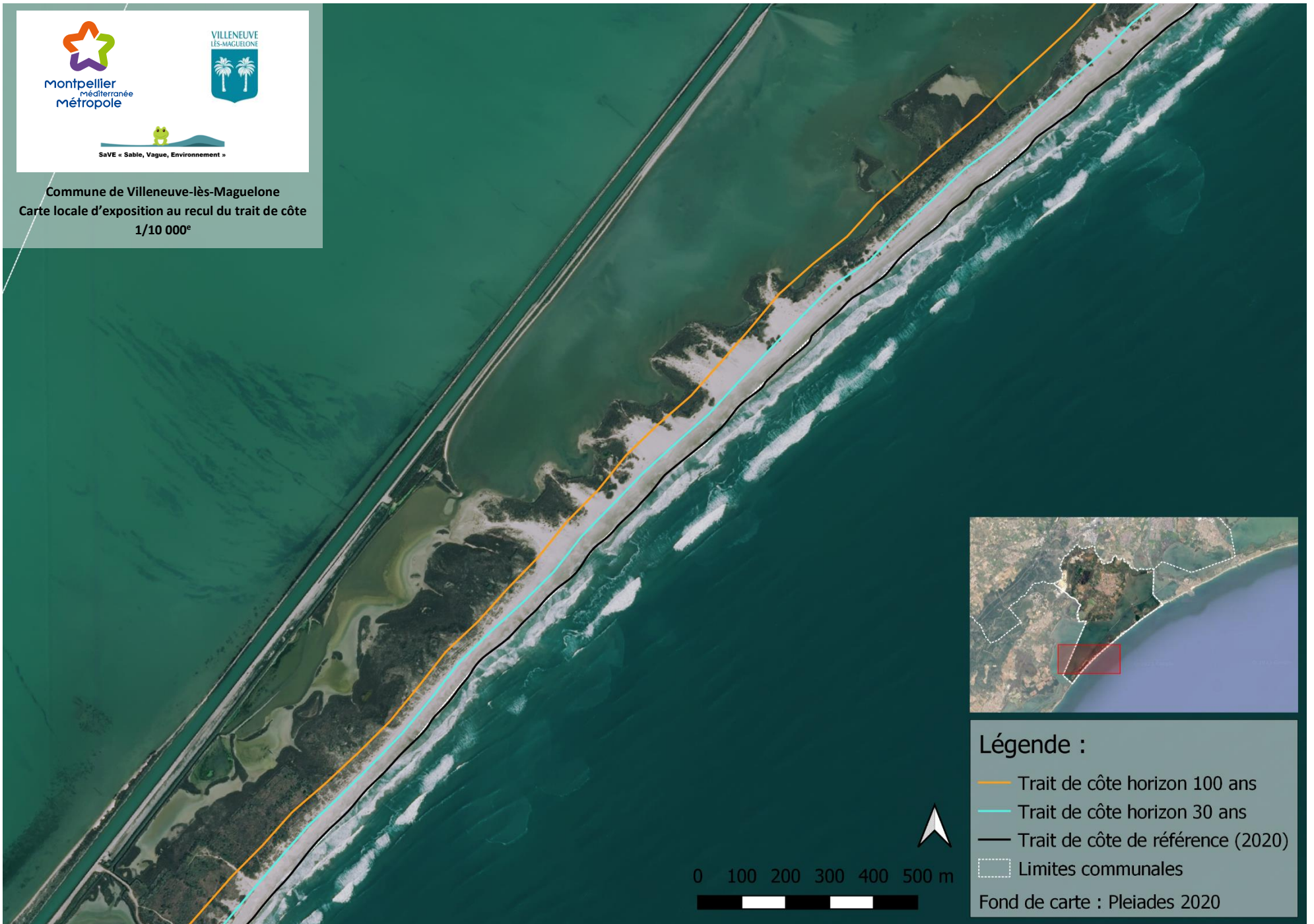


VILLENEUVE
LÈS-MAGUELONE



SaVE « Sable, Vague, Environnement »

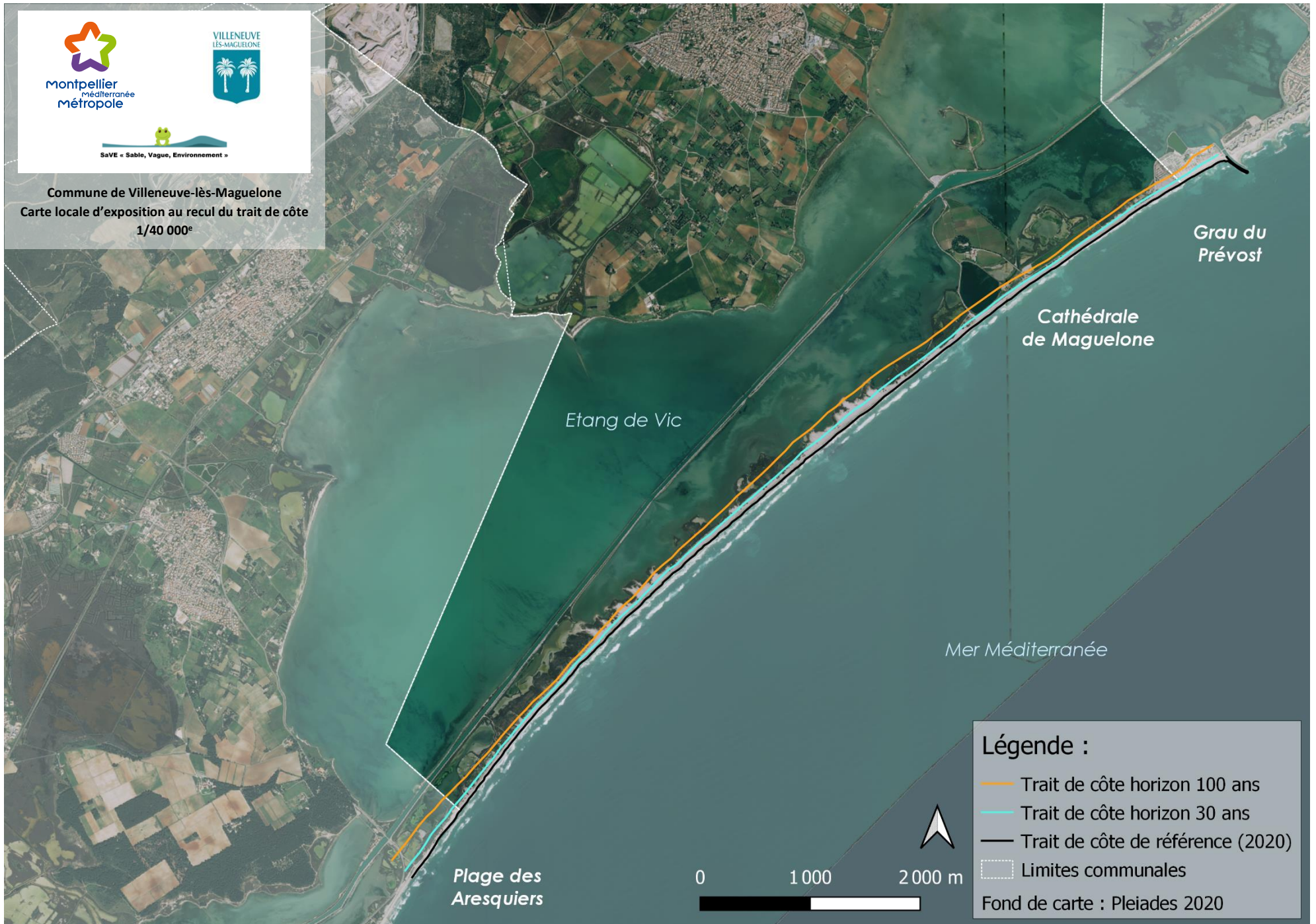
Commune de Villeneuve-lès-Maguelone
Carte locale d'exposition au recul du trait de côte
1/10 000^e



Légende :

- Trait de côte horizon 100 ans
 - Trait de côte horizon 30 ans
 - Trait de côte de référence (2020)
 - - - Limites communales
- Fond de carte : Pleiades 2020





Bibliographie

Aleman N., « Morphodynamique à l'échelle régionale d'une avant-côte microtidale à barres sédimentaires. Le cas du Languedoc-Roussillon à l'aide de la technologie LIDAR ». Thèse de doctorat en Océanologie, sous la direction de Jean Benkhelil, Université de Perpignan Via Domitia, 2013, 253p.

Aleman N., Raynal O., Certain R., Robin N., Brunel C. *Atlas de l'évolution morphologique et du budget sédimentaire du littoral du Languedoc-Roussillon 2007-2009-2011*. Rapport thème 2 - SIMILAR, 2017, 68p.

Augeard C., Tirard E., et Balouin, Y. *Etat des connaissances sur l'évolution des géomorphologies côtières*. Rapport RP-60107-FR, 2011, 67p.

Balouin Y., De La Torre Y., et Tirard E. *Les tempêtes marines sur le littoral du Languedoc-Roussillon. Caractérisation et faisabilité d'un réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts*. Rapport BRGM/RP-59516-FR, 2011, 65p.

Beynet, JM. (2020) « *Habiter ou abandonner le littoral d'ici 2100 : Prospective et propositions pour l'Occitanie*. » Essai.

Billy J., « Morphologie et architecture d'une barrière composite paraglacière : l'isthme de Miquelon-Langlade (N-O Atlantique) ». Thèse de doctorat en Océanologie, sous la direction de Serge Berne, Nicolas Robin et Raphaël Certain, Université de Perpignan Via Domitia, 2014, 322p.

Boulet D., Gervais M., Heurtefeux H., Loste C., Beullier M. *Aménagement et changement climatique sur un lido en érosion : approche prospective et paysagère sur le secteur des Aresquiers*. 2020. 8p.

Brunel C., « Evolution séculaire de l'avant-côte de la Méditerranée française, impact de l'élévation du niveau de la mer et des tempêtes ». Thèse de doctorat en Espaces, cultures, sociétés, sous la direction de François Sabatier, Université Aix-Marseille 1 en partenariat avec l'Université de Provence, faculté des lettres et sciences humaines, 2010, 470p.

Brunel C., Certain R., Robin N., Aleman N., Raynal O., avec la collaboration de Guerinel, B. et Dufresne, P. *REVOLSED : « Relation entre l'évolution du trait de côte et le bilan sédimentaire de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon »*. Rapport final. DREAL-LR / UPVD, 2014, 68p.

Castangs J., Dezileau L., Fiandrino A., Verney R. 2011. *Evolution morphologique récente d'un complexe lagunaire méditerranéen : le système des étangs Palavasiens (France)*. Revue Paralia, Vol. 4, 2011, 12p.

Castangs J., « Etude du fonctionnement hydro-sédimentaire d'un écosystème lagunaire sur des échelles de temps multiples. Application au complexe lagunaire « étangs Palavasiens – étang de l'Or – canal du Rhône à Sète ». Thèse de doctorat en Sciences de la Terre et de l'univers, sous la direction de Laurent Dezileau, Université de Montpellier II, 2012, 204p.

CEPREL, *Schéma directeur pour la protection, la restauration et la gestion du littoral du département de l'Hérault. Deuxième partie, Tome 1*. Conseil Général de l'Hérault, 1989, 140p.

Cerema-BRGM. *Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte*. Collection scientifique et technique, 2022, 96p.



Cerema. *Dynamiques et évolution du littoral fascicule 8 : Synthèse des connaissances de la frontière espagnole à Port-de-Bouc*. Collection connaissances, 2020, 272p.

Certain, R., « Morphodynamique des littoraux sableux microtidaux à multi-échelle spatio-temporelles : de leur mise en place à l'échelle millénaire aux évolutions des corps sableux actuels ». HDR en Océanologie, Université de Perpignan Via Domitia, préparée au sein de l'école doctorale E² et de l'unité de recherche CEFREM, 2017, 143p.

Direction Générale de la Prévention des Risques. *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux*. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Énergie, Service des Risques Naturels et Hydrauliques, 2014, 169p.

Donnelly C., Larson M. *State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash*. Journal of Coastal Research, 2006, 28p.

Dubois N., *How does a barrier shoreface respond to a sea-level rise ?* Journal of Coastal Research, 2002, 3p.

Durand P., « L'évolution des plages de l'ouest du golfe du Lion au 20^{ème} siècle. Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire et analyse prévisionnelle ». Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon II, 2 vol., 461p.

Durand P., Heurtefeux H. *Impacts du changement climatique sur l'intervention du Conservatoire du Littoral. Site des étangs de Vic et de Pierre Blanche*. Rapport final – Volume 1 et 2, 2003, 31p.

Durand P., Heurtefeux H. *Impact de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un cordon littoral lagunaire : une méthode d'évaluation. Exemple des étangs de Vic et de Pierre Blanche (littoral méditerranéen, France)*. 2006, 29p.

EID-Méditerranée. *Plage de Villeneuve-lès-Maguelone. Gestion du cordon dunaire. Phase 1 – diagnostic du système plage/dune*. Prestation d'expertise. 2020, 32p.

EID-Méditerranée, Conservatoire du Littoral, Atelier Claude Chazelle et Olivier Martin. *Dynamique côtière du secteur des Aresquiers, Approche paysagère et prospective*. Convention de coopération, 2020, 39p.

EID-Méditerranée, CD34. *Synthèse des données sur l'érosion du trait de côte pour l'ensemble du département de l'Hérault. Taux d'évolution du trait de côte sur la période 2009-2020 et projection à l'horizon 2050-2100 sur le littoral hérault*. Convention annuelle, 2021, 17p.

Gervais M., « Impact morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen ». Thèse de doctorat en Océanologie, sous la direction de Serge Bergé et de Yann Balouin, Université de Perpignan Via Domitia, 2012, 399p.

Gouguet L (Dir). *Guide de gestion des dunes et des plages associées*. Editions Quae, 2018.

Heurtefeux H., Richard P., (2005), cités dans Cerema. *Dynamiques et évolution du littoral fascicule 8 : Synthèse des connaissances de la frontière espagnole à Port-de-Bouc*, 2020, p27-p29., 272p.

Laborie V., Heurtefeux H. *Modélisation et observation de submersion de dunes en Languedoc-Roussillon*. La Houille Blanche, 2008, 9p.



Laouti M., Zargouni F. *Modélisation topo-bathymétrique et transit sédimentaire. Exemple des plages sableuses de la baie de Tunis, Nord-Est de la Tunisie*. Géomorphologie, Relief, Processus, Environnement, Vol 15 – n°3, 2009, 211-222p.

Pardé M. *La formidable crue d'octobre 1940 dans les Pyrénées-Orientales*. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest Européen, 12-3, 1941, 237-279p.

Ranasinghe R., Callaghan D., Stive M. *Estimating coastal recession due to sea level rise : Beyond the Bruun rule*. *Climatic change*, 110(3) : 561-574. 2012, 14p.

Raynal, O., « Architecture de dépôts et facteurs de contrôle d'un système côtier à faibles apports sédimentaires – le littoral languedocien (Golfe du Lion, Sud de la France) ». Thèse de doctorat en Sciences de la Terre et de l'univers, sous la direction de Michel Séranne et de Frédéric Bouchette, Université de Montpellier II, 2008, 187p.

Raynal O., Bouchette F., Certain R., Séranne M., Sabatier P., Lofi J., Dezileau L., Briquet L., Ferrer P., Courp T., Tessier B. *Holocene evolution of languedocian lagoonal environment controlled by inherited coastal morphology (Northern Gulf of Lions, France)*. Société Géologique Fr., 181, p211–224, 2010, 15p.

Raynal O., Certain R., Brunel C., Aleman N., Robin N., Guérinel B., Montel L. *LITTOSIS - Analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux littoral du Languedoc-Roussillon*. Rapport final LITTOSIS, 2015, 46p.

Rogers S., Nash D. *The Dune Book*. North Carolina Sea Grant, 2003, 32p.

Rueda F. *Le cordon littoral de Villeneuve-lès-Maguelone*. Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon, 1994, 5p.

Sabatier P., Heurtefeux H., Hanot B., *Dépôts d'overwash et tempêtes à moyen terme sur deux lidos méditerranéens*. 2008, 10p.

Sallenger A.H. Jr. *Storm impact scale for barrier islands*. USGS, Journal of Coastal Research, 16, 3, p890-895, 2000, 6p.

Samat O., « Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages micro-tidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône ». Thèse de doctorat en Géographie physique et humaine, aménagement, urbanisme, sous la direction de Mireille Provansal et de François Sabatier, Université d'Aix-Marseille 1, 2007, 376p.

Schéma régional d'aménagement et de développement durable du territoire, *SRADDET - Occitanie 2040*, Région Occitanie, 2022.

Stéphanian A. et Balouin. *Evolution à long-terme des morphologies côtières sur le littoral du Languedoc-Roussillon*. Rapport BRGM/RP-62921-FR, 2013, 68p.

Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte, Ministère de la Transition Ecologique, 2012.

Stratégie Régionale de Gestion Intégrée du Trait de Côte, *Littoral Occitanie 2018-2050*. DREAL Occitanie, 2018.

Valentini N. et Balouin Y. *Amélioration des connaissances et sensibilisation à la vulnérabilité du littoral d'Occitanie - Étude du rôle de l'érosion événementielle sur la vulnérabilité du littoral aux phénomènes de submersion marine*. BRGM/RP-70384-FR, 2020, 115p.



Vinchon C., Idier D., Balouin Y., Capo S., Castelle B., Chateauminois E., Certain R., Crillon J., Fattal P., Hequette A., Maanan M., Mallet C., Maspataud A., Oliveros C., Parisot J.P., Robin M., Ruz M., Thiebot J. Projet VULSACO. Vulnérabilité de plages sableuses face au changement climatique et aux pressions anthropiques. Module 1 : Caractérisation des sites. Rapport final, BRGM/RP-56618-FR, 2008, 114p.

Yates-Michelin M., Le Cozannet G., Krien Y., Lenôtre N. *Amélioration de la méthode RNACC : caractérisation des incertitudes relatives à la quantification des impacts de l'élévation du niveau marin.* Rapport final BRGM/RP-59405-FR, 2011, 142p.

Yates-Michelin M., Le Cozannet G. et Balouin, Y. *Etat des connaissances sur les effets potentiels du changement climatique sur les aléas côtiers en région Languedoc-Roussillon.* 2011 ; 83p.



Table des illustrations

Illustration 1 : Carte du Golfe d'Aigues-Mortes selon la typologie de l'espace littoral. Des zones urbanisées succèdent à des zones naturelles (SaVE, 2022).....	4
Illustration 2 : Carte de situation du littoral de la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).....	5
Illustration 3 : Submersion du cordon littoral et ouverture d'un grau lors de la tempête du 4 décembre 2003 (Source : DRE-LR).	6
Illustration 4 : Illustration du lido de Villeneuve-lès-Maguelone, avec au premier plan le Canal du Rhône à Sète et la Cathédrale de Maguelone (Sources : Montpellier Méditerranée Métropole).	7
Illustration 5 : Une euphorbe peplis (<i>Euphorbia peplis</i>) sur le lido de Maguelone (Photo : SaVE, juin 2023).	7
Illustration 6 : Panneaux de signalisation d'une zone protégée pour la nidification d'espèces d'oiseaux sur le lido de Maguelone (Photo : SaVE, avril 2023).....	7
Illustration 7 : Evolution du niveau de la mer moyen global, sur la période 1700-2100. Document Météo-France (scénario RCP2.6 en bleu, et RCP8.5 en rouge).	8
Illustration 8 : Schéma des dispositions de la loi dite "Climat & Résilience" selon la cartographie de l'exposition locale au recul du trait de côte (document Cerema-BRGM, 2018).	9
Illustration 9 : Composition des Stratégies Locales de Gestion Intégrées du Trait de Côte en Occitanie (SaVE, PL21, 2022).	10
Illustration 10 : Schéma de présentation du transit sédimentaire parallèle à la côte (Source : Obscat, d'après Quae 2010).	11
Illustration 11 : Schéma de représentation du transit sédimentaire sur le profil de plage (Source : Obscat, d'après EID-Méditerranée 2010).	11
Illustration 12 : Exemple de secteur en érosion mais où le pied de dune avance sur la mer. La dune de la Slack est en érosion d'après l'indicateur national du trait de côte du Cerema, mais sur l'illustration, un glissement rotationnel a permis un gain sur la mer (Image Google ; SaVE, 2023).....	12
Illustration 13 : Topographie du département de l'Hérault. En seulement 35 km, le relief se transforme soudainement d'une plaine littorale (niveau de la mer) au contrefort des Cévennes (altitude supérieure à 1000 m) (Source : DDTM 34).	13
Illustration 15 : Carte climatique et rose des vents sur le littoral du Golfe du Lion (Source : Cerema, 2020).	14
Illustration 16 : l'estran est particulièrement large sur le lido de Villeneuve-lès-Maguelone, notamment en lien avec ces mouvements quotidiens de la hauteur d'eau (Photo : SaVE, avril 2023).	15
Illustration 17 : Rose des houles dans le golfe du Lion (Source : Cerema, 2020).	16
Illustration 18 : Types de régimes de tempêtes selon Sallenger (2000), d'après Valentini et Balouin (2020).	18
Illustration 19 : Recul du pied de dune et formation d'une falaise dunaire à la suite d'une tempête sur le littoral du golfe du Lion, ici à Frontignan-Plage en février 2022 (Source : SaVE, 2022).	19
Illustration 20 : Formation du lido de Maguelone, avec le développement d'une flèche sableuse autour du substrat rocheux d'avant-côte et rétrogradation vers le continent (d'après Raynal, 2008).	20
Illustration 21 : Modèle numérique de terrain illustrant la bathymétrie au droit du lido de Frontignan et de Maguelone, et notamment les barres rocheuses à l'avant-côte (SaVE, 2023 d'après Durand et Heurtefeux, 2003).	21
Illustration 22 : Des galets et un profil de plage en talus ou « en escalier » sur le lido de Maguelone (Source : SaVE, avril, 2023).....	22
Illustration 23 : Carte granulométrique de la berme des plages du golfe du Lion d'après Raynal et al, 2015.....	22
Illustration 24 : Carte granulométrique du talus (en bas) des plages du golfe du Lion d'après Raynal et al, 2015.	23



Illustration 25 : Extrait de sédiments présents sur le lido de Maguelone (graviers, coquillages, galets, beachrocks, etc.) (SaVE, 2023).....	23
Illustration 26 : Lido de Maguelone en avril 1982, le cordon est bien constitué (Sources : IGN Remonterletemps, SaVE, 2023).....	24
Illustration 27 : Lido de Maguelone en juin 1996, des brèches et lobes d’overwash sont bien visibles à l’arrière du cordon (Sources : IGN remonterletemps, SaVE, 2023).....	24
Illustration 28 : Lido de Maguelone en 2021, les éléments de 1996 sont toujours présents et des gorges sont toujours empruntées lors des tempêtes (signalées par des lettres) (Sources : Pléiades 2021, SaVE, 2023).....	24
Illustration 29 : Schéma représentant l’émergence d’un lido et sa migration à volume constant en roulant sur lui-même (d’après Certain, 2017 et Raynal et al, 2010).	25
Illustration 30 : Evolution des bilans sédimentaires des lagunes palavasiennes entre 1965 et 2005. La lagune de Pierre Blanche présente une dynamique de comblement naturel par intrusions marines et lobes d’overwash (« b ») (d’après Castaing et al, 2011).	26
Illustration 31 : Lido de Maguelone en avril 1982, le cordon est bien constitué (Sources : IGN remonterletemps, SaVE, 2023).....	27
Illustration 32 : Lido de Maguelone en novembre 1982, la tempête a ouvert un grau (Sources : DREAL Occitanie, SaVE, 2023).....	27
Illustration 33 : Lido de Maguelone en avril 1984, le grau est toujours présent mais en voie de comblement ; notons une quantité importante de dépôts à l’arrière par le courant de flot (Sources : IGN remonterletemps, SaVE, 2023).....	27
Illustration 34 : Carte du lido de Maguelone datée de 1742, où un grau est représenté avec la mention "Grau ouvert par l’inondation du lundi 3 décembre 1742" (Sources : Archives départementales de l’Hérault, C6952-3).	28
Illustration 35 : Extrait de la carte des étangs palavasiens de 1773 où figurent plusieurs graus sur le lido de Maguelone (Sources : Archives départementales de l’Hérault, C4870-1).....	28
Illustration 36 : Exemple d’un ouvrage dégradé de la fin des années 1980 (à gauche), et de lobes de dépôts de galets marins (à droite), sur le lido de Maguelone (SaVE, avril 2023).....	30
Illustration 37 : Impact d’un ouvrage longitudinal sur la pente de plage, d’après Samat, 2007.....	31
Illustration 38 : Les deux restaurants sur la plage des Aresquiers à Frontignan-Plage en 1997 (Image : DREAL Occitanie).....	31
Illustration 39 : Photo aérienne des anciennes colonies de vacances sur le lido de Maguelone aujourd’hui démontées (Sources : EID-Méditerranée, 2019).....	32
Illustration 40 : Récapitulatif de la méthode de projection du recul du trait de côte décrite dans au sein du Guide de recommandation pour l’élaboration de la carte locale d’exposition au recul du trait de côte du Cerema et du BRGM, 2022.....	33
Illustration 41 : Représentation des traits de côte sélectionnés pour le calcul du « Tx » sur le lido de Maguelone.	35
Illustration 42 : Représentation du calcul effectué à partir de profils de plage sur le lido de Maguelone (SaVE, 2023).	36
Illustration 43 : Résultats de la tendance annuelle moyenne d’évolution du trait de côte sur chaque transect, en m/an (SaVE, 2023).	37
Illustration 44 : Résultats du recul causé par le paramètre "Tx" sur la partie Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	39
Illustration 45 : Résultats du recul causé par le paramètre "Tx" sur la partie Centrale-Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).....	39



Illustration 46 Résultats du recul causé par le paramètre "Tx" sur la partie Centrale-Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	39
Illustration 47 Résultats du recul causé par le paramètre "Tx" sur la partie Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	39
Illustration 48 : Schéma représentant un profil de plage et le principe de la loi de Bruün (1962) ; avec « h » pour la profondeur de fermeture, « S » pour le niveau marin, « L » pour la longueur du profil, « B » pour la hauteur du sommet de dune, et « R » pour le recul du trait de côte (d'après Ranasinghe et al, 2012).	40
Illustration 49 : Extrait des données topo-bathymétriques issues de Litto3D, où sont cartographiés le sommet de dunes sur chaque transect et la profondeur de fermeture (IGN ; SaVE, 2023).	43
Illustration 50 : Recul associé à une élévation de 24 cm selon le modèle de Bruün (SaVE, 2023).	46
Illustration 51 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx » et la loi de Bruün sur la partie Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	48
Illustration 52 : Résultats du recul causé par le paramètre « Tx » et la loi de Bruün sur la partie Centrale-Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	48
Illustration 53 : Résultats du recul causé par le paramètre « Tx » et la loi de Bruün sur la partie Centrale-Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	48
Illustration 54 : Résultats du recul causé par le paramètre « Tx » et la loi de Bruün sur la partie Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	48
Illustration 55 : Image satellite centrée sur les écluses présentes sur le lido. Aucun des 10 traits de côtes collectés pour cette étude ne se trouve derrière les écluses (SaVE, 2023).	50
Illustration 56 : Photographie aérienne de janvier 1998, après la tempête de décembre 1997. Sur cette photo, les écluses se trouvent clairement en mer (DREAL Occitanie).	50
Illustration 57 : Photographie aérienne prise après la tempête de décembre 2003. Ici aussi, les écluses se trouvent largement à l'avant du rivage.	50
Illustration 58 : Série de photographies aériennes verticales utilisées pour le calcul du recul événementiel lors de la tempête de novembre 1982 (DREAL Occitanie, IGN Remonterletemps, SaVE, 2023).	51
Illustration 59 : Secteur où le recul est le plus important et où un grau s'est ouvert. Sur cette photo, les tracés permettent de comparer les situations pré et post-tempêtes avec un fond de carte de novembre 1982 (DREAL Occitanie, IGN Remonterletemps, SaVE, 2023).	51
Illustration 60 : Photo aérienne oblique de janvier 1998, sur le secteur des écluses (DREAL Occitanie).	52
Illustration 61 : Cartographie du secteur des écluses de l'illustration 60, où est tracés le trait de côte en janvier 1998 en comparaison au trait de côte de juillet 1997.	52
Illustration 62 : Photo aérienne oblique de janvier 1998, sur le secteur de l'étang de la Sarrazine (DREAL Occitanie).	52
Illustration 63 : Cartographie du secteur de l'illustration 60, où est tracés le trait de côte en janvier 1998 en comparaison au trait de côte de juillet 1997.	52
Illustration 64 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax » sur la partie Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	54
Illustration 65 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax » sur la partie Centrale-Ouest du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	54
Illustration 66 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax » sur la partie Centrale-Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	54
Illustration 67 : Résultats du recul causé par les paramètres « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax » sur la partie Est du lido de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	54



Illustration 68 : Un ancien ouvrage ruiné impacte toujours le transport sédimentaire ; ici les sédiments sont accumulés au pied de l'ouvrage jusqu'à ce qu'ils passent par-dessus. (Villeneuve-lès-Maguelone, SaVE, 2023).	56
Illustration 69 : Autre exemple d'un vieil enrochement sur le lido de Villeneuve-lès-Maguelone, en voie de ruine, et du blocage sédimentaire à ses pieds (SaVE, 2023).	56
Illustration 70 : Carte d'assemblage du PPRL de Villeneuve-lès-Maguelone (DDTM 34).	56
Illustration 71: Carte représentant les zones supérieures à 0,20m d'altitude et 1m d'altitude sur le lido de Maguelone (Litto3D 2014-2015, SHOM, SaVE, 2023).	57
Illustration 72 : Zoom sur une partie du lido où sont cartographiées les zones inférieures à 20 cm et 1 m, ainsi que le trait de côte 2015 et un fond de carte Pleiades 2015 (année du Litto3D) ; aussi tracé, la limite de la zone inférieure à 0,20 m car quasiment impossible à distinguer sans cette démarcation (SHOM, IGN, Litto3D, SaVE, 2023).	58
Illustration 73 : Résultats des projections du recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans sur la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	61
Illustration 74 : Résultats des projections du recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans sur la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	61
Illustration 75 : Résultats des projections du recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans sur la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	61
Illustration 76 : Résultats des projections du recul du trait de côte à horizon 30 ans et 100 ans sur la commune de Villeneuve-lès-Maguelone (SaVE, 2023).	61



Table des tableaux

Tableau 1 : Climat de Villeneuve-lès-Maguelone, sur la période 1981-2020 (Source : Météo France, fiche 34337001).....	12
Tableau 2 : Traits de côtes utilisés pour calculer la valeur « Tx ».	35
Tableau 3 : Synthèse des résultats des projection obtenues et de la construction des scénarios après le paramètre « Tx ».	38
Tableau 4 : Résultats de la période 2012-2022 des campagnes CANDHIS au marégraphe de Sète (Sources : CANDHIS).....	42
Tableau 5 : Elévation du niveau marin prévue par les trajectoires de développement socio-économique du GIEC et des projections au marégraphe de Sète par la NASA (Sources : NASA Sea Level Projection Tool, 2023).....	44
Tableau 6 : Eventail des possibilités d'élévation du niveau marin pour l'élaboration des scénarios « médian » et « sécuritaire » pour l'horizon 30 ans et 100 ans.	45
Tableau 7 : Résultats obtenus après l'application de la loi de Bruün sur chaque transect.	46
Tableau 8 : Synthèse des résultats des projection obtenues et de la construction des scénarios après le paramètre « Tx » et « loi de Bruün, 1962 ».	47
Tableau 9 : Eléments récoltés sur les tempêtes historiques du golfe du Lion et sur lesquelles des données permettent d'estimer un recul « Lmax » :	49
Tableau 10 : Synthèse des résultats des projection obtenues et de la construction des scénarios après le paramètre « Tx », « loi de Bruün, 1962 » et « Lmax ».	53
Tableau 11 : Tableau récapitulatif des scénarios envisagés pour la projection à horizon 30 ans.	59
Tableau 12 : Tableau récapitulatif des scénarios envisagés pour la projection à horizon 30 ans.	60

