

Préparer la transition environnementale des plages en érosion de Provence-Côte d'Azur, retour d'expériences sur quelques sites tests



Auteurs :

Sabatier, F., Puigserver, C., Hurtrez, L., Chatagno, G., Voisin-Henriot, M., Fleury, J., S. Meulé, O.
Boutron, P. Pentsh

Janvier 2023

Table des matières

1	INTRODUCTION GENERALE.....	5
2	LE LAISSE FAIRE PAR LA MER D'UNE PLAGE ENDIGUEE (EXEMPLE DE VERAN, CAMARGUE).....	7
2.1	INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	7
2.2	RAPPELS SUR LE FONCTIONNEMENT GEOMORPHOLOGIQUE DU SITE	8
2.3	DONNEES ET METHODES	9
2.4	UNE REACTUALISATION DES BILANS SEDIMENTAIRES SOUS-MARINS	10
2.5	LA CREATION D'UNE PLAGE MALGRE UN LITTORAL EN EROSION.....	12
2.6	L'EVOLUTION DES BANCS DE SABLES	15
2.7	CE QU'IL FAUT RETENIR.....	17
3	LE DESENROCHEMENT (EXEMPLE DES VIEUX SALINS, HYERES, VAR)	19
3.1	INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	19
3.2	RAPPEL SUR LE FONCTIONNEMENT GEOMORPHOLOGIQUE DU SITE	20
3.3	DONNEES ET METHODES	21
3.4	COMMENT EVOLUENT LE RIVAGE ET LES FONDS DE LA CELLULE LITTORALE ?	21
3.4.1	<i>Variations du rivage entre 1896 et 2017.....</i>	<i>21</i>
3.4.2	<i>Évolution des fonds entre 1896 et 2017.....</i>	<i>22</i>
3.5	COMMENT EVOLUE LE RIVAGE APRES LE DESENROCHEMENT ?.....	23
3.6	COMMENT EVOLUE LA PLAGE EN AVAL DERIVE DE LA ZONE DESENROCHEE ?.....	25
3.7	CE QU'IL FAUT RETENIR	27
4	LES BRISE-LAMES EN GEOTEXTILES IMMERGES.....	28
4.1	INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	28
4.2	LES TUBES EN GEOTEXTILE SUR LE LITTORAL MEDITERRANEEN FRANÇAIS	28
4.3	DONNEES ET METHODES	30
4.4	PRINCIPAUX RESULTATS PAR SITES.....	31
4.4.1	<i>Plage de La Capte (Hyères, Var).....</i>	<i>31</i>
4.4.2	<i>Plage de Grimaud.....</i>	<i>33</i>
4.4.3	<i>Plage de Cavalaire-sur-Mer.....</i>	<i>34</i>
4.4.4	<i>Plage du Rayol-Canadel-sur-Mer.....</i>	<i>34</i>
4.4.5	<i>Plage de la Nartelle, Sainte maxime</i>	<i>35</i>
4.4.6	<i>Plage de la Croisette, Sainte maxime.....</i>	<i>35</i>
4.4.7	<i>Plage de Cannes la Croisette.....</i>	<i>36</i>
4.5	CE QU'IL FAUT RETENIR	36
5	LE RECHARGEMENT EN GALETS DES PLAGES SABLEUSES	39
5.1	INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	39
5.2	RAPPEL SUR LE FONCTIONNEMENT GEOMORPHOLOGIQUE DES SITES	39
5.2.1	<i>Le site de la Fourcade (Saintes-Maries-de-la-Mer).....</i>	<i>39</i>
5.2.2	<i>Le site du Jai, plage de la Motte Piquet (Marignane).....</i>	<i>41</i>
5.3	DESCRIPTION DES TRAVAUX DE RECHARGEMENT EN GALETS.....	42
5.3.1	<i>Site de la Fourcade</i>	<i>42</i>
5.3.2	<i>Site du Jai</i>	<i>42</i>
5.4	DONNEES ET METHODES	43
5.5	LES GALETS STABILISENT-ILS LA POSITION DU RIVAGE ?	44
5.5.1	<i>Site de la Fourcade</i>	<i>44</i>
5.5.2	<i>Site du Jai</i>	<i>45</i>
5.6	LES GALETS RESTENT-ILS EN PLACE ?	47
5.6.1	<i>Site de la Fourcade</i>	<i>47</i>
5.6.2	<i>Site du Jai</i>	<i>49</i>
5.7	LA PARTIE SOUS-MARINE EST-ELLE ERODEE DIFFEREMMENT ?	50
5.8	CE QU'IL FAUT RETENIR	52

6	CONCLUSION GENERALE	53
7	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54
8	LEXIQUE	56

1 Introduction générale

Dans le cadre de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, adoptée par la France en 2012, un réseau national des observatoires du trait de côte a été mis en place pour favoriser le développement d'observatoires sur l'ensemble du territoire national et les bonnes pratiques d'acquisition de données. A l'échelle régionale, la DREAL PACA a initié le projet de plateforme régionale « Mon Littoral Provence-Côte d'Azur »¹ et soutient des actions de recherche pour (notamment) alimenter les connaissances scientifiques transposables à terme à la gestion des territoires. Ce rapport participe directement à cet observatoire car il constitue un retour d'expérience sur les connaissances universitaires du CEREGE concernant différentes méthodes de « protection » côtière dans une perspective de diffusion large à travers le site monlittoral.fr. Le public visé concerne les citoyens, les techniciens, ingénieurs de bureaux d'étude, de collectivités, d'associations, les élus intéressés par l'évolution et le devenir du littoral de PACA.

Dans le contexte d'une gestion historique en enrochements du littoral, de l'épuisement sédimentaire des fleuves et des côtes et de l'accélération de la montée de la mer avec des conséquences géomorphologiques mal quantifiées, la philosophie de la « protection » côtière par l'ingénierie et les collectivités évolue. En effet, les solutions basées sur la Nature émergent mais elles doivent s'appuyer sur : (1) un bilan objectif des méthodes antérieures (enrochements, renforcement dunaire, rechargement artificiel, laissé faire...), (2) une connaissance approfondie des processus physiques, souvent par le biais d'une analyse des données déjà acquises et (3) une expertise scientifique pouvant se baser sur une approche empirique et/ou modélisante. Ces approches contribuent à la transition environnementale des plages de Provence-Côte d'Azur.

Les rivages de Provence-Côte d'Azur, qui présentent une diversité de formes littorales et de pratiques de gestion sédimentaires, dans un environnement aux forts enjeux socio-économiques, subissent particulièrement l'érosion et les submersions marines et des solutions basées sur la Nature seraient sans doute adaptées à une gestion durable de l'environnement littoral. Pour ce faire nous proposons une recherche applicable sur la base de 3 thèmes :

1-Renaturation du littoral par l'abandon d'une digue à la mer ou par le désenrochement

Abandonner des enrochements à la mer ou les supprimer afin de renaturer le rivage permet aux forçages (principalement la houle et ses courants) de retrouver un fonctionnement naturel. Toutefois l'ampleur des modifications géomorphologiques et leur évolution dans le temps restent inconnues. Depuis une décennie, en PACA, les sites de la digue de Véran (Arles, Camargue) et celui des Vieux Salins (Hyères) connaissent respectivement un abandon des enrochements à la mer ainsi qu'un désenrochement. L'analyse des données historiques permettra un retour d'expérience de ces pratiques. Ce thème est présenté à travers les parties : 2- *le laissé faire par la mer d'une plage endiguée* et 3- *le désenrochement*.

2-Les brise-lames en géotextiles² immergés pour limiter l'érosion des plages

Afin de proposer une alternative aux enrochements, plusieurs communes ont misé sur la protection du rivage en tentant de diminuer la force de la houle par le biais de boudins de géotextiles remplis de sable déposés dans la zone du déferlement. Si en théorie cette approche semble séduisante, puisqu'il s'agit d'agir directement sur le forçage naturel responsable de l'érosion, les retours d'expérience sont faibles et souvent incomplets du fait d'analyses superficielles et/ou d'un manque de données replacées dans une perspective pluri-annuelle. Il s'agit donc d'apporter un regard rénové sur ces pratiques des

¹ La plateforme monlittoral.fr est copilotée par la DREAL et la Région depuis janvier 2022 et la signature d'une convention-cadre 2022-2027 relative au développement et à la gestion de monlittoral.fr

² Ce titre est plus adapté à celui mentionné dans la convention de recherche entre la DREAL et le CEREGE car « géotube » est une marque déposée par une société.

sites de méditerranée française. Ce thème est présenté à travers la partie 4- *Les brises-lames en géotextiles immergés*

3-Le rechargement en galets de plages sableuses

Le rechargement artificiel en sable dont la granulométrie de dépôt est proche de celle naturelle est une technique d'ingénierie bien documentée, mais l'utilisation de galets de rechargements dans un environnement sableux demeure peu pratiquée. En utilisant ce type de sédiments on établit l'hypothèse qu'une taille plus importante des sédiments déposés artificiellement limitera le recul du rivage. Néanmoins cette approche néglige les réadaptations morphodynamiques du profil (interactions entre la houle, la granulométrie et la morphologie) et les premières observations sur deux sites de la région, La Fourcade aux Saintes-Maries-de-la-Mer (Camargue) et sur la plage du Jaï (commune de Martigues), indiquent des résultats contradictoires. L'analyse des données historiques permettra un retour d'expérience de ces pratiques. Ce thème est présenté à travers la partie 5- Le rechargement en galets des plages sableuses

Ce rapport repose sur des mémoires de recherche d'étudiants du master COAST de l'Université d'Aix Marseille encadrés par des scientifiques de l'Université. Les travaux ont utilisé dans la mesure du possible, les jeux de données disponibles sur la plateforme « [Mon littoral](#) Provence-Côte d'Azur » qu'ils contribuent aussi à enrichir afin d'apporter des éclairages sur des questions concrètes partagées avec la communauté des acteurs du littoral (administrations, organismes, associations, collectivités, citoyens).

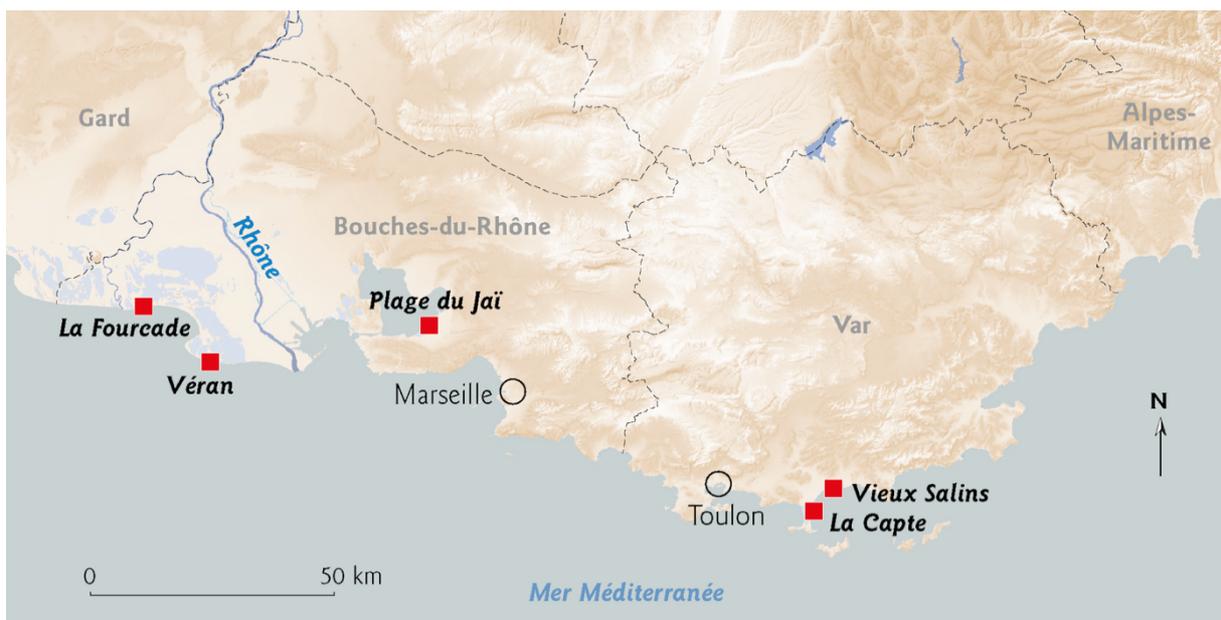


Fig. 1. Localisation des sites d'études

François Sabatier remercie chaleureusement la Tour du Valat, le Conservatoire du Littoral et le SYMADREM pour avoir transmis des données utiles à cette étude (Lidar 2016 sur le site de Véran, Topobathymétrie 2017 sur le site des Vieux Salins et plans topographiques sur le site de la Fourcade).

2 Le laissé faire par la mer d'une plage endiguée (exemple de Véran, Camargue)

Cette partie est tirée du mémoire de master 2 de Lénaïg Hurtrez.

2.1 Introduction et problématique

De nombreux travaux ont mis en évidence les effets secondaires des digues frontales sur l'érosion sous-marine. En effet, si ces dernières parviennent à stabiliser le rivage, leur présence ne stoppe pas l'érosion sous-marine et peut y contribuer en accentuant les processus de réflexion de la houle contre l'ouvrage. Ce mécanisme, connu mais peu documenté a notamment été mis en évidence par les travaux du CEREGE sur le site de Véran à travers la thèse de O. Samat (2007).

La digue du site de Véran, qui date de 1972, se situait à l'origine à plusieurs dizaines de mètres du rivage et constituait une limite efficace contre les submersions marines. Progressivement le recul du rivage a menacé la stabilité de l'ouvrage qui s'est effondré après la tempête exceptionnelle de 1997. A la suite de cet évènement, une digue plus haute et résistante a été reconstruite au même emplacement, donc sans plage mais avec les pieds dans l'eau. L'ouvrage était régulièrement attaqué par la vague et entretenu (difficilement) par les SALINS. En 2012, le Conservatoire du Littoral achète une partie du territoire des SALINS et la digue n'est plus entretenue. Depuis cette date la digue s'effondre et s'enfonçe peu à peu laissant la mer envahir l'étang de Véran qui se comble lentement de sédiments.

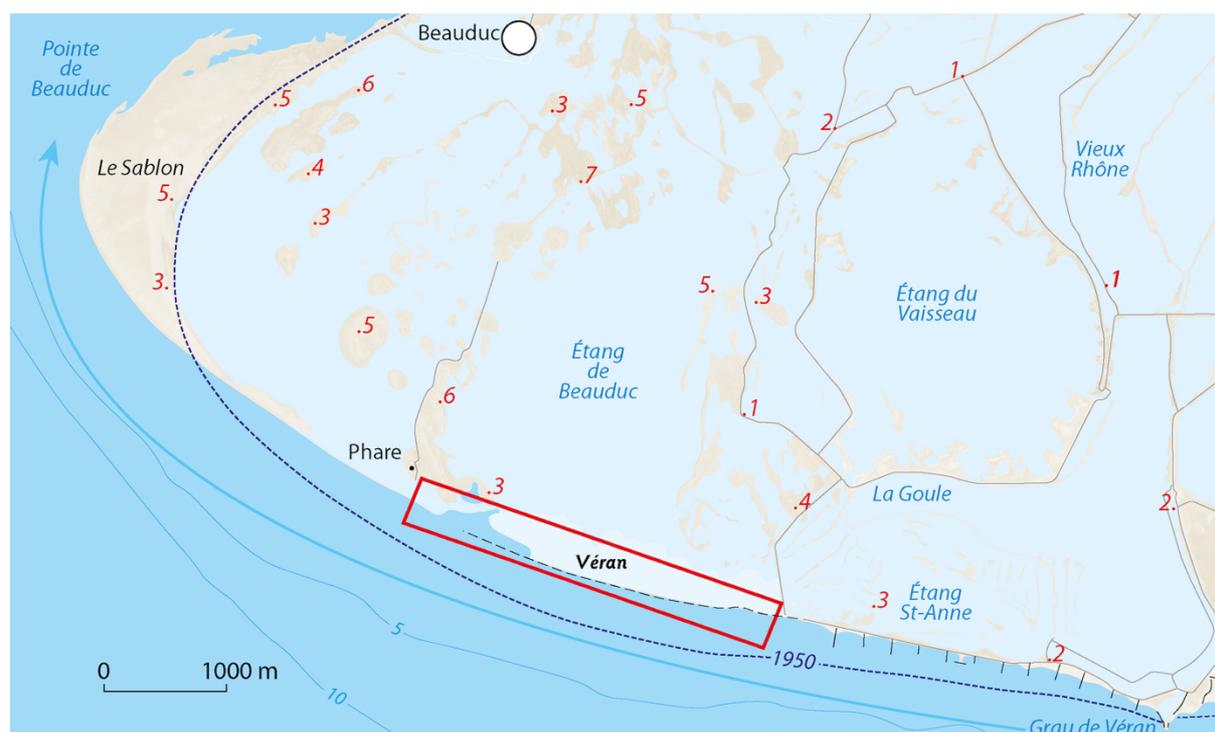


Fig. 2. Localisation du site de Véran (commune d'Arles). Les points en rouge représente des altitudes (NGF) et la flèche bleue en mer la dérive littorale dominante

Cette partie décrit l'évolution géomorphologique en mer et coté étang de la digue de Véran dans une perspective de capitalisation des connaissances puisque cette expérience présente un cas rare d'abandon d'une digue frontale et de laissé faire par la mer. Dans cet objectif nous nous interrogeons sur :

- **la mise à jour de l'évolution des fonds marins dans un logique de budget sédimentaire,**
- **la capacité d'une plage à se créer dans un contexte d'érosion du littoral,**
- **le rôle des barres d'avant côte sur le budget sédimentaire.**



Photo. 1. La digue de Véran en 2005, vue vers l'ouest depuis son extrémité est. Un lambeau de plage existe encore, à l'abri du dernier épis (au dos de la photo). Sur la droite de la digue, l'étang de Véran, profond de quelques dizaines de centimètres est aujourd'hui comblé par près de 0,5m de sédiments. On distingue un ancien dépôt d'overwash lié à la tempête de 1997 (cliché O. Samat).



Photo. 2. La digue de Véran en 2007 et en 2020 (vue vers l'ouest). La digue s'est effondrée, on distingue côté mer les blocs de la carapace (bloc 2 à 4 t) tandis que le ballast qui constituait une route carrossable est progressivement diffusé vers l'étang. Sur la droite l'étang s'est comblé suite aux dépôts de tempêtes réalisés durant les submersions marines. En 2020 le position du rivage n'est plus stabilisée puisque l'on distingue un recul de plusieurs mètres (F. Sabatier, Aix-Marseille Université, CEREGE).

2.2 Rappels sur le fonctionnement géomorphologique du site

Le site de Véran (Camargue, Arles) se localise sur une zone en érosion chronique et particulièrement marquée par le recul du trait de côte (Fig. 3). Il s'étend sur 3 kilomètres à l'ouest du grau de la Dent et au sud du phare de Beauduc. Il sépare la mer de l'étang de Beauduc et fait suite à une batterie d'épis dans le sens de la dérive littorale dominante dirigée vers l'ouest (Kulling, 2017) Avant la construction

des ouvrages en enrochements, le retrait du rivage a pu atteindre des vitesses supérieures à 10 m/an (Suanez, 1997 ; Sabatier, 2001). L'érosion est liée à la morphologie des fonds induits par l'ancienne embouchure du Bras de Fer qui s'écoulait ici jusqu'en 1711. En effet, ce dernier a construit un gigantesque lobe sous-marin qui participe à la déformation des houles qui arrivent à la cote en ayant augmenté leur énergie (convergence des orthogonales de houles). Le recul du rivage alimente la dérive littorale dominante dirigée depuis le grau de la Dent vers la pointe de Beauduc et participe donc à sa construction.

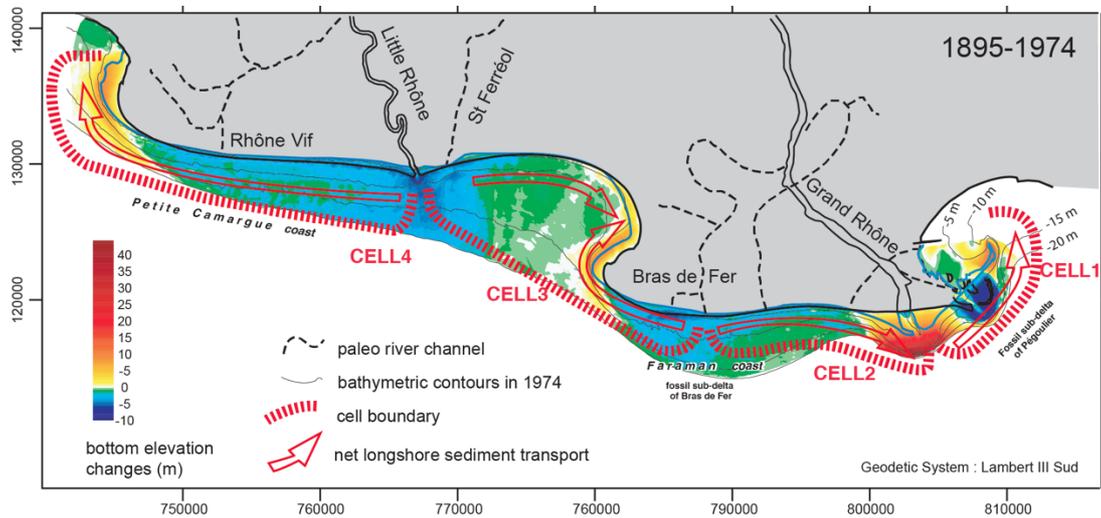


Fig. 3. Évolution séculaire des fonds et organisation en cellules de dérive littorale du delta du Rhône (Sabatier et Anthony, 2015).

2.3 Données et méthodes

Nous avons utilisé plusieurs jeux de données collectées dans des études antérieures et surtout grâce au projet [Space for Shore](#) dans lesquels [Monlittoral](#) et le CEREGE sont impliqués.

L'évolution des fonds pour définir des budgets sédimentaires s'appuie sur des relevés de 2006 (bateau-écho sondeur-DGPS) par la société SEMANTIC pour la DIREN PACA (aujourd'hui DREAL), des relevés Lidar du SHOM en 2013 et un relevé Lidar de la Tour du Valat en 2016. Les données sont utilisées pour construire des Modèles Numériques de Terrain (MNT) c'est à dire en morphologie 3D afin de pouvoir les visualiser et déterminer des bilans sédimentaires. En mer, les données de 2016 ne s'étendent qu'à 400 m du rivage environ ce qui limite l'analyse et donc sous estime les volumes érodés et accumulés. Néanmoins, ces données permettent une réactualisation des valeurs proposées par Suanez (1997), Sabatier et al., (2006).

La quantification des dépôts de la partie émergée de la plage de Véran s'appuie sur des données Lidar de 2016 financés par la Tour du Valat et d'une campagne de photogrammétrie réalisée en 2020 par le CEREGE. En effet, la création de la plage de Véran dans l'étang de Beauduc peut s'illustrer facilement à travers les données de [Géoportail](#) (Photo. 3). Cependant la quantification des dépôts nécessite des données à haute résolution, proches ou inférieures à 10 cm de précisions car les reliefs sont très réduits sur ces vastes étendues sub-horizontales.

L'analyse morphologique des barres utilise des photographies aériennes et BD ortho de l'IGN (1998 ; 2003 ; 2008 ; 2009 ; 2011) ainsi que les bathymétries proposées par le projet [Space for Shore](#) (saisonniers de 2015 à 2020) complétées par celles de 2006 (SEMANTIC) et 2013 (Lidar SHOM).

2.4 Une réactualisation des bilans sédimentaires sous-marins

L'utilisation des données bathymétriques de 2006 ; 2013 et 2016 permettent une mise à jour des bilans sédimentaires entre le grau de la Dent et la flèche de Beauduc. Il s'agit de comparer les fonds entre deux dates afin d'en proposer une quantification.

Le bilan sédimentaire entre 2006 et 2016 (moyen-long terme) est incomplet du fait du découpage des données de 2016 et il sous-estime donc très probablement la partie en érosion (Fig. 4). On ne retiendra donc que la répartition des zones d'érosion et de dépôt qui confirment les connaissances antérieures (cellule de dérive littorale). Cependant on découvre quelques nuances à cette échelle de temps puisque dans la zone en érosion, entre Véran et le grau de la Dent, des zones de dépôt apparaissent ponctuellement. Cette répartition dévoile un transport sédimentaire en relais dans la zone du déferlement. A ce jour, ce mécanisme n'avait jamais été envisagé (ou observé) à cette échelle de temps. Elle confirme aussi l'intense érosion en face de Véran.

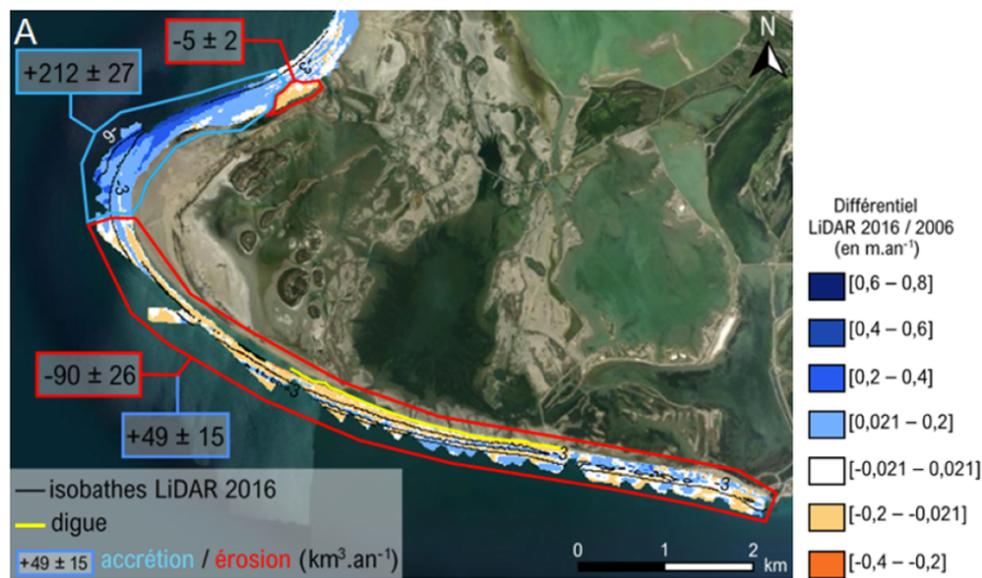


Fig. 4. Évolution des fonds et bilans sédimentaires entre 2006 et 2016 (mémoire de M2, L. Hurtrez, 2021).

Le bilan sédimentaire entre 2006 et 2013 (moyen terme) peut au contraire être interprété avec plus de précisions. L'accumulation d'environ 430.000 m³/an à Beauduc est conforme aux valeurs des travaux antérieurs (Fig. 5). Elle se limite à -6 m ce qui indique une sédimentation concentrée à proximité de la zone du déferlement. Dans la zone en érosion, des nuances apparaissent : elles dévoilent des déplacements perpendiculaires au rivage des barres d'avant côte, une érosion intense devant la digue de Véran ainsi que dans les fonds inférieurs à 6 m. Vers le large, la limite de la fin de l'érosion n'a pas été atteinte par les bathymétries car les données montrent que les processus érosifs concernent la majeure partie de l'avant côte, y compris à cette échelle de temps ce qui n'avait pas été révélé auparavant. Par conséquent, l'érosion réelle est supérieure aux 560.000 m³/an estimés ici. Le bilan sédimentaire de la cellule connaît un excédent de 84.000 m³/an environ mais compte tenu des lacunes de la partie en érosion, on peut considérer qu'il est équilibré, voire négatif.



Fig. 5. Évolution des fonds et bilans sédimentaires entre 2006 et 2013 (mémoire de M2, L. Hurtrez, 2021).

Le bilan sédimentaire entre 2013 et 2016 (court terme) dont le calcul des volumes est incomplet du fait du découpage partiel des relevés Lidar de 2016, présente des informations inédites à cette échelle temporelle (Fig. 6). En effet, la zone en érosion s'étend au-delà de la pointe de Beauduc et « repousse » celle en accrétion dans le sens de la dérive littorale. Cette information nuance le fonctionnement de la cellule littorale dont la limite entre la zone en érosion et accrétion se situe plutôt habituellement à l'Est du phare de Beauduc. Il est possible, comme observé auparavant par Suanez (1997), que cette limite se déplace lentement vers l'Ouest. Si cette dynamique se confirme, il devient alors envisageable que le fond du golfe de Beauduc reçoive plus de sédiments puisque la zone en érosion sera plus étendue. A cette échelle temporelle on perçoit très significativement le déplacement des bars dans la zone en érosion ce qui suggère son importance sur le bilan sédimentaire.

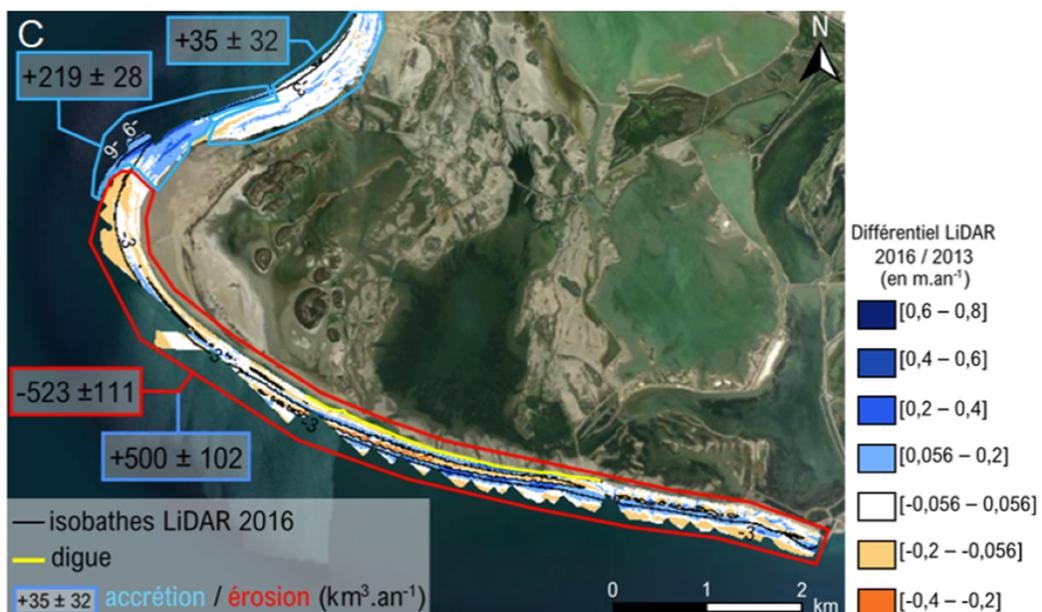


Fig. 6. Évolution des fonds et bilans sédimentaires entre 2013 et 2016 (mémoire de M2, L. Hurtrez, 2021).

2.5 La création d'une plage malgré un littoral en érosion

Le bilan sédimentaire entre 2016 et 2020 de la partie émergée de la plage de Véran révèle une plage en accrétion (Fig. 7 et Photo. 3). En effet, 56% de la zone étudiée montre une accumulation alors que seulement 7% connaît une érosion tandis que 37 % de la plage reste stable (dans la limite de l'erreur des mesures) entre 2016 et 2020. L'érosion se concentre principalement au niveau du rivage, en arrière et au pied de la digue tandis que les gains se localisent plutôt en arrière des zones érodées (donc du rivage). Les gains (24.000 m³/an) sont 10 fois plus élevés que les pertes (2.300 m³/an) et le bilan sédimentaire de la partie émergée de la plage de Véran s'élève donc à 21.000 m³/an entre 2016 et 2020. L'évolution topographique et le bilan sédimentaire suggèrent un enroulement du prisme littoral qui recule sur lui-même mais il dévoile surtout des apports sableux issus de la partie sous-marine (sans doute depuis les fonds devant l'ouvrage en enrochements).

Pour illustrer le gain sédimentaire de la zone, trois profils sont utilisés. Tous indiquent une élévation altimétrique pouvant atteindre 1 m mais souvent proche de 0,2 m. Sur le profil A (Fig. 8 en lien avec G18p de la Fig.7) on observe un fort recul du rivage avec des dépôts qui s'accumulent pour former un cordon tandis que sur les profils B et C (Fig. 8 en lien avec G16p et G15'p de la Fig.7), l'accumulation concerne surtout la partie plane. Si on considère que les étangs qui sont aujourd'hui comblés par ces dépôts de tempêtes affichaient des valeurs altimétriques légèrement inférieures à 0 NGF, alors la sédimentation totale est proche de 0,6 m.

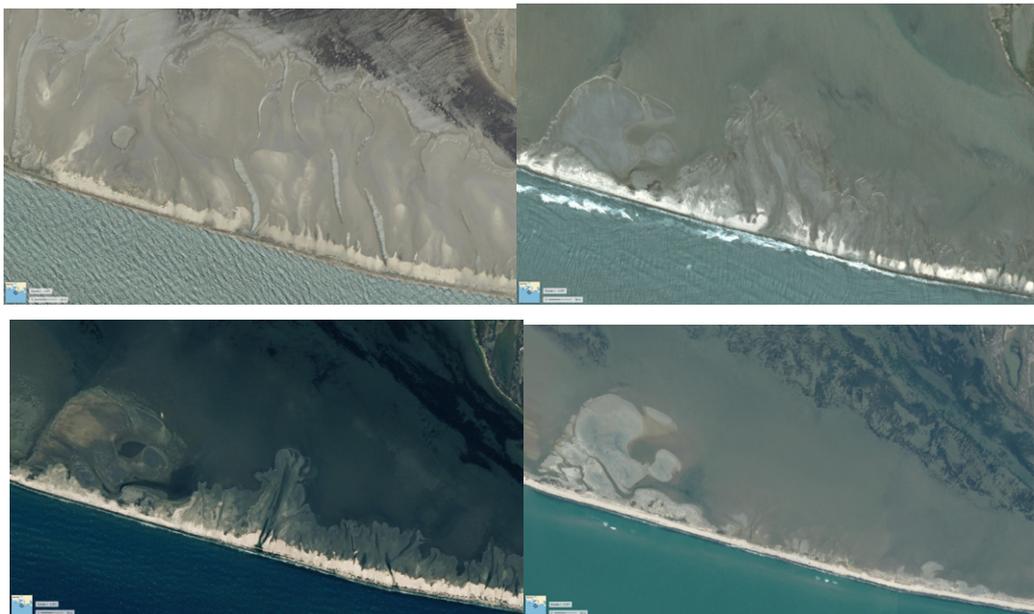


Photo. 3. Dépôts d'overwash dans l'étang de Beauduc suite à la destruction de la digue de Véran en 2021-2017-2015-2009 (données [Géoportail](#)).

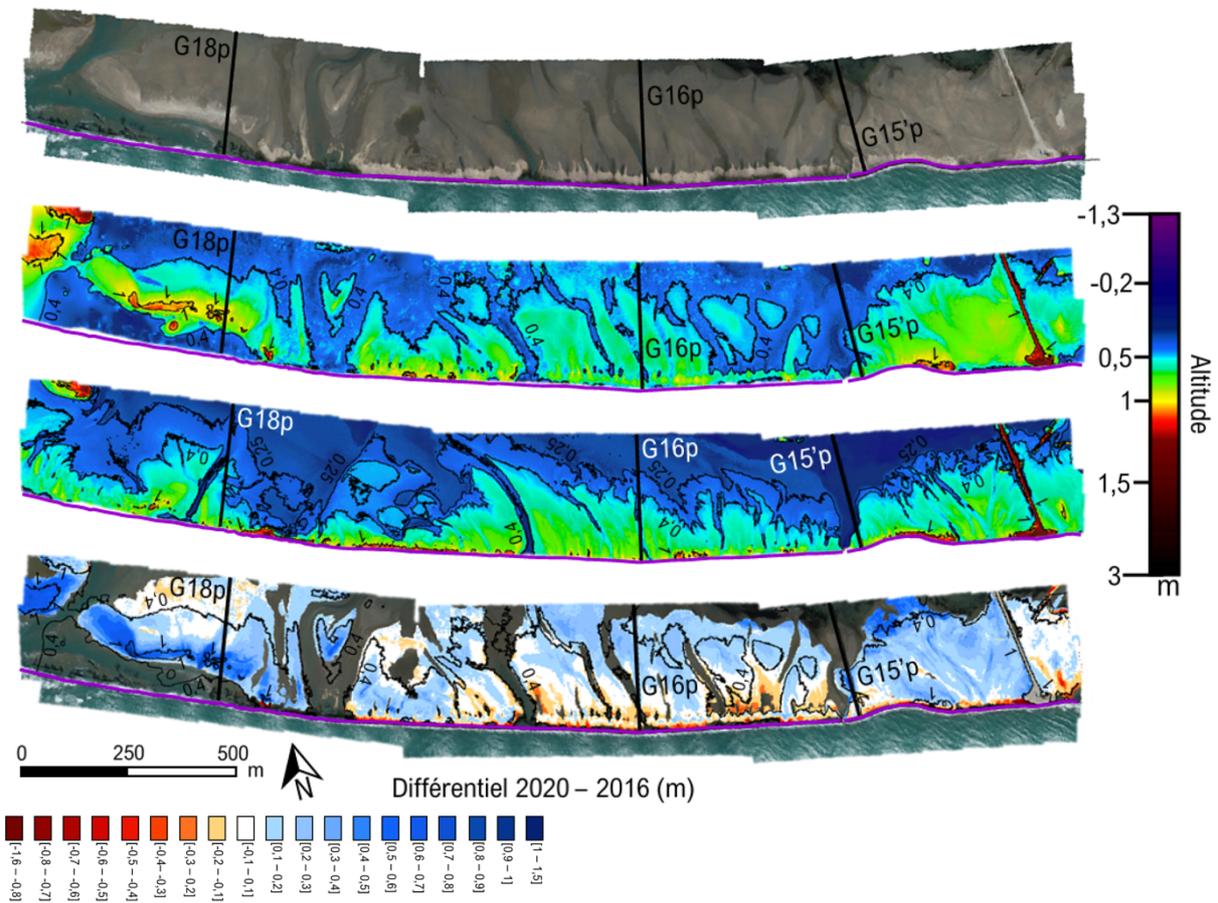


Fig. 7. De haut en bas, orthophoto de 2020 de la plage de Beauduc, MNT de 2020, MNT de 2016 et différentiel de MNT de 2020 et 2016. Les couleurs orangées et dans les tons bleus du différentiel indiquent respectivement de l'érosion et de l'accrétion. La couleur blanche représente l'incertitude de 10 m. Les traits rectilignes noirs indiquent la position des profils G18p, G16p et G15'p. Le trait violet indique la position de la digue (mémoire de M2, L. Hurtrez, 2021).



Photo. 4. Les dépôts d'overwash qui comblent l'étang en 2021 (vue vers le nord). La plage est large de plus de 300 m pour une épaisseur de dépôts proche de 0,6 m. On distingue un chenal d'écoulement mis en évidence par la présence d'eau résiduelle ainsi que des ondulations de la topographie qui dévoilent des courants importants lorsque le site est submergé (cliché P. Larroude).



Photo. 5. En 2021, à l'ouest du site il ne subsiste plus que les blocs de la carapace de la digue qui s'enfoncent progressivement dans le sable. Le rivage a reculé de presque 100 m. Au premier plan on distingue des vestiges (galets et petits blocs) de la route carrossable de la digue (cliché P. Laroudé).

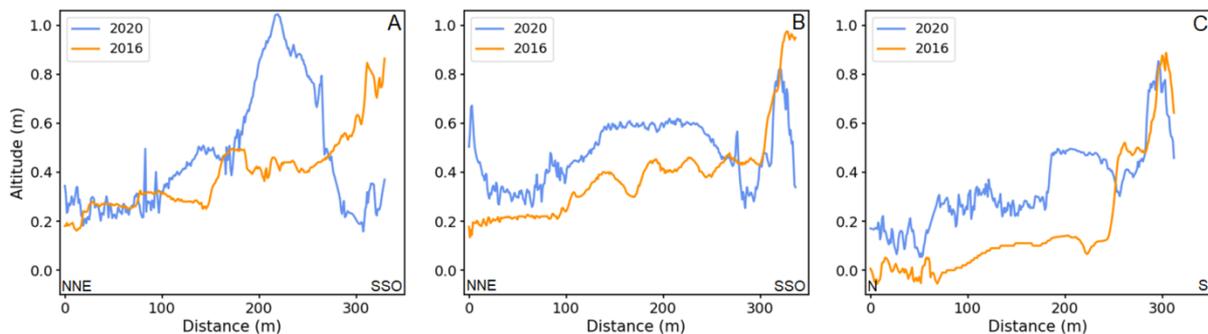


Fig. 8. Profils topographiques sur les overwash de la plage de Vérán (mémoire de M2, L. Hurtrez, 2021).

La digue s'effondre lentement (Fig. 9) surtout à l'ouest, ce qui génère la formation d'une passe avec l'étang de Beauduc. Aujourd'hui l'altitude de la digue dépasse rarement 1 m NGF et même les tempêtes annuelles (fréquentes et peu intenses) sont donc capables de la franchir. Par conséquent les processus d'overwash ne sont plus limités aux événements intenses. Néanmoins l'ouvrage limite encore la vitesse du recul du rivage puisqu'à l'ouest celui-ci a significativement reculé par rapport au reste de la zone où l'ouvrage résiste mieux.

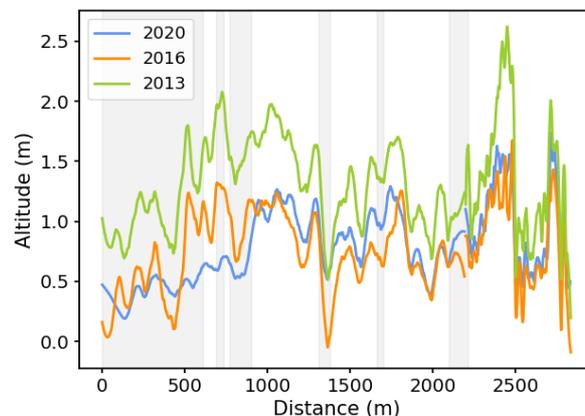


Fig. 9. Profil longitudinal de la digue le long de la plage de Beauduc en 2013, 2016 et 2020. Les zones grises correspondent à la position des chenaux principaux (mémoire de M2, L. Hurtrez, 2021).

2.6 L'évolution des bancs de sables

La zone d'étude, entre la Pointe de Beauduc et l'est du Grau de la Dent, présente entre 1998 et 2020 jusqu'à cinq barres d'avant-côte visibles sur les bathymétries et les photographies aériennes (Fig. 10). Les barres d'avant côte sont des bancs de sables, ici parallèles au rivage, qui induisent mais aussi sont la conséquence du déferlement. Elles représentent de véritables stocks sédimentaires utiles au prisme sableux littoral et la description de leur fonctionnement est une étape indispensable pour comprendre le fonctionnement d'une cellule littorale. Par exemple, les bilans sédimentaires (cf supra) soulignent leur importance dans le budget sédimentaire. De plus, si de nombreux travaux de la littérature scientifique ont montré qu'à moyen long terme, les barres se déplacent vers le large, ce fonctionnement n'est pas nécessairement universel et la présence de la digue induit très certainement une modification du fonctionnement naturel de ces bancs sableux. A ce titre, Samat et al., 2006 ont principalement montré un éloignement des barres devant la digue de Véran et un approfondissement en pied d'ouvrage couplés à une organisation longitudinale croissante dans le sens de la dérive littorale (d'est en ouest).

Les barres sont identifiées par une lettre, la plus proche de la côte correspondant à la barre **a** et la plus au large à la barre **d** (Fig. 10). Les barres internes **a** et **b** rejoignent la côte à l'est au large de la partie ouest de la digue et s'en écartent à mesure qu'on se déplace vers l'ouest. Ces barres internes sont toujours continues et fines (environ 40 m de large) tandis que les barres externes **c** et **d** sont souvent plus larges (environ 100 m) et irrégulières (**d**).

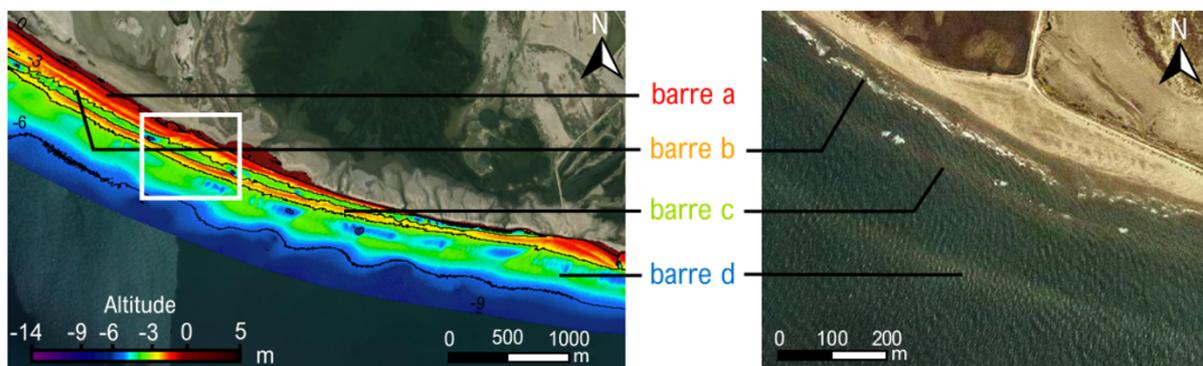


Fig. 10. MNT provenant du LiDAR 2013 (à gauche) et orthophotographie aérienne de 1998 (à droite). Le rectangle blanc sur l'image de gauche indique l'emplacement de l'orthophotographie (mémoire de M2, L. Hurtrez, 2021).

En 2013, la fosse au pied de la digue présente une profondeur qui atteint presque 6 m sur les profils situés dans la partie centrale de la digue (G16 et G15') alors qu'ailleurs, y compris là où la digue va s'effondrer et où une passe va se créer, les profondeurs sont moins importantes et semblables à des situations naturelles (Fig. 11). En 2016, les fosses en pied de digue ou sur la plage naturelle sont moins profondes et proches de 2 m. Ces observations suggèrent que l'impact érosif de la digue sur la bathymétrie est maximal dans la partie centrale et s'amoindrit au large de ses extrémités. Par ailleurs, (Samat, 2007) a mis en évidence un approfondissement de la fosse interne de 4 m environ entre 1988 et 2004 alors qu'elle atteignait 1 à 2 m avant la reconstruction de la digue. L'augmentation de la profondeur devant la digue était alors interprétée comme un affouillement directement lié à la présence de l'ouvrage que nous confirmons mais il s'amoindrit sur les données de 2016 pour afficher le même ordre de grandeur que celui estimé par Samat (2007) avant la reconstruction de la digue. Il est donc probable que l'affaissement progressif de la digue soit à l'origine d'une diminution de l'érosion des fonds au pied de l'ouvrage

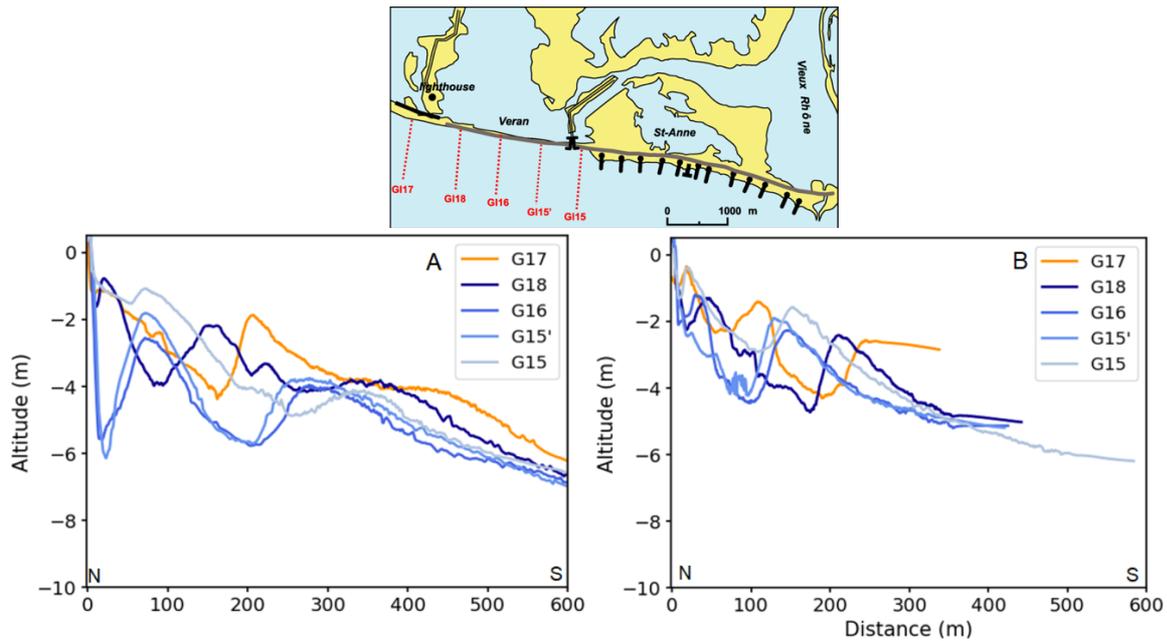


Fig. 11. Profils bathymétriques en 2013 (A) et 2016 (B). En orange au droit de la plage naturelle et en dégradés de bleus devant la digue (mémoire de M2 L. Hurtrez, 2021).

L'enveloppe des déplacements des barres entre 1998 et 2020 montre des différences marquées selon les secteurs devant les épis à l'est, devant la digue et devant la plage naturelle à l'ouest (Fig. 12) mais le mouvement général est orienté vers le large. Ainsi, dans le secteur au large des épis et à l'ouest du Grau de la Dent, les barres **c** et **d** montrent une enveloppe de déplacement d'environ -250 m. Au large de la digue, on observe une diminution, d'est en ouest, du déplacement des barres externe **c** et **d**, jusqu'à atteindre un minimum de déplacement d'environ -150 m à l'extrémité ouest de la digue. La barre interne **b** définie sur l'intégralité du secteur de la digue montre un déplacement relativement faible mais en direction de l'ouest son déplacement vers le large augmente. D'est en ouest de la plage naturelle, les barres d'avant-côte montrent une augmentation progressive de leur déplacement vers le large de l'ordre de 100 m pour la barre **a** et 200 m pour les barres **b**, **c** et **d**. Sans explication évident, la barre **a** et **d** montrent une diminution synchrone de leur déplacement au niveau de la pointe de Beauduc en opposition avec l'enveloppe des déplacements des barres **b** et **c**. Il est très difficile de trouver une logique dans l'organisation spatiale des barres. La digue semble jouer un rôle sur la position des barres **c** et **d** puisqu'elles s'éloignent du rivage en aval dérive de l'ouvrage sans que nous puissions en expliquer la/les causes.

La recherche de tendances temporelles du déplacement des barres est décevante (Fig. 12). En effet, peu de valeurs sont significativement représentatives. La dynamique transverse des barres semble donc globalement non linéaire et les valeurs et tendances de la figure 11 sont à prendre avec recul. Cependant, cela ne signifie pas que le mouvement des barres soit chaotique, mais souligne l'extrême complexité de l'organisation morphodynamique des barres d'avant côte.

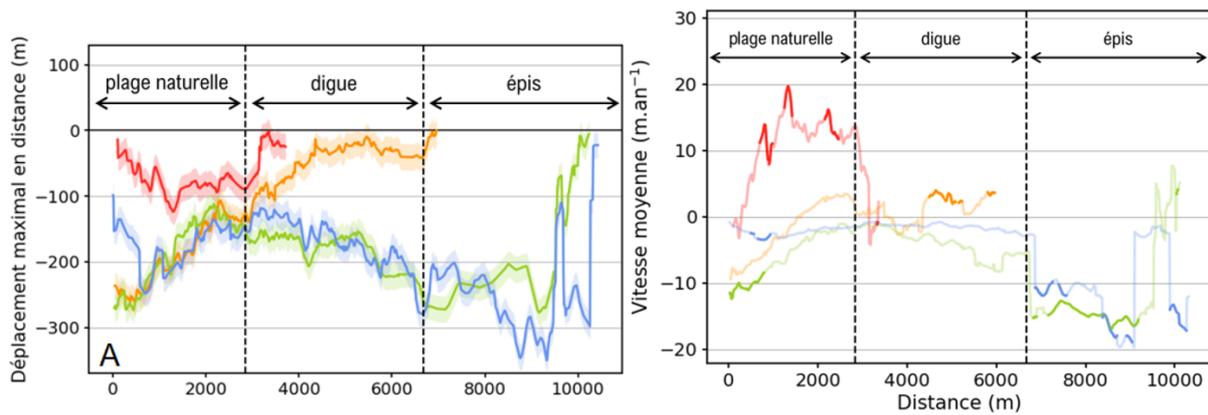


Fig. 12. Caractéristiques des barres d'avant côte. Les barres a, b, c et d sont respectivement représentées en rouge, orange, vert et bleu. Un déplacement positif (négatif) correspond à un déplacement vers la côte (le large). Gauche : Enveloppe des positions des barres entre 1998 et 2020. Les bandes de couleurs correspondent à une incertitude de positions estimée à 20 m. Droite : tendances linéaires des variations du rivage des barres. Les profils plus foncés ou plus clairs indiquent respectivement les valeurs pour lesquelles les valeurs sont significatives ($R^2 > 0,75$) ou non (mémoire de M2, L. Hurtrez, 2021).

2.7 Ce qu'il faut retenir

Les bilans sédimentaires à moyen et moyen-long terme confirment l'organisation en cellules de dérive littorale. A cette échelle de temps ils dévoilent surtout une dynamique longitudinale alors qu'à long terme, des pertes vers le large ont été suggérées (Sabatier et al., 2006). L'érosion dans la zone n'est pas directement causée par les enrochements de la digue mais elle s'explique essentiellement par une diminution des apports sédimentaires du Rhône, un recul historique lié au gradient de la dérive littorale (Sabatier et al., 2009 ; Brunel et Sabatier, 2009). Les bilans sédimentaires calculés dans ce rapport présentent le même ordre de grandeur que ceux issus des bilans antérieurs (Sabatier, 2001). On remarque également une variabilité importante des volumes érodés selon les périodes, que ce soit avant ou après la mise en place de la digue (dès 1972) ou sa reconstruction (1998) ce qui suggère que les enrochements n'ont pas d'effets visibles sur le bilan érosif de la partie sous-marine à cette échelle spatiale. Avec des données plus précises, Samat (2007) a montré que la digue augmente la réflexion et l'érosion en pied d'ouvrage mais à l'échelle des cellules sédimentaires cette conclusion n'apparaît pas évidente. Ces nuances obligent donc à déployer plusieurs types de méthodes (bilans sédimentaires, profils, courantologie, etc.) pour comprendre le fonctionnement sédimentaire du site.

Le rivage recule sur le littoral de Véran en fonction de la résistance et de l'effondrement de la digue : rapidement là où elle a disparu et plus lentement là où elle est encore « haute ». A ce recul s'associe des submersions marines qui apportent des sédiments (dépôts d'*overwash*) dont les dépôts dans la lagune créent une nouvelle plage. Contrairement à l'opinion commune, ce mécanisme se met en place dans un contexte général érosif. Les apports sédimentaires par les submersions marines sont estimés à 20.000 m³/an environ mais cette valeur ne peut pas être considérée comme un apport constant ou régulier. En effet, il dépend d'abord de la force et de la fréquence des tempêtes dont les valeurs ne sont pas encore estimées. Ensuite, la morphologie ante dépôt de tempête est primordiale car les dépôts sont plus importants lorsque l'étang n'est pas encore comblé. Autrement dit, une même tempête ne déposera pas la même quantité de sédiment si elle se produit sur un profil ayant déjà reçu des sédiments ou pas. Néanmoins le rivage reculant, les dépôts pourront toujours se réaliser comblant ainsi progressivement l'étang de Beauduc. **Ce mécanisme naturel d'élévation altimétrique compense donc l'élévation lente de la montée de la mer et il pourrait être perçu comme une alternative efficace aux enrochements. Il nécessite néanmoins l'acceptation d'un recul du rivage et suffisamment d'espace pour laisser les processus naturels de submersions marines se développer.**

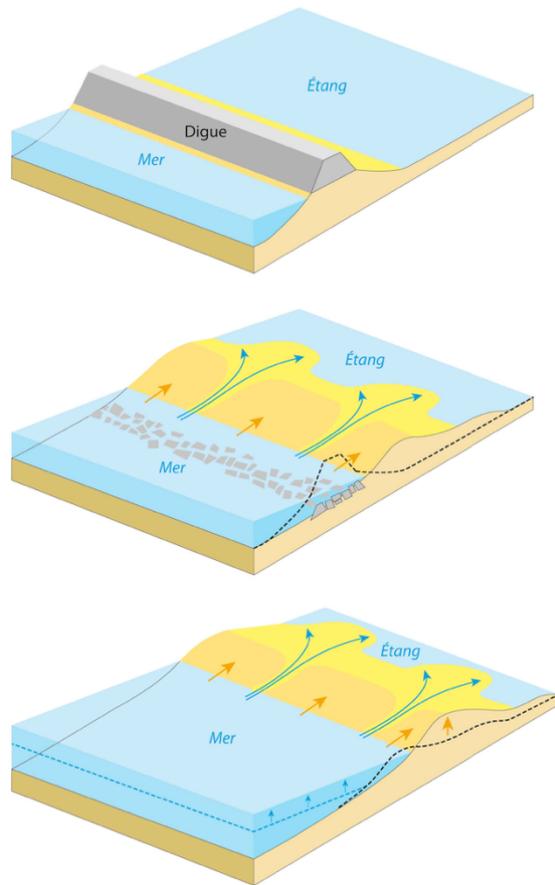


Fig. 13. Schéma conceptuel de l'évolution de la plage de Véran. Le rivage recule mais la plage s'élève altimétriquement ce qui compense la lente montée de la mer (croquis F. Sabatier et P. Pentsh).

3 Le désenrochement (exemple des Vieux Salins, Hyères, Var)

Cette partie est principalement tirée du mémoire de master 2 de Gael Chatagno.

3.1 Introduction et problématique

Pendant plusieurs décennies, les digues (ouvrages longitudinaux en enrochements) ont été considérées comme une solution efficace contre le recul du rivage et les submersions marines. En effet, si l'ouvrage résiste à l'assaut des vagues, alors il stabilise la position du rivage et s'il est correctement calibré, il permet de limiter, voire d'interdire, le franchissement de la mer durant les tempêtes. Toutefois cette efficacité est limitée par des effets secondaires comme, par exemple, l'affouillement à sa base qui finit par menacer la stabilité de l'ouvrage (par exemple à Véran). De plus, l'ouvrage en enrochement peut induire une encoche d'érosion en aval dérivée du fait de l'accélération des courants causée par la digue, de l'augmentation de la réflexion causée par la digue ainsi que de la stabilisation du rivage au niveau de la digue alors que la partie non enrochée continue son recul.

Le littoral des Vieux Salins (commune de Hyères, Var), entre l'étang de l'Anglais et la plage de Miramar, présente un intérêt majeur car une partie (150 m environ) de sa digue a été supprimée durant l'automne 2011 et le suivi topographique de la plage à proximité présente une véritable opportunité pour déterminer les impacts morphologiques d'une telle pratique (Fig 14). L'étude de ce rapport s'étend de 2010 à 2017 sur la base des données disponibles et des travaux qui modifient le fonctionnement du site désormais soumis à des contraintes différentes à partir de 2016 (mise en place de ganivelles, recalibrage d'un bourrelé sableux et autres phases successives de désenrochement) dont le projet [Adapto](#) réalise notamment une synthèse.

Après cette première phase de désenrochement, plusieurs questions se posent :

- **comment évoluent le rivage et les fonds de la cellule littorale ?**
- **comment évoluent le rivage et la plage après le désenrochement ?**
- **existe-t-il un transfert longitudinal des sédiments ?**



Photo. 6. La plage au droit de l'étang de l'anglais en septembre 2011. On distingue au fond, derrière le bateau, l'extrémité de la digue qui va être supprimée quelques semaines plus tard. La plage est toujours équipée de ganivelles qui seront progressivement détruites par les tempêtes et reconstruites, en arrière, en 2016-2017. (F. Sabatier, Aix Marseille Université, CEREGE).



Photo. 7. La digue désenrochée en 2011. Les matériaux utilisés correspondent à des blocs déposés plutôt « en vrac », assez éloignés de recommandations de génie côtier (F. Sabatier, Aix Marseille Université, CEREGE).

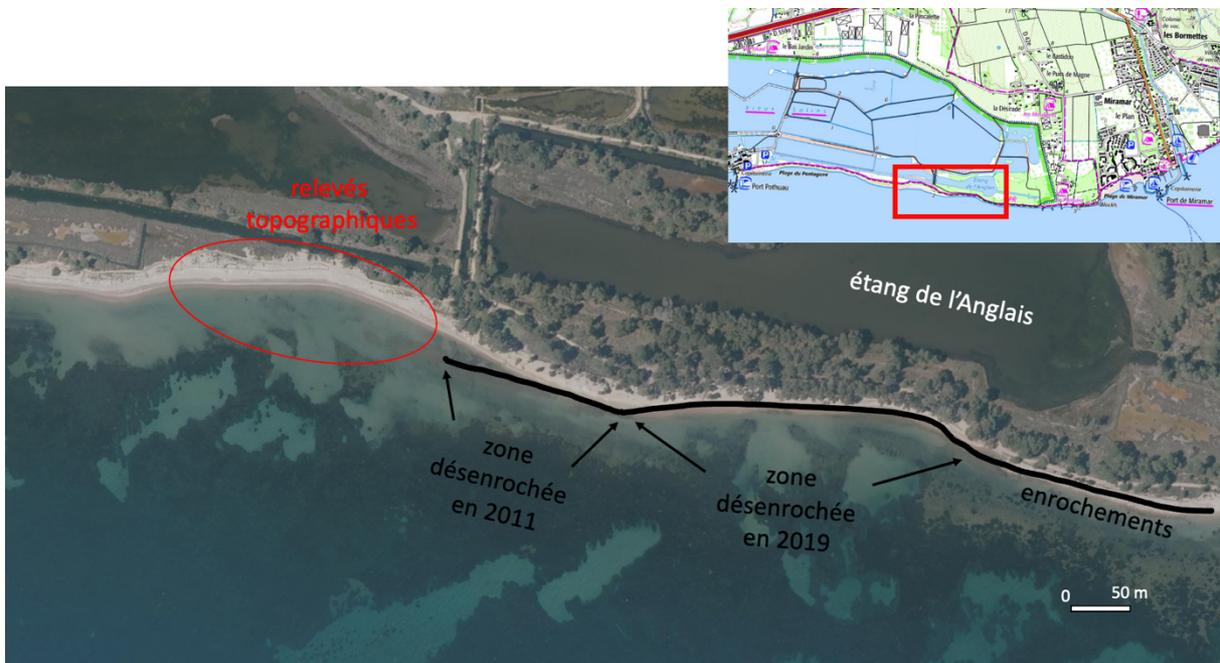


Fig. 14. Localisation de la zone désenrochée et du suivi topographique (fond Géoportail, 2017)

3.2 Rappel sur le fonctionnement géomorphologique du site

Entre la plage de Miramar et la digue de Port Pothau, le sédiment est sableux, localement mixte avec des graviers. Le cordon littoral a été formé essentiellement par les apports du Pansard Maravenne qui ont formé un delta dont la pointe à la fin du XIX^{ème} siècle correspond à la plage du camping le Pansard et au canal de son débouché au XX^{ème} siècle (Fig. 15). Cette zone est d'ailleurs équipée de trois épis et d'une digue qui s'allonge vers l'ouest à la base de laquelle la plage a disparu. A la fin de la digue, au niveau de l'étang de l'Anglais, la plage s'étire vers Port Pothau et lorsque la dune est présente, elle ne dépasse pas 2 m NGF. Cet ensemble en érosion chronique sépare de la mer d'anciens marais utilisés par l'industrie salière. L'ensemble de la zone connaît un recul du rivage hormis la plage du Pentagone qui s'élargit à la suite de l'accumulation de sables transportés par la dérive littorale depuis la zone à l'est en érosion. Le lecteur trouvera des indications supplémentaires sur le fonctionnement et la géomorphologie du site à travers Courtaud (2000), les rapports d'Artelia (2018), sur le [site du Conservatoire du Littoral](#) et Bazin (2022). La zone décrit donc une cellule de dérive littorale orientée d'est en ouest en relation avec les tempêtes de secteur Est à Sud.



Fig. 15. Localisation du site d'étude. Les chiffres en rouge représentent des altitudes NGF et la flèche en bleu foncée la dérive littorale dominante.

3.3 Données et méthodes

Entre Port Pothuau et la digue des Vieux Salins, nous avons combiné plusieurs données bathymétriques pour couvrir une échelle séculaire, entre 1896 (données du SHOM) et 2017 (données du Conservatoire du Littoral réalisés par SEMANTIC). La densité des points de sondes est par contre variable d'une campagne à l'autre, néanmoins ce jeu de données présente une occasion rare et unique, pour évaluer l'évolution des fonds sur 121 ans. Les bathymétries sont extrapolées en MNT afin de pouvoir les comparer et établir des bilans sédimentaires. Il s'agit ici de localiser et de quantifier les zones en érosion et celles en accumulation. Cette pratique permet d'interpréter les résultats selon le principe des cellules de dérive littorale.

L'analyse des fonds à long terme (1896 à 2017) est couplée à celle des variations du rivage sur la base de données compilées et/ou acquises par le CEREGE à partir de cartes anciennes, de photographies aériennes et d'orthophotographies de l'IGN.

A proximité immédiate de la zone désenrochée et dans l'encoche d'érosion située en aval dérive de la digue, nous avons utilisé des relevés de terrain (DGPS) de 2010-2012-2015-2017 réalisés par le CEREGE (à l'exception de 2017 fournis par le Conservatoire du Littoral -relevés SEMANTIC-). Ces relevés sont exploités en MNT afin de quantifier les zones de dépôts et d'érosion.

3.4 Comment évoluent le rivage et les fonds de la cellule littorale ?

3.4.1 Variations du rivage entre 1896 et 2017

Le littoral est découpé en trois zones en relation avec les déplacements du trait de côte (Fig. 16).

A l'échelle de la cellule, le littoral des Vieux-Salins subit un recul moyen du rivage de -0.18m/an entre 1896 et 2017.

Les variations du rivage au niveau de la plage Miramar (à l'Est) indiquent un recul moyen de 0.29m/an durant la période d'étude mais la tendance est à la réduction. Dans le détail, les intervalles entre 1896-1924 et 1947-1971 montrent les reculs les plus importants (-1.96m/an ; -1.29m/an et -0.94m/an) (Fig. 16). Ces épisodes de reculs rapides sont succédés par une relative stabilité du trait de côte, voire

d'accrétion comme entre 1989-1998 (+0.97m/an). Sur la plage de Miramar, le rivage recule donc rapidement jusqu'en 1971 avant de se stabiliser, voire d'avancer ces dernières décennies.

La partie centrale qui correspond au rivage au droit des Vieux Salins connaît un recul chronique avec une décennie 1960 et 1971 particulièrement érosive (-0,59m/an) tandis que la période entre 1924 et 1947 montre une légère phase d'accrétion (+0,17m/an). Entre 1896 et 2017, les valeurs d'érosion oscillent finalement autour de -0,35 m/an.

La plage du Pentagone (Ouest) connaît des vitesses d'avancée du trait de côte qui augmentent durant la période d'étude puisqu'elles passent de +0,29 à + 0,54 m/an respectivement entre 1896-1924 et 1998-2017.

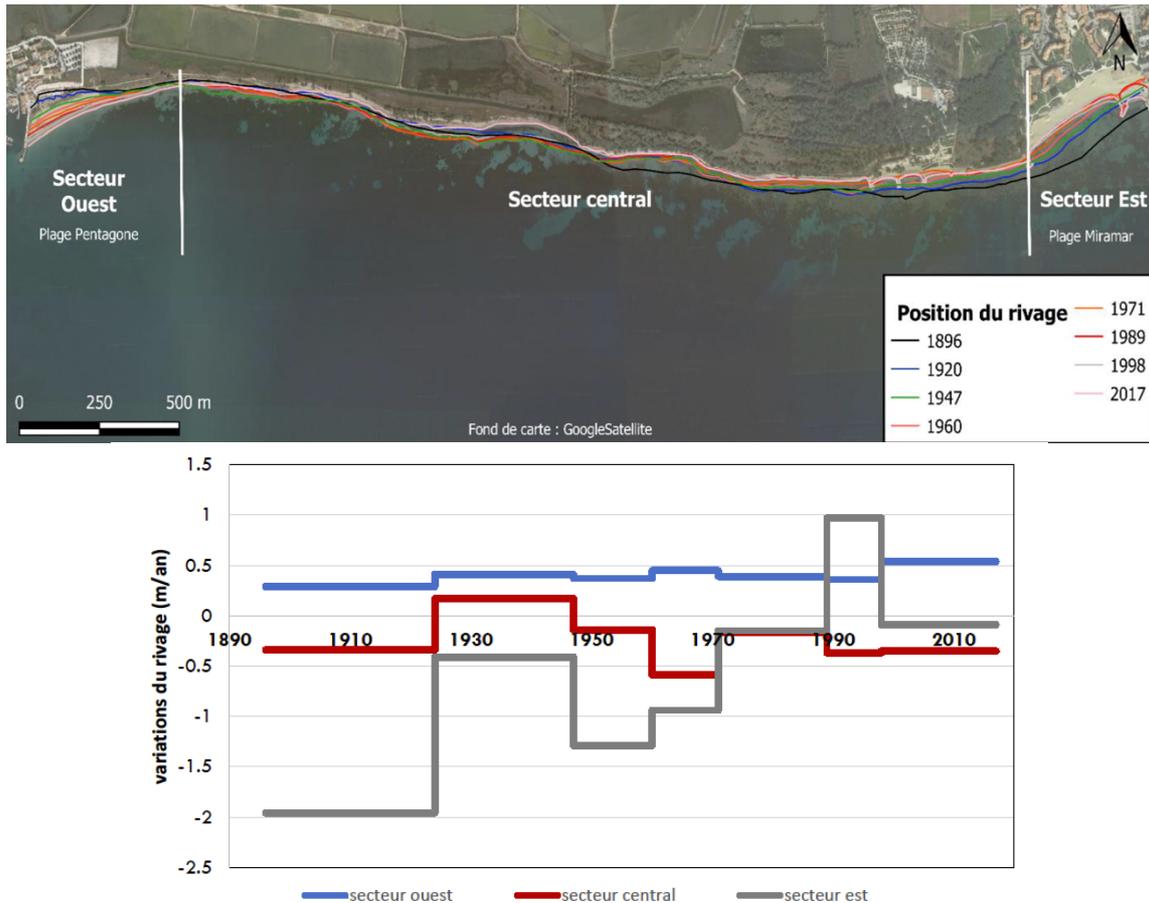


Fig. 16. Évolution du rivage entre 1896 et 2017 (mémoire de M2 G. Chatagno, 2020).

3.4.2 Évolution des fonds entre 1896 et 2017

Les comparaisons bathymétriques à long terme (1896 à 2017) sont en accord avec les variations du rivage puisqu'elles dévoilent une zone d'accumulation (56.260 m³, soit +404 m³/an) contre la digue de port Porthuau à l'Ouest tandis que la partie centrale connaît une érosion relative de (19.900 m³, soit 157 m³/an) et la plage de Miramar une érosion plus marquée (41.000 m³, soit 339 m³/an) (Fig. 17).

L'érosion diminue depuis le rivage vers le large et la transition entre le secteur en érosion vers celui en accrétion s'effectue progressivement à partir de l'étang de l'Anglais. Vers les fonds de -3 m environ, on observe aussi une zone d'accumulation devant le canal de la Gargatte (10.000 m³, soit 83 m³/an), peut être en relation avec des apports sédimentaires par les crues.

Finalement, le bilan sédimentaire de la zone (différence entre les gains et les pertes) montre un très léger déficit qui indique plutôt un équilibre sédimentaire à cette échelle de temps. Par conséquent, si les plages de la partie centrale et de Miramar connaissent une érosion chronique à long terme, la cellule littorale montre plutôt une conservation des sables en relation avec un transport sédimentaire dirigé vers l'ouest causé vraisemblablement par des houles de tempêtes de SE.

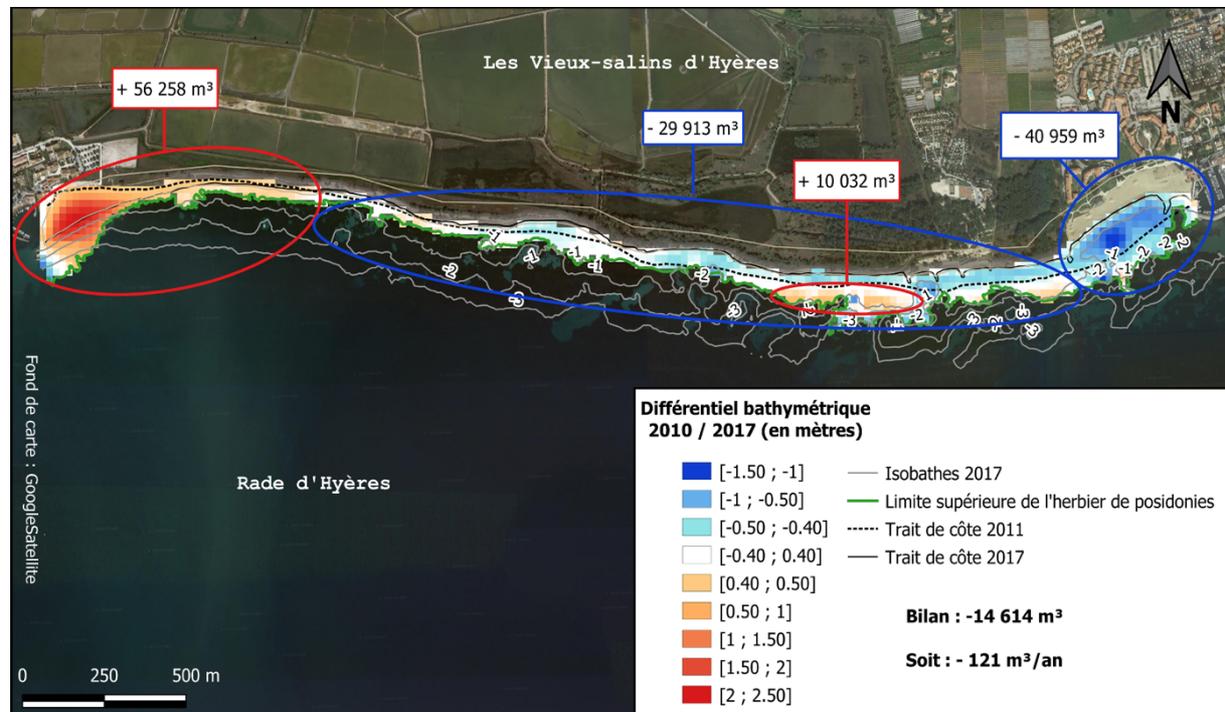


Fig. 17. Évolution des fonds entre 2010 et 2017 (mémoire de M2 G. Chatagno, 2020).

3.5 Comment évolue le rivage après le désenrochement ?

Tout d'abord, le phénomène d'érosion du rivage devant l'étang de l'Anglais entre 1896 et 2017 est évidemment lié à celui observé au sein de la cellule où la dérive littorale dominante vers l'Ouest joue un rôle déterminant.

Avant la construction de la digue (1896 à 1989), l'ensemble du secteur fonctionne naturellement sans différences significatives (Fig. 18).

De 1989 à 1998, la ligne du rivage devant l'enrochement recule légèrement plus vite que celle dans l'encoche d'érosion, sans doute à cause de la réflexion de la houle que produit l'enrochement durant les tempêtes. Ce phénomène, bien documenté dans la littérature scientifique, induit une accélération de l'érosion des plages en pied de digue par rapport à celles dépourvues d'enrochements.

Entre 1998 et 2011, la plage en aval dérive de la digue connaît une accélération de l'érosion certainement en lien avec la présence de l'ouvrage en enrochements. Le recul moyen de la zone atteint 4,5 m/an entre 2009 et 2011. Les valeurs du recul du rivage sont singulièrement supérieures à celles observées avant les enrochements (< 0,5 m/an).

Entre 2011 et 2014, la zone désenrochée recule significativement alors que le rivage de la plage en aval dérive avance légèrement démontrant le transfert de sédiments depuis la zone sur laquelle les enrochements ont été supprimés. Les relevés de terrain au DGPS du CEREGE indiquent que cette avancée est de courte durée (Fig. 18).

Entre 2014 et 2017, l'ensemble de la zone recule à des vitesses (environ 1,7 m/an) plus élevées que celles durant la période naturelle ($< 0,5$ m/an). Si ce résultat était attendu dans la zone désenrochée car le profil de plage se réadapte, il est surprenant dans la zone naturelle en aval dérive. Néanmoins la zone désenrochée est toujours plus avancée en mer que l'encoche d'érosion et on peut s'attendre à une régularisation du rivage. La comparaison de relevés de terrains 3D de la partie suivante nuance ces résultats.

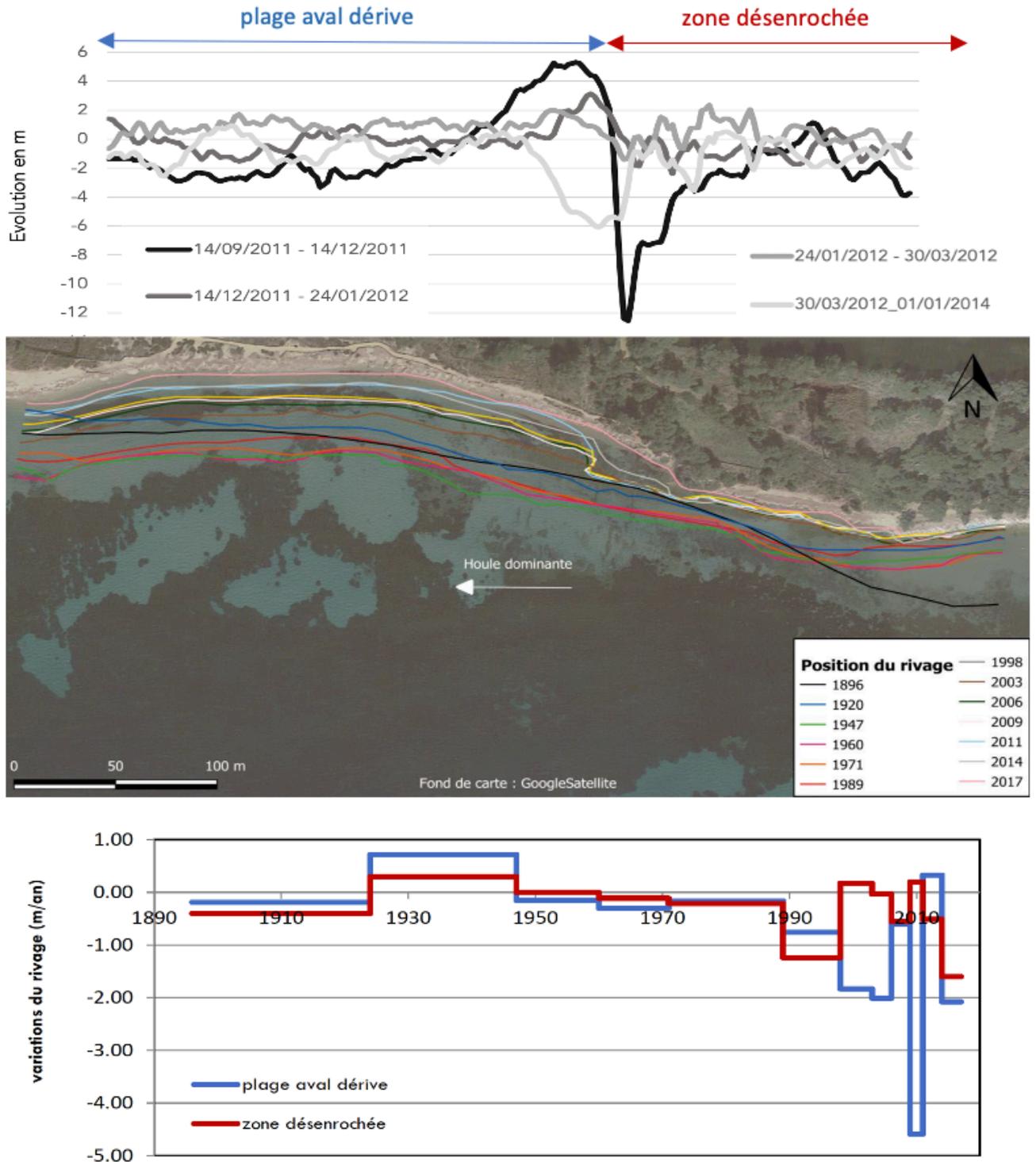


Fig. 18. Variations du rivage dans le secteur de la zone désenrochée et en aval dérive de celle-ci. Haut : évolution à court terme ; milieu : cartographie de l'évolution à long terme et bas : variations moyenne à long terme par zone d'étude (mémoire de M2, G. Chatagno, 2020).

3.6 Comment évolue la plage en aval dérive de la zone désenrochée ?

Entre 2010 et 2015, le secteur désenroché connaît logiquement une érosion importante qui se manifeste notamment par un affaissement de la topographie d'environ 1,5 m et un recul du rivage supérieur à 10 m (Fig. 19). La plage naturelle en aval dérive, enregistre également une perte sédimentaire à proximité du rivage. Ces données et cette échelle de temps nuancent les résultats obtenus à partir de la position du rivage car on n'observe donc pas de transfert sédimentaire depuis la zone désenrochée érodée vers la plage immédiatement en aval dérive. Néanmoins le relevé de 2010 (Lidar IGN) est antérieur d'une année au désenrochement, aussi, les observations mélangent l'évolution du site avec et sans la digue.

Dans la zone naturelle en aval dérive de celle désenrochée, la comparaison des MNT entre 2010-2012 et 2012-2015 montrent un fonctionnement identique. En effet, l'érosion se localise principalement autour de la position du rivage alors que la plage connaît une sédimentation qui atteint en moyenne 6 à 7 cm/an mais avec des secteurs où les élévations altimétriques atteignent 80 cm. Les dépôts prennent la forme de cônes de débordements de tempêtes (Photo. 8).

Entre 2015 et 2017, la zone désenrochée affiche un bilan sédimentaire positif (+200 mm). De toute évidence, même si le site connaît une dynamique de recul du rivage, une plage se reconstruit progressivement. Dans la partie naturelle en aval dérive, le bilan sédimentaire est contrasté, sans doute en relation avec la densification des ganivelles qui perturbent les mécanismes naturels d'*overwash*.



Photo. 8. La plage naturelle en aval dérive de la zone désenrochée en 2012 (haut, vue vers l'est) et 2013 (bas, vue vers l'ouest). En 2012, on observe près du rivage des troncs (coupés) qui témoignent du recul du rivage. Le trait de côte subit une érosion et ses sédiments sont déposés en arrière pendant les phases de submersions liées aux tempêtes. Entre 2012 et 2013, la végétation se développe sur les dépôts d'*overwash*. Les ganivelles bloquent partiellement ce processus naturel mais elles seront progressivement détruites et/ou ensevelies avant leur reconstruction. (F. Sabatier, Aix-Marseille Université, CEREGE).

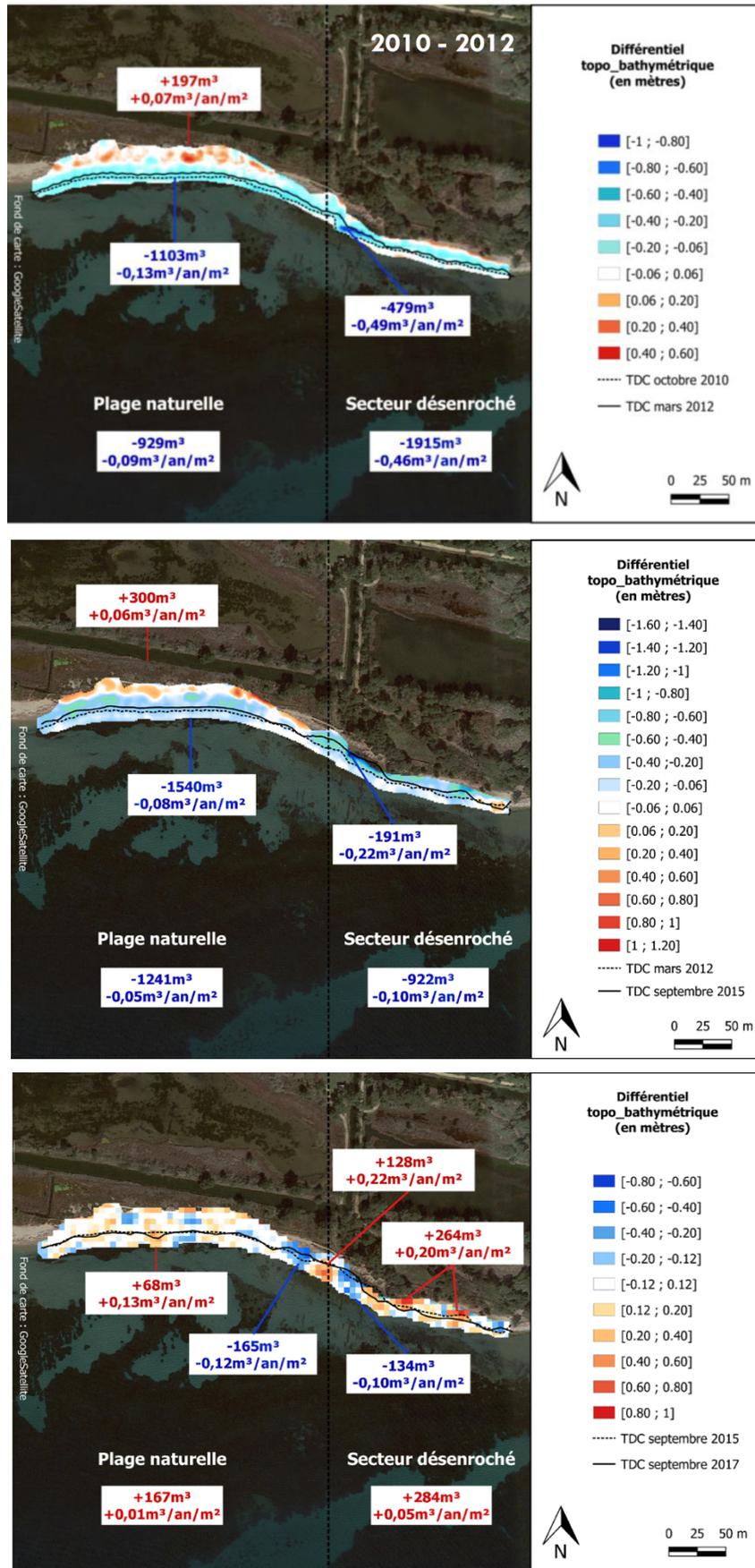


Fig. 19. Différentiels altimétriques entre 2010-2012-2015-2017 (mémoire de M2, G. Chatagno, 2020).

3.7 Ce qu'il faut retenir

Les plages comprises entre Port Pothuau (plage du Pentagone) et la Londe-les-Maures (plage de Miramar) montrent un fonctionnement en cellule de dérive littorale dirigée vers l'Ouest en relation avec les houles de tempêtes de SE. A long terme (1895-2017) les sédiments situés entre le rivage et la limite supérieure de l'herbier à posidonies semblent se déplacer en conservation de masse principalement vers la plage du Pentagone. A cette échelle de temps et d'espace, les volumes déplacés sont faibles au regard d'autres zones en érosion en Méditerranée ce qui devrait faciliter la gestion sédimentaire de la zone. Si le rôle de la montée de la mer dans cette dynamique reste difficile à percevoir, on peut utiliser la technique simple d'inondation active (Brunel et Sabatier, 2009) qui consiste à évaluer le recul du rivage en fonction de la pente de la plage et de la montée de la mer. Dans les conditions les plus défavorables (pente 1% et montée de la mer 2 mm/an), alors le recul serait au maximum de 0,2 m/an. Cette valeur reste inférieure aux observations historiques et la montée de la mer n'explique pas donc à elle seule le recul du rivage. Au contraire, l'équilibre sédimentaire de la zone et les faibles apports extérieurs suggèrent plutôt une dérive littorale importante durant les tempêtes qui déplacent les sables vers l'Ouest où la digue de Port Pothuau les bloque. En revanche, l'accélération de la montée de la mer déjà perçue depuis les années 2000 va se rajouter aux processus d'érosions.

Dans le détail et à moyen terme, les données topographiques montrent aussi un transfert de sédiments durant les tempêtes en direction de l'arrière-plage (dépôts d'*overwash*). Les accumulations proviennent principalement de l'érosion de la zone du jet de rive mais il est possible que l'érosion du secteur désenroché fournisse aussi des sédiments à cette zone (en quantité réduite néanmoins). Les dépôts d'*overwash* participent ainsi à l'élévation altimétrique de l'arrière-plage, localement jusqu'à 80 cm, ce qui constitue une protection naturelle contre la montée de la mer. La reconstruction des ganivelles en 2016-2017 (et antérieur) perturbe ce mécanisme car les sédiments restent bloqués par les ganivelles et ne s'étendent pas sur toute la zone. A long terme il faudra donc s'interroger sur l'opportunité ou non de laisser se produire les dépôts d'*overwash*.



Photo. 9. Après une tempête d'Est en 2020, les sables projetés depuis la mer par les tempêtes (de gauche à droite sur la photo) sont bloqués par les ganivelles (F. Sabatier, Aix-Marseille Université, CEREGE).

Le désenrochement ne s'est pas traduit par une réduction évidente de l'érosion sur la plage naturelle en aval dérive. Néanmoins, ce résultat n'est pas surprenant car les volumes érodés de la plage désenrochée sont finalement faibles (environ 2.000 à 1.000 m³/an entre 2010-2012-2015) au regard de ceux de la plage naturelle. **Autrement dit, le désenrochement permet d'injecter des sédiments dans le système littoral mais l'érosion générale, plus importante, ne rend pas visible ces apports. Il est probable que les travaux de désenrochement ultérieurs et la régularisation du rivage à en attendre joueront sur la position du rivage et l'érosion des plages en aval dérive.**

4 Les brise-laves en géotextiles immergés

Cette partie est tirée du mémoire de master 2 de Cécile Puigserver.

4.1 Introduction et problématique

Les brise-laves sont des dispositifs orientés parallèlement au trait de côte (ouvrages longitudinaux), mais non rattachés à celui-ci, conçus pour diminuer l'énergie de la houle incidente en la brisant et induire la constitution d'un tombolo (une langue de sable entre le continent et l'ouvrage). Ce mécanisme existe à l'état naturel avec son meilleur exemple régional que constitue le double tombolo de Giens (Var). Les brise-laves peuvent être émergents (environ 10% des ouvrages de protection en France) ou totalement immergés. A partir des années 90, avec les critiques de plus en plus fortes contre les structures en enrochements et sur la base de pratiques en Australie, la conception et l'installation de brise-laves immergés en géotextile a progressivement démarré en France.

L'ouvrage est constitué de boudins ou chaussettes en géotextiles, remplis de sédiments, souvent de 1 à 3 m de diamètre et long de plusieurs mètres, déposés dans ou en amont de la zone du déferlement afin de briser la houle avant le rivage. Les brise-laves en géotextile (Fig. 20) sont constitués d'un tapis anti-affouillement fixé sur le fond via des tubes d'ancrage remplis de sable. Sur ce tapis est disposé le tube en géotextile rempli de sable. Ces structures immergées présentent un avantage esthétique non négligeable puisqu'elles sont invisibles depuis la plage. De plus, en raison de la pénurie des roches naturelles ces dernières années, les structures côtières à base de roches sont devenues très coûteuses à construire et à entretenir, le matériel en géotextile serait alors une alternative économiquement plus attractive car son coût par rapport aux brise-laves en roches naturelles serait réduit de moitié. Enfin, leur construction produirait 83 % de CO₂ en moins qu'un brise-lame traditionnel en gravats (Shabankareh et al., 2017).

Leur conception (largeur, longueur, profondeur, orientation et distance par rapport au rivage) demeure souvent empirique et **il est légitime de s'interroger sur leur efficacité car a priori cette technique présente donc de nombreux avantages.**

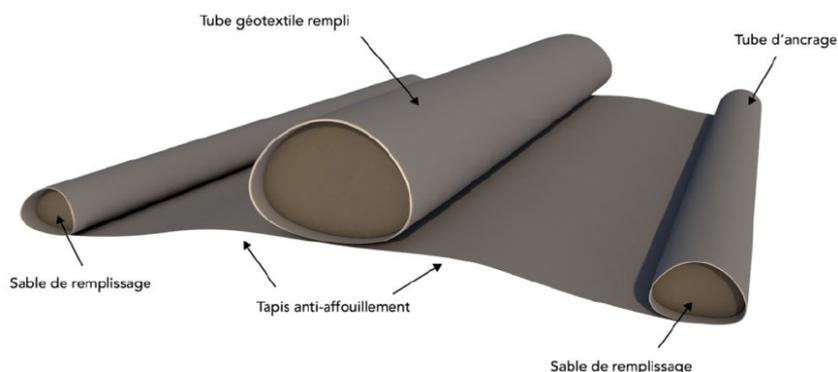


Fig. 20. Schéma explicatif d'un brise-laves en géotextile (<https://trasomar.mc/>)

4.2 Les tubes en géotextile sur le littoral méditerranéen français

La façade méditerranéenne française enregistre 9 ouvrages immergés de type tube en géotextile dont 6 sont déjà construits et 3 en phase de projets. Les ouvrages se situent majoritairement dans le département du Var (La Capte, Le Rayol-Canadel-sur-Mer, Grimaud, Sainte-Maxime, Cavalaire-sur-Mer), un seul se trouvant dans le département des Alpes-Maritimes (Cannes) alors que deux structures ont été construites en Occitanie à Sète/Marseillan et Valras (Hérault) (Tableau 1).

Sites	Pente moyenne entre l'ouvrage et la côte (%)	Distance moyenne à la côte (m)	Longueur de l'ouvrage (m)	Largeur de l'ouvrage (m)	Hauteur maximale (m)	Revanche (m)	Orientation : angle entre la structure et le Nord	Orientation de la côte	Nombre de structures	État de la mise en place	Source
La Capte	1.7	133.5	228	9	1.80	- 0.44	0°	NS	2	Installés en 2008 et 2015	N°DREAL : F09318P0430
Cannes	3.2	74.3	682	10	2.5	- 2.12	117°	NO SE	7	Installés en 2011	N°DREAL : F09319P0353
Cavalaire-sur-Mer	4.7	130	592	10	3	- 1.1	38°	NE SO	6	Avis MRAe en 2018	N°MRAe : 2018-001936
Croisette - Sainte-Maxime	7.6	58.6	318	20	3.6	- 1.44	11°	NS	3	Dossier soumis à la consultation du public 19/01/21	N°DREAL: f09317p0159
Grimaud	1.8	79.5	50	5	2	- 0.22	38°	NE SO	3	Installés en 2019	N°DREAL: F09317P038.
La Nartelle - Sainte-Maxime	5.3	59.5	100	18	2.56	- 1.26	0°	NS	1	Dossier soumis à la consultation du public 19/01/21	N°DREAL: f09317p0176
Rayol-Canadel-sur-Mer	2.6	84.5	305.5	[8, 12]	3	- 1.27	80°	EO	2	Installés en 2020	N°MRAe : 2018-001809
Sète	1.06	319	2 225	[12, 13]	3	- 2.2	47°	NE SO	1	Installés en 2013 et 2018	N°DREAL : 2017-005114
Valras	1.99	140	290	10	1.5	- 2.77	47°	NE SO	1	Installés en 2008/2009	Mazeiraud et al. [2010]

Tableau 1. Caractéristiques des ouvrages immergés en géotextile du littoral méditerranéen français (mémoire de M2, C. Puigserver).

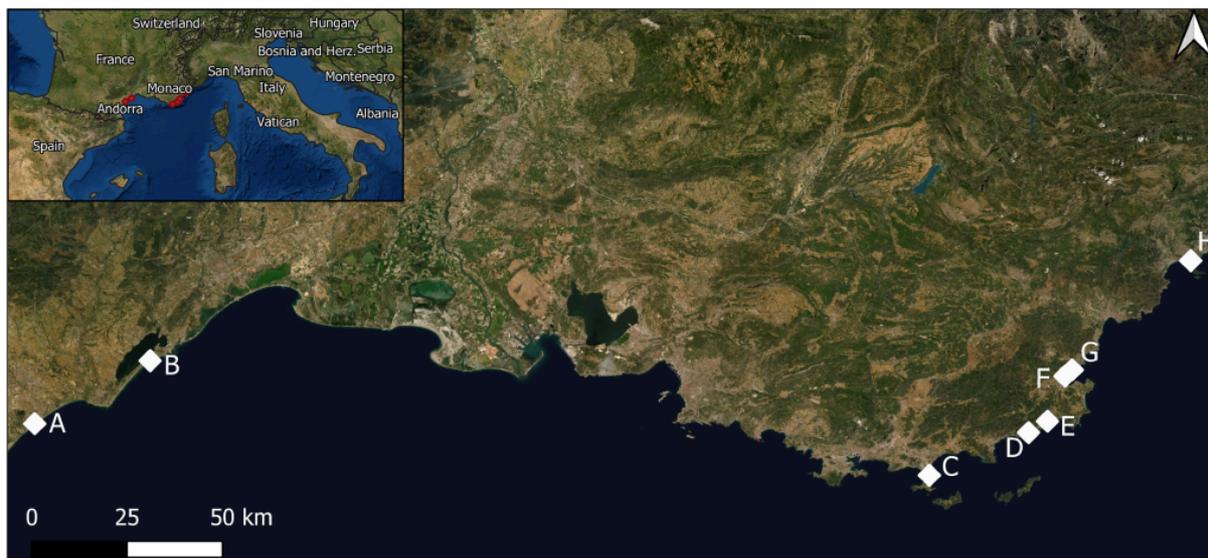


Fig. 21. Emplacement des ouvrages de type "tube en géotextile submergé" sur la façade méditerranéenne française. A = Valras, B = Sète, C = La Capte, D = Rayol-Canadel-sur-Mer, E = Cavalaire-sur-Mer, F = Grimaud, G = Sainte-Maxime, H = Cannes (mémoire de M2, C. Puigserver, 2021).

4.3 Données et méthodes

L'analyse de l'impact des boudins en géotextiles immergés pour réduire la force de la houle est précisément décrite dans C. Puigserver (2021). Nous présentons ici une synthèse.

Afin de quantifier l'impact des structures immergées, nous avons utilisé [Xbeach](#), un modèle numérique reconnu dans la communauté scientifique pour reproduire l'hydrodynamique littorale. Xbeach nous permet de simuler la houle et les courants en présence ou en absence des ouvrages afin d'en quantifier l'impact. Sur la base des enregistrements de houle au large (base de données <https://candhis.cerema.fr/>), nous avons retenu des scénarios de tempêtes en dissociant des tempêtes de faible, moyenne et forte intensités ainsi que des événements peu énergétiques respectivement représentés par les centiles Q80, Q90, Q99 et Q50 des séries temporelles des houlographes (Tableau 2). Les caractéristiques de la houle (hauteur, période et direction) sont propagées selon la théorie linéaire jusqu'à -20 m puis avec Xbeach à proximité du domaine. Sur chaque site nous avons sélectionné trois directions : perpendiculaire et obliques (30° des deux côtés de l'ouvrage) au rivage afin de pouvoir comparer les sites et en espérant établir des lois de comportement autour des ouvrages. La bathymétrie est issue des bases de données [Edmonet](#) et du [Lidar du SHOM](#).

		Nice	Leucate	Porquerolle	Sète (Marseillan)	Sète
Durée d'observation (ans)		9.01	11.49	13.44	8.82	13.85
Distance à la côte (mile)		0.9	2.9	1	2.9	2.7
Profondeur (m)		270	40	90	32	30
H_{m0} (m)	Q99	1.95	2.72	3.4	4.17	2.93
H_{m0} (m)	Q95	1.33	1.63	2.62	3.2	1.72
H_{m0} (m)	Q80	0.8	0.95	1.75	1.15	0.8
H_{m0} (m)	Q50	0.47	0.53	0.89	0.46	0.46
T_{pic} (s)	Q99	10.6	10.2	9.6	?	10.6
T_{pic} (s)	Q95	9.3	8.4	8.8	?	8.9
T_{pic} (s)	Q80	7.3	6.3	7.5	8.8	6.8
T_{pic} (s)	Q50	5.5	3.9	6.1	5.5	4.4

Tableau 2. Caractéristiques des houles (mémoire de M2 C. Puigserver, 2021).

Pour quantifier l'impact des ouvrages, des indicateurs hydrodynamiques sont utilisés :

- L'énergie de la houle qui renseigne sur la réduction ou non de la force d'une tempête,
- le coefficient de transmission de l'onde (k_t), un rapport entre la hauteur significative de la houle transmise au-delà de l'ouvrage (H_t) par celle incidente avant l'ouvrage (H_i),
- la circulation des masses d'eau induite par des différences de niveau d'eau derrière l'ouvrage interprétées en zone potentielle d'érosion ou d'accrétion.

Ces indicateurs sont examinés à proximité des ouvrages et évalués au regard de la profondeur d'eau moyenne par temps calme au-dessus de l'ouvrage ainsi que de la largeur sommitale des boudins en géotextiles.

4.4 Principaux résultats par sites

4.4.1 Plage de La Capte (Hyères, Var)

Une attention particulière est réalisée sur ce site car c'est le seul à présenter un suivi topographique sous la responsabilité de S. Meulé (CEREGE, Aix Marseille Université ; <https://sextant.ifremer.fr/geonetwork/srv/api/records/362aa565-6936-4201-aca3-878c4927dafa>) dont nous proposons une synthèse. Les boudins en géotextiles ont été déposés en 2008 et ont subi un recalibrage en 2015 qui se traduit par un agrandissement de l'ouvrage avec la mise en place d'un autre tube côté plage surplombant de 0,5m les tubes déposés précédemment.

L'évolution sédimentaire de la plage de la Capte entre 2010 et 2020 témoigne d'une tendance globale à l'érosion (Fig. 22). Cependant, deux périodes se distinguent :

- entre 2009 et 2015, soit avant l'agrandissement de l'ouvrage en 2015, on constate une augmentation des pertes sédimentaires de la plage,
- entre 2015 et 2021, l'érosion diminue progressivement en relation avec un rechargement de 700 m³ de sable en 2016 et des rechargements de 700 à 900 m³ de sable sur la plage de La Capte pour les années 2017 à 2019. A ces phases, en mai 2020 un rechargement de 800 m³ a été réalisé. Associés à ces dépôts artificiels, les accumulations augmentent significativement entre 2018 et 2019 (Fig. 24). Il est aussi envisageable que cette évolution soit liée aux crues de mai 2019 qui auraient transporté une quantité importante de sédiments à la côte. A notre connaissance, aucun rechargement n'aurait été effectué en 2021 : ce qui pourrait expliquer la reprise de l'érosion entre 2020 et 2021.

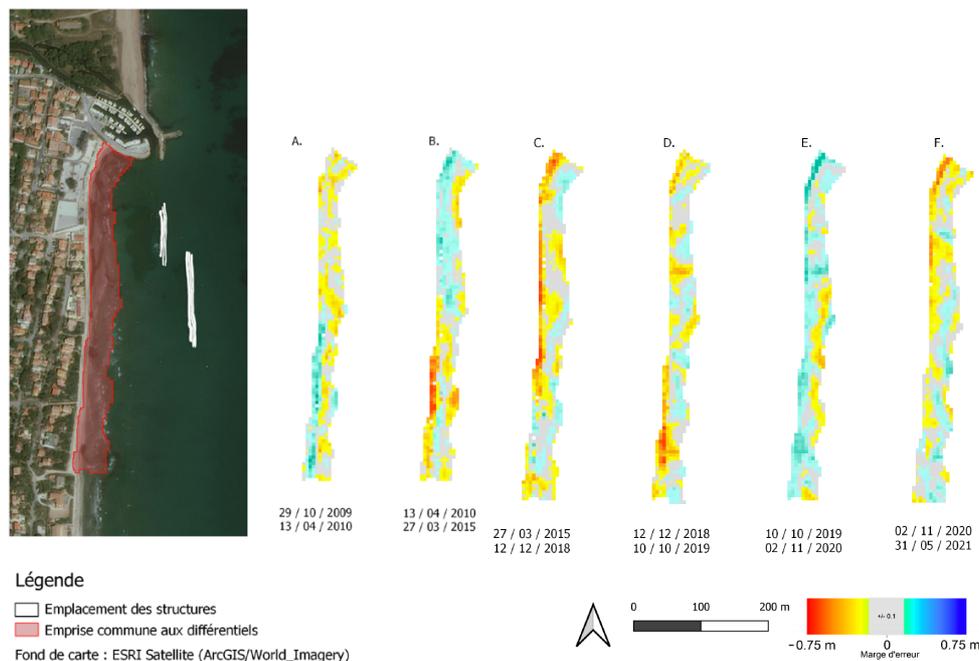


Fig. 22. Suivi morphologique de la plage de la Capte (mémoire de M2, C. Puigserver, 2021).

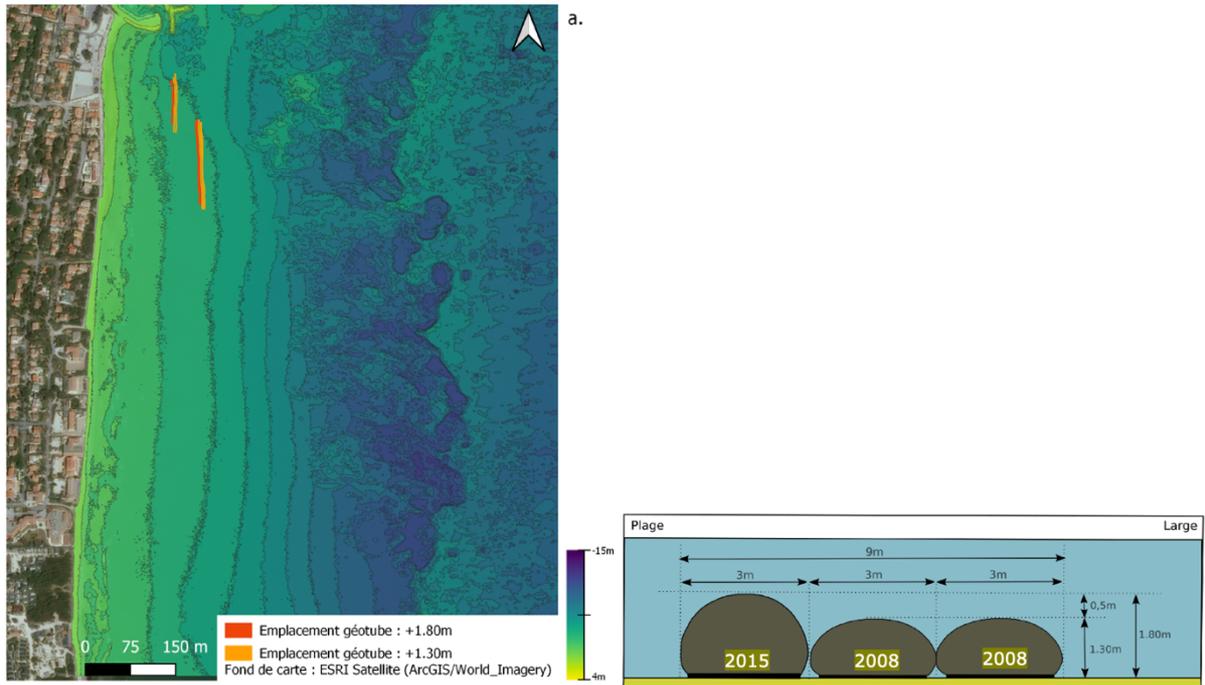


Fig. 23. Bathymétrie et coupe simplifiée des boudins en géotextiles immergés sur le site de la Capte (Hyères, Var) (mémoire de M2, C. Puigserver, 2021).

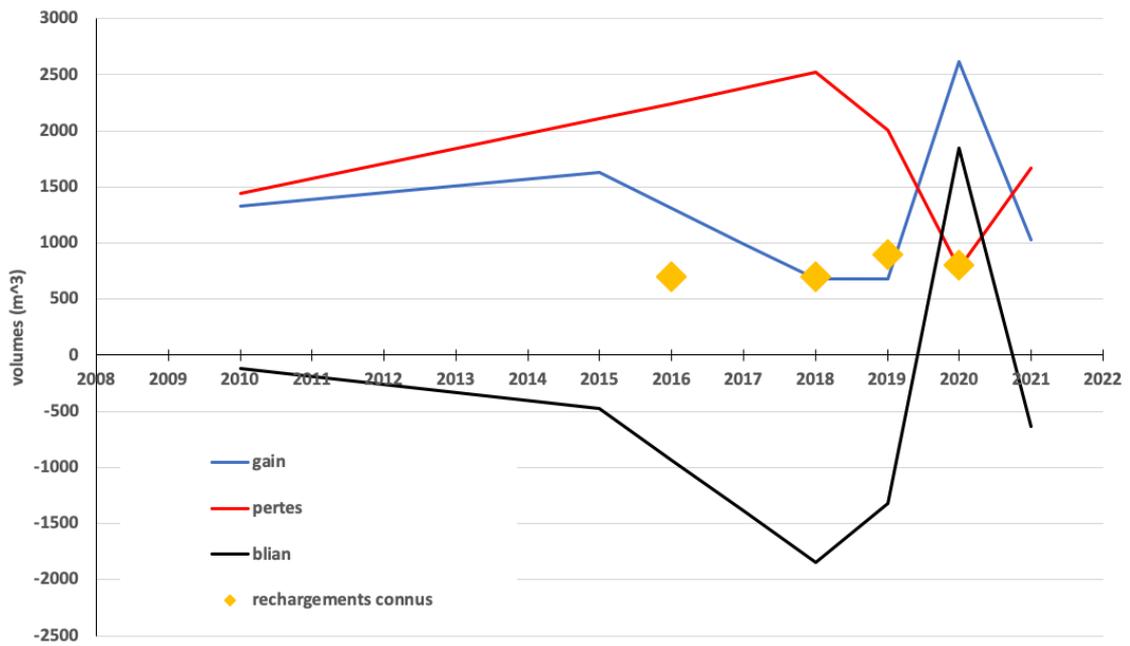


Fig. 24. Accrétion – Érosion et du bilan sédimentaire de la plage de la Capte entre 2010 et 2020 (données d'après le mémoire de M2 C. Puigserver, 2021).



Photo. 10. Gauche : on distingue une ligne de déferlement au large induite par les boudins en géotextiles dans des conditions de faible énergie correspondant à Q50. Droite : les boudins en géotextiles visibles par transparence dans des conditions estivales (clichés F. Sabatier, Aix-Marseille Université, CEREGE, 2016).

Depuis 2015, on constate une réduction de l'érosion de la plage de La Capte probablement en relation avec la modification de la structure entraînant une diminution des hauteurs significatives de houles et une diminution particulièrement importante de son énergie. L'ouvrage aurait une plus grande efficacité pour les houles de faible intensité. On peut émettre l'hypothèse que la modification de l'ouvrage de La Capte en 2015 (ajout d'un troisième tube de taille supérieure aux précédents) et un rechargement annuel diminuerait la proportion de zone en érosion et stabiliserait le bilan sédimentaire cumulé ou du moins ralentirait la tendance à l'érosion de la plage émergée. Concernant, la dynamique de circulation, on constate depuis 2015, pour les houles perpendiculaires au rivage et de -30° , une cellule d'érosion d'autant plus importante que les événements sont intenses. Les houles provenant de $+30^\circ$, induiraient la formation d'une cellule d'accrétion pour des conditions de fortes intensités et une cellule d'érosion lors de conditions calmes.

4.4.2 Plage de Grimaud

L'ensemble des résultats sur le site de Grimaud montrent que les structures permettent une atténuation pertinente des houles de faibles intensités, soit les plus fréquentes. Cependant, la configuration du site ne permet pas à la masse d'eau de s'évacuer au N-O amenant potentiellement un gonflement derrière les structures et ne favorisant probablement pas une cellule de circulation accrétive. Cette hypothèse reste à vérifier via un suivi topo-bathymétrique.

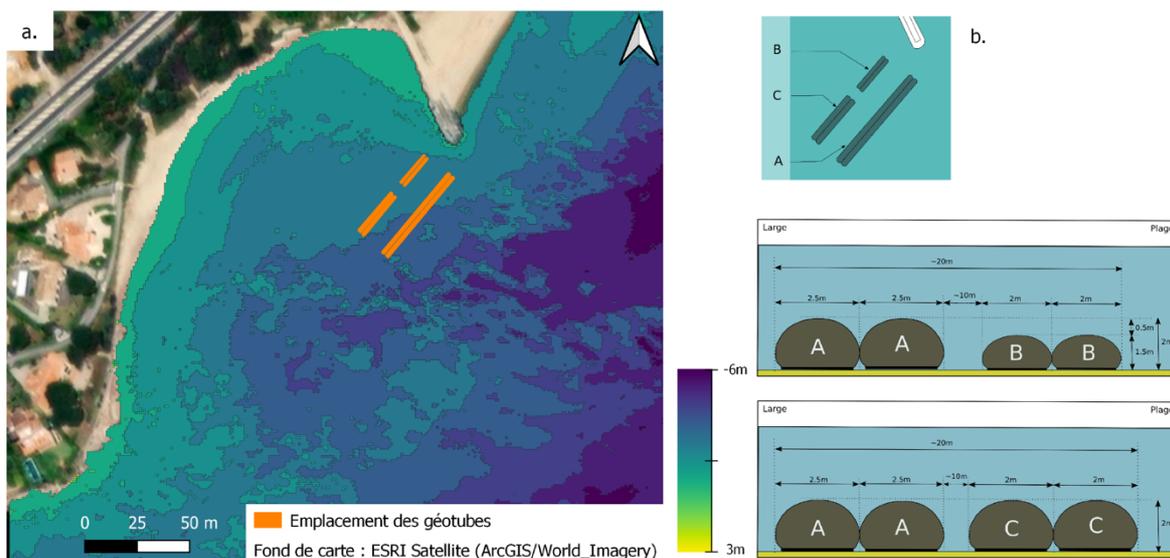


Fig. 25. Configuration bathymétrique de la plage de Grimaud et coupe schématique des boudins en géotextiles immergés (mémoire de M2, C. Puigserver, 2021).

4.4.3 Plage de Cavalaire-sur-Mer

Globalement sur le site de Cavalaire-sur-Mer, l'efficacité des boudins en géotextiles immergés diminuerait lorsque la force des tempêtes augmente mais dans le détail nos résultats sont plus complexes et quelques fois contradictoires. Par exemple, les coefficients de transmission peuvent montrer une atténuation plus importante des tempêtes d'intensité élevée que des tempêtes d'intensité faible selon les points d'observations. Il est aussi possible que la houle se reforme et déferle de nouveau après avoir franchi les boudins en géotextiles ce qui perturbe l'analyse, et les conditions propices à une sédimentation à l'abri de l'ouvrage ne semblent alors pas réalisées. Ces résultats restent à vérifier via un suivi topo-bathymétrique, voire courantologique.

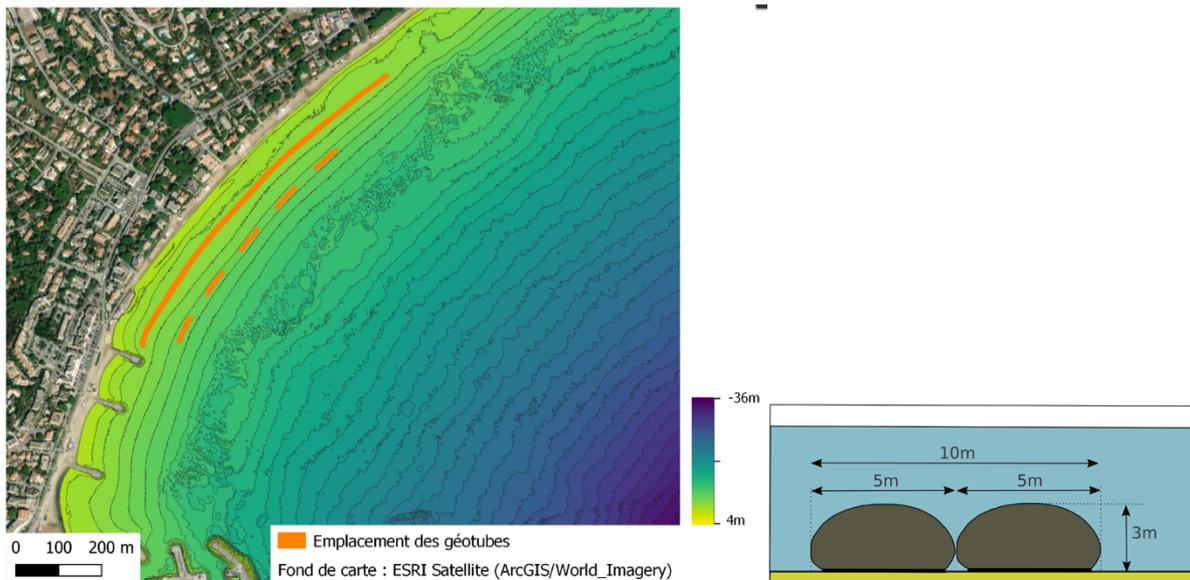


Fig. 26. Configuration bathymétrique de la plage de Cavalaire-sur-Mer et coupe schématique des boudins en géotextiles immergés (d'après C. Puigserver, 2021)

4.4.4 Plage du Rayol-Canadel-sur-Mer

Sur le site de Rayol-Canadel-sur-Mer, les structures immergées feraient déferler les houles de tempêtes d'intensités modérées à élevées. Les tempêtes d'intensité modérée seraient particulièrement atténuées dues au couplage structure et dissipation alors que les tempêtes de faible intensité ne seraient pas significativement influencées par l'ouvrage.

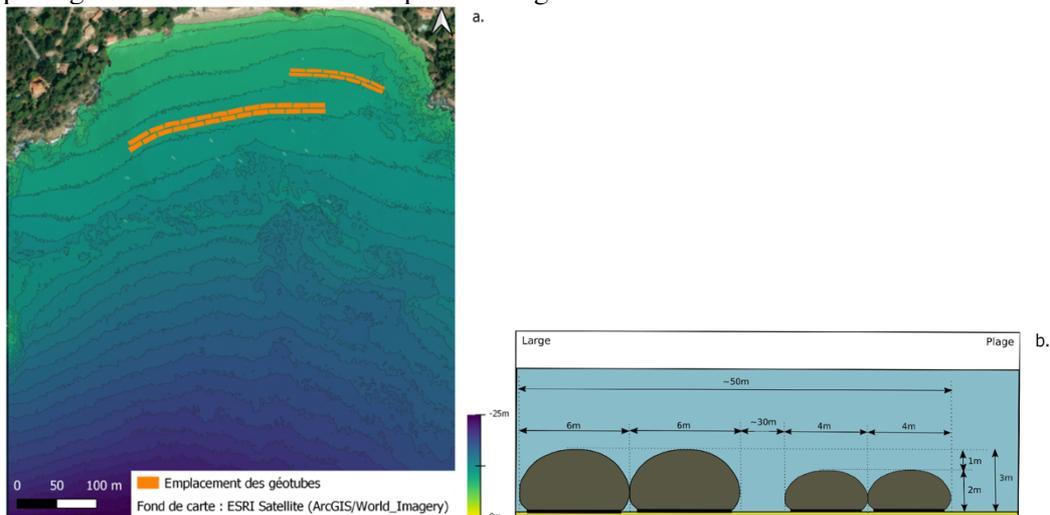


Fig. 27. Fig. Configuration bathymétrique de la plage du Rayol-Canadel-sur-Mer et coupe schématique des boudins en géotextiles immergés (mémoire de M2 C. Puigserver, 2021).

4.4.5 Plage de la Nartelle, Sainte maxime

Sur ce site les tempêtes de faibles intensités sont amplifiées quelles que soient leurs directions incidentes mais cette amplification est dissipée par les fonds en direction du rivage. Les houles de plus fortes intensités seront diminuées de manière équivalente quel que soit leur niveau d'intensité et leur direction incidente. Il semble donc que la pente de la plage permette une dissipation non négligeable de l'énergie transmise déjà atténuée par la mise en place des structures. Malgré des atténuations importantes de l'énergie, des cellules érosives semblent être présentes en arrière des structures. Le rôle de la nature des fonds, joue aussi un rôle dans la stabilisation du rivage car il se crée une amorce de petit tombolo au droit des roches apparentes.

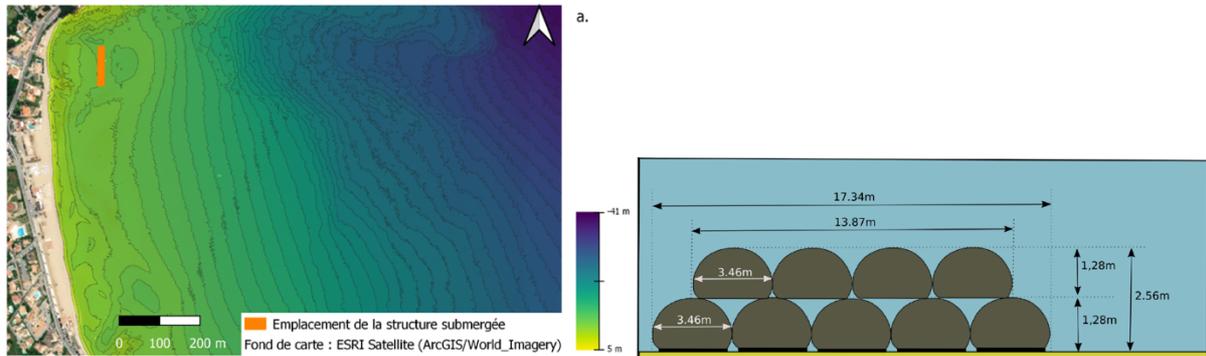


Fig. 28. Configuration bathymétrique de la plage de la Nartelle, Sainte-Maxime et coupe schématique des boudins en géotextiles immergés (mémoire de M2 C. Puigserver, 2021).

4.4.6 Plage de la Croisette, Sainte maxime

Globalement, ce site permet une atténuation de l'intensité des tempêtes arrivant sur la côte mais son importance diminue lorsque les tempêtes augmentent. Cette atténuation est globalement similaire selon les différents angles d'incidence des houles. L'analyse des niveaux d'eau présente des cellules érosives en arrière des structures avec des flux sortant particulièrement importants pour une houle perpendiculaire à l'ouvrage. Par conséquent il est peu probable que le rivage avance mais cette hypothèse reste à vérifier via un suivi topo-bathymétrique.

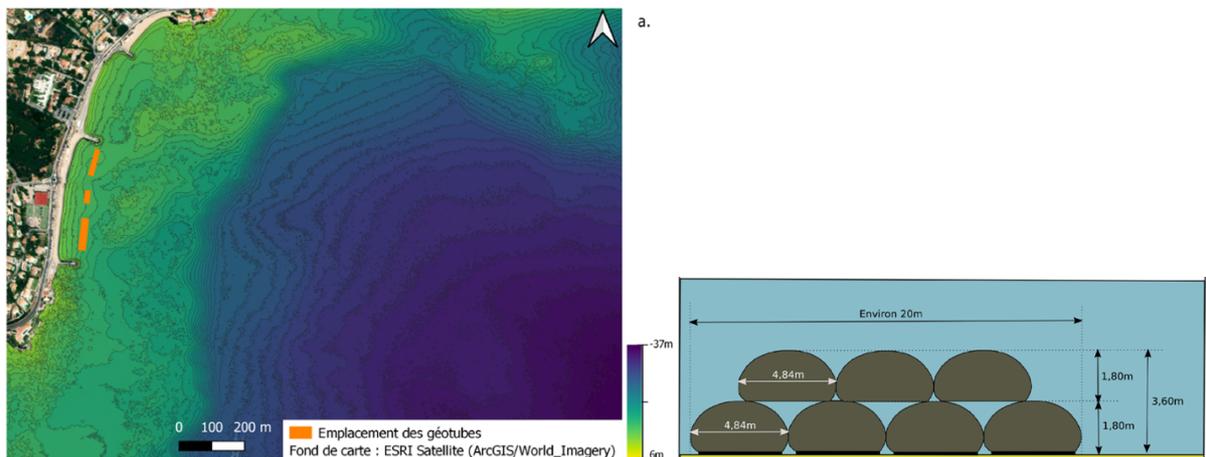


Fig. 29. Configuration bathymétrique de la plage de la Croisette, Sainte Maxime et coupe schématique des boudins en géotextiles immergés (mémoire de M2 C. Puigserver, 2021).

4.4.7 Plage de Cannes la Croisette

Les brise-lames immergés en géotextiles sur le site de Cannes présentent une efficacité globalement faible. En effet, elles ne semblent pas avoir d'effet sur les tempêtes d'intensités faibles à modérées et pourraient augmenter le gonflement du niveau d'eau et/ou de l'énergie des houles dans le cas de tempêtes modérés à fortes. Par conséquent, les conditions pour créer un bilan sédimentaire de la zone ne semblent pas réunies. Néanmoins, un examen sous [Géoportail](#) montre que le site est régulièrement rechargé en sédiments et/ou la plage recalibrée ce qui se traduit par un élargissement de la plage.

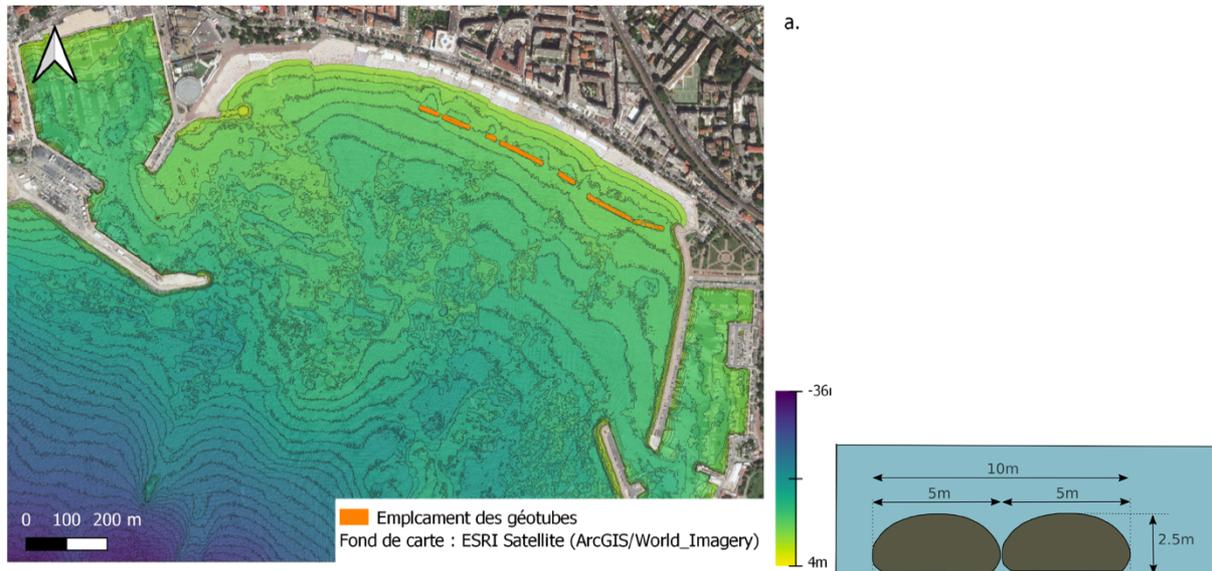


Fig. 30. Configuration bathymétrique de la plage de Cannes la Croisette et coupe schématique des boudins en géotextiles immergés (mémoire de M2 C. Puigserver, 2021).

4.4.8 Synthèse des sites

L'influence de la direction de la houle sur la capacité des structures à diminuer l'énergie incidente, montre que l'énergie des houles transmise est amortie de manière plus efficace lorsque l'ouvrage est oblique par rapport à la direction de la propagation de la houle (+30°, -30°) ce qui confirme des travaux antérieurs (Ranasinghe and Turner, 2006).

L'analyse des neuf sites indique que la capacité des structures à diminuer l'énergie incidente de la houle se résume par quatre catégories :

1. Catégorie 1. les structures engendrent une augmentation ou diminution négligeable ou faible de l'énergie (inf^R 12%), résultats « négligeables » dans le tableau 3,
2. Catégorie 2. les structures engendrent une diminution de l'énergie inversement proportionnelle à l'augmentation de l'intensité de la houle, résultats « décroissants » dans le tableau 3,
3. Catégorie 3. les structures engendrent une diminution de l'énergie proportionnelle à l'augmentation de l'intensité de la houle, résultats « croissants » dans le tableau 3,
4. Catégorie 4. les structures engendrent des variations d'énergie ne répondant à aucune des situations énoncées ci-dessus, résultats « contradictoires » dans le tableau 3,

Si a priori on s'attendait à ce que les ouvrages contribuent à baisser l'énergie de la houle lorsque les tempêtes augmentent afin d'en réduire leur efficacité au rivage, on se rend compte que la réalité des sites est singulièrement différente.

Sites	Houle perpendiculaire au rivage	Houle oblique + 30° au rivage	Houle oblique - 30° au rivage
Cannes	négligeable	négligeable	négligeable
Croisette Ste Maxime	décroissante	décroissante	décroissante
Nartelle Ste Maxime	contradictaires	contradictaires	contradictaires
Grimaud	croissante	croissante	croissante
La Capte	croissante	croissante	croissante
Sète	décroissante	contradictaires	décroissante
Valras	négligeable	négligeable	négligeable
Rayol Canadel sur Mer	croissante	contradictaires	croissante
Cavalaire sur Mer	croissante	croissante	croissante

Tableau 3. Synthèse de l'efficacité des boudins de géotextiles immergés lorsque la force de la houle augmente.

L'analyse de l'influence des paramètres structuraux de l'ouvrage (hauteur d'eau au-dessus de l'ouvrage et largeur) sur la diminution de l'intensité de la houle incidente montre que :

- si la hauteur d'eau au-dessus de l'ouvrage est supérieure à une certaine valeur (entre 0.47 m et 0.23 m) les tempêtes d'intensité élevée seront mieux atténuées que les tempêtes d'intensité faible, en dessous de cette valeur le phénomène s'inverse,
- si la largeur de l'ouvrage est supérieure à une certaine valeur (entre 10 m et 5 m) les tempêtes d'intensité élevée seront mieux atténuées que les tempêtes d'intensité faible, en dessous de cette valeur le phénomène s'inverse. A partir de 10-12 m de largeur de l'ouvrage, une augmentation de cette dernière n'affecte que très peu l'intensité de la houle transmise. Il ne serait donc pas nécessaire de dimensionner la largeur des structures au-dessus de ce seuil (ce qui est rarement réalisé).

Nos résultats concernant l'importance de la hauteur d'eau au-dessus de l'ouvrage sur sa largeur pour réduire l'intensité de la houle confirment les travaux antérieurs (Makris and Memos, 2007 ; Maiolo et al., 2020). Cependant, des analyses complémentaires permettront de vérifier la cohérence et l'existence de ces seuils.

4.5 Ce qu'il faut retenir

L'analyse de l'impact des ouvrages immergés en géotextiles sur l'ensemble des sites met en évidence :

- une variabilité importante d'un site à l'autre concernant les processus agissant entre les structures et le rivage. Il n'est pas possible, sur l'ensemble de nos résultats, de proposer une loi générale de comportement concernant l'impact de ces structures sur la houle. Cependant, dans tous les cas, la dissipation qu'elle soit due au déferlement ou à la pente de la plage et le processus de *shoaling* sont les deux processus les plus significatifs pour atténuer la force de la houle,

- seules les structures sur les sites de Valras et de Cannes n'apparaissent pas comme une solution efficace pour diminuer l'impact des tempêtes alors que sur les autres sites, les ouvrages influent sur l'agressivité de la houle à la cote (mais parfois très modestement),
- les sites dont la morphologie et le rivage sont les plus stables correspondent aussi à des zones rechargées artificiellement en sables (Cannes et la Capte).

Avec l'accélération de la montée de la mer, la hauteur d'eau au-dessus des brise-lames immergés en géotextiles augmentera ce qui paradoxalement ne se traduira pas nécessairement par une diminution de leur efficacité. Néanmoins cela ne signifie pas que ces sites ne subiront pas d'érosion et/ou de submersions marines. Par conséquent, la géométrie de ces structures immergées doit être choisie avec soins et à ce stade elles ne présentent pas une solution unique pour répondre aux risques de recul du rivage et de submersions marines. Par exemple, sur le site de la Capte (commune de Hyères), des résultats positifs quant à la stabilité du rivage sont atteints car à la présence des brise-lames immergés en géotextile, des phases de rechargements artificiels en sables sont réalisées. Compte tenu de la complexité des phénomènes, des suivis topo-bathymétriques semblent indispensables pour évaluer l'efficacité et les impacts des brise-lames immergés en géotextiles.

5 Le rechargement en galets des plages sableuses

Cette partie est principalement tirée du mémoire de master 2 de Maelys Voisin-Henriot pour la Fourcade.

5.1 Introduction et problématique

Le rechargement artificiel en sable est une pratique largement répandue dans le monde, particulièrement aux États-Unis et en Hollande. En France cette méthode reste marginale même si elle connaît un essor depuis les années 2000. Les résultats sont probants en ce qui concerne la capacité à élargir la plage mais, en plus de poser des problèmes de destruction des écosystèmes de la plage et de la disponibilité de la ressource, le rechargement artificiel en sable oblige à reconduire les opérations des dépôts (souvent tous les 3 à 10 ans). En effet, les sables déposés sur la plage et/ou dans les petits fonds, finissent toujours par se déplacer sous l'action du vent, des courants et de la houle. Pour répondre à cette difficulté, une solution consisterait à déposer des sédiments de taille supérieure comme des graviers ou des galets en faisant l'hypothèse que des sédiments, plus gros et plus lourds, seront plus difficilement érodés. De fait, la nécessité de recharger régulièrement devient alors moins fréquente. Néanmoins cette pratique est peu développée et en Méditerranée les retours d'expériences restent faibles. Par exemple, le lecteur pourra consulter les travaux de Jackson et al., (2006), de Lanza et Randazzo (2013) en Italie ou de Bitan et al., 2020 en Israël qui présentent des résultats plutôt positifs car le recul du rivage serait significativement ralenti. Cependant, ces pratiques d'ingénierie souffrent d'observations à long terme et d'interprétation morphodynamique.

Par conséquent, on peut s'interroger sur l'efficacité d'un rechargement en galets sur une plage sableuse en érosion pour :

- **limiter le recul du rivage, car les plages en galets peuvent aussi reculer,**
- **limiter, réduire ? la puissance de la dérive littorale qui ne dépend pas directement de la granulométrie des dépôts mais surtout de l'obliquité de la houle à la côte et de son intensité,**
- **modifier le niveau d'eau potentiellement atteint sur la plage du fait de la modification à attendre du fait d'une granulométrie plus grossière des sédiments de la pente de la zone du déferlement et/ou du jet de rive**

En Méditerranée française, le rechargement en galets le plus connu et massif concerne la plage de Nice (Anthony et al., 2010) mais ces conclusions ne s'appliquent pas une plage sableuse d'origine et le contexte morphologique particulier de cette zone (pente très forte, absence de plateau continental) confère à cette expérience des conditions difficilement reproductibles ailleurs. Dans le Var et les Alpes-Maritimes, des rechargements en sables et/ou graviers et/ou galets sont régulièrement réalisés pour maintenir la position du rivage mais ces initiatives manquent de suivis et leur efficacité ne peut être que qualitative. Par exemple, dès 2007, le rapport sur la position du rivage du littoral des Alpes-Maritimes réalisé par le BCEOM (aujourd'hui EGIS) mettait en avant ces pratiques pour stabiliser la position du trait de côte sans pour autant pouvoir proposer un bilan précis de ces méthodes.

Par contre, au début des années 2000, deux plages sableuses des Bouches-du-Rhône (communes des Saintes-Maries-de-la-Mer et de Marignane) ont été artificiellement rechargées en galets afin de lutter contre leur érosion. Ces deux sites pour lesquels des relevés morphologiques existent présentent donc une opportunité pour tester cette méthode particulière de rechargement artificiel en sédiments.

5.2 Rappel sur le fonctionnement géomorphologique des sites

5.2.1 Le site de la Fourcade (Saintes-Maries-de-la-Mer)

La plage de la Fourcade se situe sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer, sur le flanc Est du village (Fig. 31). Avant le rechargement, la plage est sableuse (D_{50} proche 0,16 mm) et comporte une à deux barres d'avant côte parallèles au rivage. À partir de la fin des années 90, des limons apparaissent sur la plage, à proximité de la position du rivage et jusqu'à 1m de profondeur environ (Photo. 11). Cette morphologie dévoile une très faible épaisseur de la couverture sableuse en relation avec un fort

recul du rivage dans la zone (-6 m/an en moyenne depuis les années 2000). L'arrière-plage était bordée par les restes d'un cordon dunaire en érosion qui disparaît au début des années 2000. Vers les étangs, la plage est alors limitée par un petit talus artificiel irrégulier (environ 2m NGF) constitué des dépôts de curage du canal d'écoulement qui sépare la plage d'une route carrossable en contre-bas de la digue à la mer. Cette évolution s'inscrit dans une dynamique ancienne de recul du rivage de la zone accentuée par les ouvrages en enrochements en amont dérive (thèse Samat, 2007). Sur la plage de la Fourcade, l'érosion est naturelle mais accentuée par les ouvrages qui ont contribué à fixer le rivage devant le village des Saintes-Maries-de-la-Mer (Fig. 32). Pour contenir le recul du rivage et limiter les submersions marines qui menacent la digue à la mer et les Saintes-Maries-de-la-Mer, les autorités mettent en place un cordon de galets en 2007.

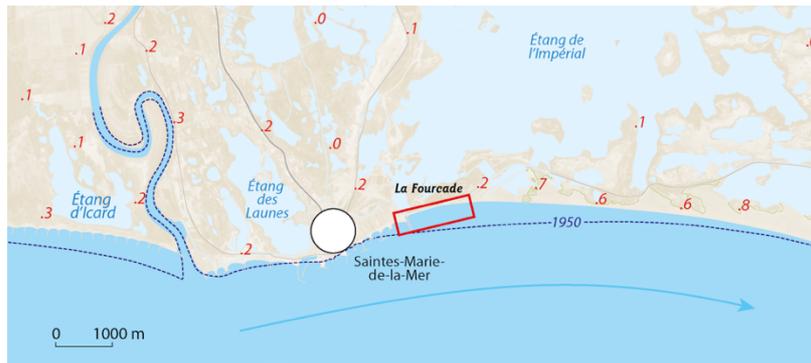


Fig. 31. Localisation de la plage de la Fourcade. Les chiffres en rouge représentent des altitudes NGF et la flèche en bleu foncé la dérive littorale dominante.

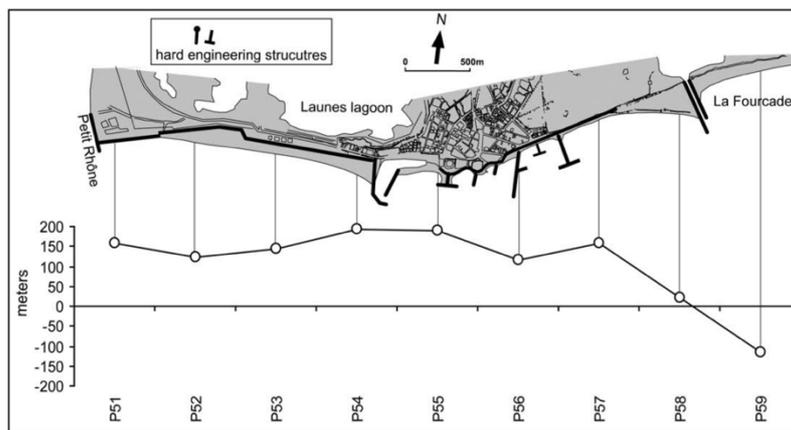


Fig. 32. Modélisation des gains ou pertes de la position du rivage par rapport à l'année 2000. Sur le site de la Fourcade, à l'est du village, on observe un recul accru du rivage en relation avec les enrochements qui permettent de le sauver de l'érosion marine (Sabatier et al., 2009)



Photo. 11. La plage de la Fourcade en 2000 avant et après une tempête (vue vers l'Est). Le cordon dunaire est très dégradé, la plage étroite (<30m) ne montre plus les caractéristiques des plages de Camargue. La dune disparaîtra définitivement en 2002 (clichés F. Sabatier Aix Marseille Université).

5.2.2 Le site du Jaï, plage de la Motte Piquet (Marignane)

Le littoral du Jaï se situe sur un cordon du Jaï long de 5 km (environ 250 m de large) séparant l'étang de Berre d'une lagune (l'étang de Bolmon). Les houles, issues du Mistral sont faibles, dépassant rarement 1,8 m de hauteur en relation avec un fetch limité. Néanmoins, elles sont capables d'éroder des sédiments et de les transporter du SW vers le NE organisant les plages du cordon selon le principe d'une cellule de dérive littorale. Pour réduire le recul de rivage et maintenir les bourdigues (ouvertures artificielles entre le Bolmon et l'étang de Berre), des épis ont été progressivement installés dans la seconde moitié du XXème siècle. La zone d'étude se situe en aval dérive du dernier épi et connaît un fonctionnement classique d'érosion causée par l'enrochement (encoche d'érosion). Le recul moyen est proche de 0,3 m /an avant la mise en place des galets.



Fig. 33. Localisation de la plage de la Fourcade. Les chiffres en rouge représentent des altitudes NGF et la flèche en bleu foncé la dérive littorale dominante.



Fig. 34. Variations du rivage durant le XXème siècle. Les zones en érosion et en accumulation forment une cellule de dérive littorale qui témoignent du transport sédimentaire longitudinal orienté vers le NE.

5.3 Description des travaux de rechargement en galets

5.3.1 Site de la Fourcade

Les dépôts de galets en septembre 2007 (granulométrie entre 20 et 40 mm) concernent la plage sur une longueur proche de 300 m, une largeur de 30 m et une épaisseur de 1 m environ. Les dépôts sont bordés à l'ouest par un merlon en bois censé les retenir (Photo. 12). La plage est bordée par un talus qui fait office de digue composée de matériaux meubles (sables et limons) afin de reproduire un cordon dunaire (Fig. 35). Cependant, suite à l'érosion continue et à la formation d'une brèche importante et menaçant de submersion le village (en 2010), une phase supplémentaire de dépôts est réalisée en 2012 afin de revenir au profil initial (de 2007). Une partie des galets déplacés vers l'ouest est récupérée pour être redéposée dans la zone de dépôt initiale et des apports supplémentaires sont ajoutés (absence de quantification). A partir de cette date, des travaux de recalibrages ponctuels après les coups de mer sont effectués. Dans la partie centrale des dépôts, la plage devient si étroite qu'une digue est construite en 2017-2018 pour renforcer la digue à la mer, stopper le recul du rivage et limiter les submersions marines.



Photo. 12. Gauche : les galets pendant la phase de travaux en septembre 2007 (crédit F. Sabatier). Droite : le merlon en pieux de bois en 2008 censé border les dépôts de galets (crédit : PNRC)

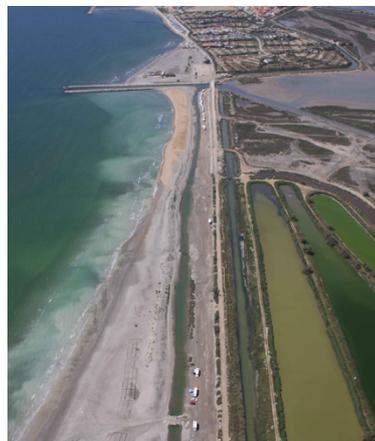


Photo. 13. Photo Les dépôts de galets de la Fourcade en 2008. Vue aérienne vers l'ouest (crédit : Dreal LR)

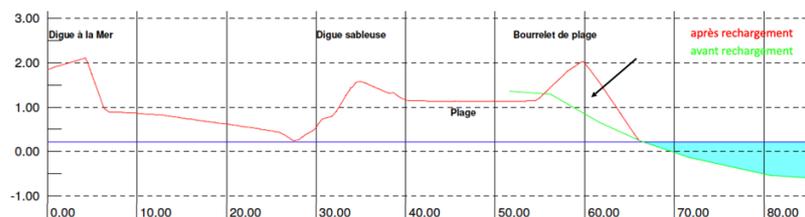


Fig. 35. Profil de plage avant/après le rechargement en galets (document transmis par le SYMADREM)

5.3.2 Site du Jaï

Avant les dépôts, la plage large de moins de 10 m, est bordée par un talus d'érosion de 50 cm de haut environ témoignant de l'attaque des vagues et du recul du rivage. Les maisons situées à quelques mètres du rivage sont menacées d'inondations lors des plus importants coups de Mistral. Les dépôts de galets ont été réalisés sur une longueur de 120 m environ depuis le dernier épi du lido du Jaï dont la présence induit une encoche d'érosion en aval dérive selon le même principe qu'aux Vieux Salins et à la Fourcade. Les dépôts, de taille réduite, proche de 2 à 4 cm (catégorie des gravillons) élèvent la plage de 0,6 m environ. La partie sommitale des dépôts qui composent « la plage » a été aplanie à la fin des travaux. Les dépôts de gravillons n'avancent pas le rivage de manière homogène : cette avancée est maximale à proximité du dernier épis (environ 15 m) (Photo. 14) et diminue progressivement à l'extrémité NE de la zone de dépôts pour rejoindre le rivage naturel. À notre connaissance les dépôts de gravillons n'ont pas été rechargés et/ou recalibrés mais à partir de 2021, un nouvel aménagement de la zone est entrepris. L'analyse des données du CEREGE permet donc d'établir un bilan de cette pratique de rechargement sur une décennie environ.



Photo. 14. Vue dans le sens de la dérive littorale dominante (vers le NE) depuis le dernier épis avant et après le rechargement en gravillons (cliché F. Sabatier, Aix-Marseille Université, CEREGE, 2007)



Photo. 15. Vue de l'extrémité des dépôts dans le sens de la dérive littorale dominante (vers le NE). Les gravillons viennent progressivement s'accoler à la ligne du rivage (cliché F. Sabatier, Aix-Marseille Université, CEREGE, 2008).

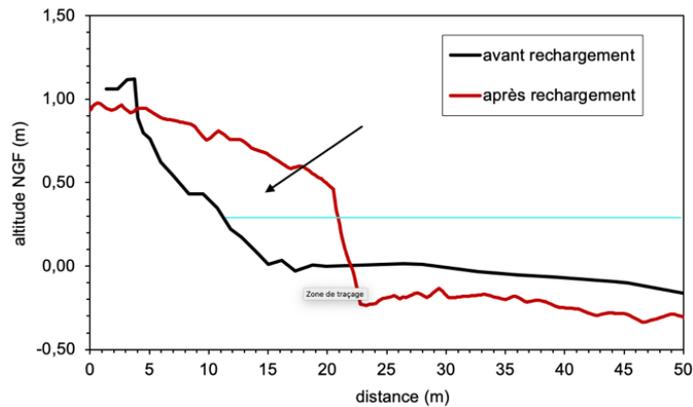


Fig. 36. Profil topographique avant/après les dépôts à proximité du dernier épi

5.4 Données et méthodes

Les données utilisées pour étudier les variations du rivage à la Fourcade sont listées dans le mémoire de master de Maelys Henriot (2021). Elles sont collectées sur [DataSud](#) et [Monlittoral](#). L'analyse est complétée à partir des plans transmis par le SYMADREM et de celles mises à disposition sur Geoportail et DataShom. Nous utilisons donc une compilation de données quasi annuelles ou bi annuelles entre 1998 et 2016 (1998 ; 2000 ; 2001 ; 2002 ; 2003 ; 2005 ; 2006 ; 2008 ; 2009 ; 2011 ; 2013 ; 2015 ; 2016 ; 2017) issues d'identification du position du rivage à partir d'orthophotographies de l'IGN, relevés DGPS du CEREGE et d'images satellitaires (analysées par I-Sea dans le projet [Space for Shore](#) dans lequel [Monlittoral](#) est impliqué). Les données sont analysées le long de transects perpendiculaires au rivage correspondant à ceux réalisés par le CEREGE pour la DDTM13 en 2015 (Sabatier et al., 2017) au moyen du logiciel DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*).

Les données utilisées pour étudier les variations du rivage après le rechargement sur la plage du Jai sont issues de relevés de terrains en 2007 ; 2008 ; 2009 ; 2014 ; 2015 ; et 2022. Ces relevés au DGPS ont été réalisés sur la zone rechargée et sur la plage limitrophe en aval dérive. Ils sont exploités en MNT afin d'établir un bilan sédimentaire du rechargement.

Finalement, pour des raisons de disponibilités, d'existence et de précision des données, les analyses conduites sur les deux sites ne sont pas totalement identiques mais les questions scientifiques restent les mêmes.

5.5 Les galets stabilisent-ils la position du rivage ?

5.5.1 Site de la Fourcade

Malgré le rechargement en galets, le rivage connaît un recul continu (Fig. 37). Au niveau du rechargement en galets (transects 189 à 191), les vitesses de recul du rivage sont équivalentes entre la période ante rechargement (1998 à 2006) et après rechargement (2008 à 2016). Si les dépôts n'ont pas augmenté la vitesse du recul du rivage, ils ne l'ont pas significativement ralenti non plus. Sur l'ensemble de la zone, les vitesses moyennes depuis le rechargement (entre 2008 et 2016) sont plus faibles (environ -5m/an) que celles avant le rechargement (entre 1998 et 2006). Ce résultat doit être interprété avec prudence car les différences entre les deux périodes d'observations sont faibles et la période 2008-2016 montre aussi un recul du rivage moins fort sur d'autres portion du littoral camarguais que celui compris entre 1998 et 2006. L'évolution du rivage témoigne d'un recul plus important vers le transect 200 ce qui correspond à la brèche observée dans les années 2010. À ce stade il est difficile de lier cette évolution à la présence des galets. En effet, pour induire une érosion aval dérive, il faudrait qu'ils présentent une action de blocage sédimentaire, comme le ferait un épi, or, les données montrent que les galets n'ont pas d'action significative sur les pentes sous-marines (cf infra) et ne parviennent pas à stabiliser le rivage. On ne peut donc pas relier simplement la présence des galets à cette brèche, hormis établir une hypothèse de réflexion de la houle plus importante à cause des

galets mais cette explication demeure très (trop) hypothétique. Par contre, la brèche témoigne du recul historique du rivage alors que dans la partie rechargée en galets, la digue de sable aura permis de limiter les submersions marines (Photo. 16).

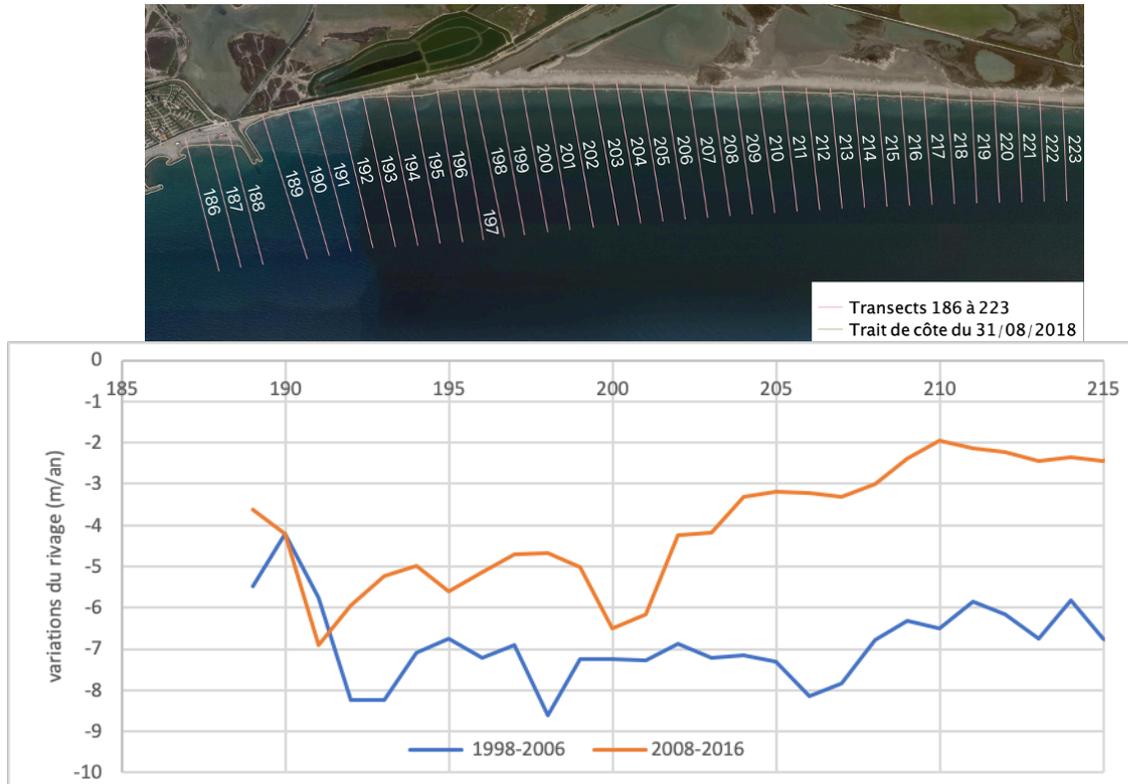


Fig. 37. Variations du rivage avant/après les dépôts de galets



Photo. 16. Les dépôts de galets de la Fourcade en 2016. Suite à l'érosion continue, une brèche s'est formée et favorise les submersions marines. Les galets ont envahi l'arrière plage constituée d'un canal de circulation de l'eau et d'une route carrossable (crédit : DREAL LR). La flèche blanche indique la direction de la dérive littorale dominante.

5.5.2 Site du Jaï

Après avoir significativement avancé (10 m), suite au rechargement le recul reprend à des vitesses élevées, variant de -2 à -4 m annuellement (Fig. 38). Après 7 à 10 ans, les vitesses de recul ralentissent significativement pour retrouver des vitesses proches de la situation anté rechargement (proche 0,5 m/an). Ces variations de vitesses de recul du rivage témoignent de la réadaptation du trait de côte suite à une perturbation anthropique (le rechargement). À la fin de la période d'observation, le rivage a quasi retrouvé la position qu'il occupait en 2007 mais les gravillons sont toujours présents et la plage est restée plus haute, ce qui limite les submersions marines.

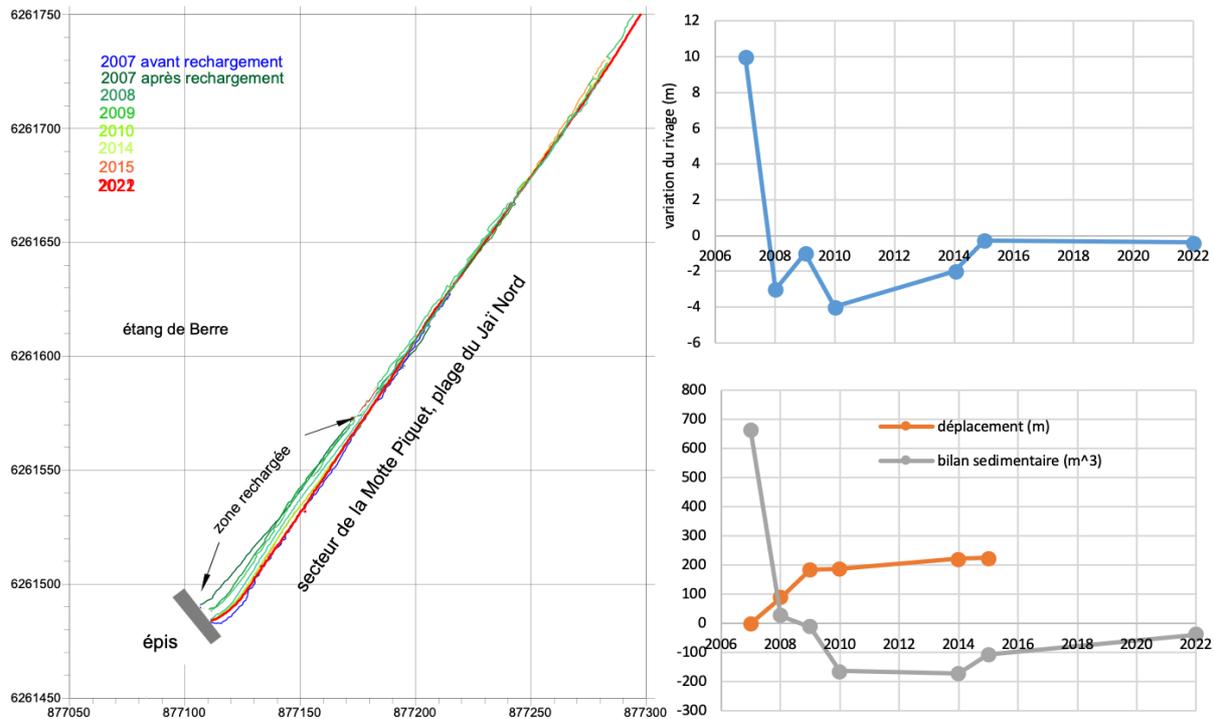


Fig. 38. Positions et variations du rivage, déplacement et bilan sédimentaire de la zone rechargée

L'analyse des bilans sédimentaires des MNT complète les informations issues des variations du rivage (Fig. 39). Le gain lié au rechargement atteint presque 800 m^3 dont il reste environ 170 m^3 sur place 15 ans plus tard : même si le trait de côte a retrouvé sa position d'origine, une quantité non négligeable est restée sur place. Comme pour le rivage, les mouvements les plus importants se produisent les premières années après les dépôts du fait du déséquilibre sédimentaire qu'ils induisent. On observe par exemple un étirement des dépôts entre 2008 et 2009 mais les accumulations sont temporaires et à la fin de la période d'observation, le rivage et les dépôts connaissent un recul général.

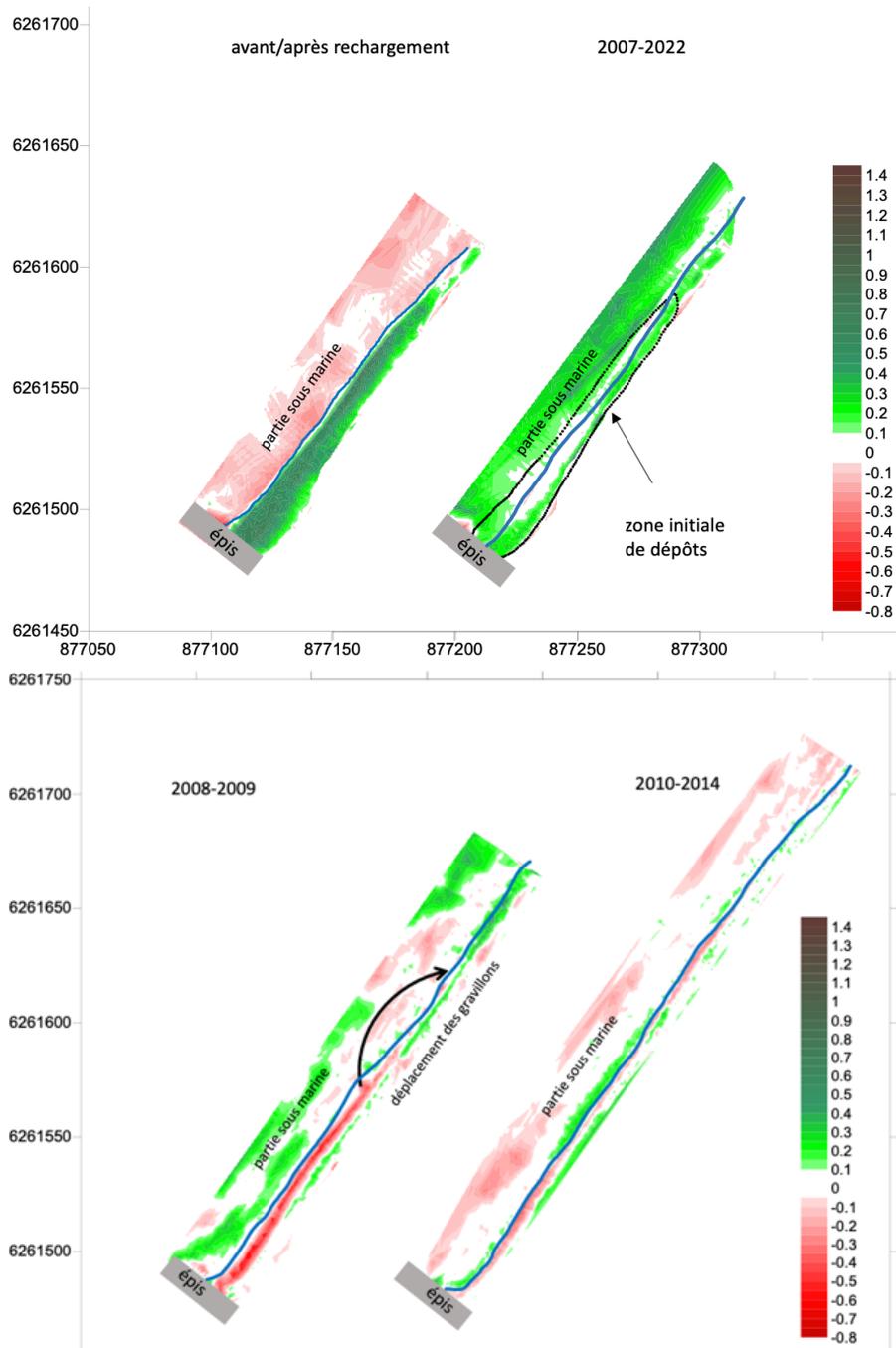


Fig. 39. Comparaisons des MNT du Jai

5.6 Les galets restent-ils en place ?

5.6.1 Site de la Fourcade

Les dépôts de galets ont été cartographiés à partir de photographies aériennes et d'images satellites via [Géoportail](#) afin de définir les caractéristiques de leur évolution dans le temps : surface, longueur et déplacements (d'après la localisation de l'extrémité ouest et du centroïde des dépôts).

Entre 2007 et 2019, les dépôts de galets s'étirent vers l'est. Ils auront parcouru plus de 600 mètres depuis 2007 (Fig. 40). Cette extension n'est pas continue. Les vitesses de déplacement sont rapides les deux années suivant les travaux. Ces derniers réalisés à l'automne 2007 sont logiquement suivis de tempêtes et dès le mois de janvier, les galets dépassent d'une centaine de mètres le gabion de bois censé les contenir. L'année suivante, les galets se déplacent de presque 400 m (ils ne seront d'aucune

efficacité pour stopper une brèche qui se forme durant l'hiver 2009-2010. En revanche, et en relation avec le recul du rivage, la surface générale des dépôts de galet reste globalement stable, environ 9.000 m². Cependant entre 2009 et 2010 cette superficie augmente significativement en relation avec une redistribution importante des galets en arrière sous l'effet de débordements de tempêtes qui se traduisent par des *overwash*. La superficie totale des galets montre des valeurs plus faibles depuis 2018 car les galets se sont progressivement enfouis et diffusés avec les autres sédiments de la plage ce qui rend leur identification difficile à partir de cette date. Aujourd'hui, ils n'apparaissent plus dans la zone initiale de dépôt (qui a significativement reculé et est équipée d'une digue frontale) mais seulement sur la plage à l'Est, à plus de 1 kilomètre, sous la forme de dépôts de tempêtes.

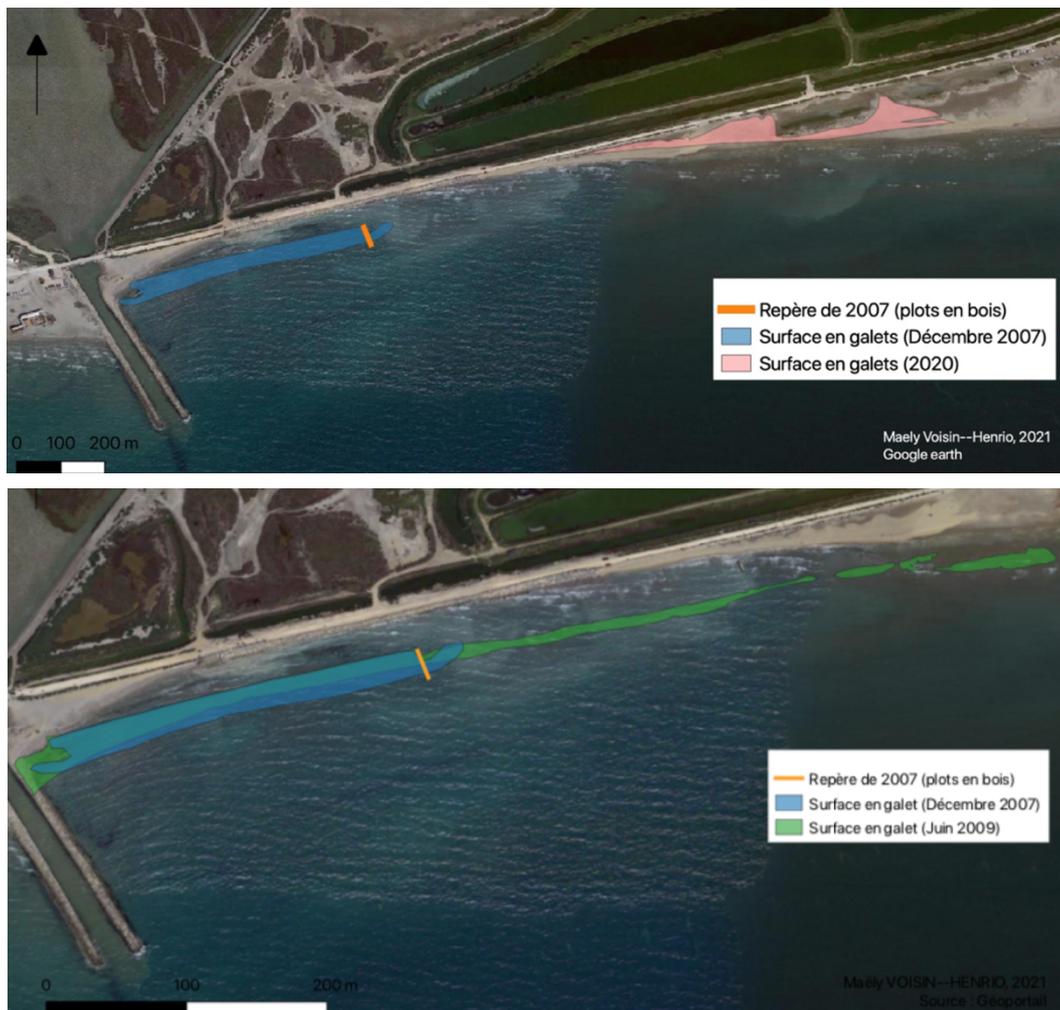


Fig. 40. Évolution du cordon de galets entre 2007 et 2020

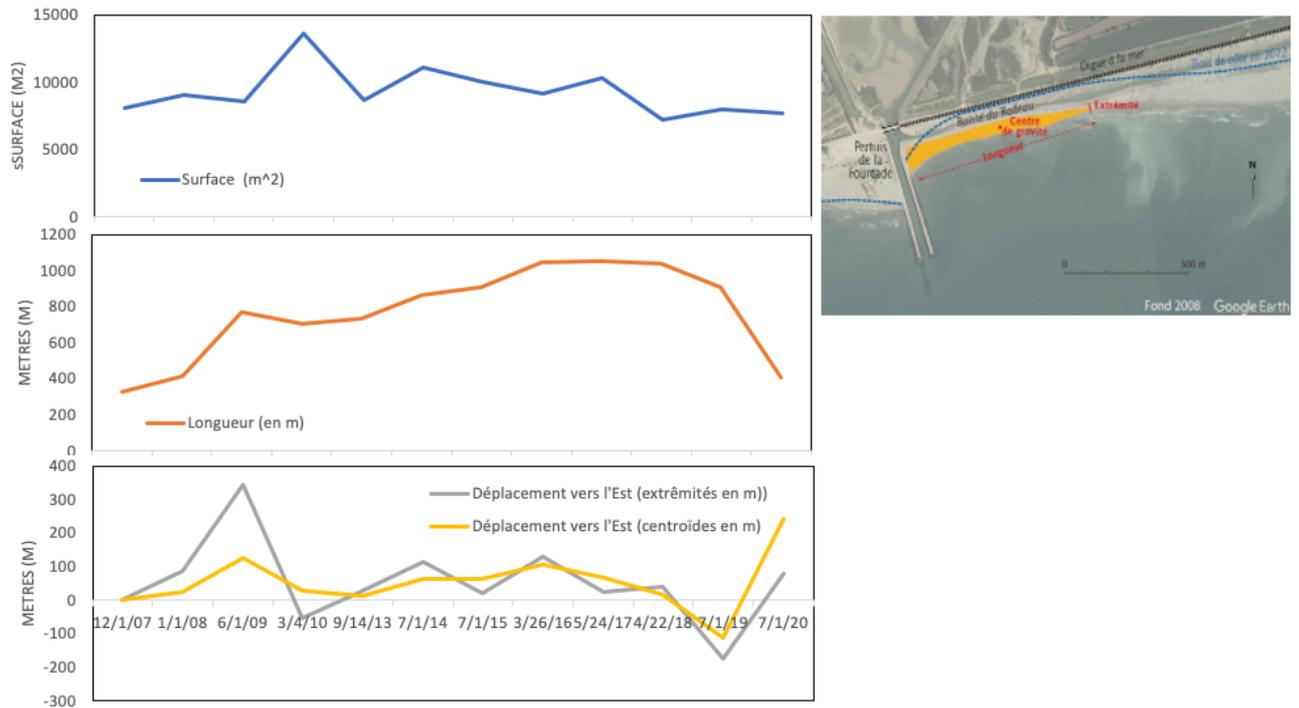


Fig. 41. Caractéristiques géométriques des dépôts de galets



Photo. 17. Les dépôts de galets en juin 2009 (vue vers l'Est). Les galets ont franchi sans difficulté les pieux de bois car ils sont préférentiellement déplacés sur la plage durant les tempêtes et où ils ne rencontrent pas d'obstacles (cliché F. Sabatier, 2009)



Photo. 18. Les galets en mai 2010 (vue vers l'Est). Les galets s'étirent progressivement vers l'Est sous l'action des tempêtes en se mélangeant au sable local. Le cordon dunaire est artificiel (cliché F. Sabatier, 2009)



Photo. 19. Après une tempête hivernale en décembre 2014, le cordon de galet recule et commence à combler la route carrossable en contre-bas de la Digue à la Mer. Ce mécanisme ressemble aux overwashes décrits dans les parties 2 et 3 (cliché F. Sabatier, Aix Marseille Université, CEREGE, 2014).

5.6.2 Site du Jaï

Entre 2007 et 2022, les dépôts de gravillons s'étirent vers le NE. Le corps du rechargement ne connaît pas un mouvement très visible car il s'étire et s'allonge peu comparativement à la Fourcade (200 m) (Fig. 39). En revanche, les gravillons se déplacent plutôt dans la partie haute du jet de rive (Photo. 20), et s'éloignent de la zone initiale de dépôt de plusieurs centaines de mètres. De plus, une partie des gravillons glisse aussi vers le bas de la zone du jet de rive sans toutefois atteindre la zone du déferlement. Ces mouvements confirment les connaissances sur le déplacement des gravillons. En effet, ils sont mobilisés lorsque les vagues sont plus fortes et induisent un jet de rive puissant, il est donc logique que les gravillons se déplacent dans cette zone. Les mouvements sont rapides les deux premières années après le rechargement (environ 90 m/an) puis ralentissent (moins de 10 m/an). L'étirement du dépôt se réalise par amas de gravillons (Fig. 39) au grès du mouvement des vagues.



Photo. 20. Déplacement progressif des gravillons vers la plage naturelle, vue vers le NE. La zone de dépôts se trouve 30 m derrière (cliché F. Sabatier, Aix-Marseille Université, CEREGE, 2009).



Photo. 21. Les dépôts de gravillons depuis le dernier épi vus vers le SW. La pente du jet de rive est plus prononcée avec les gravillons que sur la plage naturelle sableuse. Les gravillons « descendent » aussi sous l'eau mais sans aller plus au large vers la zone du déferlement (cliché F. Sabatier, Aix-Marseille Université, CEREGE, 2009).

5.7 La partie sous-marine est-elle érodée différemment ?

Les pentes de la plage dans la partie sous-marine de la zone du déferlement (entre le rivage et -3m à la Fourcade et -1 m au Jaï) restent globalement identiques depuis les dépôts de galets. En effet, sur les deux sites les valeurs sont proches de 1%, sans tendance particulière, ce qui est conforme aux pentes naturelles. Par conséquent, la propagation de la houle déferlante et son agressivité n'est pas modifiée par la présence des galets. Ce résultat s'explique par la localisation « haute » des galets qui séjournent sur la partie émergée, sur la zone du jet de rive mais ne se dirigent pas vers la zone du déferlement.

En revanche, la pente du jet de rive (la zone de va-et-vient des vagues) est singulièrement augmentée du fait de la taille plus importante des sédiments. En effet, le sédiment naturel sableux induit une pente faible (environ 1 à 5%) alors que celle liée à la présence des galets est significativement plus forte (jusqu'à 50 %) (Photo. 22). Il est fortement probable que la pente du jet de rive liée aux galets induise

une réflexion des vagues plus importante que celle causée par des sables. Cette réflexion peut causer une accentuation de l'érosion sous-marine mais nous n'avons pas observé de modifications de la pente de la zone du déferlement. Par conséquent l'augmentation de l'érosion sous-marine en raison de la présence des galets n'est pas démontrée. À la Fourcade, des limons cohésifs apparaissent entre le rivage et -1m de profondeur environ. Cette dynamique de décapage de la couverture sédimentaire avait cependant débuté dès les années 2000. L'apparition de ces limons ne peut donc pas être attribuée aux dépôts de galets mais ces derniers participent certainement à leur mise à jour sans qu'il soit possible d'en quantifier leur rôle.

Sans surprise mais de manière originale pour les plages sableuses de Camargue, les dépôts de galets obéissent aux lois de comportement connus en géomorphologie littorale. En effet, durant les tempêtes qui submergent le cordon, celui-ci recule sur lui-même en roulant vers l'arrière-plage et en comblant les zones basses. Par exemple, les galets ont « rempli » le canal de circulation des eaux qui bordait la dune artificielle ainsi que la route carrossable qui se trouvait en contrebas de la digue à la mer (Photo. 22). Ce mécanisme correspond aux processus d'*overwash* aussi décrits dans les parties 2 et 3 mais il n'est pas observé au Jaï car la topographie de l'arrière plage est différente, en position haute. Pour que des dépôts de tempêtes puissent se réaliser, cette zone doit se trouver en contre-bas afin que les sédiments puissent s'y accumuler. Néanmoins, la période d'étude n'a pas connu d'importantes submersions marines qui auraient déplacé la plage et les galets n'ont logiquement pas transité vers l'intérieur.



Photo. 22. haut : les dépôts de galets vus vers l'Est en décembre 2014 à la Fourcade et bas : les dépôts de graviers vus vers le SW en octobre 2008. Dans les deux cas, la pente du jet de rive est significativement plus forte que sur une plage sableuse. Au Jaï, on observe un petit bourrelet témoignant d'une houle plus forte qu'au moment du cliché (cliché F. Sabatier, Aix-Marseille Université, CEREGE).

5.8 Ce qu'il faut retenir

Le rechargement en galets montre de meilleurs résultats sur le site du Jaï plutôt que sur le site de la Fourcade. Dans les deux cas, malgré le rechargement, le rivage continue à reculer et les galets se déplacent longitudinalement dans le sens de la dérive littorale (ce qui permet de confirmer leurs directions). La taille des galets joue probablement un rôle sur le maintien du cordon car il semble évident que des galets de diamètre supérieurs se déplacent plus lentement mais ce paramètre n'a pas pu être établi. En effet, au Jaï les dépôts sont de taille plus réduite mais la houle est aussi moins forte. On ne peut pas envisager le rechargement en galet comme une solution pérenne, comme tous les rechargements artificiels en sédiments, ces pratiques doivent être reconduites (à une fréquence à déterminer). La présence des galets n'induit pas de modification significative de la pente sous-marine même si celle du jet de rive est plus prononcée. Par conséquent il n'y a pas d'évidence de l'augmentation de l'érosion et/ou de la force des vagues suite à ces rechargements en galets sur des plages sableuses. Le comportement d'un cordon en galets déposés artificiellement est similaire à un cordon de galets naturel.

6 Conclusion générale

Sur tous les sites nous montrons des problèmes de gestion littorale en aval dérive d'enrochements : la Fourcade, le Jai ; Vieux Salins, La Capte, Véran. La réduction de l'érosion est combattue de manière différente : ajouts de sédiments plus grossiers (galets) que ceux naturellement en place (sables), abandon des ouvrages en enrochements, désenrochement, mise en place de brises lames immergés en géotextiles. Dans la majorité des cas on observe des résultats limités : les galets se déplacent alors qu'on supposait qu'ils présenteraient une solution de stabilisation du rivage pluri décennale, les brises lames immergés stabilisent la position du rivage mais à conditions que la plage soit aussi rechargée en sables ; sur les secteurs où les digues sont abandonnées à la mer ou artificiellement supprimées, le recul du rivage reprend par régularisation. Dans la très grande majorité des cas, lorsque la topographie le permet des processus naturels d'accumulations de sédiments liés aux submersions marines (dépôts d'overwash) se mettent en place et permettent de créer une plage et/ou d'élever altimétriquement l'arrière-plage ce qui lui permettra à long terme, de résister à l'accélération de la montée de la mer.

De manière synthétique, ce rapport permet de répondre aux questions suivantes :

Que se passe-t-il lorsque l'on laisse la mer démanteler progressivement une digue qui fixait le rivage et qui interdisait les submersions marines (vers une zone basse) ?

L'effondrement de la digue, par érosion sous-marine à sa base, se traduit par un recul du rivage et des submersions marines durant les tempêtes qui permettent alors des dépôts de sables. Ces accumulations créent de nouvelle plage et/ou une élévation topographique de la zone basse. Ce mécanisme élève la frange littorale et donc permet de compenser la montée de la mer (sans pouvoir quantifier à ce stade l'efficacité de ce processus).

Le désenrochement d'une digue permet-il de limiter le recul du rivage d'une plage située à proximité de l'ouvrage ?

Ce mécanisme n'est efficace qu'à condition que la zone désenrochée soit suffisamment étendue pour s'éroder et fournir suffisamment de sédiments à la plage limitrophe. Si à ce stade ces conclusions restent qualitatives, dans la zone désenrochée et sur la base de la conclusion précédente, on peut s'attendre à ce qu'une plage se (re)crée lorsque la digue est supprimée (mais le recul du rivage reprendra).

Les brise-lames immergés en géotextiles stabilisent-ils la position du rivage ?

La généralisation de l'efficacité de ces structures est délicate tant chaque site est particulier. Dans tous les cas ils permettent de réduire l'intensité de la houle (parfois faiblement) mais leur efficacité grandit lorsqu'ils sont couplés à des phases de rechargements artificiels.

Le rechargement en galets sur une plage sableuse est-il efficace ?

Le rechargement ne stoppe pas le recul du rivage, dans un contexte de dérive littorale importante, le recul du rivage continue et les courants déplacent les galets latéralement (sur plusieurs centaines de mètres). Tout comme le rechargement artificiel en sable, cette pratique demande aussi à être renouvelée et la qualité paysagère du site est fortement modifiée.

Au final, ces exemples soulignent la mobilité naturelle du rivage et les contraintes d'aménagement que l'on s'impose lorsque ceux-ci sont trop proches du rivage. La transition environnementale des plages doit donc passer par l'acceptation de ce fonctionnement naturel. À long terme, dans une perspective d'accélération de la montée de la mer et de pénurie en sédiments sur les plages, il semble alors raisonnable de ne plus considérer le littoral comme une zone facilement aménageable où les infrastructures rigides peuvent être implantées dans la zone de mobilité naturelle de la plage. Ce rapport à l'aménagement du littoral rejoint finalement celui compris et accepté dans les années 90 le long des cours d'eau autour desquels on respecte aujourd'hui une zone de mobilité.

7 Références bibliographiques

- Anthony, E. J., Cohen, O., & Sabatier, F. (2011). Chronic offshore loss of nourishment on Nice beach, French Riviera: A case of over-nourishment of a steep beach?. *Coastal engineering*, 58(4), 374-383.
- Artelia, 2018. Rapport Renaturation du trait de côte des Vieux Salins d'Hyères ; inter Reg, projet Maritimo, Conservatoire du Littoral
- Bazin, P. (2022). Les effets du changement climatique : quelle adaptation pour les territoires littoraux ?. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 106, 48-53.
<https://doi.org/10.3917/re1.106.0048>
- Bceom, 2007) Etude de l'évolution du trait de côte du littoral des Alpes-Maritimes, Conseil Général des Alpes-Maritimes
- Bitan, M., Galili, E., Spanier, E., & Zviely, D. (2020). Beach Nourishment Alternatives for Mitigating Erosion of Ancient Coastal Sites on the Mediterranean Coast of Israel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(7), 509.
- Brunel, C., Sabatier, F., 2009. Potential sea-level rise influences in controlling shoreline position for French Mediterranean Coast. *Geomorphology*, 107, 47-57.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.024>
- Courtaud, J. (2002). *Dynamiques géomorphologiques et risques littoraux* (Doctoral dissertation, Atelier national de Reproduction des Thèses).
- Jackson, N. L., Nordstrom, K. F., Saini, S., & Smith, D. R. (2010). Effects of nourishment on the form and function of an estuarine beach. *Ecological Engineering*, 36(12), 1709-1718.
- Kulling, B. (2017) [Déformation du rivage et dérive littorale des plages du Golfe du Lion](#), thèse en co-direction Edward Anthony et François Sabatier, ED 351, Aix Marseille Université, 315 p.
- Lanza, S., & Randazzo, G. (2013). Tourist-beach protection in north-eastern Sicily (Italy). *Journal of Coastal Conservation*, 17(1), 49-57.
- Maiolo, M., Mel, R. A., & Sinopoli, S. (2020). A stepwise approach to beach restoration at Calabaia Beach. *Water*, 12(10), 2677.
- Makris, C. V., & Memos, C. D. (2007, July). Wave transmission over submerged breakwaters: Performance of formulae and models. In *The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
- Ranasinghe, R., & Turner, I. L. (2006). Shoreline response to submerged structures: A review. *Coastal Engineering*, 53(1), 65-79.
- Sabatier, F. (2001). *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 3).
- Sabatier, F., Anthony, E. 2015 [The Sand Spits of the Rhône River Delta: Formation, Dynamics, Sediment Budgets and Management](#). In : Randazzo, G., Jackson, D.W.T., Cooper, J.A. (Eds) *Sand and Gravel Spits*, Springer, vol 12 of the series Coastal Research Library, pp 259-274, ISBN: 978-3-319-13715-5 (Print) 978-3-319-13716-2 (Online).
- Sabatier, F., Maillet, G., Fleury, J., Provansal, M., Antonelli, C., Suanez, S., Vella, C., 2006. Sediment budget of the Rhône delta shoreface since the middle of the 19th century. *Marine Geology*, 234, 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.09.022>
- Sabatier, F., Samat O, Ullmann A et Suanez S., 2009. Connecting large-scale coastal behaviour with coastal management of the Rhone delta. *Geomorphology*, 107,79-89.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.026>
- Samat, O. (2007). *Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales: Le cas du languedoc et du delta du rhône* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 1).

- Samat, O., Sabatier, F., Lambert, A., 2005. Erosion of the sandy bottom in front of a seawall (Véran site, Gulf of Lions, Mediterranean coast) *5th International Conference on Coastal Dynamics*, American Society of Civil Engineering, Barcelona. CD-room.
- Shabankareh, O., Ketabdari, M. J., & Shabankareh, M. A. (2017). Environmental Impact of Geotubes and Geotextiles used in Breakwaters and Small Breakwaters Construction (Case Study: Rigoo Public Breakwater in South of Qeshm island-Iran). *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 5, 1-6.
- Suanez, S. (1997). *Dynamiques sédimentaires actuelles et récentes de la frange littorale orientale du delta du Rhône* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 1).

8 Lexique

affouillement : érosion accentuée au pied d'un ouvrage

aval dérive : dans le sens de la dérive littorale, secteur se trouvant sur la partie aval. Cette terminologie emprunte au vocabulaire utilisé en géomorphologie fluviale où l'aval se situe plus bas que l'amont dans le sens de l'écoulement du cours d'eau. Ici le cours d'eau est conceptuellement remplacé par la dérive littorale

barre ou barre d'avant côte : banc de sable dans la zone du déferlement. La morphologie (parallèle, oblique, en croissants, etc) et la génèse (déferlement, ondes de houles) sont largement discutés dans la littérature scientifique. De manière générale on considère que ces structures sédimentaires jouent un rôle clef dans le fonctionnement sédimentaire d'une plage car elles induisent et sont la conséquence du déferlement et leur volume représente une quantité importante de sédiments

bilan sédimentaire : exprimé en volumes, il décrit la différence entre des accumulations (entrées) et des érosions (sorties) d'une unité géomorphologique (par exemple la partie sous marine d'une plage, une dune, etc)

budget sédimentaire : exprimé en volumes, décrit la quantification des bilans sédimentaires des différentes unités géomorphologiques composant le littoral. Il permet de quantifier les échanges sédimentaires entre la dune, la plage, les dépôts de tempêtes, les barres d'avant côte ect

cellule littorale ou cellule de dérive littorale : Concept associant deux zones littorales, l'une en érosion, l'autre en accrétion liées par la dérive littorale. Ces deux unités forment une cellule dont la dérive littorale transporte les sédiments depuis la zone érodée vers la zone en accumulation sédimentaire.

encoche d'érosion : augmentation du recul du rivage lié à la présence d'un ouvrage et à proximité de ce dernier. Généralement, dans le sens de la dérive littorale dominante, une encoche d'érosion apparaît après le dernier ouvrage. On parle alors d'érosion en aval dérive.

limons cohésifs : dépôts de sédiments anciens formés lorsque le rivage se trouvait plusieurs centaines de mètres en mer

MNT = Modèle Numérique de Terrain, représentation en 3 dimensions de données morphologiques. Lorsque deux MNT d'un même secteur sont comparés, on peut alors quantifier les zones stables, en gain (dépôts) ou en érosion (pertes) afin d'établir un bilan sédimentaire

overwash : dépôts de sédiments dans une zone en contre-bas de l'arrière plage durant une tempête liés à une submersion marine

shoaling : changement de forme et du comportement des vagues lorsqu'elles se propagent dans des eaux de profondeur décroissante.

théorie linéaire de la houle : théorie de propagation de la houle du large vers la côte prenant surtout en compte la réfraction, c'est à dire l'influence du fond qui modifie la hauteur et la direction de la houle. La période de la houle restant stable. Cette théorie est acceptable en Méditerranée dans les cas simples.

9 Liste des données selon les parties

Type / méthode	Date	Où trouver les données
Le laissé faire par la mer d'une plage endiguée (exemple de Véran, Camargue)		
Bathy / monofaisceau	2006	Téléchargeable sur Monlittoral.fr
Bathy / Lidar	2013	Téléchargeable sur datashom
Topo bathy / Lidar	2016	Tour du Valat (contact O. Boutron)
Topo / photogrammétrie	2020	CEREGE (fournit dans ce rapport), Téléchargeable sur Monlittoral.fr
Bathy / image sat.	2015-2016-2017-2018- 2019-2020	Téléchargeable sur Monlittoral.fr
Le désenrochement (exemple des Vieux Salins, Hyères, Var)		
Bathy / sondes	1896	Téléchargeable sur datashom
Topo bathy / sondes	2017	Conservatoire du Littoral
Topo / Lidar	2010	Téléchargeable sur datashom
Topo / points DGPS	2012 - 2015	CEREGE (fournit dans ce rapport)
Trait de côte / Photo aériennes et DGPS	1947-1960-1971-1989- 1998-2003-2006-2009- 2011-2014	CEREGE (fournit dans ce rapport), Téléchargeable sur Monlittoral.fr
Les brise-lames en géotextiles immergés		
Bathy / Lidar	2013-201-2015	Téléchargeable sur datashom
Topo / points DGPS	2010-2015-2018-2020- 2021	Téléchargeable sur CNRS-SNO- DynaLit ,
Le rechargement en galets des plages sableuses		
Site de la Fourcade		
Trait de côte / Photo aériennes et DGPS	1998-2002-2003-2004- 2005-2006-2008-2009- 2011-2013	CEREGE (fournit dans ce rapport), Téléchargeable sur Monlittoral.fr
Trait de côte / images sat.	2015-2016-2017	Téléchargeable sur http://www.monlittoral.fr/
Site du Jaï		
Topo / points DGPS	2007 (2)-2008-2009-2014- 2015-2022	CEREGE (fournit dans ce rapport), Téléchargeable sur Monlittoral.fr