

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE ET EXTRACTION DE GRANULATS MARINS : POINT SUR LES CONNAISSANCES ET LES PRATIQUES ACTUELLES



RAPPORT D'ÉTUDE

JUIN 2021



REMERCIEMENTS

L'UNPG remercie l'ensemble de ses membres investis dans les travaux de la commission granulats marins et plus particulièrement mesdames Agnès Garçon, Anaïs Guérin-Chapel et Laëtitia Paporé, ainsi que son service communication pour l'accompagnement sur ce sujet.

Nous souhaitons également sincèrement remercier monsieur Luc Hamm d'Artelia et madame Amélie Roche du Cerema pour la richesse de nos échanges et le travail accompli dans le cadre de cette étude, ainsi que leurs collaborateurs, notamment madame Sabine Cavellec et monsieur François Hédou du Cerema, pour leurs contributions.

RAPPORT D'ÉTUDE

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE ET EXTRACTION DE GRANULATS MARINS :
POINT SUR LES CONNAISSANCES ET LES PRATIQUES ACTUELLES

RÉDACTION :

Artelia
Cerema
UNPG

DESIGN ET RÉALISATION GRAPHIQUE

Dominique Constantin

Crédit photo de couverture : Compagnie Armoricaïne de Navigation

SOMMAIRE GÉNÉRAL


SOMMAIRE DÉTAILLÉ 
PAGE 5

AVANT PROPOS
PAGE 7


1.

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SUJET 
PAGE 10

2.

SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SUR CERTAINES PROVINCES SÉDIMENTAIRES
DES FAÇADES DE LA MER DU NORD, DE LA MANCHE ET DE L'ATLANTIQUE 
PAGE 22

3.



SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES SUR LES DIFFÉRENTS PROCESSUS
HYDROSÉDIMENTAIRES POUVANT AMENER UN IMPACT DES EXTRACTIONS
DE GRANULATS MARINS SUR LE TRAIT DE CÔTE 
PAGE 60

4.

RETOURS D'EXPÉRIENCE EN FRANCE 
PAGE 77

ANNEXES 
PAGE 100

SOMMAIRE DÉTAILLÉ

1.	ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SUJET	10	
1.1.	INTRODUCTION	11	
1.2.	FACTEURS D'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE	11	
1.2.1.	Les phénomènes physiques	12	
1.2.1.1.	Une question d'échelle de temps...	12	
1.2.1.2.	... et de types de côte	13	
1.2.2.	Les impacts anthropiques	15	
1.2.3.	Dragages portuaires, rechargements de plage et extractions de granulats en mer	16	
1.3.	L'ÉVOLUTION GÉNÉRALE DU TRAIT DE CÔTE SUR LE LITTORAL MER DU NORD-MANCHE-ATLANTIQUE	18	
2.	SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SUR CERTAINES PROVINCES SÉDIMENTAIRES DES FAÇADES DE LA MER DU NORD, DE LA MANCHE ET DE L'ATLANTIQUE	22	
2.1.	INTRODUCTION	23	
2.2.	DE LA POINTE DU HOURDEL AU CAP D'ANTIFER (SOMME, SEINE-MARITIME)	23	
2.2.1.	État des connaissances sur l'évolution du trait de côte	23	
2.2.2.	État des connaissances des impacts des activités anthropiques	25	
2.2.3.	Activités d'extraction de granulats marins	26	
2.2.3.1.	Historique des extractions sur la province	27	
2.2.3.2.	Volumes extraits	29	
2.2.3.3.	Suivi des impacts	29	
2.3.	DU CAP D'ANTIFER AU CAP DE LA HAGUE (SEINE-MARITIME, CALVADOS, MANCHE)	31	
2.3.1.	État des connaissances sur l'évolution du trait de côte	31	
2.3.2.	État des connaissances des impacts des activités anthropiques	33	
2.3.3.	Activités d'extraction de granulats marins	35	
2.4.	DU CAP DE LA HAGUE À LA POINTE DE CORSEN (MANCHE, ILLE-ET-VILAINE, CÔTES-D'ARMOR, FINISTÈRE)	38	
2.4.1.	État des connaissances sur l'évolution du trait de côte	38	
2.4.2.	État des connaissances des impacts des activités anthropiques	40	
2.4.3.	Activités d'extraction de granulats marins	42	
2.5.	DE LA POINTE DE CHEMOULIN À LA POINTE DE SUZAC (LOIRE-ATLANTIQUE, VENDÉE, CHARENTE-MARITIME)	45	
2.5.1.	État des connaissances sur l'évolution du trait de côte	45	
2.5.2.	État des connaissances des impacts des activités anthropiques	47	
2.5.3.	Activités d'extraction de granulats marins	48	
2.6.	DE LA POINTE DE SUZAC À LA FRONTIÈRE ESPAGNOLE (GIRONDE, LANDES, PYRÉNÉES-ATLANTIQUES)	52	
2.6.1.	État des connaissances sur l'évolution du trait de côte	52	
2.6.2.	État des connaissances des impacts des activités anthropiques	55	
2.6.3.	Activités d'extraction de granulats marins	56	

3. SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES SUR LES DIFFÉRENTS PROCESSUS HYDROSÉDIMENTAIRES POUVANT AMENER UN IMPACT DES EXTRACTIONS DE GRANULATS MARINS SUR LE TRAIT DE CÔTE **60**

3.1.	INTRODUCTION	61
3.2.	PREMIÈRES ÉTUDES : LE CAS DU GOLFE DE GASCOGNE	61
3.2.1.	Les travaux préliminaires	61
3.2.2.	Évolution morphodynamique d'une souille en modèle réduit à fond mobile	61
3.2.3.	Impacts sur le trait de côte et critères à respecter	62
3.2.4.	Généralisation des résultats	63
3.3.	SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART EN FRANCE (LATTEUX, 2008)	65
3.4.	LE PROJET EUROPÉEN SANDPIT (2002-2005)	66
3.5.	LES RECHERCHES AU ROYAUME-UNI	66
3.5.1.	Identification des impacts et premières recommandations	66
3.5.2.	Les guides de référence anglais	67
3.5.3.	Études d'impact régionales	67
3.6.	RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR DES SITES EXPLOITÉS	68
3.6.1.	Côte allemande de la mer Baltique	68
3.6.2.	Le littoral de Great Yarmouth, Royaume-Uni	69
3.6.3.	Le littoral de Pakiri, Nouvelle-Zélande	71
3.7.	LA PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	73
3.7.1.	Origine des littoraux actuels	73
3.7.2.	Transport des sédiments du large vers la côte à court-terme	73
3.7.3.	Transport résiduel à long-terme	74
3.7.4.	Le rôle de la géologie locale et des actions anthropiques	76

4. RETOURS D'EXPÉRIENCE EN FRANCE **77**

4.1.	LE PILIER (44)	78
4.1.1.	Contexte	78
4.1.2.	Les études d'impacts préalables	79
4.1.3.	Les bilans quinquennaux	79
4.1.4.	Modélisation des impacts sur le transit littoral	80
4.1.5.	Dossier de fermeture	83
4.1.6.	Conclusions sur le site du pilier	83
4.2.	CAIRNSTRATH A ET SN2	84
4.2.1.	Contexte	84
4.2.2.	Étude de l'agitation et de son impact sur le trait de côte	85
4.2.3.	Étude de la courantologie et des transports sédimentaires	88
4.2.4.	Conclusion sur les études de cairnstrath	91
4.3.	CONCESSION GRANULATS MARINS HAVRAIS (GMH)	92
4.3.1.	Contexte	92
4.3.2.	Étude des impacts sur l'agitation et le littoral	93
4.3.3.	Conclusions sur la concession GMH	97
4.4.	SYNTHÈSE	98

ANNEXE A •	BIBLIOGRAPHIE	99
-------------------	----------------------	-----------

ANNEXE B •	RÉGLEMENTATION FRANÇAISE SUR LES EXTRACTIONS DE GRANULATS MARINS	106
-------------------	---	------------



AVANT-PROPOS

Consciente de la nécessité de répondre à l'approvisionnement durable des territoires, la Profession s'est engagée, il y a une trentaine d'années, et à la demande de l'État, dans le développement de l'extraction de granulats marins afin d'accompagner la diminution de l'extraction dans les vallées alluviales. Elle l'a fait avec la préoccupation de respecter l'environnement marin. Elle a d'ailleurs participé à des programmes scientifiques d'envergure européenne, voire internationale (CIEM) pour améliorer la connaissance de ses impacts et adapter ses méthodes d'exploitation. Ces démarches ont permis de maîtriser les impacts de l'exploitation de granulats marins et de contribuer à l'amélioration des connaissances du milieu marin.

Étant une ressource d'origine terrestre avec les caractéristiques physico-chimiques de l'alluvionnaire terrestre, les granulats marins extraits dans le domaine maritime français, constituent une ressource à part entière pour l'approvisionnement des chantiers et ouvrages structurants des territoires, ainsi que pour certaines productions agricoles. De plus, cette filière contribue à l'économie maritime et des territoires sur lesquels elle est implantée.

L'exploitation des granulats marins fait l'objet d'une réglementation stricte et encadrée à laquelle notre Profession s'est conformée et adaptée au gré de ses évolutions. Dans ce contexte, elle s'est notamment engagée depuis 2012 dans les discussions portant sur la « Stratégie nationale de gestion durable des granulats marins et terrestres et des matériaux et substances de carrières » et a participé au groupe de travail sur les granulats marins (GTGM) qui a rédigé un guide méthodologique pour l'élaboration des Documents d'Orientation pour une Gestion Durable des Granulats Marins (DOGGM) publié en novembre 2016 par le ministère en charge de l'Environnement.

À la lecture de ce guide, il apparaissait que le sujet de l'impact de l'activité d'exploitation de granulats en mer sur l'érosion du trait de côte méritait un focus. L'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG)¹, au travers de la commission granulats marins, a souhaité mettre à la disposition de tous un document scientifique, technique et pédagogique qui fait le point sur le lien entre extractions de granulats marins et évolution du trait de côte². Pour se faire, l'UNPG a confié au bureau d'étude Artelia et à l'établissement public Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) le soin de mener à bien la rédaction de cette étude. Le rapport en résultant est organisé en quatre chapitres :

- évolution du trait de côte : présentation générale du sujet (rédaction Cerema),
- synthèse des connaissances sur certaines provinces sédimentaires des façades de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique (rédaction Cerema),
- synthèse des connaissances scientifiques sur les différents processus hydrosédimentaires pouvant amener un impact des extractions de granulats marins sur le trait de côte (rédaction Artelia),
- retours d'expérience en France (rédaction Artelia).

Le rapport est complété (en annexe) par une partie traitant de la réglementation française sur les extractions de granulats marins (rédaction Cerema). Elle apporte des éclairages sur les autorisations nécessaires à cette activité ainsi que sur les points importants de l'instruction des dossiers de demande de concession et d'autorisation d'exploitation (AOTM) qui nécessitent une étude d'impact afin d'éviter notamment tout impact sur le trait de côte (séquence ERC : Éviter-Réduire-Compenser).

Dans un deuxième temps, il est envisagé, en coopération avec le ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES), de compléter ce rapport par la rédaction et la publication d'un guide méthodologique pour accompagner les producteurs de granulats marins dans la rédaction de leur étude d'impact sur le sujet du trait de côte.

Laëtitia Paporé,
présidente de la commission granulats marins de l'UNPG

1 UNPG-GM, <https://www.unicem.fr/accueil/la-federation/syndicats/partenaire-amont-incontournable-de-la-filiere-construction/>

2 Pour en savoir plus : <http://sablessetgravieresenmer.fr/pages/erosion-cotiere.html>

GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS

Une bonne compréhension de ce rapport nécessite une connaissance de base sur la gestion du trait de côte en France. Le lecteur pourra donc se reporter utilement au guide méthodologique de gestion du trait de côte publié en 2010 par le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer³. Le lecteur intéressé y trouvera notamment une description détaillée des milieux littoraux ainsi qu'un glossaire technique que nous avons complété ici par quelques termes d'importance particulière pour le sujet traité dans ce rapport.

Termes techniques

Banc : Accumulation d'alluvions (sables, graviers, galets) en mer, soumis à l'action de la houle et des courants qui en font évoluer sa forme et sa position.

Barre : Banc sous-marin d'alluvions, affleurant un peu en dessous du niveau des plus basses mers et constituant ainsi un danger pour la navigation, notamment à l'embouchure des fleuves et lagunes ou au large de grandes plages (barre littorale).

Profondeur de fermeture : Profondeur limite au-delà de laquelle le transit littoral est quasiment nul et les évolutions verticales de la côte des fonds est faible, voire imperceptible sur une période donnée (1 an, 10 ans, etc...).

Souille : Excavation artificielle (anthropique) dans un fond marin ou terrestre.

Stratigraphie : Description des strates, ou couches de terrain, qui constituent l'écorce terrestre dans le but de reconstituer l'histoire de celle-ci.

Transit littoral : Transport de sables, galets et graviers, parallèle au rivage induit par le déferlement des vagues sur les plages.

Zéro des cartes marines (CM). Les côtes du fond marin et les niveaux d'eau dans ce rapport sont fournies en mètres rapportés au zéro des cartes marines (m CM).

Zéro hydrographique (ZH). Niveau de référence des profondeurs du fond marin et des niveaux de la mer. Il est notamment utilisé dans l'établissement des cartes marines (CM) et les annuaires de marée.

Sigles

AOTM : Autorisation d'ouverture de travaux miniers

AOT : Autorisation d'occupation temporaire

APP : Autorisation de prospections préalable

Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CERC (Coastal Engineering Research Center) : Centre de recherche du corps des ingénieurs de l'armée américaine (US Army Corps of Engineers) en charge d'établir les manuels et guides de bonnes pratiques pour les opérations de génie côtier

CETE : Centre d'études techniques de l'équipement

Cetmef : Centre d'études techniques maritimes et fluviales

CICGBDS : Commission inter-régionale de concertation pour la gestion de la baie de Seine

CIEM : Conseil international pour l'exploration de la mer

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

DCSMM : Directive cadre stratégie pour le milieu marin

3 « La gestion du trait de côte » a été édité en 2010 par les éditions QUAE à Brest. Disponible en ebook sur <https://www.quae.com/produit/885/9782759209880/la-gestion-du-trait-de-cote>

DCPEM : Directive cadre pour la planification de l'espace maritime

DIRM NAMO : Direction interrégionale de la mer Nord Atlantique-Manche Ouest

DOGGM : Document d'orientation pour une gestion durable des granulats marins

DRE : Direction régionale de l'équipement

DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

DROM : Départements et régions d'outre-mer

DSF : Document stratégique de façade

DYNALIT : Dynamique du littoral et du trait de côte

EDF : Électricité de France

ERC : Éviter – Réduire – Compenser

ESTRAN : Espace scientifique et technique des ressources aquatiques et de la navigation (association)

GEMEL : Groupe d'étude des milieux estuariens et littoraux

GIE : Groupement d'intérêt économique

GIE GMN : Groupement d'intérêt économique « Granulats Marins de Normandie »

GIE GMO : Groupement d'intérêt économique « Granulats de la Manche Orientale »

GIP : Groupement d'intérêt public

GIS : Groupement d'intérêt scientifique

GRESARC : Groupe de recherche sur les environnements sédimentaires aménagés et les risques côtiers

Ifremer : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INSU : Institut national des Sciences de l'univers

LCHF : Laboratoire central d'hydraulique de France

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

MEDDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement

MEEDDM : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer

MEEM : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

MIACA : Mission interministérielle d'aménagement de la côte aquitaine

MINEFI : Ministère de l'Économie et des Finances

MTES : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

OLIBAN : Observatoire du littoral bas-normand

OREAP : Organisme régional d'études pour l'aménagement de la Picardie

PAMM : Plan d'actions pour le milieu marin

PER : Permis exclusif de recherche

PER GMH : Permis exclusif de recherche des granulats marins havrais

ROL : Réseau d'observation du littoral (de Normandie et des Hauts-de-France)

SHOM : Service hydrographique et océanographique de la Marine

SIEGMA : Suivis des impacts de l'extraction de granulats marins

SIG : Système d'informations géographiques

UNPG : Union nationale des producteurs de granulats

ZEE : Zone économique exclusive

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SUJET

1.1 INTRODUCTION

Les phénomènes d'érosion ou de « recul du trait de côte » sont de plus en plus suivis par les populations locales qui voient une urbanisation littorale, fortement développée au plus proche de la mer, menacée à chaque tempête : les stocks sédimentaires ne semblent plus suffire pour réalimenter les plages et protéger les enjeux côtiers.

Depuis 2012, la France s'est ainsi dotée d'une Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (MEDDTL, 2012), dont l'ambition est de favoriser l'adaptation et l'anticipation des phénomènes d'érosion côtière, pour décider de choix appropriés et ne pas subir les évolutions à venir dans un contexte de changement climatique. La mise en œuvre de cette stratégie nationale s'appuie à ce jour sur deux programmes d'actions (2012-2015 et 2017-2019, MEEM, 2017) qui ont placé le développement et le partage des connaissances comme enjeux prioritaires afin de bien comprendre ces phénomènes complexes.

Les deux premiers chapitres de ce document visent ainsi à présenter de manière pédagogique et neutre l'état actuel des connaissances concernant l'évolution du trait de côte et les impacts anthropiques sur celle-ci. Il s'appuie en particulier sur les résultats des travaux de développement de la connaissance réalisés par le Cerema dans le cadre de la *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte*, notamment la production d'un indicateur national de l'érosion côtière et l'actualisation du « Catalogue sédimentologique des côtes françaises ».

1.2 FACTEURS D'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

Le « trait de côte⁴ » correspond ici à un espace littoral à l'interface entre la terre, la mer et l'atmosphère. Il évolue naturellement et continuellement en fonction de sa nature intrinsèque (type de côte, disposition et résistance des roches, topographie de l'arrière-pays...) et sous l'effet de facteurs atmosphériques (vents, dépressions, précipitations, etc.) et hydrodynamiques (niveau marin, vagues, courants associés, débits des fleuves). Son équilibre dépend des flux sédimentaires et s'exprime par le bilan établi entre d'une part, les apports marins et fluviaux et la production biogène (maërl, sable coquillier), et d'autre part les pertes en mer et à terre (extractions, dragages, ouvrages bloquant le transit sédimentaire...). Ces flux sédimentaires s'évaluent au niveau des « cellules hydrosédimentaires », compartiments littoraux dans lesquels la majorité des échanges sédimentaires ont lieu de manière plus ou moins indépendante des compartiments adjacents (Figure 1). Les limites en mer de ces compartiments sont difficiles à appréhender. La notion de « profondeur de fermeture » correspond à la limite côté mer des modifications morphologiques significatives dans le profil de plage (Hallermeier, 1981 ; Sabatier *et al.*, 2004). Cette zone au plus près de la côte est soumise à l'action des vagues et rassemble l'essentiel des échanges sédimentaires en relation avec la position du trait de côte (Sabatier *et al.*, 2004). Au-delà de cette profondeur, des mouvements sédimentaires existent mais leurs mécanismes d'action et relations à la côte sont encore largement méconnus et restent à ce stade l'objet de travaux de recherche.

⁴ La définition officielle du « trait de côte » est donnée par le Shom en France et correspond « au niveau des plus hautes mers atmosphériques (coefficient 120) dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large et pression atmosphérique moyenne de 1 013 hPa) ». Cette définition technique et géométrique ne prend cependant pas en compte la dynamique des espaces côtiers. L'expression est ainsi également utilisée de manière abusive pour désigner la frange côtière mobile sous la triple influence des environnements maritime, terrestre et atmosphérique.

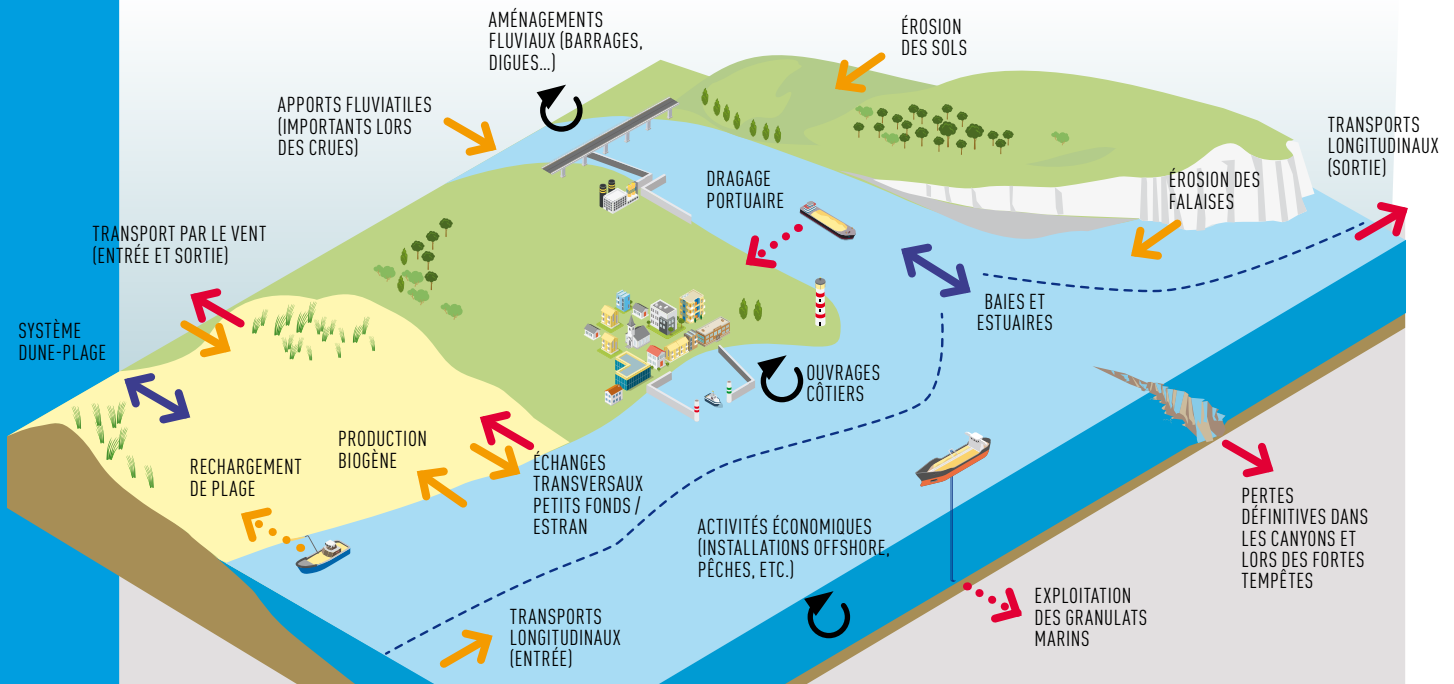


Figure 1 – Échanges sédimentaires au sein d'une cellule hydrosédimentaire
(modifié d'après MEDDE, 2015)

- Perte de sédiments
- Apport de sédiments
- Actions anthropiques
- Dépôts sédimentaires remobilisables
- Perturbation des échanges sédimentaires
- Profondeur de fermeture

Le texte qui suit a été rédigé d'après la brochure « Développer la connaissance et l'observation du trait de côte. Contribution nationale pour une gestion intégrée » (MEDDE, 2015)

1.2.1. LES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

1.2.1.1. Une question d'échelle de temps...

Le trait de côte évolue à diverses échelles de temps allant de l'événement instantané (la tempête), aux variations millénaires du niveau marin, et en fonction de la nature du littoral et de l'intensité des processus érosifs naturels. Le tout peut être modifié par des phénomènes tectoniques sur des pas de temps longs (isostasie⁵, glacio-isostasie, volcanisme...), mais également par des actions anthropiques récentes (Figure 1). La compréhension de la dynamique actuelle des littoraux nécessite donc une approche à diverses échelles de temps (et d'espace).

Une grande partie des stocks de sédiments actuellement présents sur les littoraux est héritée de la dernière remontée importante du niveau marin survenue lors de la transgression marine dite « flandrienne ». Dans un grand nombre de régions du monde, la mobilité et l'épuisement contemporain de ce stock constituent les premières causes d'instabilité du littoral. Au quotidien, de nombreux facteurs, propres aux milieux et à leurs environnements, contrôlent ainsi l'évolution du littoral.

⁵ Ajustement vertical de la position de la croûte terrestre en réponse aux variations des charges de surface (théorie d'équilibre de la croûte terrestre par application du principe d'Archimède) (MEEDDM, 2010).

1.2.1.2. ...et de types de côte

La morphologie des côtes *basses meubles* (plages, dunes...) est marquée alternativement par des phases d'érosion et d'accumulation particulièrement visibles à l'échelle saisonnière. Au cours des tempêtes, ce type de côte subit généralement une érosion, suivie d'une phase de reconstruction lors de périodes dites calmes. Ces évolutions, normales et réversibles, traduisent l'ajustement des formes d'accumulation aux forçages météo-marins. Ces fluctuations sont décrites par certains scientifiques comme étant le « degré de liberté » ou la « respiration du système⁶ ». Les capacités et les vitesses d'ajustement des systèmes littoraux dépendent également de leur « budget sédimentaire » :

- avec un budget déficitaire, les formes d'accumulation s'adaptent aux conditions de fortes agitations, mais leur tendance évolutive à long terme est régressive : ces plages présenteront des formes d'érosion et potentiellement un recul du trait de côte,
- avec un budget excédentaire, au-delà de l'adaptation morphologique réversible pendant et après les fortes agitations marines, la tendance générale du système sera à l'accrétion.

À l'échelle annuelle, les vitesses moyennes d'érosion sont parfois supérieures à 3 m/an. Lors d'événements tempétueux (de forte intensité ou répétitifs), les reculs instantanés d'érosion peuvent même atteindre plusieurs dizaines de mètres (par exemple, à l'occasion des tempêtes successives de l'hiver de 2013-2014 qui ont touché les côtes atlantiques).

Impact des tempêtes sur les côtes basses meubles

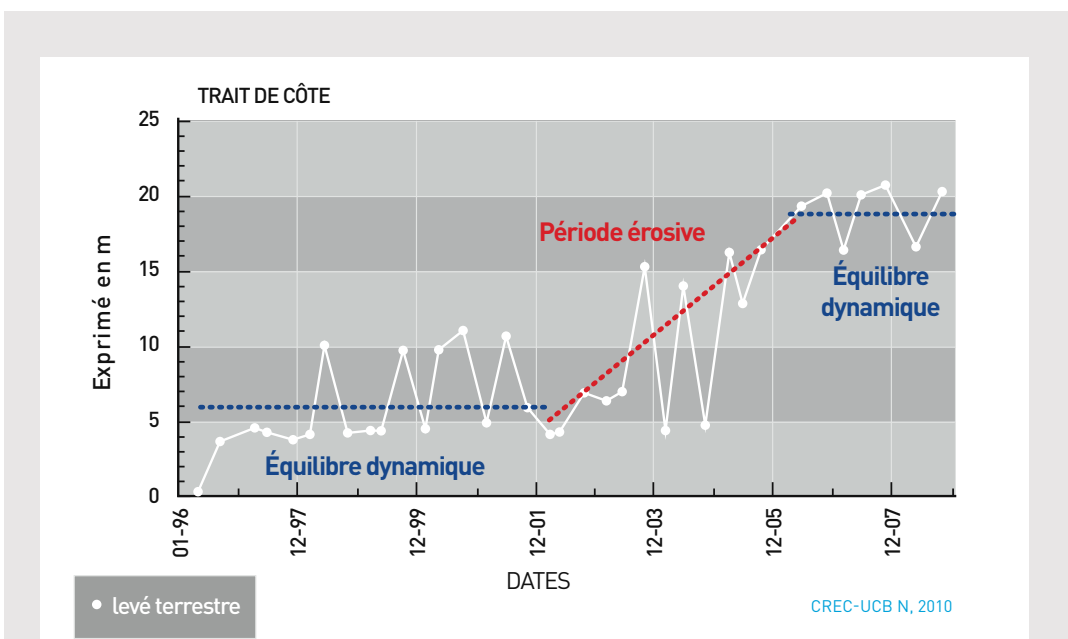
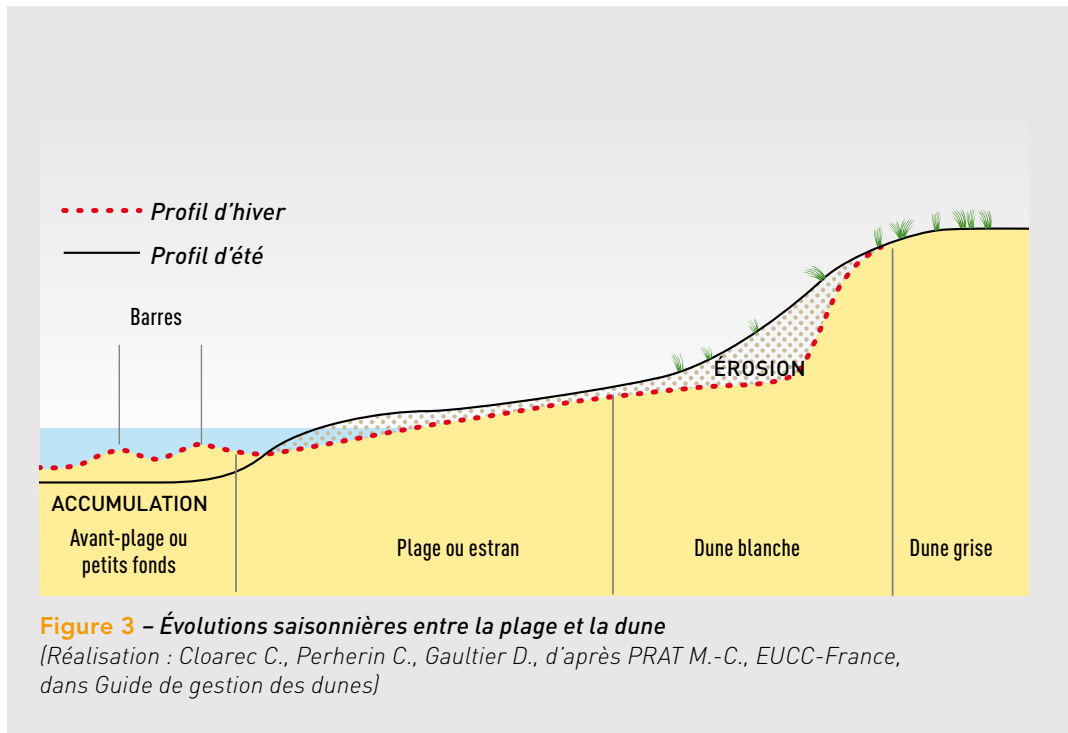
(d'après le guide méthodologique « Plans de prévention des risques littoraux » - MEEM, 2014)

Pour les côtes basses sableuses, des événements tempétueux extrêmes peuvent provoquer une érosion considérable de la dune littorale et un recul important du trait de côte. Ainsi, sur la côte atlantique, les observations réalisées après la tempête Xynthia ont permis d'estimer des reculs moyens de l'ordre de 10 m, pouvant atteindre ponctuellement 30 m (Garcin et al., 2011 ; Figure 2). Cependant, ces reculs ponctuels extrêmes peuvent être regagnés au cours de quelques saisons moins érosives, en particulier lorsque le cordon dunaire n'est pas affecté par la présence d'ouvrages côtiers et garde une part de résilience (Illustrations Figure 3 et Figure 4).



Figure 2 – Recul de la dune à La Tranche-sur-Mer, Vendée, suite à la tempête Xynthia – mars 2010
(Photo : © Bruno BERENGER, Cerema)

⁶ Le système côtier comprend l'ensemble des formes naturelles physiques du littoral en interaction du point de vue sédimentaire (par exemple un cordon dunaire avec une plage et une plage sous-marine ou une falaise rocheuse avec une grève).



Les côtes à *falaise* et côtes *rocheuses* subissent un recul régulier, plus ou moins rapide selon leur composition, sous l'effet combiné de la mer et des paramètres atmosphériques de température (gel/dégel) ou de précipitations (infiltration de l'eau). Leurs mouvements les plus amples sont brutaux et ponctuels dans le temps et dans l'espace. Ainsi lors d'effondrements ou de glissements majeurs, les reculs instantanés en haut d'abrupt peuvent atteindre plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres. Cependant, sur plusieurs décennies, les vitesses d'évolution moyenne du trait de côte atteignent rarement 0,5 m/an.

Les habitats naturels côtiers participent à la résilience du milieu : ils diminuent l'impact des facteurs d'évolution et jouent un rôle de « zone tampon » vis-à-vis de l'érosion côtière et de la submersion marine. Certains habitats ont un rôle privilégié, notamment les cordons dunaires, les herbiers, les mangroves et les récifs coralliens. Protéger les habitats naturels, qu'ils soient marins ou terrestres, contribue donc également à la lutte contre l'érosion côtière et la submersion marine. La pérennité et la capacité d'ajustement de ces systèmes continus, des fonds marins aux plages aériennes, sont directement liées à la liberté des échanges sédimentaires entre ses différentes composantes. Or cette dernière est souvent perturbée par des ouvrages ou des interventions humaines. Toute perturbation, voire rupture, des échanges sédimentaires entre les fonds marins et la plage voire l'arrière-plage, diminue la capacité de résilience et d'adaptation des systèmes littoraux et peut en exacerber l'érosion.

1.2.2. LES IMPACTS ANTHROPIQUES

Les interventions humaines impactant le littoral sont nombreuses et s'étendent des territoires continentaux au milieu marin. Le principal impact reste l'artificialisation des zones côtières. La vocation de ces dernières a profondément évolué au cours des siècles, d'un milieu à usage nourricier et défensif au Moyen Âge à une exploitation balnéaire récréative en seconde moitié du XX^e siècle. Ces actions anthropiques majeures, répondant à des besoins économiques, touristiques, d'agriculture ou d'urbanisation, contribuent ainsi depuis plusieurs décennies à la perturbation locale du fonctionnement des milieux naturels littoraux. Ce sont ainsi près de 16 000 ouvrages et aménagements côtiers qui ont été recensés en France métropolitaine et sur les 5 départements et régions d'outre-mer (Cerema et MTES, 2018⁷) dont plus de la moitié du linéaire correspond à des ouvrages construits dans un but de fixation du trait de côte ou de lutte contre les effets locaux de l'érosion. Ces aménagements côtiers sont majoritairement apparus à partir des années 1960 : on observe en particulier entre 1960 et 2010, 5,5 fois plus d'épis et 2,3 fois plus de jetées portuaires (Cerema et MTES, 2018). En tout, ces aménagements impactent un linéaire côtier de l'ordre de 3 100 km, soit un taux d'artificialisation moyen de l'ordre de 30 %⁸. Pourtant, ces aménagements ne constituent pas un remède efficace à long terme contre l'érosion voire accélèrent les phénomènes en reportant latéralement l'érosion (cas des perrés, des épis et des brise-lames) ou en provoquant un abaissement de la plage par l'augmentation de la réflexion de l'énergie des vagues en pied d'ouvrage (cas des perrés, murs et digues).

7 Voir <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cartographie-ouvrages-amenagements-littoraux-methode>, <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cerema-elabore-premiere-cartographie-nationale-ouvrages>, <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cartographie-ouvrages-amenagements-littoraux-realisee-cerema> et <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/cartographie-nationale-des-ouvrages-et-r502.html>

8 Sur la base du trait de côte de référence Histolitt® (Shom-IGN), 35 % en métropole et 13 % dans les départements et régions d'outre-mer.

À ces impacts directs, déjà conséquents, peuvent s'ajouter :

- les modifications des apports sédimentaires des fleuves du fait des interventions humaines sur les bassins versants, notamment par la construction de barrages, l'endiguement des cours d'eau et les prélèvements passés dans les lits des rivières⁹ qui limitent et diminuent la circulation et les volumes de sédiments parvenant à la côte,
- les impacts cumulés des usages et activités en mer (pêche via les arts traînants, champs éoliens en mer, extractions de granulats, traitement à terre des sédiments de dragage des ports, etc.) qui perturbent le transit et peuvent diminuer le stock sédimentaire disponible dans le système côtier,
- et la pollution des milieux, une des premières causes de la dégradation des herbiers, mangroves et récifs coralliens.

Bien que connus qualitativement, ces impacts cumulés sont toutefois difficiles à quantifier. Ils s'apprécient préférentiellement à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire et nécessitent des études locales, au cas par cas. Par ailleurs, comme indiqué précédemment (**voir 1.2**), les activités générant des impacts sédimentaires au-delà de la profondeur de fermeture¹⁰ peuvent éventuellement avoir des impacts à la côte du fait de l'existence de mouvements sédimentaires profonds (**voir chapitre 3**). Cependant, ces processus de transfert sédimentaire et d'impact à la côte sont difficiles à appréhender et restent du domaine de la recherche.

1.2.3. DRAGAGES PORTUAIRES, RECHARGEMENTS DE PLAGE ET EXTRACTIONS DE GRANULATS EN MER

En mer, les principales activités d'extraction de sédiments des fonds marins, sources de remobilisation et/ou de perte sédimentaire pour les systèmes marin et littoral, sont : les dragages portuaires, les dragages réalisés dans un but de rechargement de plage et les extractions de granulats marins.

Les dragages portuaires sont réalisés dans un but de maintien ou d'amélioration des conditions de navigation (entretien de chenaux d'accès, approfondissement ou aménagement de nouvelles aires portuaires). La dérive littorale¹¹ est souvent à l'origine du dépôt dans les zones portuaires de sédiments bloqués par les ouvrages ou captés dans une zone abritée. En fonction des caractéristiques granulométriques et sanitaires des sédiments dragués, ceux-ci peuvent être ensuite soit clapés en mer ou déposés sur l'estran, soit retraités à terre. Les sédiments réintégrés dans l'environnement marin ou littoral peuvent ainsi contribuer de nouveau à l'équilibre des systèmes, notamment pour les côtes basses meubles (analyse à faire par cellule hydrosédimentaire), tandis que les sédiments gérés à terre constituent une perte définitive pour les systèmes. Il faut toutefois noter que les sédiments dragués dans les darses portuaires sont généralement essentiellement composés d'éléments fins, participant peu au budget sédimentaire des cellules hydrosédimentaires, et pouvant présenter de fortes concentrations en métaux lourds et matières organiques. Les données relatives aux sites d'immersion des sédiments de dragages portuaires sont suivies et analysées par le Cerema pour le compte du Ministère en charge de l'environnement¹². On peut estimer que le volume moyen dragué pour les opérations portuaires est de l'ordre de 38,5 millions de m³/an entre 2006 et 2015¹³.

⁹ Les extractions dans l'espace de mobilité des cours d'eau (espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer) sont interdites en France depuis 1994 par arrêté ministériel (arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières).

¹⁰ Par exemple l'extraction de granulats au sein d'une concession implantée au-delà de la profondeur de fermeture d'une cellule hydrosédimentaire.

¹¹ Transport latéral à la côte des sédiments sous l'effet des vagues et des courants marins

¹² Plus d'informations sur : <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/sites-d-immersion-des-sediments-de-dragages-r396.html>

¹³ <http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/fr/print/indicateurs/evolution-du-dragage-dans-les-ports-maritimes>

Pour les dragages réalisés à des fins de rechargement de plage, les sédiments extraits sont déposés directement sur l'estran ou dans les petits-fonds et alimentent ainsi le système plage sous-marine/plage émergée/dune. Il s'agit de sédiments dont la granulométrie et les qualités biogéochimiques doivent être vérifiées et cohérentes avec le milieu à recharger. En particulier, pour un rechargement de plage durable, le diamètre médian des sédiments doit être au moins équivalent ou supérieur au diamètre des sédiments du système rechargé. Un récent recensement d'opérations majeures, supérieures à 150 000 m³, a été réalisée par Artelia (2019) entre 2000 et 2019 pour un total de 14 millions m³, soit 0,7 million de m³/an.

Les extractions de granulats marins ont vocation à exploiter cette ressource en dehors de son système d'origine ; il s'agit donc uniquement de pertes pour le système. Les extractions concernent essentiellement des sédiments de type sables, graviers ou galets. Le recensement UNPG entre 2000 et 2019 indique une production comprise entre 3 à 4,5 millions de m³/an.

Ces trois activités partagent la nécessité d'analyser les effets potentiels :

- sur le milieu naturel physique et biologique (faune, flore, turbidité...) difficile à évaluer, notamment pour les aspects cumulatifs,
- sur l'évolution du trait de côte qui doit s'évaluer à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire et prendre en compte les caractéristiques physiques et environnementales de cette dernière en particulier la profondeur d'implantation du site, sa distance à la côte et la profondeur d'extraction, ainsi que le type de sédiment extrait.

La législation relative aux extractions de GM nécessite une étude d'impact (**voir annexe**).

Impacts des extractions de granulats marins sur l'évolution du trait de côte en France

L'érosion côtière est un phénomène naturel qui peut être exacerbé par les activités anthropiques limitant les échanges sédimentaires voire réduisant les apports à la côte. Les extractions de granulats marins sont ainsi des actions perturbatrices du milieu marin au même titre que d'autres activités ou que la construction d'ouvrages côtiers ou de barrages fluviaux. Ces impacts, connus de longue date, sont pris en considération dans la réglementation française en vigueur qui encadre ces activités pour en limiter les impacts ; à ce jour, aucune étude ne démontre en France un recul du trait de côte directement imputable aux seules extractions de granulats en mer.

1.3. L'ÉVOLUTION GÉNÉRALE DU TRAIT DE CÔTE SUR LE LITTORAL MER DU NORD-MANCHE-ATLANTIQUE

Les travaux menés dans le cadre de la *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte* pour la production de l'indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTES, 2017¹⁴) et l'actualisation du Catalogue sédimentologique des côtes françaises (collection « Dynamiques et évolution du littoral »)¹⁵ ont permis de dresser un panorama des phénomènes d'érosion et des facteurs d'évolution du trait de côte sur les « provinces sédimentaires » du littoral des façades métropolitaines mer du Nord, Manche et Atlantique (MNMA). Sur ce littoral MNMA, sept provinces sédimentaires, de plusieurs centaines de kilomètres en moyenne, ont ainsi été délimitées sur la base d'une certaine homogénéité des processus d'évolution du trait de côte par rapport aux provinces adjacentes. Elles font actuellement l'objet d'une synthèse des connaissances coordonnée par le Cerema ¹⁶ :

- 1. De la frontière belge à la pointe du Hourdel (Nord, Pas-de-Calais et Somme)
- 2. De la pointe du Hourdel au cap d'Antifer (Somme et Seine-Maritime)
- 3. Du cap d'Antifer au cap de la Hague (Seine-Maritime, Calvados et Manche)
- 4. Du cap de la Hague à la pointe de Corsen (Manche, Ille-et-Vilaine, Côtes-d'Armor et Finistère)
- 5. De la pointe de Corsen à la pointe de Chemoulin (Finistère, Morbihan et Loire-Atlantique)
- 6. De la pointe de Chemoulin à la pointe de Suzac (Loire-Atlantique, Vendée et Charente-Maritime)
- 7. De la pointe de Suzac à la frontière espagnole (Gironde, Landes et Pyrénées-Atlantiques)

L'indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTES, 2017) donne une évaluation des vitesses moyennes d'évolution passée du trait de côte à long terme (généralement sur une période supérieure à 50 ans) et est calculé sur un linéaire côtier naturel tous les 200 m. L'indicateur national est disponible sur l'ensemble de la métropole et des départements et régions d'outre-mer (DROM), hors Guyane dont les phénomènes sont cycliques, d'une ampleur incomparable au reste du pays et difficiles à observer. L'indicateur national ne prend pas en compte les évolutions altimétriques du trait de côte (par exemple érosion se traduisant par un abaissement de l'estran) et n'est pas calculé au droit des ouvrages et aménagements côtiers fixant le trait de côte, qui ont par ailleurs été recensés par le Cerema et MTES (2018). Il ne permet donc pas d'évaluer l'éventuelle efficacité des protections du littoral mises en place et ne permet pas d'identifier les sites rechargés. Il permet par contre, pour la première fois de manière homogène sur l'ensemble du territoire français, de quantifier finement les vitesses d'évolution du trait de côte et de visualiser la répartition géographique de l'intensité du phénomène.

¹⁴ Plus d'informations sur : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/indicateur-national-erosion-cotiere> et <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/indicateur-national-de-l-erosion-cotiere-r473.html>

¹⁵ Plus d'informations sur : <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/dynamiques-et-evolution-du-littoral-synthese-des-r462.html>

¹⁶ Les fascicules et leurs atlas cartographiques sont publiés et disponibles gratuitement en téléchargement sur le site du Cerema et les données SIG associées sont sur le site Géolittoral.

Sur les provinces MNMA, l'indicateur montre une très forte disparité des intensités des phénomènes d'érosion, parfois sur des distances faibles, mais il confirme également qu'aucun territoire n'est épargné (Figure 5 et Figure 6). Les résultats sur les façades MNMA sont très proches de ceux calculés au niveau national (21 % en recul, 13 % en avancée et 67 % non perceptible sur les façades contre 19 %, 12 % et 70 % respectivement au niveau national), indiquant des tendances comparables entre façades de l'hexagone et même sur les territoires ultramarins.

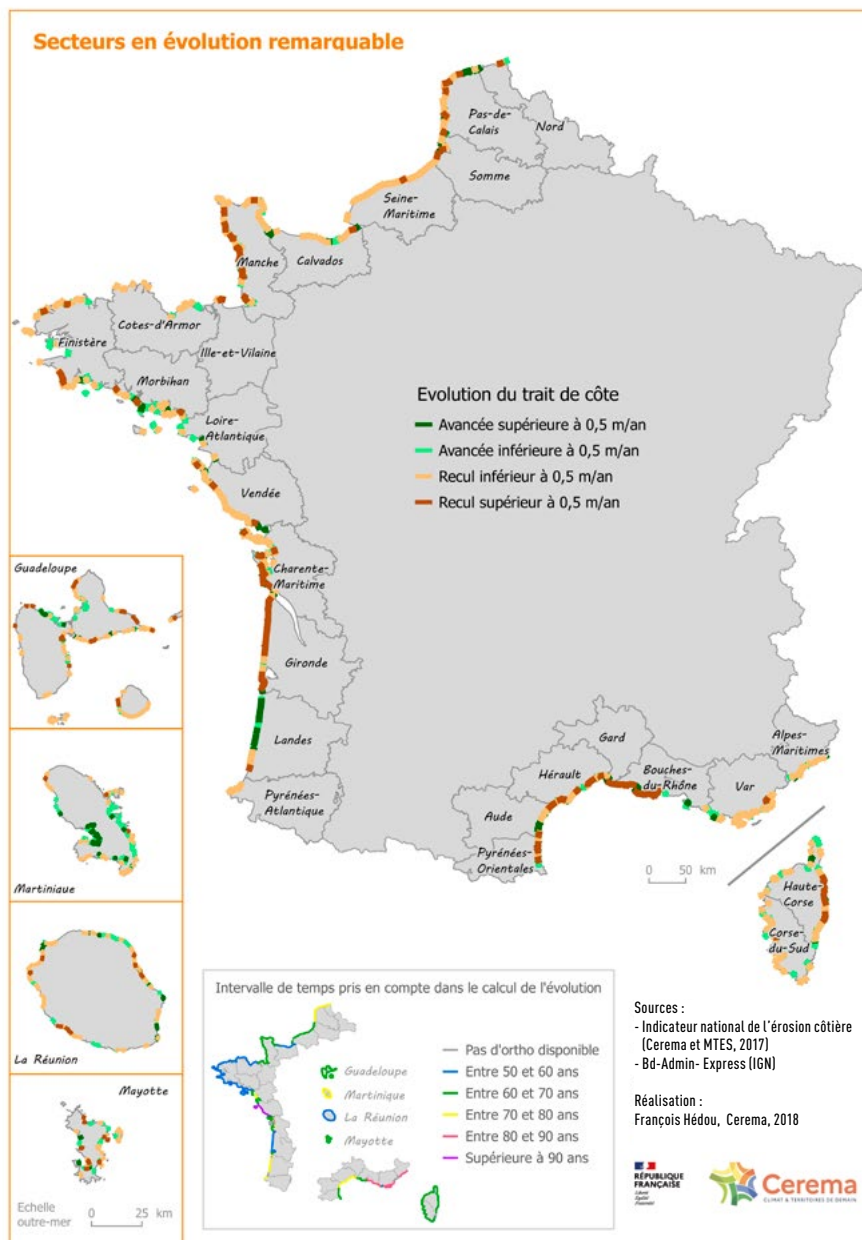


Figure 5 – Représentation à l'échelle nationale de l'évolution du trait de côte d'après les données de l'indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTEs, 2017).

NB : à cette échelle, les évolutions comprises entre $\pm 0,1$ m/an ne sont pas cartographiées et une priorité d'affichage est appliquée aux évolutions « remarquables ». Les représentations à des échelles supérieures, plus fines, permettent de faire apparaître des nuances substantielles de vitesse d'évolution localement.

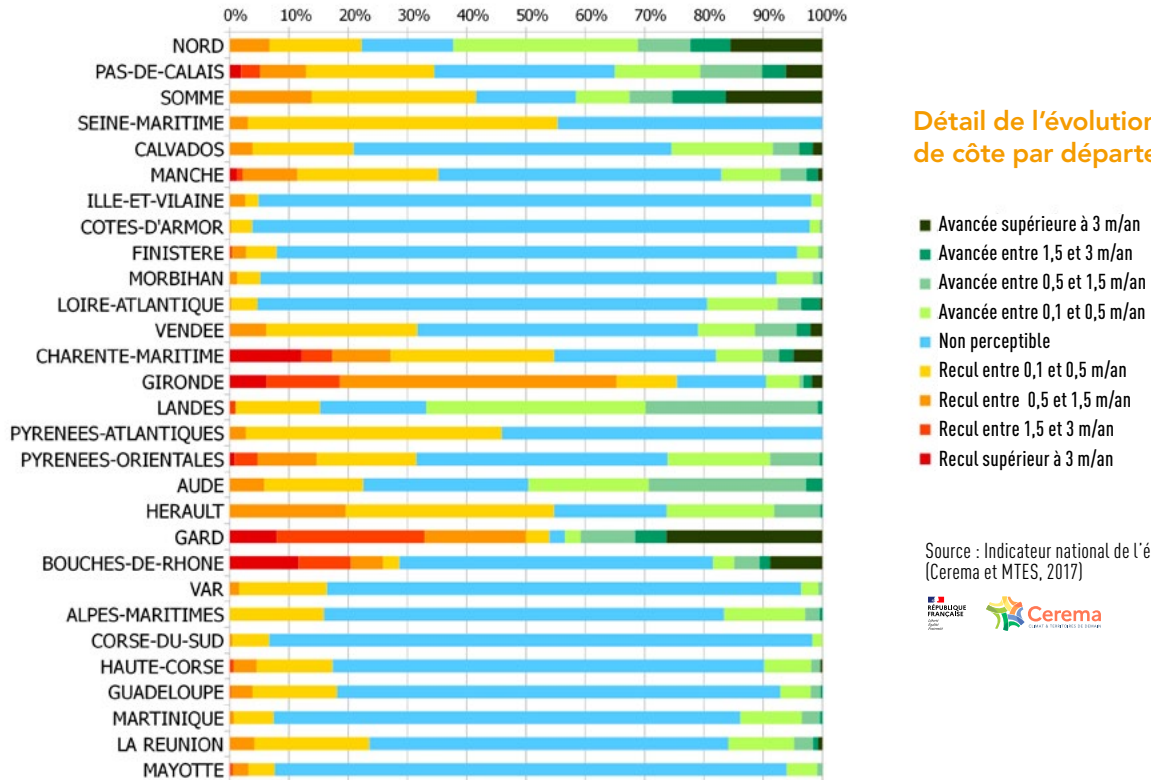


Figure 6 – Histogramme des vitesses d'évolution du trait de côte par département (métropole et DROM) d'après les données de l'indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTES, 2017). NB : Les évolutions non perceptibles correspondent à des vitesses d'évolution comprises entre $\pm 0,1$ m/an.

Sur les façades MNMA, 3 départements (Seine-Maritime, Charente-Maritime et Gironde) possèdent au moins de 50 % de leurs côtes en recul, alors que les 4 départements bretons et la Loire-Atlantique ont moins de 10 % de valeurs en recul. Des phénomènes de recul du trait de côte, importants mais très localisés, peuvent cependant affecter des départements présentant globalement un faible linéaire de côte en recul. Ainsi le département des Côtes-d'Armor qui ne présente que 4 % de valeurs d'évolution en recul sur son linéaire côtier, connaît localement des reculs pouvant être problématiques du fait de la présence d'enjeux au plus proche du trait de côte. 324 communes des façades MNMA possèdent au moins un secteur touché par un recul du trait de côte sur les 567 communes de la façade où l'indicateur national de l'érosion côtière a été calculé. Cela correspond à 57 % des communes de la façade, concernées par une problématique de recul du trait de côte. 26 communes de ces façades sont par ailleurs concernées par des reculs dépassant 1,5 m/an sur certaines portions de leur littoral.

Ces résultats peuvent également être appréhendés en fonction des types de côte (Figure 7). Les côtes à falaises représentent la moitié (50 %) des environnements naturels rencontrés par les profils de l'indicateur national sur les façades MNMA. Leur évolution peut être ponctuellement brutale lors de glissements ou d'écroulements en masse, mais ces côtes présentent généralement une évolution très faible à l'échelle du front de falaise. Sur la période d'étude de l'indicateur national, leur évolution apparaît ainsi non perceptible sur 90 % des profils. Des reculs du trait de côte sont néanmoins observés sur 10 % de ces profils, notamment dans des secteurs de falaises composées de roches sédimentaires comme en Seine-Maritime et dans les Pyrénées-Atlantiques. Les côtes basses sableuses représentent quant à elles 46 % des environnements naturels de l'indicateur national sur la façade et présentent les taux d'évolution les plus importants et les plus contrastés avec 34 % de valeurs en recul, 24 % en avancée et 42 % stables.

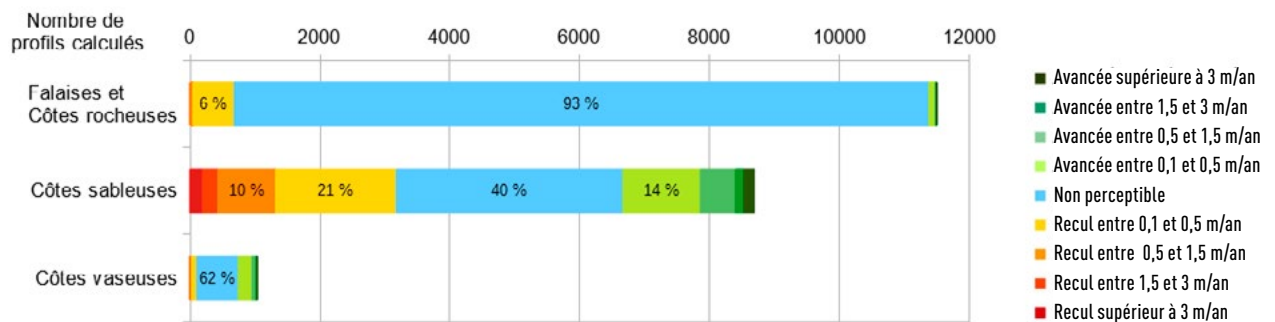


Figure 7 – Évolution du trait de côte au niveau national
(métropole et DROM – hors Guyane) selon le type de côte (Cerema et MTES, 2017)

Source : Indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTES, 2017)



En faisant l'hypothèse que le recul calculé en un seul profil peut être extrapolé sur un secteur de trait de côte rectiligne de 200 m (correspondant à l'espacement des profils), il est possible de fournir un ordre de grandeur des surfaces de terres gagnées ou perdues. En métropole et dans les DROM (hors Guyane), la surface totale perdue au niveau des secteurs en recul est estimée à 30 km² en 50 ans entre 1960 et 2010. Cette superficie correspond globalement à la surface de 4 200 terrains de football. Sur les mêmes bases de calcul, l'estimation des pertes est de 18 km² sur les façades MNMA, soit 60 % des surfaces perdues du littoral français (hors Guyane). Trois départements de métropole, dont 2 sur la façade Atlantique, avec chacun environ un peu plus de 5 km² de terres perdues en 50 ans, concentrent la moitié de la perte de surface totale : il s'agit de la Gironde (recul quasi-généralisé de la côte sableuse), de la Charente-Maritime (recul au sud-ouest de l'île d'Oléron et au niveau de la Tremblade) et des Bouches-du-Rhône (recul particulièrement marqué en Camargue). Il existe toutefois des lieux où les terres avancent naturellement, notamment au niveau de certaines embouchures comme au sud de la baie de Somme. À l'échelle de la métropole et des DROM (hors Guyane), la balance nationale entre les gains et les pertes de terres reste cependant négative avec un bilan pour les espaces naturels estimé à - 6 km² entre 1960 et 2010, et de - 5 km² pour la façade Atlantique depuis la pointe de Corsen jusqu'à la frontière espagnole.

Ainsi, l'analyse de l'évolution du trait de côte peut être précisée au niveau des provinces sédimentaires. Lorsque l'information est disponible, cette analyse est réalisée au niveau des cellules hydrosédimentaires, sinon selon un découpage reposant plus sur les types de côte appelé « unités morphosédimentaires ».

SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SUR CERTAINES PROVINCES SÉDIMENTAIRES DES FAÇADES DE LA MER DU NORD, DE LA MANCHE ET DE L'ATLANTIQUE

2.1. INTRODUCTION

Les dossiers d'extraction de granulats marins ne concernent pas toutes les provinces sédimentaires des façades MNMA. Ainsi, la synthèse des connaissances ne portera que sur les provinces :

- 2. De la pointe du Hourdel au cap d'Antifer (Somme et Seine-Maritime)
- 3. Du cap d'Antifer au cap de la Hague (Seine-Maritime, Calvados et Manche)
- 4. Du cap de la Hague à la pointe de Corsen (Manche, Ille-et-Vilaine, Côtes-d'Armor et Finistère)
- 6. De la pointe de Chemoulin à la pointe de Suzac (Loire-Atlantique, Vendée et Charente-Maritime)
- 7. De la pointe de Suzac à la frontière espagnole (Gironde, Landes et Pyrénées-Atlantiques)

Sur chacune de ces provinces sédimentaires, sont établies une synthèse de l'ensemble des interventions humaines, historiques et actuelles, et, en tant que possible, une évaluation de l'importance relative de chacune d'entre elles dans les dynamiques sédimentaires et les évolutions du trait de côte. La possibilité ou non d'apprécier la part relative des opérations d'extraction de granulats sur ces évolutions est ainsi précisée en fonction de l'état des connaissances actuelles.

Les éléments présentés ci-dessous s'appuient sur la documentation rassemblée par le Cerema dans le cadre de l'actualisation du Catalogue sédimentologique des côtes françaises (collection « Dynamiques et évolution du littoral »).

2.2. DE LA POINTE DU HOURDEL AU CAP D'ANTIFER (SOMME, SEINE-MARITIME)

2.2.1. ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

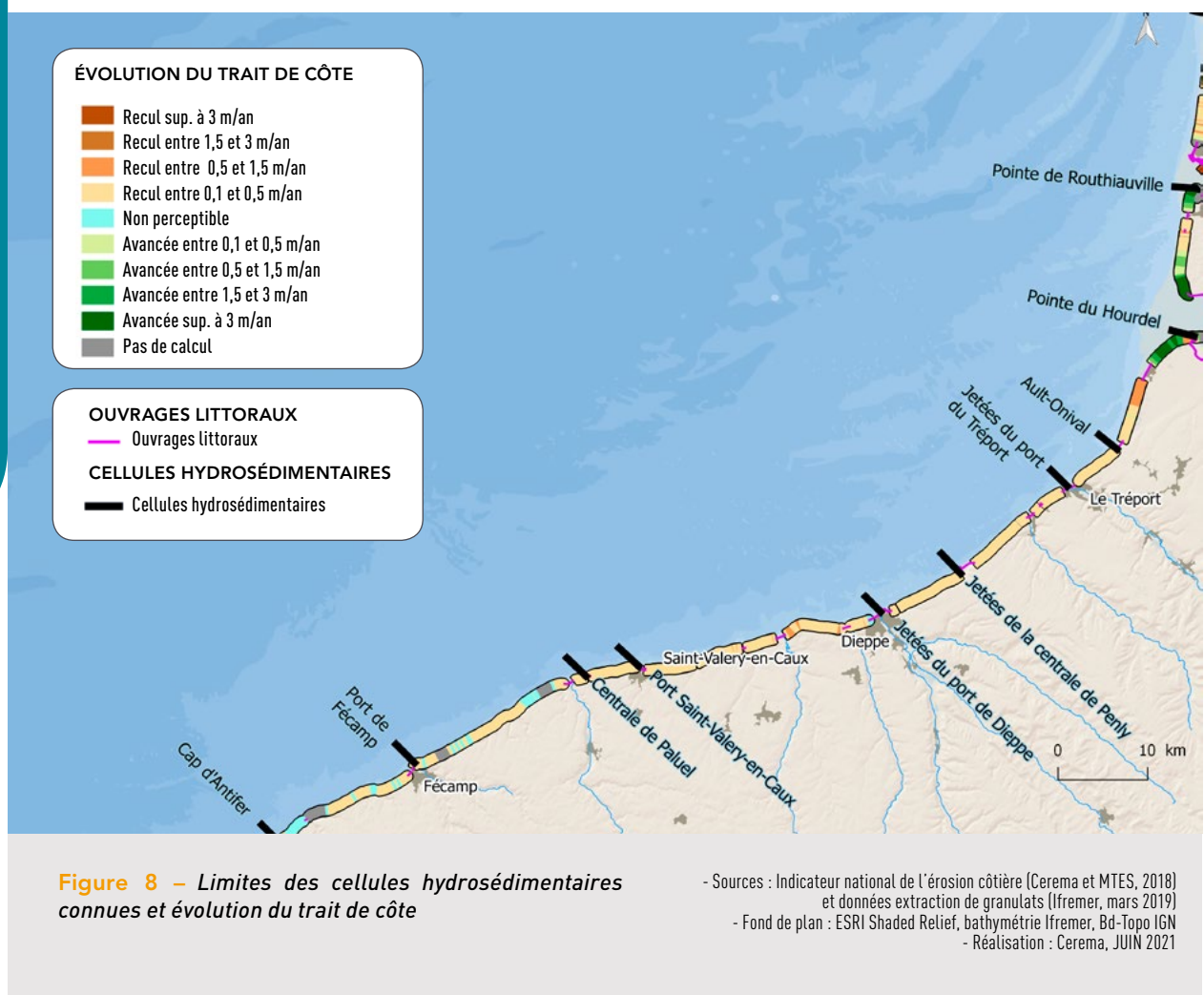
La province de la pointe du Hourdel au cap d'Antifer présente deux secteurs côtiers de morphologies bien distinctes :

- une côte basse meuble de la pointe du Hourdel à Ault-Onival (~ 29 km), correspondant aux bas-champs de Cayeux dont l'altitude est inférieure aux plus hautes eaux et constituée par un cordon de galets se terminant en flèche au niveau de l'estuaire de la Somme,
- une côte à falaises crayeuses hautes de Ault-Onival au cap d'Antifer (~ 113 km), correspondant à la côte d'Albâtre et dont le littoral est entrecoupé de valleuses et de vallées basses où circulent les fleuves côtiers, au débouché desquels sont naturellement implantés des ports et/ou des stations balnéaires concentrant une grande partie de l'habitat.

Le trait de côte de la province est majoritairement naturel mais ponctué de nombreux ouvrages transversaux (épis, jetées portuaires...) impactant près de 43 km du linéaire côtier : 330 ouvrages de défense contre la mer ont été inventoriés le long de la province, dont 220 ouvrages transversaux (Cerema-MTES, 2018). Par conséquent, le littoral de la province évolue non seulement sous l'influence des facteurs hydrodynamiques naturels (vagues, niveau marin, courants...) mais aussi et surtout du fait de l'impact des aménagements et activités anthropiques (ouvrages, extractions...).

L'évolution du littoral de la province est décrite par plusieurs travaux de recherche, des observatoires du trait de côte (le Réseau d'observation du littoral –ROL– de Normandie et des Hauts-de-France, le service national d'observation DYNALIT du CNRS/INSU, les associations GEMEL Normandie et ESTRAN, etc.) et des études liées aux deux centrales nucléaires EDF installées sur la côte. L'indicateur national de l'érosion côtière (Cerema, 2018) a permis de proposer une analyse de l'évolution du littoral s'inscrivant sur le moyen à long terme (de 1947 à 2014 du cap d'Antifer à Paluel, de 1947 à 2013 de Paluel au Tréport et de 1947 à 2007 du Tréport à la pointe du Hourdel) : 56 % du littoral est ainsi en recul (dont 49 % à des vitesses comprises entre 0,1 et 0,5 m/an et 7 % entre 0,5 et 1,5 m/an), 5 % en accrétion et 39 % stable ou d'évolution non perceptible.

Sur cette province, les cellules hydrosédimentaires sont globalement bien appréhendées, du fait de l'impact important des ouvrages majeurs sur le transit sédimentaire, et peuvent être cartographiées pour servir à l'analyse des phénomènes d'évolution du trait de côte (Figure 8). Cependant, si les mouvements sédimentaires à la côte sont essentiellement longitudinaux (le transport sédimentaire longitudinal résultant est globalement orienté du sud-ouest vers le nord-est), les mouvements perpendiculaires au trait de côte restent à ce jour très peu connus sur l'ensemble de la province. La province est par ailleurs caractérisée par un cordon de galets en haut de plage, généralement adossé au pied des falaises ou à des perrés au débouché des vallées, qui finit, au niveau de la plaine maritime picarde, par une flèche libre à la pointe du Hourdel.



2.2.2. ÉTAT DES CONNAISSANCES DES IMPACTS DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Les deux types de côte de la province (côtes basses meubles et côtes à falaises) se distinguent par une évolution des aménagements qui leur est propre, en lien avec les activités et les enjeux de ces territoires littoraux (protection contre les submersions marines, lutte contre l'érosion, protection à des fins économiques : tourisme, pêche, etc.).

Historiquement, de par sa situation face à l'Angleterre et sa position intermédiaire sur les routes de navigation entre l'Atlantique et la mer du Nord, l'activité portuaire de la province s'est tournée vers la pêche et le commerce. Sa situation entre deux capitales européennes majeures, Paris et Londres, a permis à la côte d'Albâtre un développement résidentiel et économique rapide dès le XIX^e siècle. Après l'arrivée des premiers curistes dans les années 1750, les villes balnéaires deviennent des lieux de loisirs qui vont connaître de nombreux aménagements (Corbin, 1988 ; Deprest, 1997 ; Meur-Férec, 2006 ; Letortu, 2013). En parallèle, les jetées portuaires, construites en bois au XVII^e siècle et nécessitant un entretien régulier des chenaux d'accès, sont prolongées vers le large pour limiter l'obstruction des entrées des ports par les galets : Fécamp en 1850, Saint-Valery-en-Caux en 1860, Le Tréport en 1882 et Dieppe en 1913 (Bellin, 1764 ; Latteux, 2001 ; Letortu, 2013).

Après la Seconde Guerre mondiale, le tourisme devient un tourisme de masse (Letortu, 2013). Les industries s'installent dans ces villes littorales, attirant avec elles les populations au plus près des côtes (Meur-Férec, 2006 ; Letortu, 2013). Des ouvrages longitudinaux tels que des perrés et des digues faisant office de promenades sont aménagés sur les plages. Les villes mettent également en place des ouvrages transversaux (épis) de défense contre la mer (Augris *et al.*, 2004 ; Letortu, 2013). Ces ouvrages constituent un obstacle au transit des sédiments notamment des galets, scindant en sept segments le cordon de galets qui s'étendait du cap d'Antifer à la pointe du Hourdel (Letortu, 2013). Aujourd'hui encore, des ouvrages de défense contre la mer sont érigés ou consolidés pour protéger les villes des assauts de la mer. L'industrialisation du littoral se poursuit au XX^e siècle avec la construction de nouvelles jetées au niveau des chenaux des centrales nucléaires de Paluel en 1978 et de Penly en 1981, et se poursuivra au début du XXI^e siècle avec l'installation de parcs éoliens en mer.

D'autres activités peuvent avoir un impact direct ou indirect sur les apports sédimentaires à la côte et par conséquent sur l'évolution du littoral et des fonds. Ainsi, avant 1950, les plages ont fait l'objet de ramassage manuel de galets et, en 1970, le prélèvement sur les plages devient interdit sauf cas particulier. Avec l'interdiction d'exploitation des gravières dans les lits mineurs des rivières, l'exploitation de granulats marins se développe et s'industrialise (Dolique, 1999 ; Letortu, 2013). L'aquaculture et la pêche sont également liées à la mise en place d'aménagements qui peuvent influencer, eux aussi, sur la dynamique sédimentaire. Enfin, les zonages réglementaires liés à la protection de l'environnement participent indirectement à la protection du littoral et à son équilibre sédimentaire.

2.2.3. ACTIVITÉS D'EXTRACTION DE GRANULATS MARINS

Sur la province, 4 concessions, concernant 6 sites d'extraction de granulats marins, sont autorisées et en activité en 2020 (Tableau 1 et Figure 9). À ces sites situés en mer s'ajoute un site côtier de prélèvement sur l'estran, faisant l'objet d'une autorisation d'occupation temporaire (AOT) du domaine public maritime au niveau de la pointe du Hourdel (Figure 9).

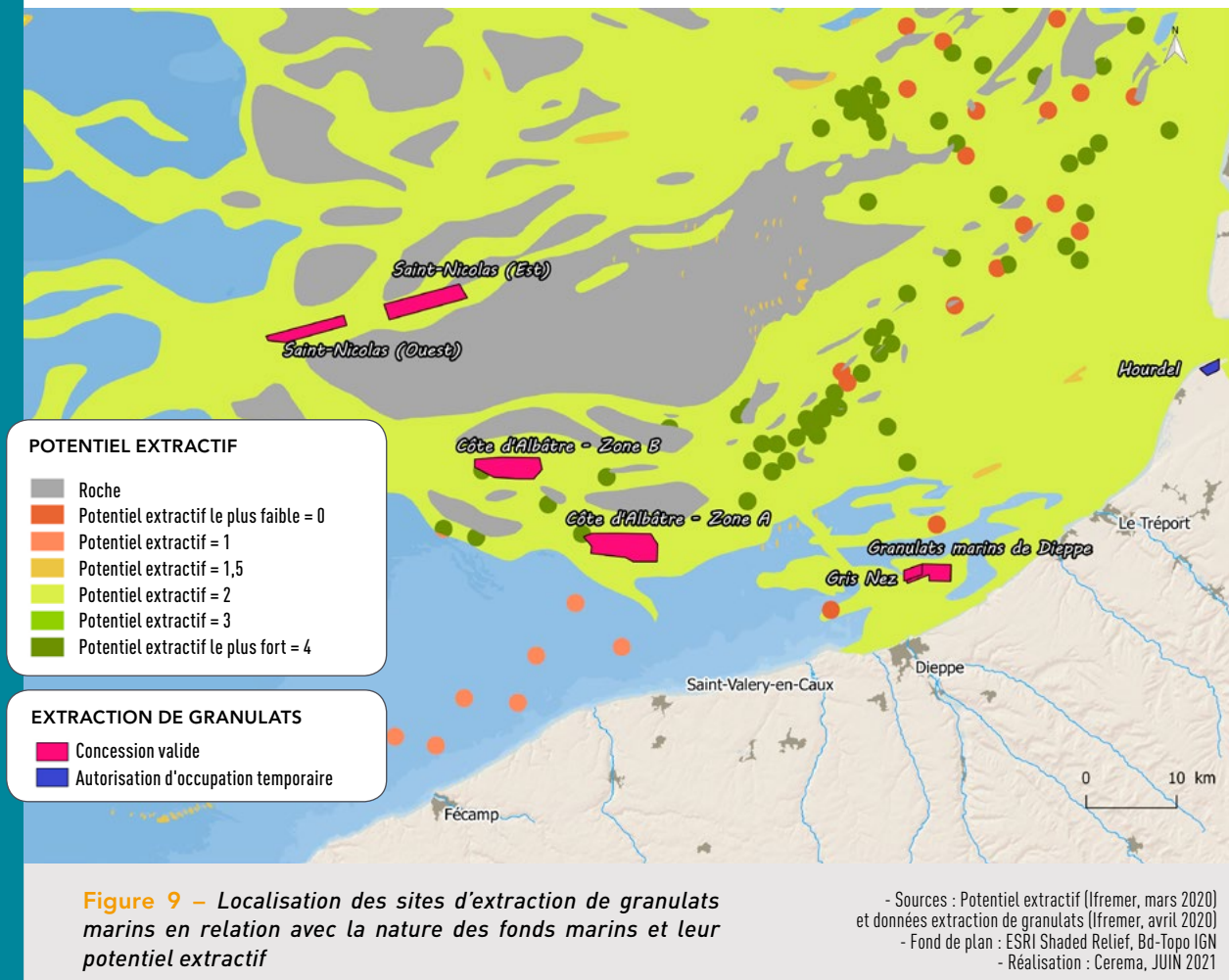
Gisement	Délivrance de la concession	Localisation	Superficie (km ²)	Quantité autorisée
Granulats marins de Dieppe	17/04/10	Au large de Dieppe	5,9	375 000 m ³ /an pour 15 ans puis 500 000 m ³ /an pour 15 ans
Gris-Nez	17/04/13	Au large de Dieppe	2,36	270 000 m ³ /an pour 30 ans
Côte d'Albâtre	02/12/11	Au large entre Fécamp et Dieppe	34 (2 sites)	600 000 m ³ /an pour 5 ans puis 1 800 000 m ³ /an pour 25 ans
Saint-Nicolas	10/03/13	Au large entre Antifer et Saint-Valery-en-Caux	25 (2 sites)	3 000 000 m ³ /an pour 30 ans

Tableau 1 – Détails des gisements de granulats marins situés entre le cap d'Antifer et la pointe du Hourdel (GESLAIN, 2014 ; MEEM et MINEFI, 2016)

En Manche, les ressources de matériaux potentiellement extractibles sont estimées, suivant la méthode géostatistique, à 149 milliards de m³ dans la ZEE dont près de 117 milliards de m³ dans les paléovallées (Augris et al., 2006 ; MEEM et MINEFI, 2016). En particulier, la ressource en sable et graviers devant Dieppe approche le milliard de m³ (DRE Haute-Normandie et CETE Normandie-Centre, 2000 ; Latteux, 2001). Les ressources minérales marines actuellement exploitées en Manche orientale proviennent ainsi principalement de deux types de dépôts sédimentaires : les paléovallées et les cordons côtiers fossiles.

Les paléovallées, d'âge quaternaire et localisées par 30 à 40 m de fond, sont les prolongements des fleuves actuels et ont la même origine sédimentaire que les gisements alluvionnaires terrestres. Elles sont constituées de sédiments grossiers (sable et graviers siliceux) auxquels s'ajoutent des éléments pluridécimétriques, essentiellement granitiques provenant probablement de la débâcle glaciaire. C'est le cas des concessions de « Côte d'Albâtre » et de « Saint Nicolas » (Claveleau, 2007).

Les cordons côtiers fossiles sont principalement constitués de galets et sables grossiers, comme dans le cas des concessions « Granulats marins de Dieppe » et « Gris Nez », (Duclos, 2012). Ces concessions exploitent ainsi un cordon de galets fossile situé au large de Dieppe par 15-20 m de fond, témoin de l'ancienne ligne de rivage au cours du Quaternaire (Claveleau, 2007 ; Figure 9).



2.2.3.1. Historique des extractions sur la province

L'exploitation des cordons de galets sur le littoral commence au XIX^e siècle et s'intensifie au XX^e. Entre Antifer et Le Tréport, 3 000 000 m³ de galets ont été extraits entre 1900 et 1972, soit la moitié des stocks existants à l'époque (LCHF, 1986a ; Costa *et al.*, 2007) :

- dans la zone de Dieppe-Ault, une quantité de galets de l'ordre de 1 000 000 m³ a été extraite de 1913 à 2001, dont 800 000 m³ à Dieppe (Latteux, 2001 ; Sogreah, 1994),
- entre Fécamp et Le Tréport, 415 000 m³ de galets ont été extraits entre 1946 et 1970 sur deux zones majeures, Dieppe et Le Tréport, avec respectivement 235 000 m³ et 180 000 m³ de galets extraits (Letortu, 2013).

Au niveau des Bas-Champs de Cayeux, l'extraction des galets a débuté en 1840 pour un usage régional puis, à partir de la fin du XIX^e siècle, pour un commerce international. Jusqu'en 1950, l'extraction est artisanale, à la main ou avec une pelle, puis l'extraction s'industrialise (**voir encart page suivante**). En 1900, 100 000 tonnes de galets ont été extraites contre 15 000 tonnes 40 ans auparavant. Bastide *et al.*, 2005 proposent une estimation du tonnage de galets extraits du Hourdel au cours du 20^{ème} siècle sans que celle-ci soit facilement imputable aux prélèvements sur l'estran ou dans la carrière terrestre. De plus, les attestations d'anciens prélèvements illégaux de galets conduisent certains auteurs à réévaluer à la hausse cette estimation (Augris *et al.*, 2004 ; Letortu, 2013). D'autre part une série d'études menées par Artelia (1992 à 2018) sur le site de la carrière du Hourdel n'a pas mis en évidence d'interaction entre l'exploitation de cette carrière et la dynamique hydrosédimentaire du littoral.

Des galets d'une pureté exceptionnelle

En effet, les galets de Cayeux sont formés de silex issus de l'érosion des falaises picardes et ont à ce titre la particularité d'être constitués de silice pratiquement pure (près de 99 %) (OREAP, 1975 ; <http://www.cayeux-sur-mer.fr/economie-et-developpement/industrie-du-galet/>, site consulté le 13 février 2020). Les galets peuvent être exploités de 2 manières : soit « crus », c'est-à-dire tels quels, triés, calibrés ou concassés, soit « cuits », c'est-à-dire calcinés sur place à des températures comprises entre 1 000 et 1 600 °C (OREAP, 1975).

Pour les galets crus, leur utilisation dépend de leur couleur et forme (OREAP, 1975), les plus recherchés étant les galets bleus pour l'industrie céramique et la porcelaine (avec une partie exportée vers la Grande-Bretagne pour la production de flint-glass). Les galets ronds sont sélectionnés à la main et utilisés comme agents de broyage dans l'industrie de la céramique, l'industrie chimique, des peintures ou pour le broyage de minéraux. Les autres galets de couleur (gris, jaunes, marrons et blancs) sont utilisés non concassés pour de la décoration (décors muraux, carreaux, dalles...) ou concassés pour des activités du BTP (béton, sablage, ravalement de bâtiments, sciage des marbres, papiers abrasifs...), la filtration des eaux ou encore l'alimentation de volailles (éléments de broyage).

Pour les galets cuits, qui donnent par transformation thermique une cristobalite très blanche et très pure, leur utilisation dépend de leur teneur en silice et de la température de calcination ; ils sont ensuite broyés à différentes granulométries avant utilisation (OREAP, 1975). Cuits à 1 000 et 1 200 °C, ils intègrent la composition d'enrobés bitumineux clairs et de certains bétons (bétons blancs de masse, béton architectonique) respectivement. Les galets les plus purs en silice sont calcinés à très haute température (1 500-1 600 °C) pour se transformer en silice cristobalite¹⁷ très blanche et broyés pour entrer dans la composition de céramiques, de peintures, de pâtes à polir, mais également de ciments dentaires et chirurgicaux. Les différentes granulométries donnent lieu à plusieurs variétés de silice des usages particuliers, tels que l'augmentation de la cohésion des bétons et peintures pour la variété Farsil (entre 20 et 44 microns), la cohésion des enduits et des peintures routières (avec augmentation de leur luminosité et adhérence) pour la variété Minigrain, de granulométrie légèrement supérieure, et réalisation de béton blanc, béton architectonique, signalisation routière en béton pour la variété Grenette, de granulométrie encore plus élevée (OREAP, 1975).

L'impact des extractions historiques sur l'estran et des dragages des accès portuaires sans restitution dans le milieu naturel sur l'évolution du cordon de galets est mis en évidence par l'état du cordon de galets durant la période 1939-1945 où les extractions et dragages étaient notablement réduits du fait de la guerre, notamment à Saint-Valery-en-Caux (LCHF, 1987 ; Latteux, 2001), Criel-sur-Mer (Teisson, 1989 ; Latteux, 2001) et Ault-Onival (Dallery, 1955 ; Latteux, 2001).

En 1972, l'extraction des galets est restreinte et réglementée et en 1983, elle est définitivement interdite sur les plages normandes et picardes (Latteux, 2001 ; Letortu, 2013). Actuellement, seul le cordon littoral des Bas-Champs au nord de Cayeux-sur-Mer, au niveau de la zone d'accumulation de la flèche terminale, est autorisé à l'exploitation, à hauteur de 55 000 tonnes/an. La fraction de sédiments extraits du cordon de galets comprise entre 20 et 40 mm est mise à disposition pour des besoins en rechargement (entre 50 et 100 000 m³/an) afin d'entretenir

¹⁷ La cristobalite est un minéral composé de silice -dioxyde de silicium SiO₂- avec des traces d'autres minéraux (Fe, Ca, Al, K, Na, Ti, Mn, Mg, P). La cristobalite est stable seulement au-dessus de 1 470 °C, mais elle peut cristalliser et persister dans un état métastable à des températures plus basses (Source : <http://destinationbaie-de-somme.over-blog.com/2015/10/le-galet-de-cayeux-sur-mer.html>, site consulté le 13 février 2020). La cristobalite est insensible à toute attaque chimique (OREAP, 1975).

la digue (cordon de galets conforté par 104 épis) des Bas-Champ de Cayeux. Par ailleurs, un principe de restitution de 1 tonne pour chaque tonne prélevée est imposé, permettant le maintien de l'équilibre sédimentaire du cordon (Source : <http://www.cayeux-sur-mer.fr/economie-et-developpement/industrie-du-galet/>, site consulté le 16 mai 2019) ; les galets mis en compensation sont issus de carrières terrestres. La zone d'accumulation de la Mollière est actuellement exploitée en installation classée pour l'entretien de la plage et du cordon.

La première autorisation d'extraction en Manche orientale a été accordée au large de Dieppe en 1979. L'objectif était de diminuer la pression d'exploitation des gravières dans les vallées côtières (exploitation des dépôts dans le lit majeur) tout en restant en capacité de répondre aux grands chantiers de construction, notamment celui de la centrale nucléaire de Penly dans les années 80 (Claveleau, 2007). La concession est située à 5 km au large de Dieppe, à des profondeurs comprises entre 10 et 15 m CMH¹⁸ sur une superficie de 5,9 km². L'extraction à but commercial a commencé en 1980 par la zone ouest du site d'extraction et s'est étendue vers l'est à partir de 1993 (Duclos, 2012 ; Quemmerais-Amice et al., 2012). Depuis 2005, deux sites d'extraction sont autorisés et actifs dans la province, tous deux au large de Dieppe : les concessions « Granulats Marins de Dieppe » et « Gris Nez ». En même temps, deux autres sites marins ont été retenus pour rechercher des granulats : le site de la « côte d'Albâtre » divisé en deux zones (zone A et zone B, recherches débutées en 2003) et le site de « Saint-Nicolas » divisé aussi en deux parties (est et ouest, recherches débutées en 2005) (Augris et al., 2006). Les permis de recherche ont abouti à des concessions d'exploitation depuis 2011 pour le site « Côte d'Albâtre » et depuis 2013 pour le site de « Saint-Nicolas ».

2.2.3.2. Volumes extraits

Entre 1980 et 1987, le GIE Graves de mer a extrait plus de 3 millions de tonnes de matériaux constitués essentiellement de sables et de galets (Costa, 1997 ; Latteux, 2001). Les quatre concessions de la province ont un volume total autorisé de 2 770 000 m³. Le volume réellement extrait est de l'ordre de 800 000 à 1 000 000 m³ et peut varier fortement d'une année à l'autre selon les besoins du marché (Tableau 1). À Dieppe, entre 2004 et 2005, l'intensité des extractions était de l'ordre de 1 h/ha/an (Desprez et Lafite, 2014). La durée des concessions d'exploitation des quatre gisements de granulats marins (sables et graviers siliceux) sur la province est de 30 ans.

2.2.3.3. Suivi des impacts

Les demandes de concession d'exploitation des granulats marins s'accompagnent d'une étude d'impact et d'un suivi environnemental des impacts, dans le but de déterminer des mesures de réduction des impacts des extractions sur le milieu marin. La synthèse produite par le GIS SIEGMA (Desprez et al., 2012) présente les résultats des suivis effectués sur les sites ateliers de Dieppe et de la baie de Seine entre 2003 et 2012. Geslain (2014) a produit une synthèse sur l'évaluation et le suivi de l'impact des extractions de granulats marins sur les écosystèmes et la biodiversité montrant un impact généralement limité au périmètre de la concession et dont la durée dépend de la pression d'extraction et des conditions hydrosédimentaires du secteur ; la thèse de doctorat de Duclos (2012) analyse les impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats marins dans le bassin oriental de la Manche (sites de Dieppe et de la baie de Seine). À Dieppe, les impacts hydrosédimentaires suivants ont été relevés :

- une modification de la nature sédimentologique des fonds, avec une augmentation de 10 % de sables fins constatée entre 2004 et 2005 (Le Bot et al., 2010 ; Desprez et al., 2012),
- une restauration morphologique et sédimentaire dans un délai de 10 ans (Le Bot et al., 2010 ; Duclos, 2012).

18 Côte marine du Havre

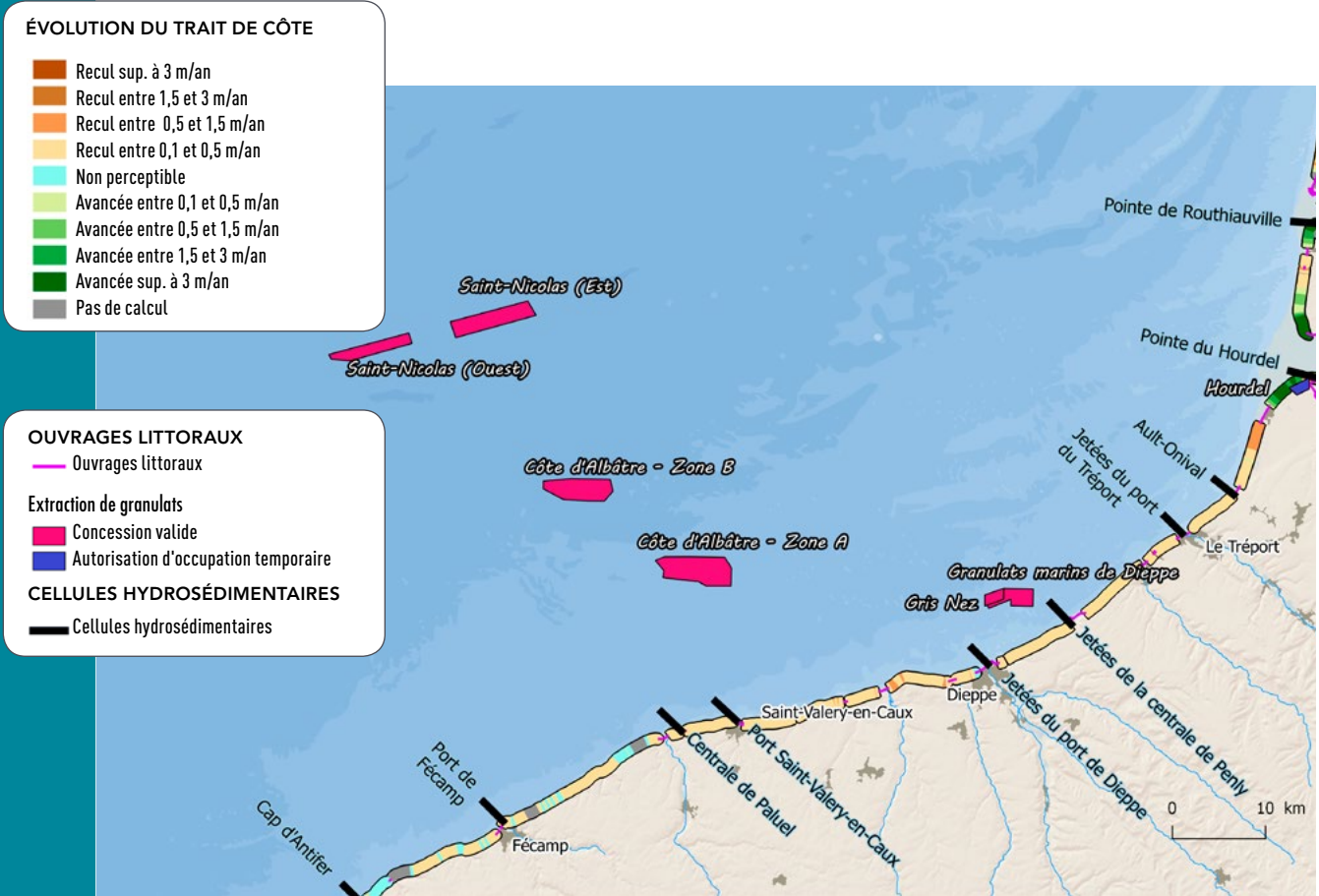


Figure 10 – Localisation des sites d'extraction de granulats marins, limites des cellules hydrosédimentaires connues et évolution du trait de côte

Sources : Indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTES, 2018) et données extraction de granulats (Ifremer, mars 2019)
 - Fond de plan : ESRI Shaded Relief, bathymétrie Ifremer, Bd-Topo IGN
 - Réalisation : Cerema, JUIN 2021

CHIFFRES-CLÉS DE LA PROVINCE :

LINÉAIRE DE TRAIT DE CÔTE

142 km

TYPES DE CÔTE :

68 % de falaises et côtes rocheuses

21 % de côtes d'accumulation

11 % de côtes artificialisées

LINÉAIRE IMPACTÉ PAR DES AMÉNAGEMENTS CÔTIERS



43 km

(soit 30 % du trait de côte)

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE



56 % en recul
(dont 49 % entre 0,1 et 0,5 m/an)



39 % en évolution non perceptible



5 % en accréation

CELLULES HYDROSÉDIMENTAIRES :
9 cellules (bien identifiées)

ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Sites d'extraction autorisés en 2020 :

4 concessions (6 sites en mer) + cordon actif de galets des Bas-Champs

Lien entre extractions et évolution du trait de côte :

non établi pour les sites en mer, impact positif grâce à la compensation sur le cordon des Bas-Champs participant à l'entretien de la digue des Bas-Champs

2.3. DU CAP D'ANTIFER AU CAP DE LA HAGUE (SEINE-MARITIME, CALVADOS, MANCHE)

2.3.1 ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

La province sédimentaire entre le cap d'Antifer et le cap de la Hague s'étend sur environ 435 km et est constituée de quatre unités morphosédimentaires :

- la pointe de Caux, entre le cap d'Antifer et le cap de la Hève, correspond à une côte à falaise à large platier rocheux et cordon de galets,
- la baie de Seine, s'étendant sur près de 280 km entre le cap de la Hève et Saint-Vaast-la-Hougue, est caractérisée par une alternance de côtes à falaises présentant très souvent un platier rocheux, de côtes d'accumulation sableuse à sablo-silteuse avec un système dunaire assez peu développé isolant de la mer des territoires bas et potentiellement submersibles, et de côtes d'accumulation sablo-vaseuse ou vaseuse correspondant aux estuaires de la Seine, de la Touques, de la Dives, de l'Orne, de la Seulles et de la baie des Veys,
- la côte est du Cotentin (de Saint-Vaast-la-Hougue à la pointe de Barfleur) et la côte nord du Cotentin (de la pointe de Barfleur au cap de la Hague) sont deux unités au tracé d'ensemble très découpé et caractérisées par une alternance d'anses étroites et fermées, de longues plages sableuses et de caps rocheux très résistants (côtes rocheuses accores).

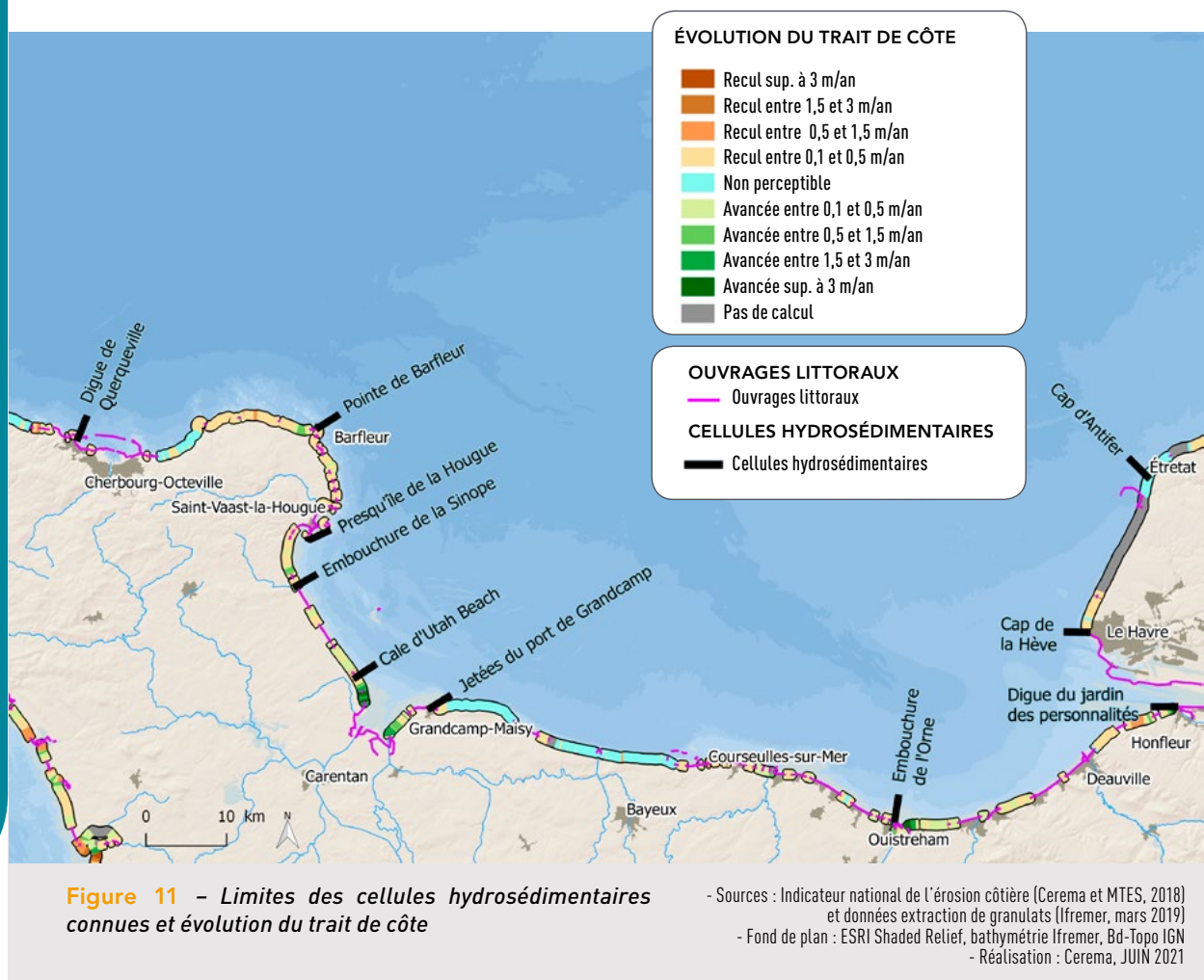
La province est ainsi constituée sur près des deux tiers de son linéaire par des côtes d'accumulation sableuses et vaseuses, et de 35 % de côtes rocheuses à falaise. Cependant, avec près de 254 km cumulés d'ouvrages et aménagements côtiers recensés (Cerema-MTES, 2018), le littoral de la province est impacté par des aménagements à près de 59 %. Les secteurs les plus fortement anthropisés correspondent, d'une part, aux infrastructures portuaires (Grand port maritime du Havre, Caen-Ouistreham, Cherbourg-Octeville...), et d'autre part, aux côtes d'accumulation entre Honfleur et Asnelles-sur-Mer (côte de Grâce, Côte fleurie, côte de Nacre), pour ne citer que cette partie du littoral. Cette dernière est très anthropisée, comportant de très nombreux ouvrages de protection transversaux (ouvrages de lutte contre l'érosion) et/ou longitudinaux (ouvrages se substituant au trait de côte).

Les limites des dix cellules hydrosédimentaires (**Figure 11**) de la province sont naturelles (telles que les « épis hydrauliques » représentés par l'estuaire de la Seine, la baie des Veys ou encore le cap d'Antifer), mais également d'origine anthropique (telles que les jetées portuaires des ports de Cherbourg, Grandcamp et Ouistreham qui bloquent une grande partie des sédiments transportés longitudinalement par la dérive littorale). À ce titre, certaines limites pourraient être discutées car elles ne sont pas nécessairement bien définies : la limite fixée aux jetées du port de Grandcamp aurait très bien pu être fixée entre la pointe du Hoc et la pointe de la Percée, qui correspond à une zone de divergence des transports longitudinaux résultant par dérive littorale (Levoy et Larssonneur, 1995).

Entre le cap d'Antifer et le cap de la Hague, depuis la publication du Catalogue sédimentologique des côtes françaises (LCHF, 1986), l'évolution générale des littoraux a été étudiée dans le cadre de programmes de recherche académique ou de suivis menés sur différentes sections côtières de la province (Maquaire, 1990 ; Levoy et Larssonneur, 1995 ; Gresarc, 2000 ; 2006 ; Lesourd, 2000 ; Stépanian, 2002 ; Garnaud, 2003 ; Delsinne, 2005 ; Elineau, 2013 ; Lissak et al., 2013 ; Rolnp et Dreal-BN, 2014) et les nombreuses publications du GIP Seine-Aval. L'atlas cartographique du réseau d'observation du littoral (ROL Normandie et Hauts-de-France)¹⁹ fournit de nombreuses informations sur l'évolution du littoral et des fonds issus de ces travaux.

19 <https://rolnp.maps.arcgis.com/apps/MinimalGallery/index.html?appid=1a1f60310d0541839a848efeeae421c99>

Les tendances évolutives du littoral à long terme sont disponibles grâce à l'indicateur national de l'érosion côtière (Cerema, 2018) qui fournit les vitesses d'évolution du littoral de la province sur plus de 70 ans. De façon générale, le trait de côte de la province évolue lentement (quelques décimètres par an), avec sur certaines côtes d'accumulation des alternances possibles de périodes d'érosion et d'engraissement. Les auteurs cités précédemment confirment les ordres de grandeurs d'évolution indiquées par l'indicateur national, mais apportent des nuances et des précisions, en raison de l'utilisation de nouvelles techniques hautes-résolutions et hautes-fréquences, mais aussi par une approche diachronique multi-sources et multi-temporelle. Certains secteurs particulièrement sensibles à l'érosion ainsi que les estuaires ont fait l'objet d'études plus ponctuelles qui ne sont pas forcément extrapolables à l'ensemble de la province.



À l'échelle historique, le littoral de la province montre un trait de côte relativement stable ou en léger recul ($\pm 0,5$ m/an), mais avec quelques secteurs ponctuels en accrétion de plusieurs mètres par an (Cerema, 2018) :

- les falaises et côtes rocheuses affichent un recul sur 22 % de leur linéaire avec des valeurs de retrait variant de 0,1 à 0,5 m/an selon la nature des matériaux armant la base du versant,
- les côtes d'accumulation sableuse ou sablo-silteuse sont soit en accrétion (pour près de 27 %), soit en érosion (pour près de 30 %) avec des vitesses de recul supérieures à 0,5 m/an,
- les côtes d'accumulation vaseuse sont en accrétion (près de 70 %) mais certaines peuvent néanmoins être affectées par des vitesses de recul supérieures à 0,5 m/an (environ 15 %).

La caractéristique de cette province est donc une variabilité spatiale des évolutions résultant de la multiplicité des types de forme de littoraux en présence et de la fragilité des budgets sédimentaires. À l'échelle du siècle dernier, les zones les plus évolutives correspondent aux estuaires (Seine, Dives, Orne, La Seulles, baie des Veys...) qui ont été marquées par la migration de leurs ensembles sédimentaires vers le large et dans le sens de la dérive littorale. Ainsi, une accréation généralisée se traduit par un développement important de flèches sableuses et s'accompagne de phénomènes érosifs en rives opposées qui ont souvent rendu nécessaires des travaux de confortement. L'estuaire de la Seine a subi une évolution spectaculaire, avec un taux de remplissage de 2 à 5 millions de m³ par an, impliquant le comblement de l'espace disponible et une migration du dépôt-centre de sédimentation vers l'aval. Entre 1960 et 2000, les bancs de la Seine ont connu une migration de l'isobathe -2 m d'environ 100 m par an vers l'ouest. Ces différences d'évolution du trait de côte soulignent la présence d'une dynamique beaucoup plus locale et la nécessité d'étudier la côte de la province à plusieurs échelles spatiales.

La province ne bénéficie que de peu d'apports sédimentaires actuels. Hormis les débris liés au recul des côtes à falaises, les fleuves de dimensions modestes (en dehors de La seine) ne contribuent que peu au bilan sédimentaire. Les apports fluviaux sont essentiellement des particules fines en quantité faible et captées par les estuaires, qui ont un rôle de puits de sédiments : les baies présentent donc une concentration élevée de particules fines. Les mouvements des sédiments correspondent plutôt à une redistribution du matériel hérité, mis en place lors de la transgression holocène et remanié depuis lors, tels que les cailloutis et les galets de silex. Les stocks sédimentaires actuels présentent une forte proportion d'éléments coquilliers dont l'essentiel est issu d'une production locale et actuelle (coquilles entières et débris de mollusques principalement). Une faible proportion provient de faunes anciennes remaniées. Les sédiments bio-clastiques représentent localement une grosse proportion des sédiments grossiers (sables) de la province (jusqu'à 100 % en estuaire de Seine pour 30 % de bioclastes en moyenne). Aucune estimation chiffrée de cette production bioclastique n'est disponible.

Les mouvements de sédiments sur la province sont essentiellement longitudinaux, le transport sédimentaire résultant est orienté vers le sud pour la côte du Bec du pays de Caux et la côte est du Cotentin et vers l'est pour la façade du département du Calvados. Pour le nord Cotentin, il n'y a pas de transit littoral marqué. Ces deux directions de transport convergent vers la baie de Seine et vers la baie des Veys. Il existe quelques contre-dérives localisées dans les embouchures et au nord de Quineville, par exemple sur la côte est du Cotentin. Ces directions de transport sont en accord avec l'asymétrie des courants tidaux orientés vers le nord-est, associée à des houles dominantes de direction nord-est. Les volumes sédimentaires actualisés déplacés au large de la province ne sont pas connus. Par ailleurs, la province est marquée par des dynamiques sédimentaires perpendiculaires au trait de côte, notamment dans les secteurs de systèmes de barres et barres-bâches ; mais ces mouvements sont relativement mal connus et peu quantifiés.

2.3.2 ÉTAT DES CONNAISSANCES DES IMPACTS DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Par ses atouts naturels (large accès à la mer, eaux du littoral de bonne qualité -sauf en périodes d'épisodes très pluvieux-, présence des plus fortes marées d'Europe, proximité de la région parisienne et de l'axe Seine...), l'aménagement et l'urbanisation du littoral de la province se sont principalement développés en deux grandes périodes distinctes.

Au cours du XIX^e siècle et jusqu'au début XX^e siècle, les petits bourgs et villages littoraux s'étendent en liaison avec le tourisme balnéaire. Ce développement profite principalement à l'est, à la Côte fleurie (pays d'Auge), à la côte de Nacre avec la renommée de certaines stations

proposant bains et casinos comme Trouville-sur-Mer, Deauville ou Houlgate, mais également à l'ouest dans le Bessin avec des stations telles qu'Arromanches-les-Bains ou bien Grandcamp-les-Bains, devenue Grandcamp-Maisy. L'existence à cette époque de lignes de chemin de fer littorales, tout comme la présence de villas en front de mer, témoigne de l'attrait de la façade maritime.

Après-guerre, un fort développement, particulièrement dans les années 1960 puis 1980, conduit à l'extension des « taches urbaines », d'abord autour du noyau urbain historique, le long des principales voies de communication, puis vers et sur le front de mer avec le développement de centres urbains littoraux (constructions pour logements, services, parkings, campings, etc.) inégalement répartis le long du littoral de la province. La pression foncière a conduit à construire au « plus près du littoral » sur des terrains de faible valeur et parfois soumis à des risques tels que sur les falaises dans les cirques des Graves et les Fosses du Macre sur les communes de Villerville et Cricqueboeuf, le Mont Canisy ou la falaise de Saint-Come-de-Fresné, sur des secteurs de cordons sableux et dunes bordières comme à Houlgate, à Lion-sur-Mer ou encore des marais littoraux comme à Asnelles et Ver-sur-Mer...

Cette pression foncière et touristique conduit dans certains secteurs au développement d'une surfréquentation humaine qui impacte la faune et la flore (notamment piétinement des espaces dunaires), et au besoin, nécessite de protéger les nombreux éléments exposés, situés dans les zones basses sableuses, contre l'érosion et la submersion marine par la construction d'ouvrages longitudinaux et transversaux. Les plages et secteurs du débarquement de juin 1944 sont notamment à l'origine du développement d'un tourisme « mémoriel » qui revêt une importance vitale pour l'économie de nombreux centres urbains situés à l'ouest d'un axe Caen-Ouistreham.

Depuis le XVIII^e siècle, les ports se développent notamment grâce à la proximité des îles Anglo-Normandes et de la Grande-Bretagne. Les ports « historiques » comme Le Havre et Cherbourg-en-Cotentin, qui ont connu l'effervescence des années fastes des traversées transatlantiques (Le Titanic, Le France...), ont pu trouver un second souffle par le développement d'autres activités portuaires. Aujourd'hui dix-huit ports (sans compter le port artificiel d'Arromanches ayant servi au débarquement de 1944) et deux zones de mouillage sont répartis le long des côtes de la province du cap d'Antifer au cap de la Hague. Selon les sites, des infrastructures portuaires, s'étendant plus ou moins loin en mer, peuvent avoir des incidences sur la dynamique sédimentaire. Les activités portuaires principales sont liées au commerce, aux transports de fret et/ou de passagers (liaisons car-ferry), à l'industrie pétrochimique, à la pêche, à la plaisance et aux activités militaires. En raison de la forte dynamique de la baie de Seine et de la configuration des ports, ils doivent faire l'objet de dragages ponctuels et d'entretien réguliers nécessitant des zones de clapage en mer, si la qualité des sédiments le permet.

La baie des Veys a fait l'objet d'une importante poldérisation débutée au XIX^e siècle et terminée en 1905. Certaines zones naturelles de la baie des Veys sont protégées et intégrées au Parc naturel régional des marais du Cotentin et du Bessin.

La province est un terrain propice au développement de ressources marines :

- l'aquaculture, avec notamment la conchyliculture (production de moules et huîtres), la pêche, l'élevage en pleine mer de saumons, la production d'algues,
- la production de granulats avec plusieurs sites propices aux extractions,
- les énergies marines renouvelables.

Les zonages réglementaires liés à la protection de l'environnement, en limitant ces impacts potentiels, participent indirectement à la protection du littoral et à son équilibre sédimentaire.

2.3.2. Activités d'extraction de granulats marins

Sur la province, 3 concessions, concernant 4 sites d'extraction de granulats marins, sont autorisées et en activité en 2020 (Tableau 2 et Figure 12).

Gisement	Délivrance de la concession	Durée de validité	Statut	Localisation	Superficie (km ²)	Quantité autorisée
Baie de Seine	2013	25 ans	Extraction	Baie de Seine, circonscription du Grand port maritime de Rouen	8,6	300 000 m ³ /an mini à 1 000 000 m ³ /an maxi
Manche Orientale	2012	30 ans	Extraction	Est de Barfleur	61	3 000 000 m ³ /an
Granulats Marins Havrais	2019	30 ans	Extraction	Large du Havre	10	500 000 m ³

Tableau 2 – Détails des gisements de granulats situés entre le cap d'Antifer et le cap de la Hague (MEEM et MINEFI, 2016 ; mise à jour par l'UNPG).

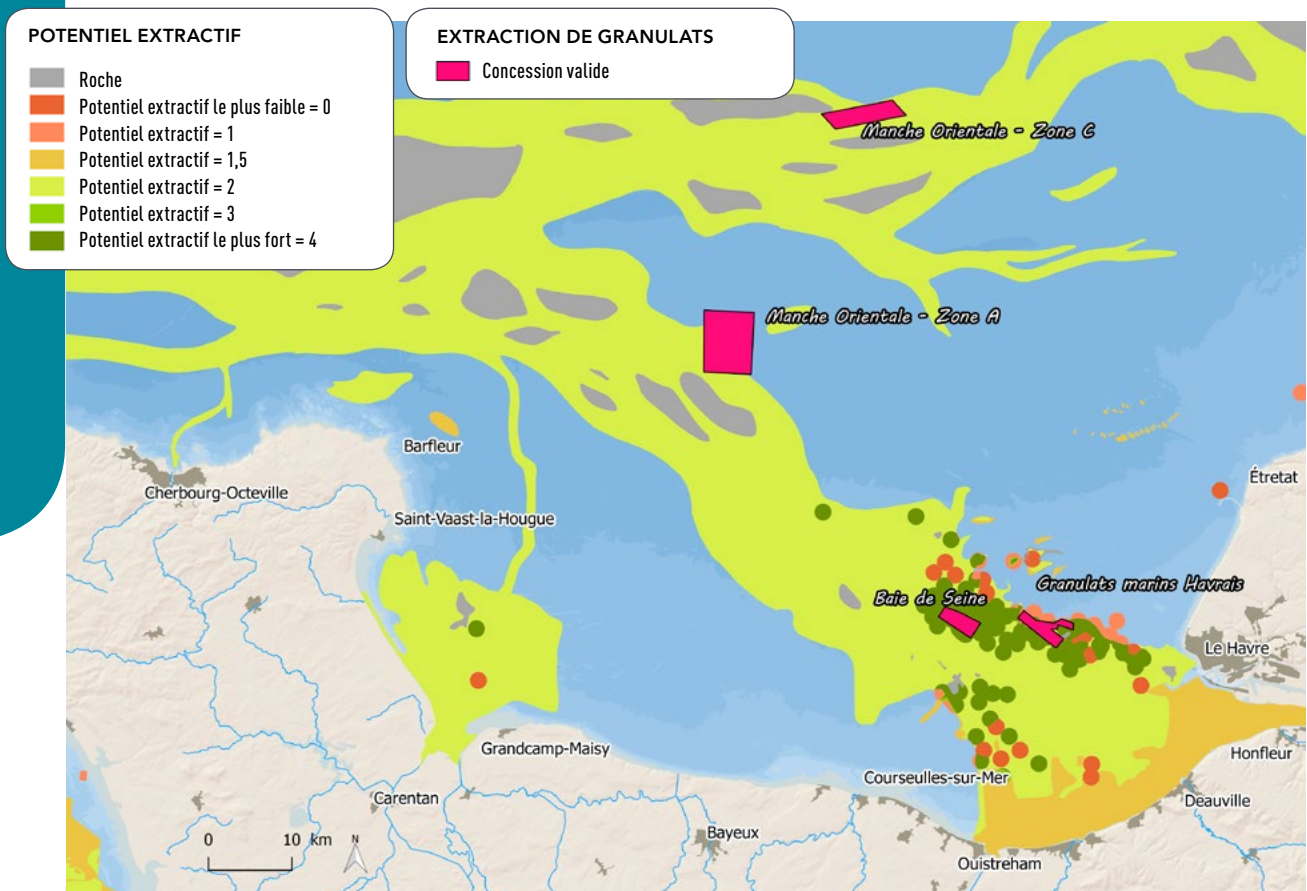


Figure 12 – Localisation des sites d'extraction de granulats marins en relation avec la nature des fonds marins et leur potentiel extractif

- Sources : Potentiel extractif (Ifremer, mars 2020)
et données extraction de granulats (Ifremer, avril 2020)
- Fond de plan : ESRI Shaded Relief, Bd-Topo IGN
- Réalisation : Cerema, JUIN 2021

En Manche, les ressources de matériaux potentiellement extractibles sont estimées, suivant la méthode géostatistique, à 149 milliards de m³ dans la ZEE dont près de 117 milliards de m³ dans les paléovallées (Augris *et al.*, 2006 ; MEEM et MINEFI, 2016). Les ressources minérales marines actuellement exploitées en Manche orientale proviennent principalement des paléovallées, d'âge quaternaire et localisées par 20 à 45 m de fond. Les gisements correspondent aux prolongements des fleuves actuels et ont la même origine sédimentaire que les gisements alluvionnaires terrestres. Ils sont constitués de sédiments grossiers (sable et graviers siliceux) dans les deux concessions situées au large du Havre (Figure 12) : concession dite « Baie de Seine » et concession des « Granulats Marins Havrais » (GMH).

Les premières demandes d'extraction de granulats marins en baie de Seine datent de la fin des années 1980. Face à une demande soudaine et à la multiplication des projets, le secteur de la pêche s'est fortement mobilisé afin d'obtenir un gel de ces dossiers dans un espace maritime relativement réduit. Afin d'estimer la possibilité d'ouvrir la baie de Seine à l'exploitation de granulats, une Commission inter-régionale de concertation pour la gestion de la baie de Seine (CICGBDS) a été créée en 1993. Elle a conduit à la mise en place d'une exploitation expérimentale en 1996 sur le périmètre du permis initialement accordé en 1989. Cette exploitation expérimentale a, par la suite, été suivie par le GIS SIEGMA (Groupement d'intérêt scientifique « Suivis des impacts de l'extraction de granulats marins ») entre 2006 et 2012. En parallèle, plusieurs concessions sont opérationnelles en baie de Seine (Tableau 2, Figure 12) :

- une concession a été accordée en 2012 au Groupement d'intérêt économique « Granulats de la Manche Orientale » - GIE GMO - sur le plateau continental en baie de Seine : le permis des « Granulats marins de la Manche orientale » concerne deux secteurs situés au nord-est de Barfleur sur une superficie de 61 km²,
- suite à une exploitation expérimentale, un site d'exploitation a été accordé en concession au Groupement d'intérêt économique « Granulats Marins de Normandie » - GIE GMN - en 2013, pour une superficie d'environ 8,2 km² pour la durée de la concession appelée « Granulats marins de la baie de Seine » située sur le plateau continental au large de la ville du Havre dans la circonscription du Grand port maritime de Rouen,
- une concession de 30 ans a été accordée en 2019 sur les bords du chenal d'accès au port du Havre pour les « Granulats Marins Havrais ».

Les trois concessions concernées par ce fascicule ont un volume total annuel autorisé de 3 500 000 m³. Pour la concession dite « Baie de Seine », l'exploitation sera réalisée sur une profondeur maximale de 2,50 m ; les autres gisements sont exploités sur une épaisseur moyenne de 1 à 5 m.

Les demandes de concession d'exploitation des granulats marins s'accompagnent d'une étude d'impact et d'un suivi environnemental des impacts, dans le but de déterminer des mesures de réduction des impacts des extractions sur le milieu marin. La synthèse produite par le GIS SIEGMA (Desprez *et al.*, 2012) présente les résultats des suivis effectués sur les sites ateliers de Dieppe et de la baie de Seine entre 2003 et 2012. Geslain (2014) a produit une synthèse sur l'évaluation et le suivi de l'impact des extractions de granulats marins sur les écosystèmes et la biodiversité ; la thèse de doctorat de Duclos (2012) analyse les impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats marins dans le bassin oriental de la Manche (sites de Dieppe et de la baie de Seine).

Les résultats des suivis montrent généralement un impact spatio-temporel limité au site de la concession et une recolonisation dans les années qui suivent la fin de l'exploitation, permettant un retour aux conditions initiales, dont la durée dépend de la pression d'extraction et les conditions hydrosédimentaires du secteur. Ces études sont détaillées dans la synthèse du GIS SIEGMA (Desprez et Lafite, 2014), pour le site atelier de la baie de Seine entre 2003 et 2012 (Claveleau, 2007) ; elles montrent l'intérêt de suivis de longue durée et de retours d'expérience.

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

- Recul sup. à 3 m/an
- Recul entre 1,5 et 3 m/an
- Recul entre 0,5 et 1,5 m/an
- Recul entre 0,1 et 0,5 m/an
- Non perceptible
- Avancée entre 0,1 et 0,5 m/an
- Avancée entre 0,5 et 1,5 m/an
- Avancée entre 1,5 et 3 m/an
- Avancée sup. à 3 m/an
- Pas de calcul

OUVRAGES LITTORAUX

— Ouvrages littoraux

Extraction de granulats

■ Concession valide

CELLULES HYDROSÉDIMENTAIRES

— Cellules hydrosédimentaires

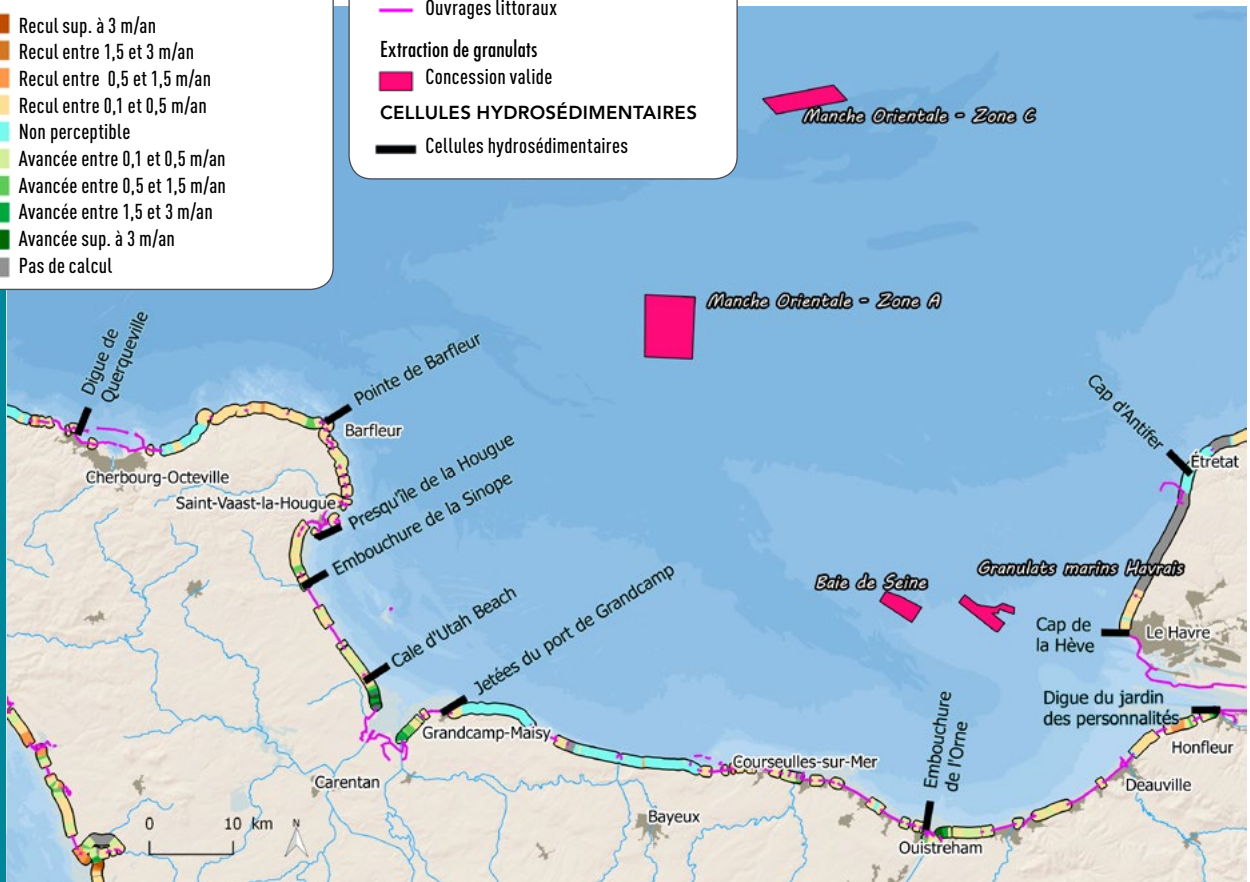


Figure 13 – Localisation des sites d'extraction de granulats marins, limites de cellules hydrosédimentaires connues et évolution du trait de côte

- Sources : Indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTEs, 2018) et données extraction de granulats (Ifremer, mars 2019)
- Fond de plan : ESRI Shaded Relief, bathymétrie Ifremer, Bd-Topo IGN
- Réalisation : Cerema, JUIN 2021

CHIFFRES-CLÉS DE LA PROVINCE :

LINÉAIRE DE TRAIT DE CÔTE
435 km

TYPES DE CÔTE :

- 22 %** de falaises et côtes rocheuses
- 42 %** de côtes d'accumulation
- 36 %** de côtes artificialisées

LINÉAIRE IMPACTÉ PAR DES AMÉNAGEMENTS CÔTIERS

254 km
(soit 58 % du trait de côte)

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

- **24 %** en recul (dont 21 % entre 0,1 et 0,5 m/an)
- **59 %** en évolution non perceptible
- **17 %** en accrétion

ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Sites d'extraction autorisés en 2020 :
3 concessions (4 sites en mer)

Lien entre extractions et évolution du trait de côte :
non établi

CELLULES HYDROSÉDIMENTAIRES :
10 cellules (bien identifiées)

2.4. DU CAP DE LA HAGUE À LA POINTE DE CORSEN (MANCHE, ILLE-ET-VILAINE, CÔTES-D'ARMOR, FINISTÈRE)

2.4.1. ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

La complexité des phénomènes naturels, notamment des courants marins, dans le Golfe normand-breton rend difficile et hasardeuse toute proposition de découpage en cellules hydrosédimentaires. Par ailleurs, le linéaire considéré et le caractère découpé des côtes ne facilitent pas la restitution synthétique des connaissances sur l'évolution du trait de côte. Globalement, trois grandes unités morphosédimentaires peuvent être retenues, et éventuellement sous-découpées (Figure 14) :

- du cap de la Hague à la pointe du Roc, la côte ouest du Cotentin,
- de la pointe du Roc à la pointe du Grouin, la baie du Mont-Saint-Michel,
- de la pointe du Grouin à la pointe de Corsen, la côte nord du Massif armoricain.

Au large, les sédiments bio-lithoclastiques pénètrent dans le Golfe normand-breton entre Bréhat et Guernesey. Au sud, ils cheminent d'ouest en est et se déposent au fond des grandes baies de Saint-Brieuc ou du Mont-Saint-Michel. Ils passent au nord des Minquiers et des îles Chausey vers le ruban sableux de la Catheue qui se raccorde à l'est au prisme littoral du Cotentin. Les sables contournent aussi Guernesey par le sud et remontent vers Aurigny. Ils s'accumulent sur les bancs de Serk, d'Aurigny, et de la Schôle puis sont repoussés par les courants du raz Blanchard vers les Ecréhous et Jersey. Les sédiments remontent du sud vers le nord au large du Cotentin de Lessay à Jobourg et se concentrent au nord de Carteret sur le banc de Surtainville. Ce banc alimente la dérive littorale orientée nord/sud. Les plages de Vauville sont approvisionnées depuis des dunes subtidales par des contre-courants côtiers. Ces mouvements sédimentaires établis, depuis la fin de la transgression holocène, ont permis l'édification de bancs de sable de plus de 30 m de haut, et d'un prisme littoral de 5 à 10 m d'épaisseur (Walker, 2001).

Au niveau proche côtier, la dynamique sédimentaire de la côte ouest du Cotentin a été suivie par le Conseil général de la Manche via un réseau de 39 stations de mesures, entre Saint-Germain-sur-Ay et le Rozel, dans le cadre de l'Observatoire du littoral bas-normand (OLIBAN). Ce suivi montre que le bilan global sédimentaire est en léger déficit sur cette côte et la très grande majorité du linéaire côtier subit une érosion de faible ampleur (-12 cm/an). Le nombre de zones en accrétion est faible mais avec des valeurs très importantes, notamment dans les havres qui connaissent une sédimentation importante comme le havre de Portbail (plus de 3,2 m/an en moyenne). Cette évolution semble irréversible à court ou moyen terme, par l'allongement, d'une part, des flèches et l'engraissement des deltas de marée qui entraîne la fermeture de la passe. D'autre part, le colmatage du havre entraîne une diminution des vitesses des courants de marée, qui renforce le dépôt de sédiments. Ainsi, le havre de Portbail se comblerait à une vitesse de 18 000 m³ à 25 000 m³ par an d'apport de sédiments marins auxquels il faut ajouter un apport de 9 000 m³ d'érosion des berges, et pourrait ainsi être entièrement végétalisé à l'échéance de 2030-2050 (GRESARC, 2002 ; Levoy, 2007 ; Biotope, 2014).

Les mouvements de sédiments des différentes baies du nord du Massif armoricain sont essentiellement liés aux courants marins et au phénomène de marée ; celles-ci sont caractérisées par une sédimentation de particules fines.

En baie du Mont-Saint-Michel, l'étude de l'interaction entre la végétation et la sédimentation dans la baie montre des taux d'accrétion sédimentaire variant de 0,2 à 10 cm/an. Le volume des apports sédimentaires par la marée permet des dépôts de tangles suivis par un phénomène de végétalisation et une progression des herbues d'environ 17 ha/an (Bonnot-Courtois, 2012).

Le golfe de Saint-Malo est situé dans une région où les agents dynamiques marins sont particulièrement efficaces ; cependant le cap Fréhel offre une position abritée à cette baie où une sédimentation d'éléments fins (vases et sables fins) accentue des phénomènes d'envasement (Vaucourt et Bonnot-Courtois, 1992).

En baie de Saint-Brieuc, un gradient granulométrique des sédiments les plus fins aux plus grossiers apparaît de la côte vers le large et de l'ouest vers l'est. La présence de platiers rocheux perturbe la répartition des sédiments avec le plus souvent une concentration d'éléments grossiers à proximité des hauts-fonds. De même, entre les zones rocheuses et la côte, le renforcement des courants dans les chenaux de Saint-Quay et d'Erquy provoque un lessivage des particules fines ; seuls les éléments les plus grossiers restent sur place (Augris et Hamon, 1996). La baie de Saint-Brieuc présente trois zones ayant des dynamiques littorales différentes (Bousquet-Bressolier et Bonnot-Courtois, 1998) :

- la côte est, formée de falaises rocheuses et exposée aux houles de nord-ouest, est soumise à l'attaque des vagues et la dérive continentale ainsi que l'érosion continentale des falaises par solifluxion,
- le fond de la baie, très abrité, est en voie de colmatage et subit localement une érosion des massifs dunaires due à la surfréquentation anthropique,
- la côte ouest est peu exposée aux agents dynamiques marins et subit une érosion principalement continentale de ses falaises meubles, alors que l'érosion marine se localise au sud-est de la pointe de Pordic.

Le sillon de Talbert, flèche de galets, graviers et sables, situé sur la commune de Pleubian dans les Côtes-d'Armor, connaît une dynamique régressive qui s'accélère depuis trois siècles. Ceci peut s'expliquer, en partie, par la faiblesse des apports de matériel dans un contexte actuel de pénurie sédimentaire (Stéphan et al., 2010).

Certaines plages de fond de baie de la région de Lannion sont en phase d'accrétion. C'est le cas de la plage de Saint-Michel-en-Grève qui a enregistré une accumulation de sable de l'ordre de 60 000 m³ sur le haut d'estran entre 1998 et 2003 (Stephan et Suanez, 2004), et également, pour le Finistère, les sites du Dossen à Santec, de Kerfissien à Cléder et de Keremma à Tréfléz ainsi que les Blancs-Sablons au Conquet (Cetmef et al., 2011).

Les estrans, situés à la sortie nord-ouest des abers, sont de vastes étendues de sables fins à moyens pour les zones ouvertes aux houles d'ouest. La présence de nombreux îlots ou affleurements rocheux ne permet pas la sédimentation de particules fines. Les baies situées sur la sortie sud, comme la baie des Anges au sud de l'aber Wrac'h, sont plus envasées car plus abritées (Hily, 2005).

Il est fondamental de noter que les accumulations, tout comme la position du trait de côte, actuelles sont héritées de la transgression holocène. Ces accumulations évoluent actuellement sur un stock, qui régionalement peut être considéré comme fini. Pour la province, les sources de sédiments restent encore plus ou moins bien connues, quantitativement comme qualitativement. La contribution de l'érosion de certaines portions de falaise aux apports sédimentaires pour une cellule a pu faire l'objet d'estimations en différents lieux sur des temps relativement courts au regard du temps long d'action des processus. Pour les productions clastique et biodétritique à l'origine des sables et des galets, il existe localement des travaux

et des mesures qui concernent ces deux aspects et des quantifications : estimations des volumes de roche produits par mouvement de masse dans les falaises rocheuses, évolutions de quelques portions de falaise meuble et quantification des produits enlevés, production biodétritique (Hénaff, 1998 ; Hénaff et Bodéré, 2001). Ces études montrent clairement une insuffisance de ces diverses sources de production au regard de l'érosion qui se manifeste sur les accumulations littorales.

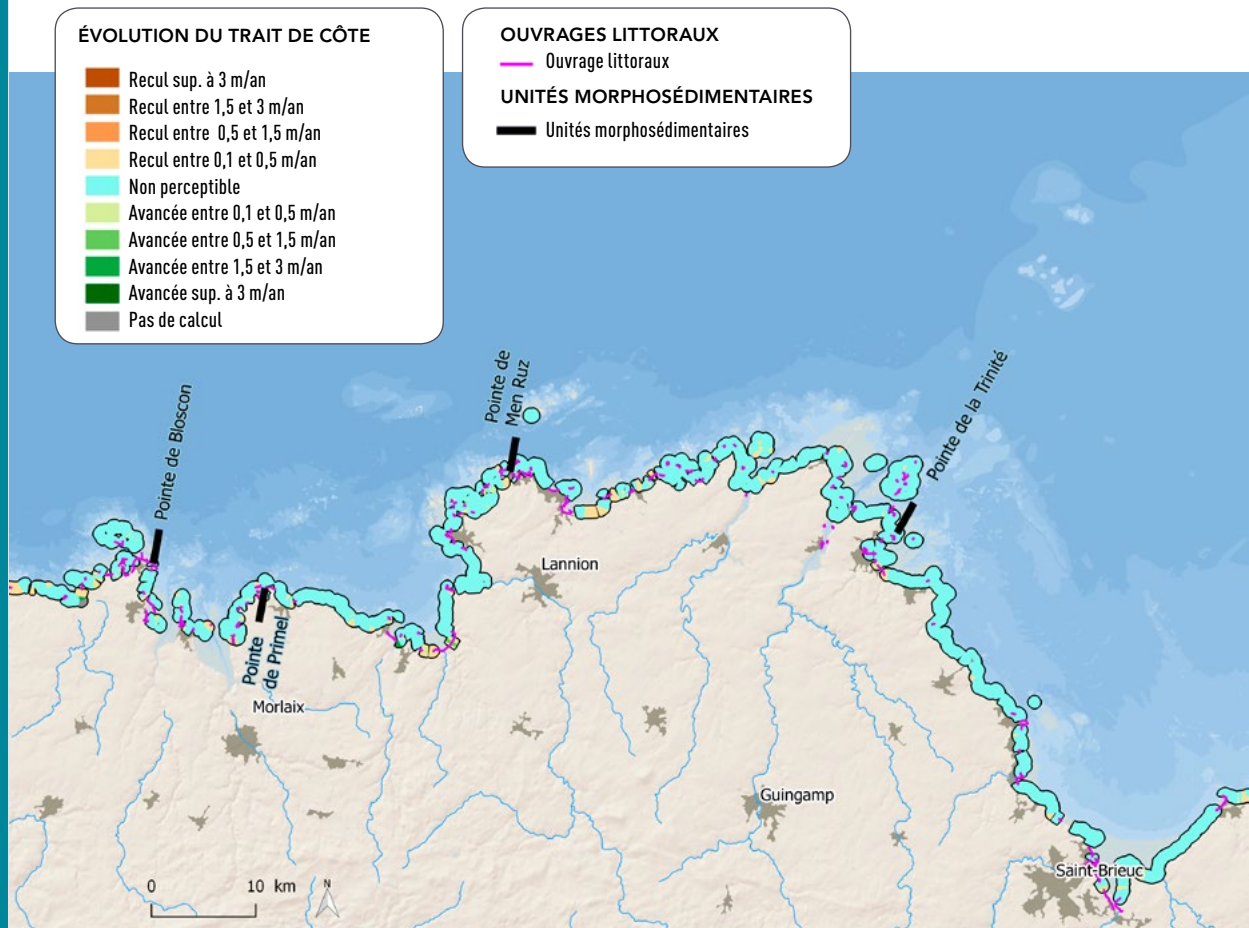


Figure 14 – Limites des unités morphosédimentaires connues et évolution du trait de côte. NB : sur ce territoire, les limites de cellules hydrosédimentaires ne sont pas établies.

- Sources : Indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTEs, 2018) et données extraction de granulats (Ifremer, mars 2019)
- Fond de plan : ESRI Shaded Relief, bathymétrie Ifremer, Bd-Topo IGN
- Réalisation : Cerema, JUIN 2021

2.4.2. ÉTAT DES CONNAISSANCES DES IMPACTS DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Les premiers ouvrages de protection contre l'érosion côtière et de fixation du trait de côte sur le littoral remontent au Moyen Âge. Ils se généralisent au cours du XIX^e siècle pour accompagner la création des stations balnéaires et l'essor du tourisme. En Bretagne, ces ouvrages de protection se sont multipliés entre 1970 et 1993 parallèlement à l'augmentation des constructions sur le littoral et la fragilisation du littoral consécutive à l'augmentation de sa fréquentation (Hénaff, 2004).

Certains secteurs de la province sont abrités et tendent à se combler, par exemple les havres et les marais : les aménagements y sont réalisés dans le but d'éviter, ou du moins atténuer, l'ensablement et l'envasement. D'autres secteurs correspondent à des côtes exposées à la houle et qui ont tendance à reculer où divers aménagements ont pu être construits pour

soit diminuer la force des agents marins responsables du départ des sédiments, soit retenir les sédiments. La province est aussi caractérisée par la présence de nombreux polders. Ces terrains gagnés sur la mer, dès le XII^e siècle en baie du Mont-Saint-Michel, ont longtemps servi à augmenter la taille des exploitations agricoles, et accueillent depuis des habitations (Casset, 2011).

Sur la côte ouest du Cotentin, beaucoup de havres ont été aménagés afin d'agrandir la surface agricole exploitable et de permettre un essor du tourisme balnéaire, en particulier à partir du cap de Flamanville vers le sud où la côte devient de plus en plus urbanisée. À partir de la 2nde moitié du XIX^e siècle, les havres subissent les impacts liés à l'implantation d'ouvrages de défense et portuaires sur la côte et dans le havre même et ont tendance à s'engraisser. En particulier à titre d'exemple, le havre de Barneville-Carteret a subi une phase de poldérisation lors de la seconde moitié du XIX^e siècle : environ 100 ha ont ainsi été endigués pour gagner des terrains agricoles et développer l'urbanisation de Barneville-Plage. Cette urbanisation s'est faite sur le cordon dunaire (Germain, 2006 ; Levoy et Larsonneur, 1994). Le trait de côte du havre est fixé par des ouvrages de poldérisation des anciens marais maritimes, alors que l'entrée du havre est canalisée par divers ouvrages, dont des murs de protection (Levoy et Larsonneur, 1994) ou encore des digues (Germain, 2006). Le havre abrite également des ouvrages portuaires importants et un bassin à flot, accentuant sa forte anthropisation. À la fin du XX^e siècle, une deuxième phase d'aménagements s'ouvre avec la construction d'ouvrages de lutte contre l'érosion côtière en enrochements (épi, perré de haut de plage, digue...).

La baie du Mont-Saint-Michel est marquée par des travaux historiques de poldérisation depuis le XII^e siècle et l'activité de conchyliculture qui jouent des rôles importants sur la sédimentation de la baie. Cette poldérisation a d'abord concerné le marais de Dol, avec la mise en place de digues et de moyens de drainage pour assécher les terrains. Les différentes rivières se jetant dans la baie, comme la Sée et la Sélune, ont perturbé le phénomène de colmatage de la baie ; leurs divagations ont souvent provoqué des ruptures de digue. La digue de Roche-Torin, construite en 1862 pour lutter contre ces divagations, a engendré une avancée du trait de côte. Les dépôts au sud de la digue sont estimés à environ 20 à 30 millions de m³ entre 1860 et 1921. Des polders à l'ouest du Mont-Saint-Michel ont aussi été mis en place entre 1858 et 1934 et les dépôts engendrés s'élevaient à entre 45 et 50 millions de m³ sur cette période (Migniot, 1998). La digue insubmersible d'accès au Mont-Saint-Michel, construite en 1878-1879, permet l'accès au mont par n'importe quelles conditions météorologiques. L'impact de cette digue sur la sédimentation des fonds n'a pas pu être démontré mais elle a joué un rôle dans le colmatage des terrains à l'est du mont. Elle a aussi permis de supprimer les courants forts gênant la navigation (Migniot, 1998). À partir de 2014, dans le cadre du projet de rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel, un pont-passerelle permet la liaison entre le Mont-Saint-Michel et le continent et la digue-route doit être progressivement démantelée (Bonnot-Courtois, 2012).

De la pointe du Grouin à la pointe de Corsen, la côte nord-armoricaine est marquée par le développement historique des villes balnéaires, notamment Saint-Malo et Saint-Brieuc. La ville de Saint-Malo s'est développée pour partie sur un ancien marais maritime progressivement endigué à partir du XIV^e siècle. Cette zone basse et globalement plane s'étend sur environ 450 ha, de la cité intra-muros à l'ouest, à Paramé à l'est et Saint-Servan au sud, et est protégée par plusieurs ouvrages aux gestionnaires distincts (DREAL Bretagne, 2014).

2.4.3. ACTIVITÉS D'EXTRACTION DE GRANULATS MARINS

Sur la province, 4 sites sont autorisés dont 3 seulement sont en activité en 2020 (Tableau 3 et Figure 15).

Site	Département	Unité morphosédimentaire	Année d'ouverture des travaux	Durée des extractions
La Cormorandière	Côtes-d'Armor	Cap Fréhel-Pointe de la Trinité	nc	nc
La Horaine	Côtes-d'Armor	Cap Fréhel-Pointe de la Trinité	2010	25 ans
Les Duons	Finistère	Pointe de Primel-Pointe de Blosson	2011	25 ans

Tableau 3 – Sites d'extraction en activité entre le cap de la Hague et la pointe de Corsen (Ifremer, 2015)

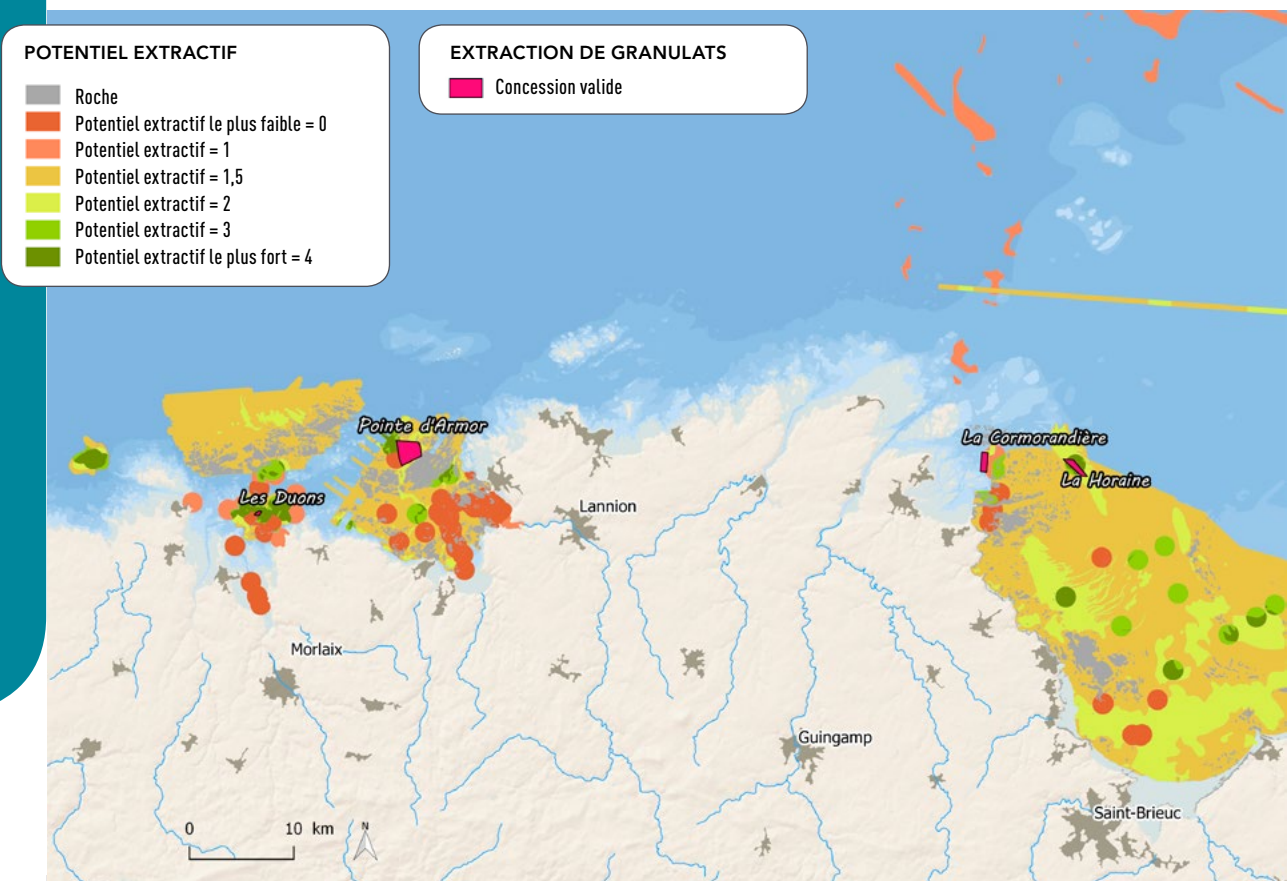


Figure 15 – Localisation des sites d'extraction de granulats marins en relation avec la nature des fonds marins et leur potentiel extractif.

NB : La concession Pointe d'Armor est autorisée mais non exploitée.

- Sources : Potentiel extractif (Ifremer, mars 2020)
et données extraction de granulats (Ifremer, avril 2020)
- Fond de plan : ESRI Shaded Relief, Bd-Topo IGN
- Réalisation : Cerema, JUIN 2021

D'abord puisé, à partir du XIX^e siècle, dans les rivières et les fleuves, l'activité d'extraction de granulats s'est, orientée depuis les années 1970, vers l'océan. D'autres pratiques, interdites aujourd'hui, consistaient à prélever des galets sur les cordons, pour la construction ou l'entretien de chemins. Les Allemands l'ont pratiquée pour construire le « Mur de l'Atlantique ». L'utilisation d'amendements marins, notamment de maërl, pour l'agriculture était également pratiquée depuis le XVII^e siècle. Au XIX^e siècle, l'extraction se faisait à la pelle ou avec des dragues en toile. Dans les années 1930, avec la motorisation, sont apparues les bennes preneuses, puis dans les années 1970, elles ont été remplacées par les dragues aspiratrices (Férec et Chauvin, 1987).

La récolte de la tange pourrait remonter au Moyen Âge et s'être diffusée avec la généralisation du collier de cheval. Activité économique importante, les chantiers de dépôts littoraux se louaient très cher et procuraient à leurs propriétaires des revenus élevés (de l'ordre de 45 000 francs à l'hectare autour des années 1860). Cette pratique semblait être spécifique aux départements littoraux de Basse-Normandie et du nord de la Bretagne, lieux où sa qualité répond à l'usage auquel elle était destinée. Certains témoignages ont également signalé de telles pratiques sur les côtes du Finistère nord (Roscoff, Morlaix, Brest), où des dépôts de sables marins ont une composition proche de celle des tangues (Camuzard, 2011). L'estimation des volumes de tange extraits vers le milieu du XIX^e siècle (Pierre, 1852 ; **Tableau 4**) pourrait être sous-évaluée (Camuzard, 2011).

Localisation	Volume annuel extrait
Baie de Saint-Germain	550 000 m ³
Baie de Régnéville	600 000 m ³
Embouchure du Couesnon	250 000 m ³
Autres rivières de la baie du Mont-Saint-Michel	250 000 m ³
Embouchure de la Rance et environs	15 000 m ³
TOTAL	1 665 000 m³

Tableau 4 – Volumes de tange extraits annuellement entre le cap de la Hague et la pointe de Corsen au cours du XIX^e siècle (Pierre, 1852)

Les extractions de granulats marins dans la province concernent essentiellement des sables calcaires et le maërl. Les principaux ports de déchargement se trouvent à Saint-Malo, Saint-Brieuc (Le légué), Pontrieux, Tréguier et Roscoff. Trois sites d'extraction de sables coquilliers sont en activité en 2020 dans la province (**Tableau 3** et **Figure 15**) ; ils étaient complétés jusque récemment par trois sites d'extraction de maërl dans les Côtes-d'Armor, extraction interdite depuis 2013 (**Tableau 5**).

Site	Unité morphosédimentaire	Année d'ouverture des travaux	Année d'arrêt des extractions
Îlot Saint-Michel	Cap Fréhel-Pointe de la Trinité	1993	2012
Lost Pic	Cap Fréhel-Pointe de la Trinité	1996	2013
La Croix	Pointe de la Trinité-Pointe de Men Ruz	1988	2018

Tableau 5 – Anciens sites d'extraction de maërl entre le cap de la Hague et la pointe de Corsen (Abellard, 2011). **NB** : Ces trois sites sont tous localisés dans le département des Côtes-d'Armor.

Les effets des extractions de granulats sur les fonds marins de la province sont documentés dans les suivis quinquennaux. Les volumes de tangues prélevés sur le littoral ont modifié la géométrie des dépôts et les cortèges végétaux des zones d'extraction ainsi que la dynamique côtière, celle-ci entraînant la divagation du trait de côte et des conséquences en termes d'érosion/sédimentation, même si les témoignages à ce sujet restent faibles et suggèrent donc la prudence (Camuzard, 2011).

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

- Recul sup. à 3 m/an
- Recul entre 1,5 et 3 m/an
- Recul entre 0,5 et 1,5 m/an
- Recul entre 0,1 et 0,5 m/an
- Non perceptible
- Avancée entre 0,1 et 0,5 m/an
- Avancée entre 0,5 et 1,5 m/an
- Avancée entre 1,5 et 3 m/an
- Avancée sup. à 3 m/an
- Pas de calcul

OUVRAGES LITTORAUX

- Ouvrages littoraux
- Extraction de granulats
- Concession valide
- UNITÉS MORPHOSÉDIMENTAIRES
- Unités morphosédimentaires

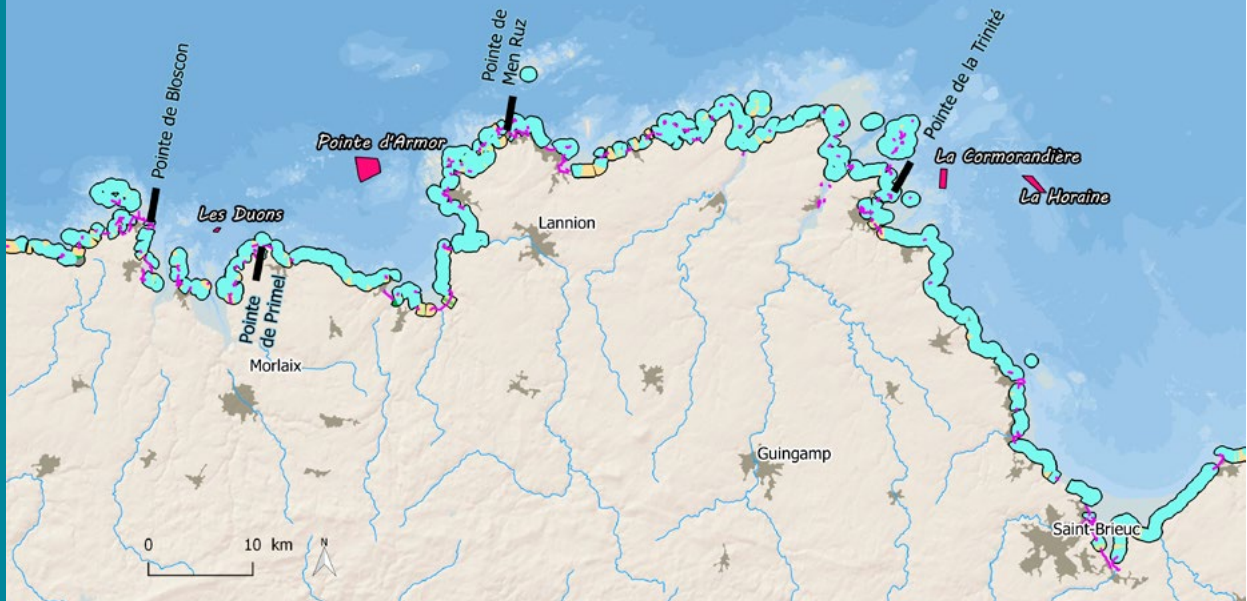


Figure 16 – Limites des unités morphosédimentaires connues et évolution du trait de côte. NB : sur ce territoire, les limites de cellules hydrosédimentaires ne sont pas établies.

- Sources : Indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTEs, 2018) et données extraction de granulats (Ifremer, mars 2019)
 - Fond de plan : ESRI Shaded Relief, bathymétrie Ifremer, Bd-Topo IGN
 - Réalisation : Cerema, JUIN 2021

CHIFFRES-CLÉS DE LA PROVINCE :

LINÉAIRE DE TRAIT DE CÔTE
1 289 km

TYPES DE CÔTE :

- 46,5 %** de falaises et côtes rocheuses
- 43,5 %** de côtes d'accumulation
- 10 %** de côtes artificialisées.

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

- ▶ **13 %** en recul
- ▶ **81 %** en évolution non perceptible
- ▶ **6 %** en accrétion

CELLULES HYDROSÉDIMENTAIRES :
 non clairement identifiées
 (hormis Ouest-Cotentin)

LINÉAIRE IMPACTÉ PAR DES AMÉNAGEMENTS CÔTIERS

384 km
 (soit 30 % du trait de côte)

ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Sites d'extraction autorisés en 2020 :
 4 sites d'extraction (3 en activité)

Lien entre extractions et évolution du trait de côte :
 non établi

2.5. DE LA POINTE DE CHEMOULIN À LA POINTE DE SUZAC (LOIRE-ATLANTIQUE, VENDÉE, CHARENTE-MARITIME)

2.5.1. ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

Entre la pointe de Chémoulin et la pointe de Suzac, le littoral est essentiellement constitué de systèmes dunaires et de côtes rocheuses entrecoupés d'estuaires : les 861 km de trait de côte se répartissent en 235 km artificialisés par des ouvrages et aménagements côtiers (soit environ 27 %) et 626 km « naturels » (55 % de côtes d'accumulation sablo-vaseuses et 18 % de côtes rocheuses). Sur cette province, l'indicateur national de l'érosion côtière (Cerema, 2018), complété localement par des suivis et des études à vocation de gestion départementale ou régionale, telles que (DHI-Geos, 2007), (Sogreah, 2012), (Cetmef et Conseil général de Charente-Maritime, 2000), a permis de proposer une analyse de l'évolution du littoral s'inscrivant sur le moyen à long terme : 37 % du littoral est ainsi en érosion, 20 % en accrétion et 43 % stable ou d'évolution non perceptible. En particulier, ce littoral comprend :

- des secteurs en accrétion sédimentaire régulière sur le dernier demi-siècle (rive sud de l'estuaire de la Loire à la faveur de son colmatage, sud de Noirmoutier, quelques secteurs du pays de Monts et de La Tranche-sur-Mer, le milieu de la pointe d'Arçay, quelques courtes sections à Saint-Georges-d'Oléron et Saint-Pierre-d'Oléron, à Yves, au niveau de La Tremblade et derrière la pointe de la Coubre),
- de nombreuses sections du littoral en relative stabilité,
- et le reste, globalement en érosion inférieure à - 0,5 m/an mais présentant également des sections avec des vitesses d'érosion supérieure à - 0,5 m/an comme la face ouest de La Tremblade, Les Mathes, Saint-Trojan-les-Bains, une partie de la côte est de Saint-Georges-d'Oléron, quelques sections de Ré (plage de la Conche des Baleines), quelques sections en Vendée (Saint-Hilaire-de-Riez, du pays de Monts au droit du Pont d'Yeu), quelques sections à Noirmoutier (les Eloux, Luzéronde et la pointe de la Loire) et la pointe des Sableaux à l'île d'Yeu.

Certaines de ces sections en érosion chronique font l'objet de mesures de défense contre la mer comme la plage des Eloux avec un recul de l'ordre de - 2 m/an sur les 10 dernières années malgré des défenses de plus en plus imposantes. D'autres sections connaissent des reculs importants qui peuvent menacer sur le court terme des enjeux importants comme la Pège à Saint-Hilaire-de-Riez avec un cordon dunaire très étroit en recul chronique (- 0,6 m/an entre 1921 et 2011). Ces sections font pour certaines l'objet d'une attention particulière (défenses, rechargements systématiques de plage, retroussages de dune le cas échéant après des événements météo-marins très morphogènes).

Sur cette province, les cellules hydrosédimentaires sont globalement bien appréhendées et peuvent être cartographiées pour servir à l'analyse des phénomènes d'évolution du trait de côte (Figure 17).

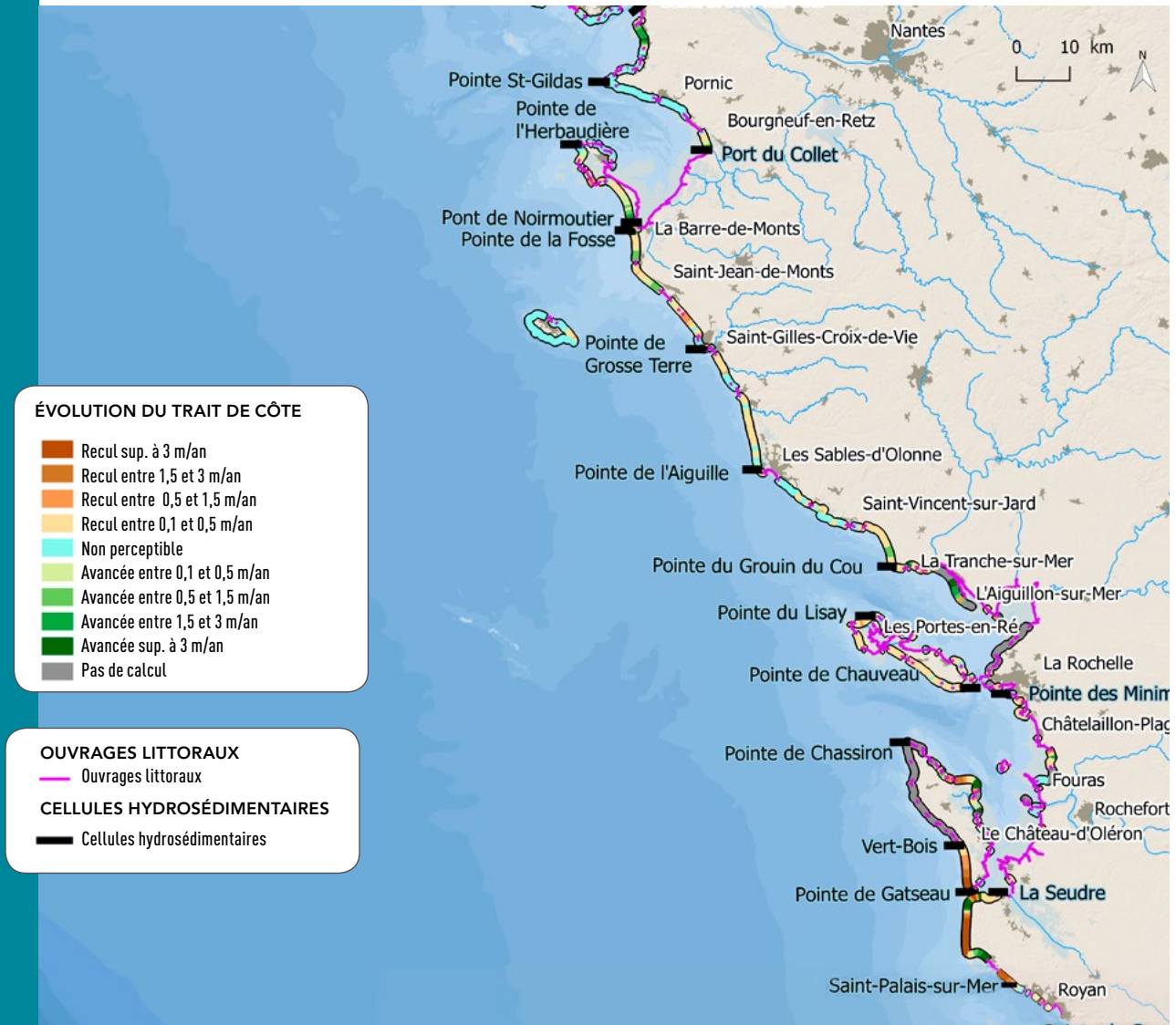


Figure 17 – Limites des cellules hydrosédimentaires connues et évolution du trait de côte

- Sources : Indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTEs, 2018) et données extraction de granulats (Ifremer, mars 2019)
- Fond de plan : ESRI Shaded Relief, bathymétrie Ifremer, Bd-Topo IGN
- Réalisation : Cerema, JUIN 2021

Cependant, si les mouvements sédimentaires à la côte sont essentiellement longitudinaux (le transport sédimentaire longitudinal résultant est globalement orienté du nord vers le sud), les mouvements perpendiculaires au trait de côte restent à ce jour très peu connus sur l'ensemble de la province, (certaines études, notamment (Cetmef et Conseil général de Charente-Maritime, 2000), mentionnent toutefois des transferts de sédiments supposés du large vers la côte pour expliquer les transits littoraux à la côte). La province est par ailleurs caractérisée par :

- la présence de deux grands estuaires, à la dynamique complexe et aux mouvements de matériaux importants,
- la présence des îles de Noirmoutier, Ré et Oléron, prolongement en mer des faciès géologiques présents sur le continent, et à l'origine de l'existence d'un système de baies (baie de Bourgneuf, pertuis Breton et pertuis charentais), avec des zones d'abri, une circulation des eaux complexe et des mouvements de sable généralement modérés aboutissant à des zones de dépôt en fond de baies (puits de sédiments pour les matériaux fins),
- et des côtes directement soumises aux actions des houles océaniques (la côte vendéenne de Fromentine à la pointe du Grouin du Cou, les façades occidentales des îles et la côte sauvage d'Arvert) avec des mouvements sédimentaires potentiellement plus importants.

2.5.2. ÉTAT DES CONNAISSANCES DES IMPACTS DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

L'histoire de l'aménagement de la province est marquée par quelques grandes périodes :

- la poldérisation de marais littoraux du nord au sud de la province et sur les trois principales îles avec plusieurs séquences d'aménagement entre le Moyen Âge et les années 1960,
- la fixation des cordons dunaires réalisée dans le cadre des dispositions du décret impérial de décembre 1810 qui a conduit à la plantation de pins maritimes à partir de 1830 afin de faire face au risque de l'ensablement du bâti et des terres agricoles (DHI-Geos, 2007),
- l'urbanisation des massifs dunaires qui a profondément transformé la côte sableuse lors de deux périodes distinctes, à partir du XIX^e siècle avec des travaux de fixation de grande ampleur, et dès la première moitié du XX^e siècle avec le développement de l'urbanisation balnéaire sur les cordons dunaires continentaux ou insulaires,
- les nombreux aménagements plus récents induits par les activités économiques ou touristiques liées au littoral (ostréiculture, ports de plaisance et ports de pêche ou de commerce).

D'autres activités plus récentes sont susceptibles d'avoir des impacts sur l'évolution sédimentaire :

- les extractions de granulats marins sur cinq sites de cette province qui se sont développées depuis les années 1970 pour répondre aux besoins de matériaux de construction,
- le développement des ports, en premier lieu ceux de commerce, qui a marqué la deuxième moitié du XX^e siècle et induit des activités de dragage et de clapage liées au maintien des fonds et des chenaux de navigation,
- et les autres activités humaines notamment celles liées à l'économie maritime (saliculture, cultures marines ou conchyliculture, ports), celles induites par le développement du tourisme sur le littoral, les infrastructures de transport, aménagement de zones de mouillage, les activités balnéaires ou encore les projets liés à la production d'énergie off-shore.

Les zonages réglementaires liés à la protection de l'environnement, en limitant ces impacts potentiels, participent indirectement à la protection du littoral et à son équilibre sédimentaire.

2.5.3. ACTIVITÉS D'EXTRACTION DE GRANULATS MARINS

Sur la province, 8 concessions, concernant 8 sites d'extraction de granulats marins, sont autorisées et 7 en activité en 2020 (Tableau 6 et Figure 18).

Historiquement sur la province, les demandes d'exploitation ont concerné quatre secteurs, du nord vers le sud (Figure 18) :

- les concessions du Pilier et du Grand Charpentier dans l'estuaire externe de la Loire,
- le Payré, au large des Sables-d'Olonne,
- Chassiron, au large de l'île d'Oléron, qui a fait l'objet de quatre concessions (dénommées B, C, D, E).

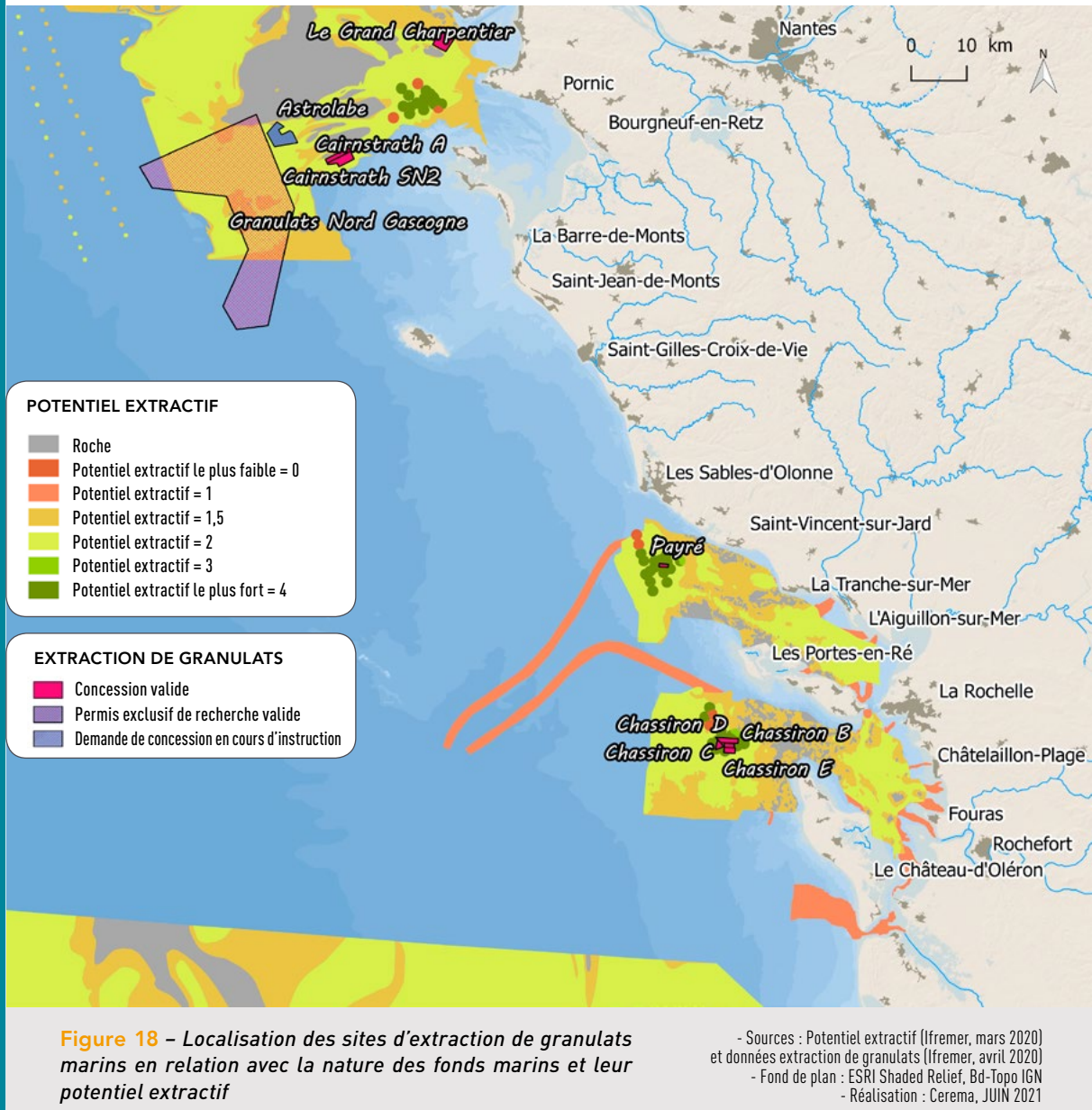
Concession	Matériaux	Surface exploitable (km ²)	Quantité maximale autorisée (m ³ /an)	Date décret	Échéance concession
Pilier (1)	Siliceux	8,20	2 267 000	04/1998	2018
Grand Charpentier (1)	Siliceux	10	1 200 000 *	09/2007	2032
Cairnstrath SN2 (1)	Siliceux	5,6	1 400 000	03/2017	2037
Cairnstrath A (1)	Siliceux	3,6	900 000	03/2017	2037
Le Payré (1)	Siliceux	0,96	350 000	11/2013	2031
Chassiron B (2)	Siliceux	1,33	330 000	03/2003	2023
Chassiron C (2)	Siliceux	1,35	330 000	09/2015	2029
Chassiron D (2)	Siliceux	3	330 000	04/2002	2022
Chassiron E (2)	Siliceux	2	482 000	07/2006	2036
Total province	Siliceux	17,84	4 122 000		

NB : Dans ce tableau, les concessions grisées sont terminées ou non exploitées.

*L'arrêté d'ouverture de travaux minier réduit la surface exploitable à 2,6 km² et la quantité maximale autorisée à 200.000 m³ par an

Tableau 6 – Concessions d'extraction de granulats marins sur la province (Sources : 1-DREAL Pays de la Loire ; 2 - Conseil international pour l'exploration de la mer -CIEM-, 2013)

Au large de l'estuaire de la Loire, le grand Charpentier n'a finalement pas été mis en exploitation et l'exploitation, qui était active au Pilier jusqu'en 2017, est poursuivie depuis avril 2017 sur les deux concessions de Cairnstrath A et SN2 avec le même volume annuel maximal autorisé que celui du Pilier.



Les principaux gisements, qui ont été identifiés lors de campagnes de prospection réalisées entre 1974 et 1979, sont situés au large de l'estuaire de la Loire, dans les pertuis charentais et au large de l'estuaire de la Gironde (Augris et al., 2006). L'estimation de la ressource (quantité, étendue et nature des sédiments) a été précisée au milieu des années 1980 confirmant les reconnaissances antérieures établies à l'occasion de l'inventaire national dans les années 1970 (Augris et al., 2006 ; **Tableau 7** et **Figure 18**).

Secteur	Volume (Mm ³)	
Saint-Nazaire	13 400	
Pertuis charentais	Pertuis d'Antioche	904
	Pertuis Breton	579
Gironde	650	
Total	15 533	

Tableau 7 – Estimation de la ressource en granulats (Augris et al., 2006)

Tous les sites de la province concernent l'extraction de granulats siliceux. La ressource exploitée correspond en effet à des accumulations de sable et de graviers siliceux au fond des paléovallées creusées par les fleuves dans le plateau continental au large des embouchures de la Loire, de la Charente et de la Gironde et constituées au cours des périodes glaciaires du Quaternaire.

À l'échelle de la province, les titres d'exploitation pour des matériaux siliceux représentent un volume total autorisé de 4 122 000 m³ pour une superficie cumulée de concession de 17,84 km² (**Tableau 6**). Pour l'ensemble de la façade Atlantique, la production s'élevait à 5,9 Mt en 2007, dont 77% concernait la province (d'après le dossier de demande de titre minier du PER "granulats au large de la Gironde" - Créocéan, 2009). Pour les sites d'extraction en région Pays de la Loire, c'est en moyenne 2,2 Mt qui ont été extraits annuellement entre 2011 et 2016 (**Tableau 8**).

Période	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Moyenne 2011-2016
Tonnage total (millions de tonnes)	2,83	2,76	2,24	2,00	1,92	1,62	2,23

Tableau 8 – Poids total de granulats marins extraits des sites des Pays de la Loire entre 2011 et 2016 (d'après DREAL Pays de la Loire dans DIRM NAMO, 2019)

Le suivi des impacts imposés aux pétitionnaires dans la zone d'influence des concessions concerne les aspects morphobathymétriques, biosédimentaires et halieutiques. Le suivi des sites d'extraction de Chassiron, pour lesquels plusieurs concessions ont été autorisées depuis 1984, a été imposé par l'État lors de la 3^{ème} autorisation et sa mise en place effective à partir de 2001. Ce suivi porte sur une reconnaissance détaillée des fonds marins (état de référence) et un suivi quinquennal portant sur une superficie de 60 km². Le suivi quinquennal effectué entre 2006 et 2011, comparé à un état de référence réalisé en 2001-2002, confirme des impacts sédimentaires qui restent conformes à ceux prévus par les études préalables à l'ouverture des travaux. La morphologie des accumulations observées met en évidence une grande mobilité des sédiments meubles sur le seuil interinsulaire. Cependant, à la date de réalisation du suivi, cette dynamique, qui traduit vraisemblablement un transit net des matériaux du large vers le pertuis d'Antioche, n'est pas affectée par les prélèvements de matériaux (Walker *et al.*, 2014).

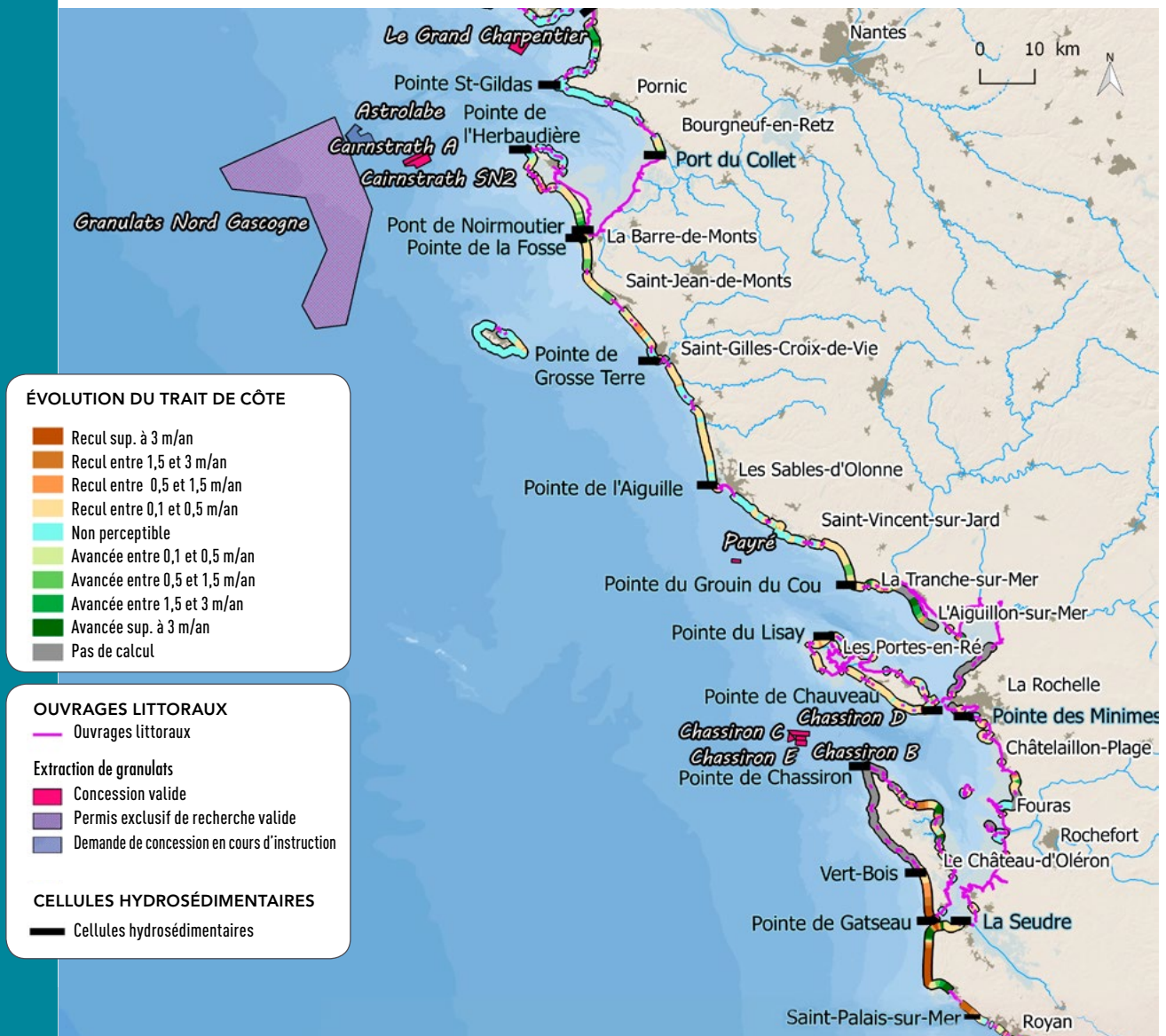


Figure 19 – Localisation des sites d'extraction de granulats marins, limites de cellules hydrosédimentaires connues et évolution du trait de côte

- Sources : Indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTEs, 2018) et données extraction de granulats (Ifremer, mars 2019)
- Fond de plan : ESRI Shaded Relief, bathymétrie Ifremer, Bd-Topo IGN
- Réalisation : Cerema, JUIN 2021

CHIFFRES-CLÉS DE LA PROVINCE :

LINÉAIRE DE TRAIT DE CÔTE
861 km

TYPES DE CÔTE :

18 % de falaises et côtes rocheuses
55 % de côtes d'accumulation
27 % de côtes artificialisées

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

37 % en recul
(dont 24 % entre 0,1 et 0,5 m/an)

43 % en évolution non perceptible

20 % en accrétion

CELLULES HYDROSÉDIMENTAIRES :
18 cellules identifiées

LINÉAIRE IMPACTÉ PAR DES AMÉNAGEMENTS CÔTIERS

478 km
(soit 56 % du trait de côte)

ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Sites d'extraction autorisés en 2020 :
8 concessions (7 en activité)

Lien entre extractions et évolution du trait de côte :
non établi

2.6. DE LA POINTE DE SUZAC À LA FRONTIÈRE ESPAGNOLE (GIRONDE, LANDES, PYRÉNÉES-ATLANTIQUES)

2.6.1. ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

Entre la pointe de Suzac au nord de l'estuaire de la Gironde et la Bidassoa, qui forme la frontière avec l'Espagne, la province sédimentaire qui borde l'océan Atlantique se divise en quatre unités morphosédimentaires très différentes :

- l'estuaire et l'embouchure de la Gironde où évoluent en permanence et de manière complexe des chenaux (naturels et artificiels) et des bancs (sableux et vaseux), sous l'effet de la houle, de courants caractéristiques à la fois de milieux côtiers et de systèmes fluviaux et du déplacement continu de matériaux sédimentaires de densités très diverses,
- une longue frange de côte sableuse et dunaire très rectiligne, d'orientation générale nord-sud et siège de deux mécanismes déterminants, la dérive littorale qui déplace des quantités importantes de sédiments le long du rivage et l'agitation océanique qui modifie en permanence la topographie du rivage et constitue l'agent majeur de l'érosion des côtes, avec un fort contraste saisonnier,
- le bassin d'Arcachon, vaste étendue d'eau lagunaire formée par l'estuaire de la Leyre, dont l'ouverture bordée à l'ouest par le Cap Ferret interrompt le littoral de la côte sableuse sur environ 3 km, et qui forme avec son système de passes un ensemble sédimentaire très singulier au sein des côtes de la province,
- les falaises rocheuses du Pays basque, sur 40 km entre Biarritz et Hendaye, présentant une résistance accrue à l'énergie de la houle océane et un moindre recul sous l'effet de l'érosion, mais aussi siège d'instabilité des terrains notable et problématique, et isolant des estrans sableux en fond de baie ou plage de poche, qui connaissent eux une dynamique très active.

L'évolution du littoral est très contrastée entre les différentes unités, sans même descendre à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire ([Figure 17](#) et [Figure 20](#)).

L'estuaire de la Gironde présente des fonds très variés, avec des zones entièrement sableuses, d'autres composées de graviers, des zones vaseuses et argileuses, ou encore des secteurs rocheux. Ces fonds, parsemés de multiples bancs de sable et îles, sont en constante évolution. Le LCHF y a réalisé très tôt des études (LCHF, 1959, 1963 ; Migniot, 1969) suivies par un nombre important de travaux universitaires ultérieurs (par exemple Braud, 1986 ; Howa, 1987 ; Mallet, 1998 ; Phan, 2002 ; Saari, 2008 ; Jalón Rojas, 2016). Les dynamiques morphologiques et sédimentaires à l'origine de cette évolution sont complexes. Elles sont contrôlées par la houle et les courants nés de la combinaison des apports fluviaux et de l'alternance des marées. À ce contrôle mécanique naturel s'ajoutent la nature très variable de ces fonds selon les lieux, les effets de la physico-chimie estuarienne -stratification, mélanges et formation de matières en suspension- (Allen, 1972 ; Allen *et al.*, 1979 ; Sottolichio et Castaing, 1999 ; Benaouda, 2008 ; Billy *et al.*, 2012) et les effets des activités humaines, importantes tant dans le domaine de la navigation que dans ceux de la pêche ou du tourisme.

De l'estuaire de la Gironde au nord de l'Adour, le littoral est meuble et constitue un système associant plage et dune littorale. De manière générale, à l'exception de quelques secteurs

localisés, en particulier dans les zones de débouchés en mer des cours d'eau (estuaires, bassin d'Arcachon et courants landais), celui-ci recule à des vitesses moyennes de l'ordre de 2,5 m/an en Gironde et 1,7 m/an dans les Landes (Bernon *et al.*, 2016). Les premiers documents publiés faisaient déjà état d'un recul régulier et quasiment généralisé du littoral aquitain (Buffault, 1930 ; 1942 ; Fabre, 1939). Les fortifications du Mur de l'Atlantique (murs épais, bunkers, supports d'artillerie...), édifiées durant la Seconde Guerre mondiale, constitueront par la suite des repères démonstratifs de la progression de l'emprise océanique durant la période récente (Manaud, 1998). Plus récemment encore, des constructions édifiées sur le littoral sableux ont été très directement menacées par cette progression. C'est le cas notamment de l'immeuble « Le Signal », sur la commune de Soulac-sur-Mer (33), évacué durant l'hiver 2013-2014.

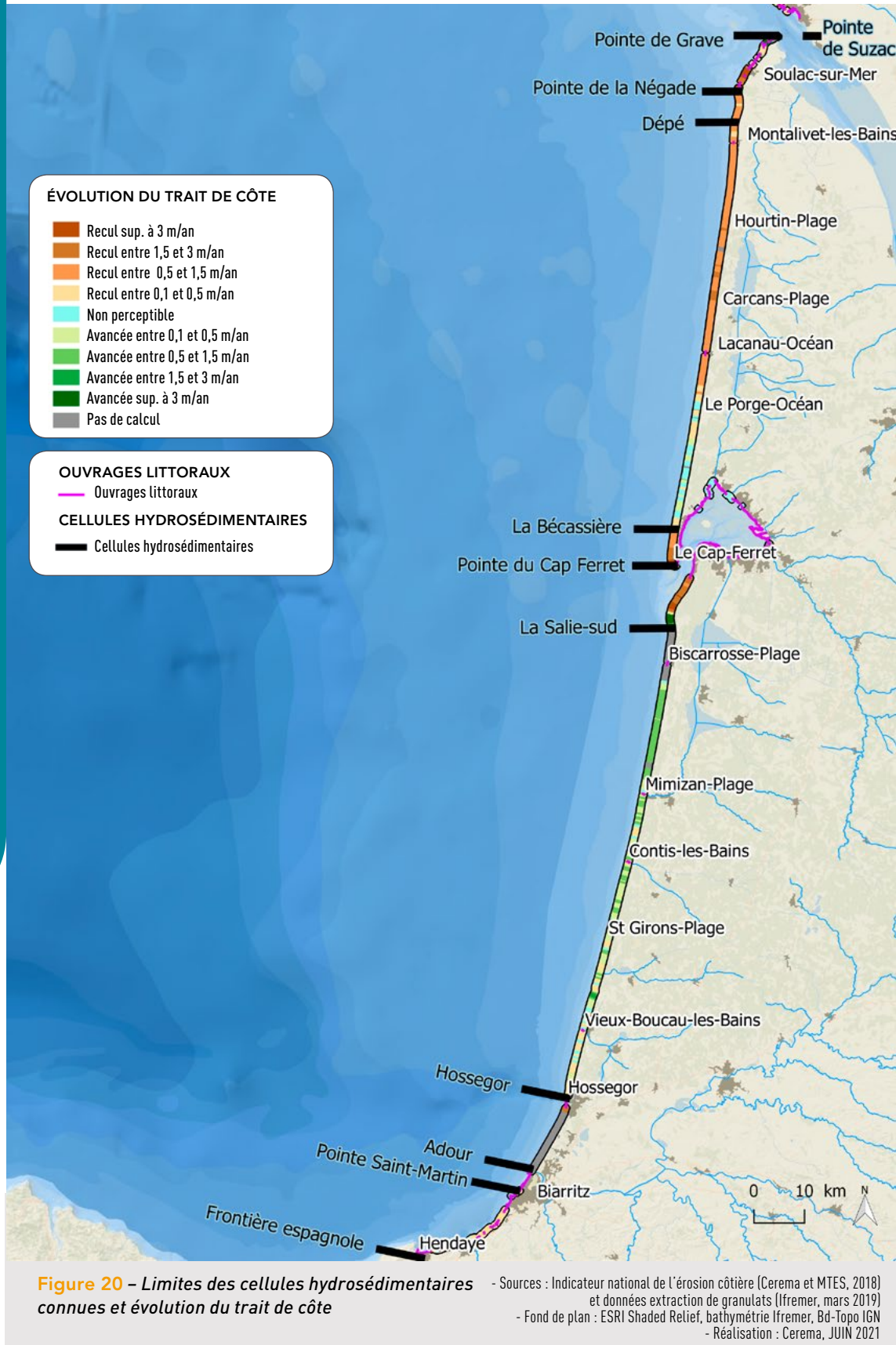
Pour quantifier le déplacement du littoral dunaire, le LCHF a fait des observations sur l'ensemble de l'Aquitaine durant la période 1977-1979 (LCHF, 1979) et a réalisé des études importantes dans les secteurs du bassin d'Arcachon (LCHF, 1969 ; 1973) et de Soulac-sur-Mer (LCHF, 1982). Des observations régulières, complétées par des constats opérés à la suite des tempêtes les plus importantes, sont effectuées depuis les années 2000 par l'ONF et le BRGM dans le cadre de l'Observatoire de la côte aquitaine (OCA). La stabilité ou l'avancée des pieds de dune entre 2003 et 2006 a été suivie d'une inversion de tendance avec une érosion accrue entre 2007 et 2008, sauf pour les secteurs de l'estuaire de la Gironde, du bassin d'Arcachon et de Capbreton, où l'accrétion a été dominante (Mugica et Mallet, 2008). De nouvelles quantifications du recul du trait de côte ont ainsi récemment été proposées (Bernon *et al.* 2016 ; BRGM et ONF, 2018 ; Cerema, 2018). Celles-ci sont globalement concordantes sauf pour la cellule hydrosédimentaire s'étendant de Biscarrosse (Salie-sud) à Hossegor (plage Notre-Dame) où l'OCA (BRGM et ONF, 2018) mentionne un recul généralisé sur la période 1950-2014 alors que l'indicateur national de l'érosion côtière (Cerema, 2018) montre plutôt une tendance à l'accrétion sur la période 1934-2011 sur les plages landaises, chiffres confortés par certaines études, telles que celles menées par Manaud *et al.* (2001) par exemple.

Les évaluations quantitatives des flux de sédiments sont opérées à différentes échelles (travaux du LCHF, OCA, travaux universitaires), et exploitent des mesures *in situ* ou des modèles numériques dont les résultats semblent concorder sur la côte sableuse (Idier *et al.*, 2013). La mise en œuvre d'outils d'observation plus précis et répétitifs (LIDAR, DGPS, photogrammétrie au sol et par drone...) ainsi que de modèles d'évolution morphologique du rivage plus performants (Marieu *et al.*, 2017 ; Biaisque, 2018) offre des perspectives d'amélioration des connaissances importantes.

Malgré la grande homogénéité paysagère de la côte sableuse, la dérive littorale s'inverse deux fois : de manière divergente de part et d'autre de l'anse du Gaur au nord et convergente de part et d'autre du gouf de Capbreton. La dynamique sédimentaire de la côte sableuse est par ailleurs influencée par la rupture que constitue l'embouchure du bassin d'Arcachon. La continuité du transit littoral cède la place à des mécanismes complexes de formation et disparition de crochons sableux, de déplacements de bancs de sable situés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du bassin et de transformations morphologiques des rivages et des fonds. Ce site présente encore à ce jour un grand nombre de facettes mal connues en matière de fonctionnement comme de devenir face aux évolutions des forçages hydrodynamiques et des volumes de sable mobilisés. Le gouf de Capbreton, canyon sous-marin dont la tête se rapproche suffisamment des côtes au sud de ce secteur pour y influencer la dynamique sédimentaire, constitue un puits de sédiments alimentant la plaine abyssale du golfe de Gascogne. Toutefois des travaux de recherche récents (Mazières, 2014) mettent en avant la possibilité de transits différents des sédiments dans ce secteur, permettant sous certaines conditions de houle la remise en circulation sur des parties plus profondes du plateau continental des sédiments du rivage.

Le long de la côte rocheuse basque, la présence et l'évolution des plages est liée, entre autres, à la fragilité de la partie haute des falaises qui les dominent. Une couverture d'altérite particulièrement sensible aux instabilités gravitaires, notamment en raison de pluies intenses,

entretient la présence durable d'une plage au pied de la falaise (Genna, 2004). Une observation régulière est également opérée sur ce secteur avec un suivi des mouvements du profil de la côte continentale et des mécanismes associés à l'action de la mer (Garnier et Millescamps, 2014 ; Garnier, 2013 ; Peter-Borie et al., 2009).



2.6.2. ÉTAT DES CONNAISSANCES DES IMPACTS DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

La province aquitaine a été marquée par les aménagements anthropiques, notamment par l'assèchement des marais littoraux et l'urbanisation progressive du rivage. Les premiers aménagements connus, et parfois encore visibles aujourd'hui, sur le littoral de la province furent expérimentés dès la seconde moitié du XVIII^e siècle. Les principaux objectifs étaient alors de gagner des terrains sur la mer pour augmenter les surfaces agricoles et assécher les zones plus ou moins humides pour limiter les problèmes sanitaires. Les dunes côtières, mobiles avant les grandes opérations de fixation engagées au XVIII^e siècle, portent la marque des activités humaines. Le cordon dunaire qui les sépare de la mer, devenu l'image de marque du littoral aquitain, a été travaillé pour les protéger. Entretenu par les « cantonniers de la dune » dans les années qui ont suivi la fixation et modelé mécaniquement dans les années 1958-1980, sa gestion repose aujourd'hui sur un contrôle souple, visant une modération de l'érosion éolienne tout en laissant les formes évoluer aussi librement que possible (Manaud, 1998).

Le développement du tourisme, timide dans l'entre-deux guerres mais sensiblement renforcé après la Seconde Guerre mondiale, a conduit à l'aménagement de la côte, notamment sous l'égide de l'État à travers la MIACA (Mission interministérielle d'aménagement de la côte aquitaine) entre 1967 et 1988 (GIP Littoral aquitain, 2007). Des stations balnéaires apparaissent le long de la côte sableuse, projetant le bourg de certaines communes girondines et landaises de l'intérieur des terres vers le front de mer, notamment Lacanau-Océan, Biscarrosse-Plage, Mimizan-Plage et Hossegor. Ce développement économique et touristique augmente la présence d'enjeux sur le territoire, le rendant plus vulnérable aux risques littoraux comme les submersions marines et les inondations dans les espaces dunaires et les zones basses artificialisées. Cette vulnérabilité accrue s'accompagne de divers aménagements sur le littoral : construction d'ouvrages de protection contre les submersions marines (digues, brise-lames), de maintien du trait de côte (perrés, murs) ou de lutte contre l'érosion des secteurs sableux (épis) et réalisation d'opérations de dragages et clapages pour l'entretien commun des chenaux de navigation et le rechargement des plages. Ces aménagements restent ponctuels et de grandes portions de la côte aquitaine n'ont pas fait l'objet d'aménagements lourds. Néanmoins les aménagements hydrauliques sur les cours d'eau (barrages) et les extractions de sédiments fluviaux et estuariens (principalement de la Gironde et de l'Adour) induisent une diminution des apports alluviaux à la côte (Manaud, 1998). D'autres activités peuvent avoir un impact direct ou indirect sur les apports sédimentaires à la côte, telles que l'anthropisation du littoral et le développement d'activités économiques à terre ou en mer (activités touristiques, pêche et cultures marines, extractions de sédiments, énergies marines renouvelables, etc.). Les zonages réglementaires liés à la protection de l'environnement, en limitant ces impacts potentiels, participent ainsi indirectement à la protection du littoral et à son équilibre sédimentaire.

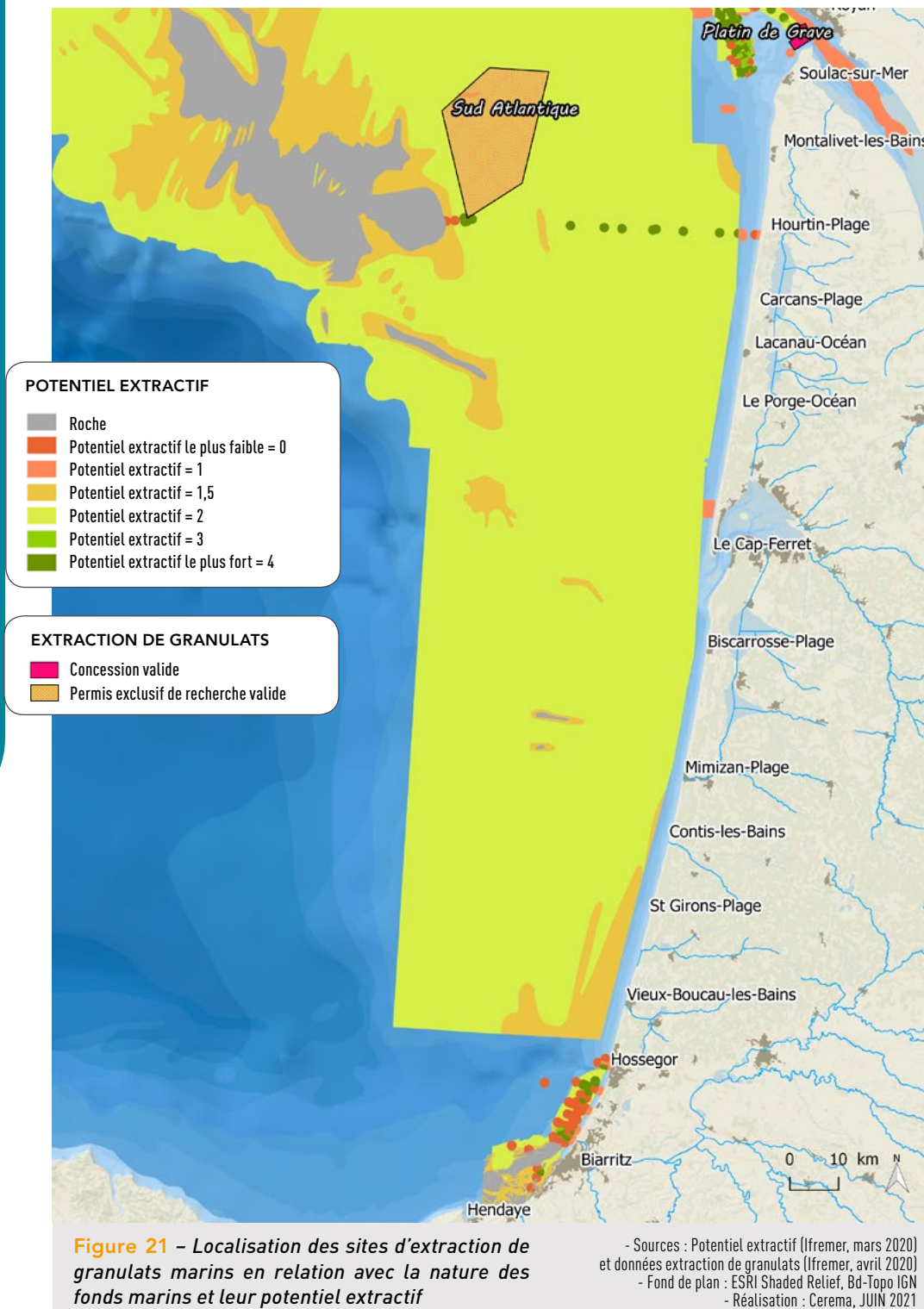
Une stratégie régionale de gestion de la bande côtière, validée par l'État et les collectivités territoriales du littoral aquitain en 2012, a défini les grandes orientations d'une gestion durable de la bande côtière. Elle prévoit l'élaboration de stratégies locales, portées par les collectivités territoriales, pour permettre d'affiner ces orientations et les adapter aux territoires (GIP Littoral Aquitain, 2012). Au 1^{er} juillet 2017, toutes les collectivités considérées comme prioritaires du point de vue des enjeux (Lacanau, Lège-Cap Ferret pour les passes du bassin d'Arcachon, Mimizan, Capbreton et la Communauté d'agglomération du Pays basque) ont lancé l'élaboration d'une stratégie locale relative à la gestion de l'érosion. La moitié d'entre elles a déjà achevé cette phase d'études et considère à présent une mise en œuvre opérationnelle.

2.6.3. ACTIVITÉS D'EXTRACTION DE GRANULATS MARINS

Sur la province, une concession, concernant un site d'extraction de granulats marins, est autorisée et en activité en 2020 (Tableau 9 et Figure 21).

Gisement	Délivrance de la concession	Durée de validité	Localisation	Superficie (km ²)	Quantité autorisée
Platin de Grave	25/07/03	20 ans	à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde	10,22	400 000 m ³ /an

Tableau 9 – Détail du gisement de granulats marins situé entre la pointe de Suzac et la frontière espagnole



Les extractions de matériaux pratiquées dans le domaine fluvial, et plus précisément ici dans les lits de la Garonne et de l'Adour, ont diminué les apports solides à la mer et affaibli le stock de matériaux ce qui, par suite de la rupture des conditions d'équilibre naturel, a provoqué des érosions et des nuisances justifiant l'abandon des exploitations d'une telle ressource (Beaudelin, 1989). Au niveau national, à mesure que les extractions dans les vallées alluvionnaires devenaient plus difficiles à exploiter du fait des contraintes d'urbanisme, de la protection des sites, de la sauvegarde des nappes d'eau souterraines et de l'environnement, et pour faire face à une demande en granulats toujours plus forte, de nouvelles sources d'approvisionnement ont été recherchées, ce qui a conduit à partir de 1969 à une reconnaissance de la couverture par des sédiments meubles du plateau continental français (Augris et Cressard, 1984).

Sur la province, les granulats marins sont essentiellement des sables et des graviers (prédominance des sables siliceux dans le golfe de Gascogne), et leur extraction peut notamment servir à recharger les plages en érosion. Il n'existe actuellement qu'une seule exploitation de granulats marins autorisée sur la province, dite du « Platin de Grave », et située à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde. Cette exploitation est assurée par l'entreprise GSM (Heidelberg Cement Group).

Des extractions ont été pratiquées sur l'estran aquitain dès le début du XX^e siècle, mais ne le sont plus actuellement (LCHF, 1987). Sur une zone de 80 km² de l'embouchure de l'Adour au gouf de Capbreton, un recouvrement sédimentaire variant entre 3 et 30 m d'épaisseur, totalisant 1,5 milliards de m³ de tout venant, avec une prédominance de sables siliceux de diamètre moyen inférieur à 315 µm, a été mis en évidence (Augris et Cressard, 1984). Dans cette zone, un gisement estimé à environ 10 Mm³ de sables²⁰ a été identifié au large de l'embouchure de l'Adour, sur la bordure nord du plateau du Loutrou (Figure 22). Ce gisement serait constitué de 10 % de petits graviers, 15 % de sables grossiers, 25 % de sables moyens et de 50 % de sables fins (Piednoir et al., 2005). Ce site a été exploité lors de constructions d'ouvrages dans la ville de Bayonne dans les années 1970, mais la disponibilité de granulats terrestres issus des Pyrénées proches rend l'exploitation des granulats marins non rentable et le site n'aurait plus été exploité par la suite (Piednoir et al., 2005).

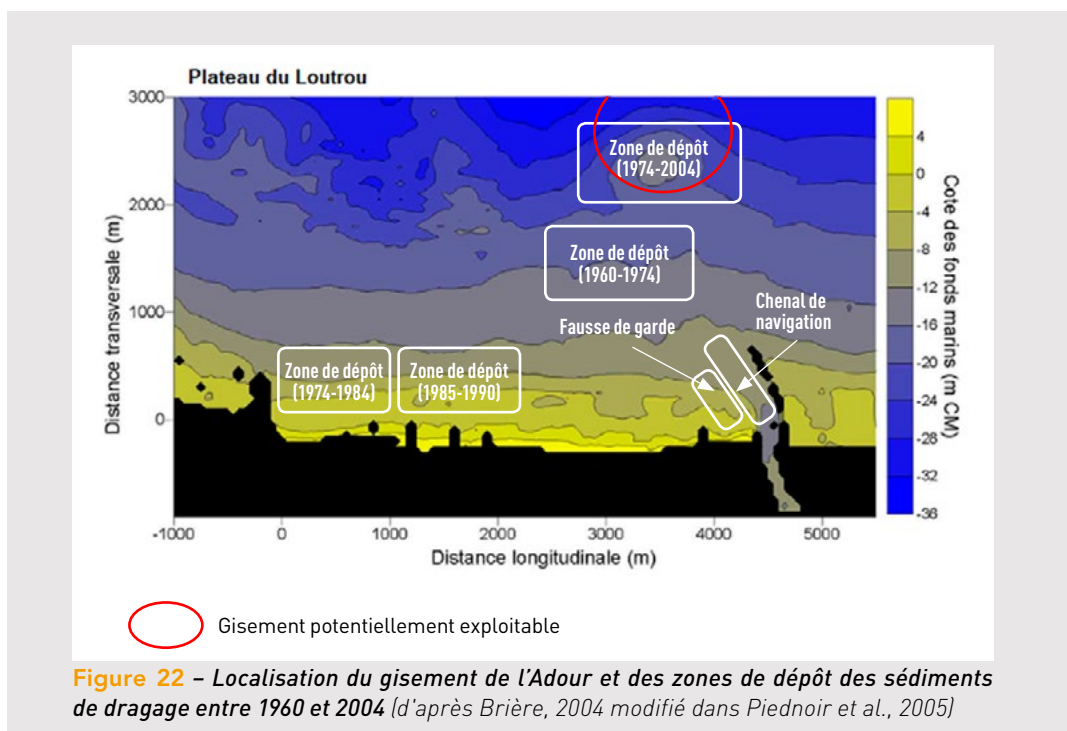


Figure 22 – Localisation du gisement de l'Adour et des zones de dépôt des sédiments de dragage entre 1960 et 2004 (d'après Brière, 2004 modifié dans Piednoir et al., 2005)

²⁰ Ce gisement serait constitué de 10 % de petits graviers, 15 % de sables grossiers, 25 % de sables moyens et de 50 % de sables fins (Piednoir et al., 2005)

Les volumes annuels moyens relatifs aux opérations d'extraction effectuées sur le Platin de Grave depuis 1945 sont synthétisés dans le **Tableau 10** ci-dessous. Depuis 1945, une intensification du régime des extractions de granulats au droit du Platin de Grave est observée, avec des autorisations de volumes extraits doublant successivement de 50 000 m³/an entre 1945 et 1965, à 100 000 m³/an entre 1965 et 1978, 200 000 m³/an entre 1978 et 2003 et jusqu'à 400 000 m³/an entre 2007 et 2023. La concession la plus récente autorise ainsi l'extraction de sables et graviers siliceux sur une superficie d'une dizaine de kilomètres carrés (UNPG, 2013).

Période	Quantité (m ³ /an)	Sources et informations complémentaires
1945-1965	50 000	(LCHF, 1987)
1965-1978	100 000	(LCHF, 1987)
1978-1981	200 000	(LCHF, 1987)
1981-2003	200 000	(Département de la Charente-Maritime, Département de la Gironde, 2014)
2007-2023 (période de délivrance de la concession)	400 000	Superficie de la concession : 10,22 km ² Matériaux : sables et graviers siliceux Déchargements : aux Monards et Grattequina (UNPG, 2013)

Tableau 10 – Historique des extractions de granulats sur le Platin de Grave (LCHF, 1987 ; UNPG, 2013)

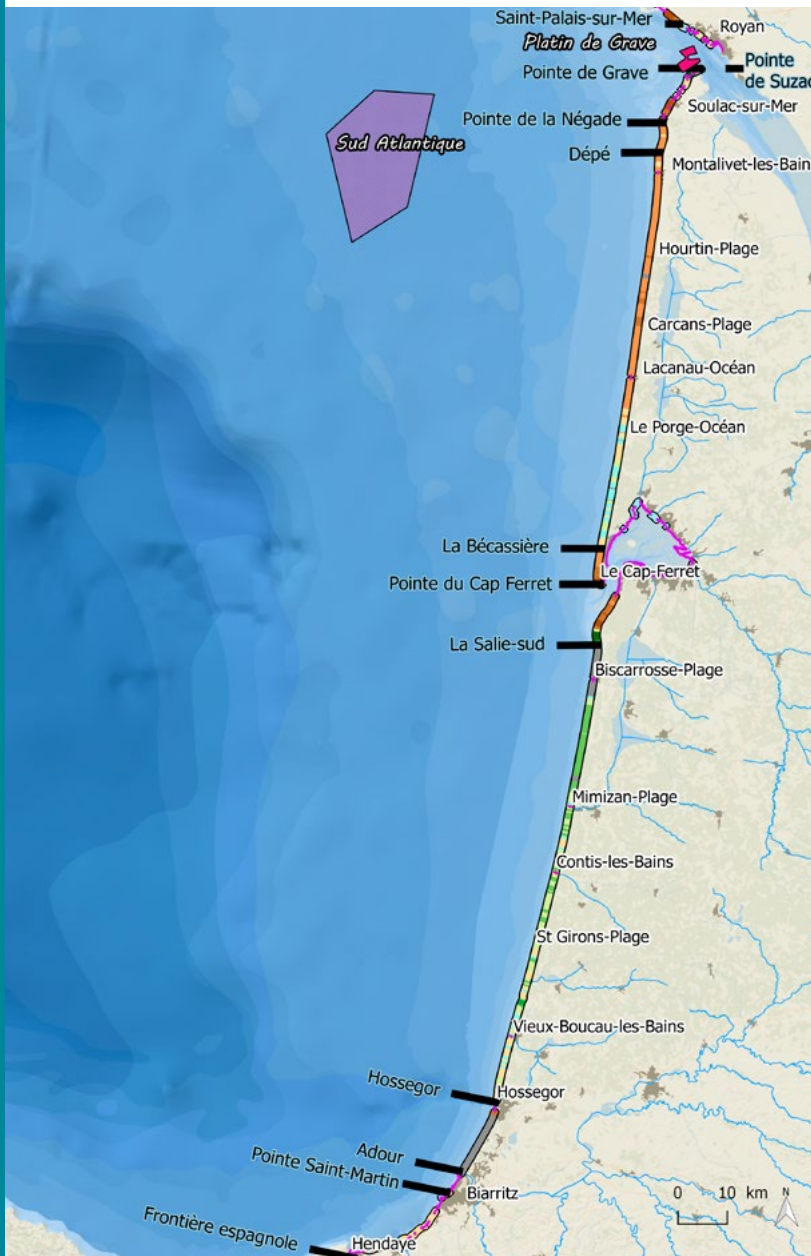
Au large de l'embouchure de l'estuaire de la Gironde, le Groupe d'intérêt économique « Sud Atlantique » s'est vu attribuer un permis exclusif de recherche de sables et graviers siliceux marins, dit « PER Sud Atlantique », portant sur les fonds marins du plateau continental au large de l'estuaire de la Gironde (Gironde et Charente-Maritime) par un arrêté ministériel en date du 3 mai 2016.

Sur l'estran, l'extraction est considérée comme un risque pouvant accentuer voire aggraver l'érosion du trait de côte que connaît le littoral à l'embouchure de la Gironde depuis le milieu du XIX^e siècle. C'est pourquoi, les extractions sur l'estran ont décliné au cours du temps, après une prise de conscience des nuisances pouvant être occasionnées.

L'état des connaissances sur les impacts potentiels des extractions de granulats marins sur la province aquitaine a été recensé par le CETE Sud-Ouest (désormais Cerema Sud-Ouest) en 2005 (Piednoir *et al.*, 2005). Sans être étayé par de la mesure locale, ce rapport, basé sur des entretiens, indique que les phénomènes d'érosion différentielle, typiquement observés dans les zones d'ombre des excavations telles que celle du Platin de Grave, pourraient être à l'origine du recul du trait de côte au Verdon-sur-Mer et à Soulac-sur-Mer. Trois études récentes (BRGM et ONF, 2018, Castelle *et al.*, 2018 et I-Sea, 2020) reposant sur une analyse historique des positions du trait de côte entre 1950 et 2014/2019 montrent au contraire que le littoral situé dans la zone d'ombre de la concession du Platin de Grave est en sédimentation depuis 1974.

Par ailleurs, Piednoir *et al.* (2005) considèrent que le risque d'impact d'une extraction potentielle sur l'évolution du trait de côte serait plus faible au niveau de l'embouchure de l'Adour, étant donné les très faibles flux sédimentaires.

Enfin, les travaux historiques de dragage du chenal de navigation au nord du gisement du Mâtelier entre 1979 et 1982 avaient provoqué une augmentation de la vitesse de migration du banc, passant de 2,8 à plus de 160 m/an (Heurtaux, 2004), laissant supposer un impact direct entre ces dragages et la dynamique hydrosédimentaire des bancs de l'estuaire de la Gironde.



ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

- Recul sup. à 3 m/an
- Recul entre 1,5 et 3 m/an
- Recul entre 0,5 et 1,5 m/an
- Recul entre 0,1 et 0,5 m/an
- Non perceptible
- Avancée entre 0,1 et 0,5 m/an
- Avancée entre 0,5 et 1,5 m/an
- Avancée entre 1,5 et 3 m/an
- Avancée sup. à 3 m/an
- Pas de calcul

OUVRAGES LITTORAUX

Ouvrages littoraux

EXTRACTION DE GRANULATS

- Concession valide
- Permis exclusif de recherche valide

CELLULES HYDROSÉDIMENTAIRES

Cellules hydrosédimentaires

Figure 23 – Localisation des sites d'extraction de granulats marins, limites de cellules hydrosédimentaires connues et évolution du trait de côte

- Sources : Indicateur national de l'érosion côtière (Cerema et MTEs, 2018) et données extraction de granulats (Ifremer, mars 2019)
- Fond de plan : ESRI Shaded Relief, bathymétrie Ifremer, Bd-Topo IGN
- Réalisation : Cerema, JUIN 2021

CHIFFRES-CLÉS DE LA PROVINCE :

LINÉAIRE DE TRAIT DE CÔTE
628 km

TYPES DE CÔTE :

- 4 % de falaises et côtes rocheuses
- 83 % de côtes d'accumulation
- 13 % de côtes artificialisées

ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

- 41 % en recul (dont 13 % entre 0,1 et 0,5 m/an et 18 % entre 0,5 et 1,5 m/an)
- 16 % en évolution non perceptible
- 43 % en accrétion (dont 20 % entre 0,1 et 0,5 m/an et 18 % entre 0,5 et 1,5 m/an)

CELLULES HYDROSÉDIMENTAIRES :
10 cellules identifiées

LINÉAIRE IMPACTÉ PAR DES AMÉNAGEMENTS CÔTIERS

208 km
(soit 33 % du trait de côte)

ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Sites d'extraction autorisés en 2020 :
1 concession (1 site en mer)

Lien entre extractions et évolution du trait de côte :
non établi

SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES SUR LES DIFFÉRENTS PROCESSUS HYDROSÉDIMENTAIRES POUVANT AMENER UN IMPACT DES EXTRACTIONS DE GRANULATS MARINS SUR LE TRAIT DE CÔTE

3.1. INTRODUCTION

La question de l'effet d'une souille d'extraction sur le trait de côte a été mise au point au début des années 80 à l'initiative de l'IFREMER (ex-CNEXO) à la suite de l'inventaire mené sur les ressources minérales disponibles sur le plateau continental. Les études ont été financées avec le soutien du Cerema (ex-STCPMVN), des services décentralisés du ministère de l'Équipement (Direction Régionale Aquitaine, Direction Départementale Pyrénées-Atlantiques) ainsi que du comité de gestion de la taxe parafiscale sur les granulats et l'UNPG (ex syndicat national des armateurs extracteurs de granulats marins).

Les études ont été confiées au Laboratoire Central d'Hydraulique de France (LCHF), aujourd'hui rattaché au groupe Artelia, qui menait dans les années 70 plusieurs travaux de recherche sur les mouvements sédimentaires littoraux sous l'action des houles ainsi que sur la protection de littoraux en érosion comme celui de la côte d'Anglet (Pyrénées-Atlantiques).

3.2. PREMIÈRES ÉTUDES : LE CAS DU GOLFE DE GASCOGNE

3.2.1. LES TRAVAUX PRÉLIMINAIRES

Ces travaux préliminaires comportaient une partie théorique de développement de formules empiriques, validées par des mesures de terrain (Migniot et Viguier, 1980). Ils avaient abouti à établir une limite d'action de la houle sur les sables à une profondeur de -30 mCM au large de la côte Aquitaine, pour les conditions de houle du golfe de Gascogne jusqu'à 7 m de hauteur significative.

D'autre part, ces recherches ont permis de montrer que les mouvements sédimentaires devenaient significatifs lorsque les profondeurs devenaient inférieures à -15 mCM avec l'établissement d'un transit littoral et des évolutions morphodynamiques appréciables. Cette limite correspond à ce que l'on appelle de nos jours en ingénierie côtière la profondeur de fermeture morphodynamique.

3.2.2. ÉVOLUTION MORPHODYNAMIQUE D'UNE SOUILLE EN MODÈLE RÉDUIT À FOND MOBILE

À partir de ces premiers résultats, Les études confiées au LCHF entre 1979 et 1983 ont porté sur la réalisation d'essais en modèle réduit d'évolution morphodynamique d'une souille de 800 000 m³ (800 m x 200 m sur 6m de profondeur) implantée sur un littoral sableux homogène (un seul profil-type) représentatif du golfe de Gascogne (pente douce de l'ordre de 1,5 % entre -28 mCM et la côte avec un sable de diamètre médian de 0,25 mm) soumise aux variations de niveau de la marée et aux conditions de houle représentatives et exceptionnelles de ce site (tempête annuelle de 5,5 m de hauteur significative et tempêtes exceptionnelles de 7,1 m et 8,7 m).

Les premiers essais ont d'abord été effectués en canal à houle et se sont poursuivis en cuve à houle et courants pour tester notamment l'influence d'une obliquité de la houle et des courants littoraux associés. Ils ont consisté à tester l'influence de la profondeur d'implantation d'une souille orientée parallèlement au rivage entre les fonds de -6 mCM et -25 mCM (Migniot et Viguier, 1980). La **Figure 24** présente le plan masse et une coupe-type du profil des fonds marins testé.

Ces essais ont montré qu'il était essentiel d'implanter une telle souille en dehors de la zone de déferlement (fonds de -16 m CM) pour éviter un piégeage du transport solide et un comblement rapide de la souille. Il fallait également prendre une distance de sécurité pour éviter une érosion régressive du profil pouvant affecter le trait de côte en se plaçant en moyenne par fonds de -21 m CM.

Une seconde série d'essais (Viguiet *et al.*, 1984) a ensuite consisté à étudier l'impact d'une augmentation de la largeur de la souille (2 alternatives à 360 puis 560 m de large conduisant à un volume de 1,05 et 1,45 millions de m³) sur son comblement et sur son impact sur le trait de côte puis à tester l'influence de l'obliquité et des courants.

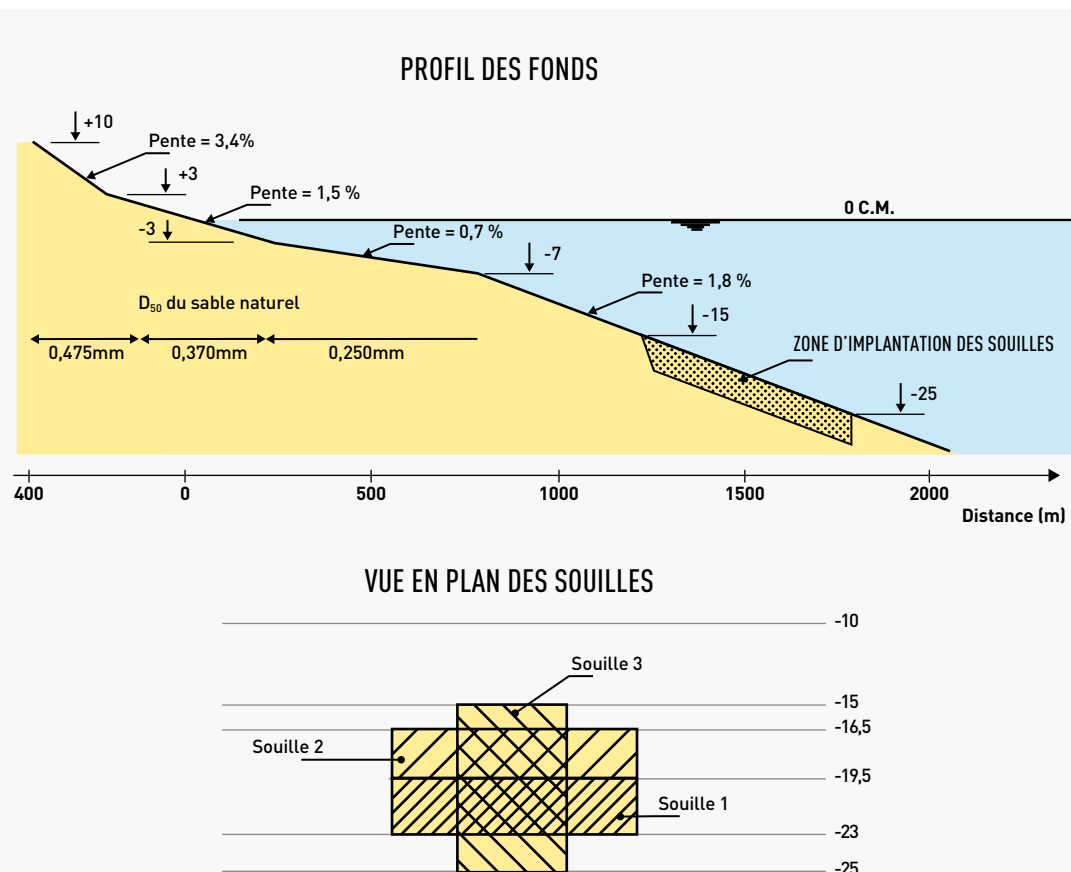


Figure 24 – Conditions expérimentales des essais en cuve à houle (d'après Viguiet *et al.*, 1984)

3.2.3. IMPACTS SUR LE TRAIT DE CÔTE ET CRITÈRES À RESPECTER

L'ensemble des résultats obtenus a été analysé pour d'une part clarifier les impacts observés et d'autre part fournir des critères sur le positionnement de la souille et ses dimensions. Trois impacts potentiels sur le littoral ont été clairement identifiés (Viguiet *et al.*, 1984).

Le premier est un impact potentiel direct sur le littoral par érosion régressive des petits fonds et de la plage entre la souille et la côte. Cette érosion vient combler la souille par un transport de sédiment dirigé de la côte vers le large. Sur ce point, la recommandation est de placer la

limite côté terre de la souille (haut du talus) à une profondeur située à plus de 400-500 m au large de la limite du déferlement. Cette limite est définie par une profondeur estimée à 1,6 fois la hauteur significative de la tempête annuelle²¹.

Le second impact possible est un effet à distance de la souille qui modifie les conditions de réfraction de la houle dans sa propagation vers la côte, ce qui induit un gradient des conditions de houle à la côte en hauteur et direction conduisant à une modulation du transit littoral puis à une évolution du trait de côte avec une sédimentation derrière la souille et une érosion de part et d'autre. C'est un effet cumulatif qui ne se voit pas directement sur les mesures de houle.

Sur ce second point, deux recommandations sont données pour éviter cet impact :

- d'une part, préférer une souille creusée parallèlement au littoral plutôt que perpendiculairement pour limiter la distance dans le profil de modification de la réfraction des vagues,
- d'autre part, limiter la profondeur de la souille de façon à ce que l'écart de célérité des vagues entre les fonds naturels et le fond de la souille reste acceptable.

Une formule empirique est fournie pour les applications pratiques. L'application de cette formule conduit à limiter le couple (largeur, profondeur) à (200 m, 6 m) ou (300 m, 4 m) dans les conditions étudiées.

Un troisième impact potentiel concerne la vitesse de comblement de la souille qui conduit ici à piéger du sable par transport longitudinal, c'est-à-dire parallèle à la côte, dans les essais réalisés. Ce comblement est très important à l'intérieur de la zone de déferlement (présence du transit littoral) et ce cas a été écarté d'emblée pour la réalisation des essais sur modèle physique.

En dehors de cette zone, les essais ont montré que l'impact reste faible lorsque les recommandations précédentes sont respectées sauf en cas de fort courant (1 m/s) observé au large de la zone de déferlement. Un tel courant peut en effet transporter des quantités significatives de sédiments mis en mouvement par la houle.

3.2.4. GÉNÉRALISATION DES RÉSULTATS

À l'issue de ce travail, l'Ifremer (Cayocca et Béryl du Gardin, 2003)²² a proposé des recommandations nationales pour limiter l'impact des extractions sur le trait de côte en reprenant les trois phénomènes mis en évidence précédemment et en y ajoutant le cas de l'extraction sur des bancs de sable.

a) Érosion régressive des petits fonds et de la plage entre la souille et la côte

Il s'agit d'un processus pouvant potentiellement combler la souille par un transport de sédiment dirigé de la côte vers le large. Cet impact, lié à la présence trop proche de la souille à l'intérieur de la zone active du déferlement, peut être évité en plaçant la souille au-delà d'une profondeur limite. Celle-ci est définie comme la profondeur de fermeture morphodynamique, généralement plus restrictive que celle définie par le LCHF, et estimée par la formule de Hallermeier (1978, 1981) mise à jour par Nicholls et al. (1998).

²¹ Par exemple, la hauteur significative de la tempête annuelle est ici de 5,5m. L'application de la recommandation conduit à une profondeur limite de déferlement à -9 mCM. D'autre part, la distance de 400 - 500 m sur une pente moyenne de 1,5 % conduit alors à positionner la limite côté terre de la souille par une profondeur de -15 à -16,5 mCM, au-delà donc de la profondeur de fermeture, estimée précédemment à -15 m CM.

²² l'Ifremer a publié ces recommandations sur son site internet <https://www.ifremer.fr/gm/Comprendre/Soutien-a-la-puissance-publique/Les-granulats-marins/Granulats-marins/Environnement/Effets-sur-la-stabilite-du-littoral>

b) Modification des conditions de réfraction de la houle dans sa propagation vers la côte

Ce processus de modification des conditions de houle n'avait pas pu être mesuré sur le modèle physique mais avait été déduit des évolutions observées du trait de côte.

Ifremer a refait les essais du LCHF sur modèle numérique et a pu visualiser ce processus conduisant à une zone d'ombre derrière la souille dans laquelle les hauteurs de vagues sont diminuées, créant ainsi une modulation du transit littoral entre les zones non affectées et cette zone d'ombre (Figure 25).

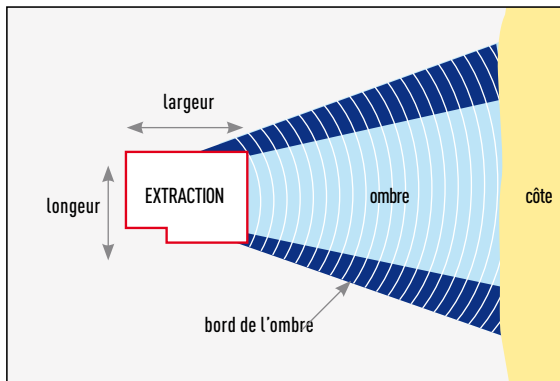


Figure 25
Effet d'une souille sur la propagation de la houle (d'après Ifremer)

Sur ce point, Ifremer propose également, comme le LCHF, de réduire cet impact en limitant la profondeur d'extraction et en réduisant la largeur de la souille, et ajoute un troisième critère qui est l'éloignement de la souille de la côte.

Ifremer propose pour cela une nouvelle formule de calcul pour déterminer ces trois paramètres. En pratique, cette formule est assez difficile à mettre en œuvre car elle nécessite de calculer des moyennes de longueur d'onde le long du profil entre la souille et la côte. Ifremer recommande des simulations numériques pour affiner le calcul ce qui sera finalement la règle pour la réalisation des études d'impact.

c) Piégeage de sédiments en dehors de la zone de déferlement

Ce processus est cité par l'Ifremer qui recommande de placer la souille en dehors de la zone active de transport afin d'éviter l'interception du transport longitudinal (transit littoral) et transversal par la souille.

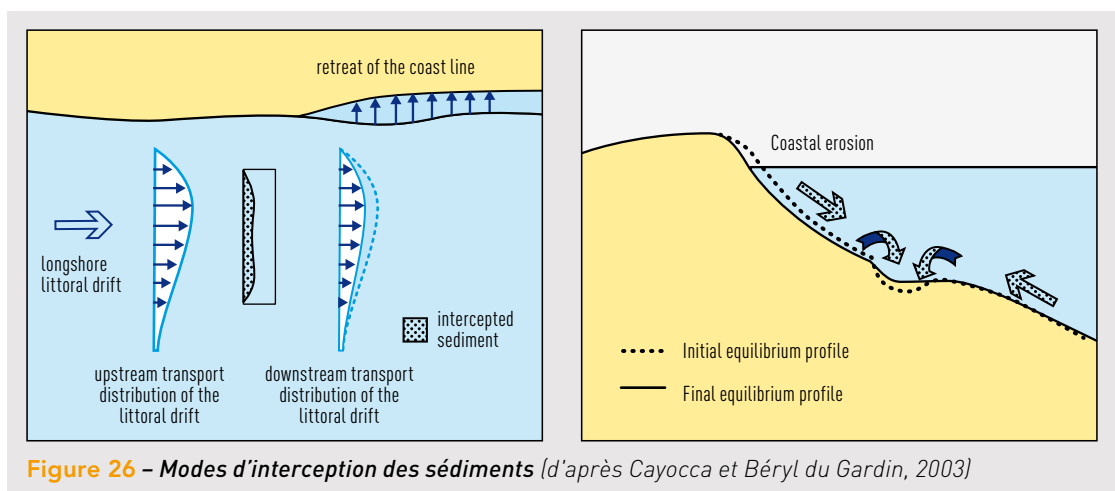


Figure 26 – Modes d'interception des sédiments (d'après Cayocca et Béryll du Gardin, 2003)

La formule de début de mouvement des sédiments pour les conditions annuelles médianes d'agitation, proposée par Hallermeier (1981), est proposée pour définir la limite de la zone active²³.

23 A titre illustratif, considérons le cas de la côte aquitaine avec une hauteur significative médiane annuelle de 1m et une période de 10 secondes, on obtient une profondeur de 28 m cohérente avec les valeurs estimées par le LCHF.

d) Extraction d'un banc de sable côtier

Ce quatrième processus, non étudié par le LCHF, est également décrit par l'Ifremer. Il s'agit d'une extraction d'un banc de sable culminant à une profondeur « d » conduisant à un abaissement de la côte du banc d'une profondeur « p » (Figure 27).

Dans ce cas, l'Ifremer fournit une recommandation qualitative sur les conditions de déferlement des vagues susceptibles d'être réduites. Cette réduction de déferlement conduit à une augmentation des hauteurs de houle à la côte pouvant mener à une possible érosion du littoral en cas d'arasement trop important. La profondeur limite p d'extraction à respecter n'est cependant pas définie par l'Ifremer.

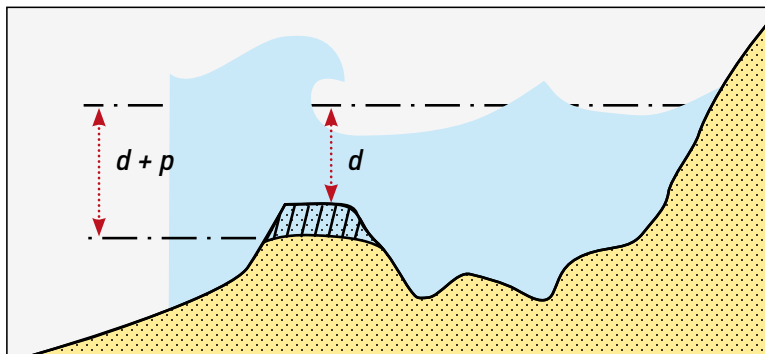


Figure 27 - Effet de l'extraction sur un banc de sable
(d'après Cayocca et Béryl du Gardin, 2003)

3.3. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART EN FRANCE (LATTEUX, 2008)

Suite aux travaux précédents, complétés par les résultats du projet européen SANDPIT (voir ci-après), l'Ifremer a confié en 2008, à un expert indépendant, M. Bernard Latteux, la rédaction d'un ouvrage de synthèse intitulé « Exploitation de matériaux marins et stabilité du littoral » publié aux éditions QUAE :

- un court premier chapitre resitue l'activité d'extraction des granulats marins en France,
- le second chapitre est consacré à une description détaillée des facteurs et des processus physiques en jeu incluant un rassemblement de formules permettant de calculer l'intensité des transports solides sous l'action de la houle et des courants,
- le troisième chapitre fait la liste des impacts potentiels sur le milieu physique (hydrodynamique et fonds sédimentaires),
- le quatrième chapitre dresse la liste des outils existants pour apprécier l'impact d'une extraction avec un accent mis sur la modélisation numérique plutôt que sur la modélisation physique,
- enfin le dernier chapitre est consacré au choix du site d'extraction et à l'étude d'impact.

Ce document constitue une compilation assez complète des recherches publiées sur le sujet à l'époque, essentiellement dans le domaine de la modélisation numérique (les études de cas sont rares) ce qui complète l'approche par modélisation physique du LCHF. Il étend également la thématique aux sites soumis principalement aux courants marins (bancs de sables de Manche et Mer du Nord). Il n'apporte pas de connaissances nouvelles sur les impacts possibles sur le trait de côte.

3.4. LE PROJET EUROPÉEN SANDPIT (2002-2005)

Le projet européen SANDPIT a rassemblé 17 instituts européens dont trois français (université de Caen, Cerema (ex-Cetmef) et Artelia (ex-Sogreah)) entre 2002 et 2005 dans le but de développer des recommandations et des outils de prévision pour mieux comprendre et prévoir les évolutions morphodynamiques des sites d'extraction de sédiments dans la zone côtière et de leur zone d'influence (à l'exclusion de la zone de déferlement et du trait de côte), avec un intérêt tout particulièrement centré sur la modélisation numérique à court-terme et les mesures nécessaires à la validation des simulations. Ce projet a permis aux chercheurs français d'échanger des informations et de la documentation avec leurs homologues européens et de s'ouvrir ainsi aux recherches internationales.

Il a également permis de confronter les différentes pratiques de chaque pays, notamment en matière de critères de positionnement de la souille en fonction de la profondeur. Un premier critère concernant l'érosion régressive des petits fonds (beach drawdown) recoupe la préconisation française de se placer toujours au-delà de -15 m CM pour éviter l'impact direct sur le trait de côte et de privilégier une souille parallèle à la côte. Un second impact à plus long-terme concerne la remontée possible de sédiments des petits fonds vers la plage qui pourraient être extraits dans la souille et soustrait au système ou même seulement interceptée par la souille. Une limite de -25 m CM est proposée au-delà de laquelle de telles remontées seraient négligeables. On retrouve ici la limite de mouvement des sédiments sous l'action de la houle estimée à -30 m CM par le LCHF.

Ce projet a d'autre part permis d'examiner plusieurs typologies de sites et notamment les zones de bancs sous-marins de la Manche et de la mer du nord pour lesquels les critères développés pour le golfe de Gascogne ne sont pas complètement adaptés.

Enfin, il a mis en évidence la variété des objectifs présidant à l'extraction de granulats marins avec notamment le développement du rechargement de plage comme méthode soutenable de lutte contre l'érosion du littoral, particulièrement aux Pays-Bas. Dans ce cas particulier, le sable extrait est restitué au système au niveau des plages ; il n'y a donc pas de perte sèche et les critères de positionnement de la souille définis par le gouvernement néerlandais sont donc moins stricts.

3.5. LES RECHERCHES AU ROYAUME-UNI

3.5.1. IDENTIFICATION DES IMPACTS ET PREMIÈRES RECOMMANDATIONS

Le Royaume-Uni est historiquement très actif dans l'extraction de granulats marins et un volume important de recherches est consacré à ce sujet depuis les années 60. Le souvenir de la destruction de 29 maisons dans le village côtier de Hallsands dans le Devon lors de la tempête du 26 janvier 1917 est également présent dans la littérature anglaise. Il avait été mis en évidence a posteriori que cette catastrophe était liée aux importantes extractions de graviers effectuées entre 1897 et 1917 très près de la côte pour les besoins de travaux portuaires à Devonport²⁴.

Price *et al.* (1978) font les premiers le point sur quatre processus pouvant affecter le trait de côte, à savoir :

- l'érosion régressive des petits fonds et de la plage,
- l'interception du transport des sédiments vers la côte susceptible d'alimenter les plages,

²⁴ <http://jncc.defra.gov.uk/pdf/gcldb/GCRsiteaccount1836.pdf>

- l'abaissement de la côte du sommet des barres et bancs sous-marins constituant une protection naturelle de la côte contre la force des vagues,
- les modifications de réfraction des vagues pouvant modifier la distribution du transit littoral à la côte et donc les évolutions du trait de côte.

On retrouve ici les principaux points développés en France, auxquels s'ajoute le souci de préserver les sources sous-marines d'alimentation des plages en sédiment (sables et graviers).

Les critères et recommandations développés dans cet article pour éviter ces impacts sont les suivants :

- placer la souille au-delà de la profondeur de fermeture estimée ici à -10 mZH pour éviter toute érosion régressive,
- placer la souille au-delà de la profondeur de début de mouvement des sédiments susceptibles de venir engraisser la plage ; une limite à -18 mZH est provisoirement recommandée pour les sites à faible courantologie avec une extension possible à -22 mZH si les courants dépassent 1 m/s,
- interdiction de draguer les barres et bancs qui protègent le littoral sauf exception,
- recommandation d'effectuer une modélisation numérique pour estimer les impacts sur la réfraction de la houle et sur le transit littoral. Des premiers calculs sur un site particulier indiquaient une limite à -14 mZH au-delà de laquelle cet effet devenait négligeable.

3.5.2. LES GUIDES DE RÉFÉRENCE ANGLAIS

En 2002, le gouvernement du Royaume-Uni a créé une nouvelle taxe sur les granulats pour favoriser leur exploitation durable. Une partie de cette taxe est consacrée aux granulats marins à travers un fonds MALSF (Marine Aggregate Levy Sustainability Fund) qui a financé des recherches sur les impacts environnementaux de cette activité entre 2002 et 2011²⁵ avec notamment des relevés régionaux exhaustifs des fonds marins. Dans ce cadre, un guide de 357 pages sort en 2004 pour définir les bonnes pratiques en matière d'étude d'impact environnemental (Posford Haskoning, 2004). Il reprend les 4 impacts potentiels définis précédemment et fournit des recommandations concrètes sur la façon d'évaluer l'importance de ces impacts et de les réduire.

Plus récemment, un guide spécifique à l'impact des extractions sur le trait de côte a été publié en 2013 conjointement par l'organisme gestionnaire du domaine public maritime et responsable de la délivrance des concessions (The Crown Estate) et par le BMAPA (British Marine Aggregate Producers Association)

3.5.3. ÉTUDES D'IMPACT RÉGIONALES

En 2008, une série de 4 études d'impact hydrosédimentaires régionales a été menée par des associations d'extracteurs de granulats afin d'examiner les effets cumulés des extractions passées, présentes et futures en préalable aux études de renouvellement de concession. Un guide de recommandations sur la méthodologie à mettre en œuvre a d'abord été élaboré puis différents bureaux d'étude ont mené ces études régionales (par exemple HR Wallingford, 2011).

Aucune de ces études n'a mis en évidence un impact des extractions passées et présentes sur le littoral. Certaines conclusions sont cependant contestées par des associations. Un exemple typique concerne l'érosion de la côte de Great Yarmouth qui serait due, selon l'association Marinet²⁶, aux sites d'extraction au large. Un retour d'expérience détaillé a donc été mené sur ce site (voir ci-après paragraphe 3.6.2).

25 <https://tethys.pnnl.gov/publications/marine-aggregate-levy-sustainability-fund-malsf-achievements-and-challenges-future>

26 <http://www.marinet.org.uk/further-evidence-of-dredging-induced-coastal-erosion.html>

3.6. RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR DES SITES EXPLOITÉS

3.6.1. CÔTE ALLEMANDE DE LA MER BALTIQUE

Ce retour d'expérience a été effectué dans le cadre du projet européen Eumarsand qui a rassemblé 9 instituts, essentiellement d'Europe du Nord et s'est concentré sur deux sites d'étude : d'un côté l'exploitation d'un banc de sable sous-marin au large de la Belgique, sans impact direct sur le trait de côte et de l'autre l'exploitation de deux sites en mer Baltique à proximité immédiate de la côte allemande.

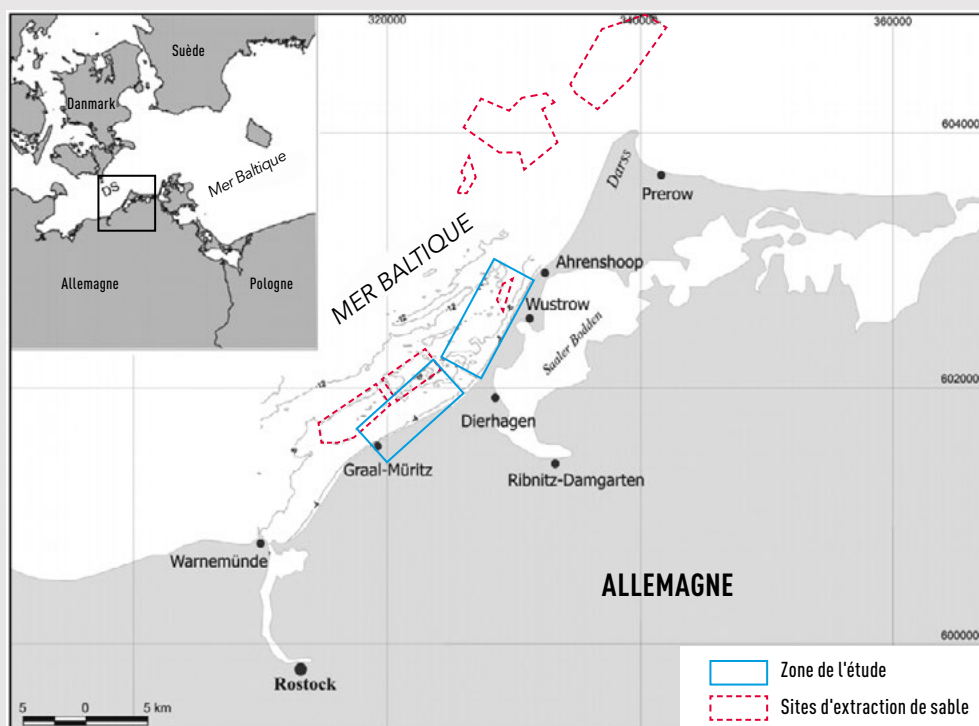


Figure 28 – Localisation des sites d'extraction en pointillé (d'après Kortekass et al, 2010).

La côte allemande de la mer Baltique entre Warnemünde et Ahrenshoop est soumise à une érosion chronique depuis plus d'un siècle de l'ordre de 0,3 à 0,7 m/an. Cela a conduit à la construction de nombreux ouvrages de protection côtière complétés par des rechargements de sable extrait de sites marins. Les deux sites principaux se situent au large de la ville de Graal-Muritz à une distance comprise entre 2,5 et 5,5 km de la côte par des profondeurs de 8 à 12 m. Les extractions s'effectuent sur une profondeur de l'ordre d'un mètre car la couverture sédimentaire est peu épaisse. C'est une zone dominée par les courants avec la présence de bancs de sable mobiles. L'agitation locale est faible (tempête quinquennale de 1,5 m de hauteur significative et 6 secondes de période moyenne) mais arrive très inclinée sur la côte générant un transit littoral vers le nord-est alimentant la construction d'une flèche de sable. La profondeur de fermeture a été estimée à 4 m.

La comparaison de données bathymétriques (1979 et 2002), de positions historiques du trait de côte entre 1953 et 2002 et la modélisation des champs de houle et du transit littoral n'ont pas permis de trouver de relation entre les souilles d'extraction de sable et les zones en érosion sur la côte. Par contre, des corrélations importantes ont été trouvées entre ces érosions et la construction d'ouvrages de protection en dur et notamment de deux brise-lames forains (Kortekaas et al., 2010).

3.6.2. LE LITTORAL DE GREAT YARMOUTH, ROYAUME-UNI

Ce littoral situé sur la côte Est de l'Angleterre au nord du Norfolk évolue de manière particulièrement complexe à cause d'une série de bancs de sable sous-marins mobiles qui se développent parallèlement à la côte. Ces bancs sont une ressource pour les extracteurs de granulats qui ont obtenu une série de concessions au large des bancs les plus côtiers. Ce sont ces extractions qui sont aujourd'hui accusées de causer l'érosion du littoral, notamment dans le secteur de Hemsby.

La **Figure 29** présente la vue générale du secteur avec l'ensemble des concessions et leurs différents statuts (5 au total) selon la couleur de leurs limites. Le pointillé noir indique la limite du détail bathymétrique des bancs fourni sur la **Figure 30**. La localité de Hemsby est en limite nord de ce pointillé.

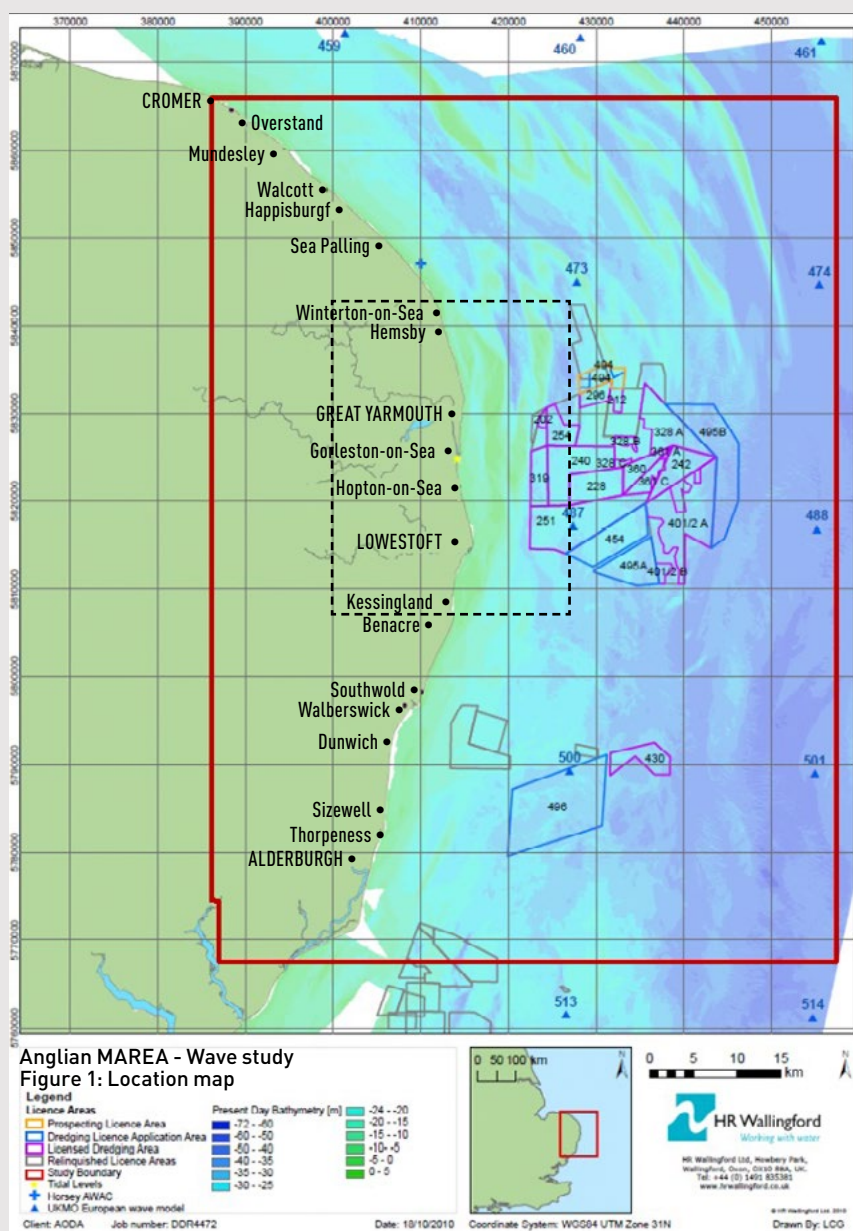


Figure 29 – Great Yarmouth : Bathymétrie générale et sites d'extraction de granulats (d'après HR Wallingford, 2011)

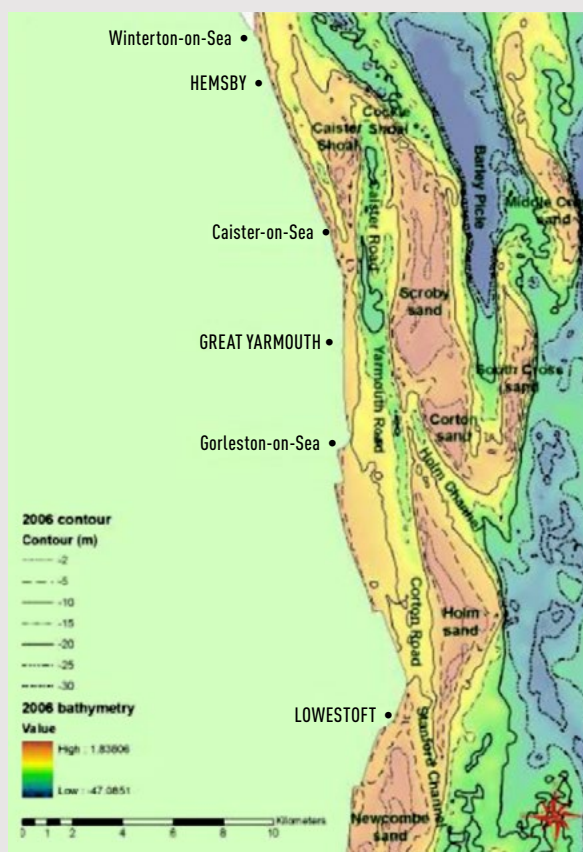


Figure 30 – Great Yarmouth. Détail des bancs de sable, bathymétrie 2006 (d'après Jacobs, 2018)

Les calculs de l'impact des concessions sur la propagation des houles n'ont pas mis en évidence d'impact sur la côte (HR Wallingford, 2011). D'autre part, des études détaillées ont été menées sur l'évolution historique de ces bancs (Jacobs, 2018 pour une synthèse). Elles ont mis en évidence un engraissement net de leur volume entre 1974 et 2014 conduisant à leur développement, en largeur vers la côte, ce qui déplace le chenal côtier vers le littoral en réduisant sa section (Figure 31). C'est ce déplacement qui entraîne une érosion des plages.

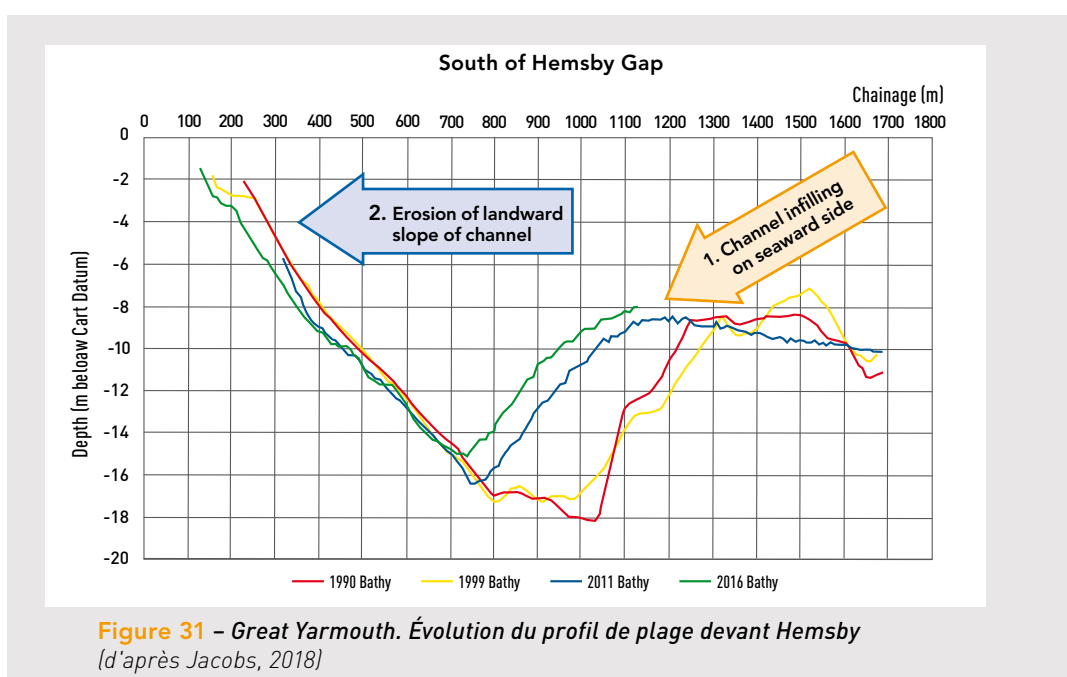


Figure 31 – Great Yarmouth. Évolution du profil de plage devant Hemsby (d'après Jacobs, 2018)

3.6.3. LE LITTORAL DE PAKIRI, NOUVELLE-ZÉLANDE

Le littoral de Pakiri est situé sur la côte Est de l'île Nord de la Nouvelle-Zélande. Il est soumis à des houles locales (hauteurs significatives inférieures à 3 m) mais peut subir exceptionnellement des tempêtes tropicales comme celle de 1978 avec une hauteur significative au large estimée à 8 m et une période associée de 12 s pour un temps de retour estimé à 10-30 ans.

Cette tempête a largement érodé le littoral et un programme de suivi de profils de plage a été entrepris notamment pour savoir si les extractions de sable effectuées par petits fonds (moins de 10 m) pouvaient induire tout ou une partie de cette érosion. L'étude de Hilton et Hesp (1996) analyse 15 années de suivi topographique de cette plage qui a fait l'objet d'entretien et de rechargements, ce qui complique l'analyse. Cette étude montre que la plage se reconstitue lentement après le choc de la tempête de 1978. Cette reconstruction du profil s'effectue par des transports dans le profil venant des petits fonds, induits par l'agitation habituelle sur ce site.

Ces petits fonds font l'objet depuis 1940 d'extractions dont les autorisations sont régulièrement renouvelées pour un volume de l'ordre de 100 000 m³/an. Elles ont lieu à 300 m de la côte par fonds de 3 à 8 m sur 9,5 km de long. Chaque campagne creuse une souille de 2 m de profondeur sur quelques centaines de m², qui est ensuite assez rapidement comblée sous l'action des vagues.

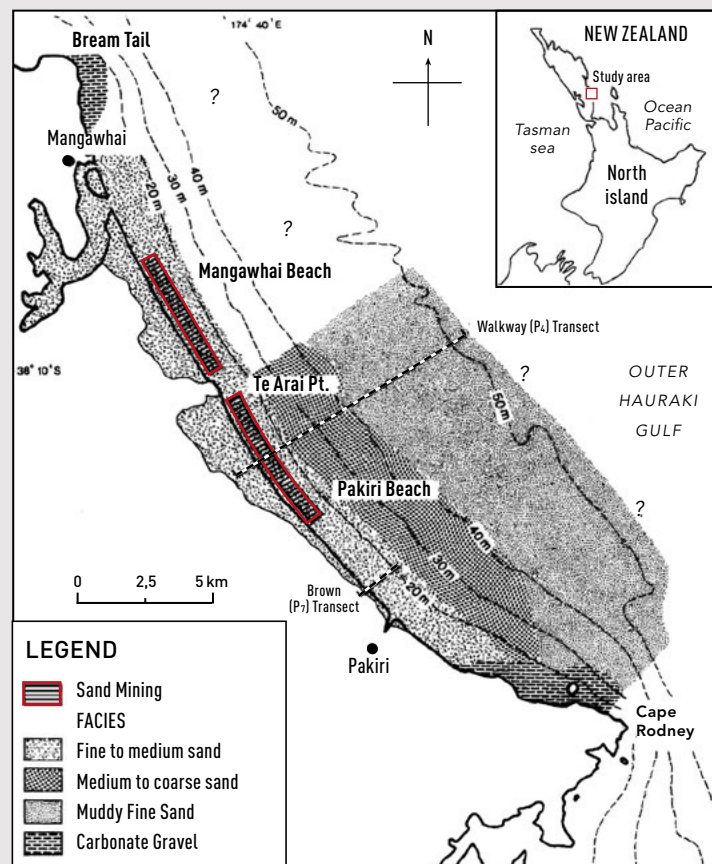


Figure 32 – Littoral de Pakiri (d'après Hilton et Heps, 1996)

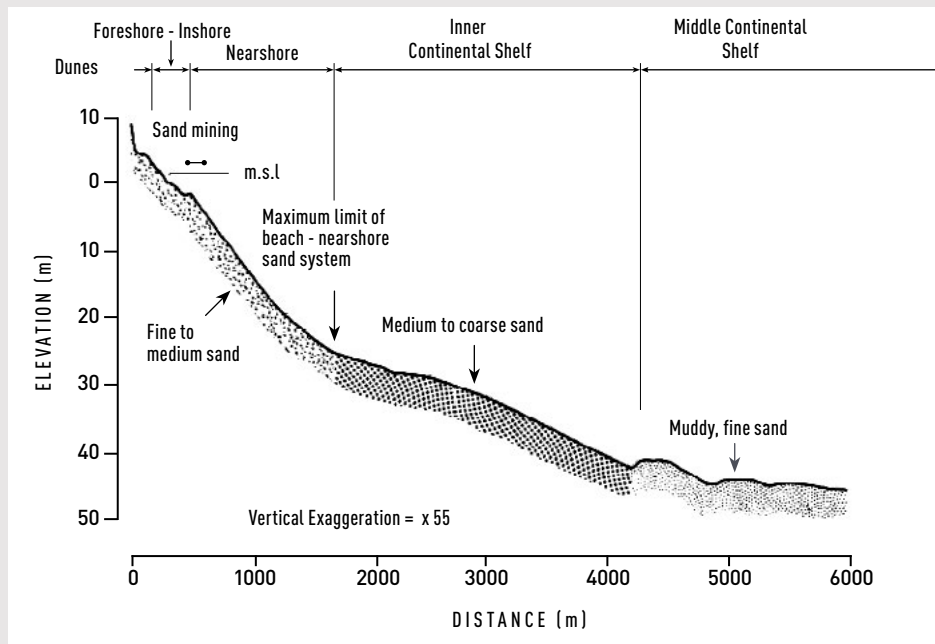


Figure 33 – Profil représentatif du littoral de Pakiri (d'après Hilton et Heps, 1996)

Les autorisations sont renouvelées à la suite d'études d'impact environnemental indiquant que l'impact de ces extractions est nul puisque le littoral est en sédimentation depuis 1978, que les volumes extraits sont faibles et que les souilles se comblent grâce à du sable remontant du plateau continental.

L'étude de Hilton et Heps porte sur ce dernier point en recherchant la limite d'interaction entre le plateau continental et la zone littorale.

Pour cela, une analyse bibliographique met en évidence sept critères permettant d'estimer la profondeur limite d'interaction que sont :

- l'analyse des profils aériens et sous-marins entre la dune et le plateau continental,
- les estimations de la profondeur de fermeture,
- la limite de l'extension des courants sagittaux vers le large,
- la présence de formes de fonds (rides, dunes),
- la composition granulométrique des fonds,
- la répartition de la faune benthique le long du profil.

Ces différents critères sont passés en revue. Ils convergent vers une profondeur limite de -25 m, à 1500 m de la côte, au-delà de laquelle il n'y a plus de mouvement de sédiment sableux. Cette profondeur marque également un changement de pente du profil qui s'adoucit sensiblement. Les calculs théoriques de contrainte critique de mise en mouvement des sables confirment cette estimation. La profondeur de fermeture est estimée à -12/-14 m par comparaison de levés bathymétriques, la formule d'Hallermeier (1978) conduisant à une valeur de -10,1 m.

Dans ces conditions, la conclusion des auteurs est que la durée limitée des observations (15 ans entre 1978 et 1993) et l'absence de bathymétrie de référence avant extraction ne permet pas de conclure sur l'impact avéré des extractions sur la position du trait de côte. Ils estiment cependant avoir démontré que le stock de sable est limité entre la côte et les fonds de -25 m et que dans ces conditions, l'extraction continue de sable, même faible, dans la zone active (en deçà de la profondeur de fermeture) contribue à un appauvrissement du stock qui va réduire les capacités de résilience du littoral après une tempête tropicale rare. Cette capacité réduite de résilience est d'ailleurs démontrée sur le site par comparaison avec des sites voisins.

3.7. LA PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les études littorales en France et dans le monde prennent aujourd'hui en compte les modifications de forçages liés au changement climatique et notamment l'élévation du niveau de la mer. Cette question devient cruciale dans les études de risque d'érosion et de submersion marine et la recherche de résilience de ces territoires. Elle a conduit à un développement des recherches historiques concernant la formation des littoraux meubles actuels qui éclairent dont les résultats éclairent leur évolution probable dans le futur.

Le présent chapitre résume les principaux résultats de ces recherches en relation avec de potentiels impacts des concessions de granulats marins susceptibles d'intercepter le transport des sédiments du large vers la côte.

3.7.1. ORIGINE DES LITTORAUX ACTUELS

Les littoraux actuels ont été modélisés en grande partie par la remontée rapide (environ 10 mm/an) du niveau de la mer de 120 m qui s'est produit entre -20 000 BP et -6 500 BP²⁷ lors de la transgression flandrienne. Cette remontée du niveau de la mer s'est en effet accompagnée d'un transport de sédiments vers la côte qui a permis de construire les lignes de rivage et les dunes côtières avec, en complément, les apports de sédiments des fleuves.

Cette remontée du niveau de la mer s'est considérablement ralentie entre -6 500 et -2 000 BP (0,6 mm/an) puis s'est stabilisé ensuite. Elle reprend cependant depuis le début de l'âge industriel avec une tendance à l'accélération (1,5 mm/an au 20^{ème} siècle et 3 mm/an sur les 20 dernières années).

3.7.2. TRANSPORT DES SÉDIMENTS DU LARGE VERS LA CÔTE À COURT-TERME

Le transport de sédiments depuis le plateau continental jusqu'à la côte résulte d'un ensemble de processus physiques encore peu étudiés par la recherche qui s'est focalisé en priorité, et à juste titre, sur la perte brutale de sédiments de la côte vers le large lors d'épisodes de tempêtes pouvant être catastrophiques, comme par exemple lors de l'hiver 2013-2014 sur la côte atlantique (Bulteau *et al.*, 2014 ; Castelle *et al.*, 2015)

D'autre part, les premières études sur les conséquences d'une élévation du niveau de la mer sur les littoraux (Bruun, 1962) ont conduit à faire l'hypothèse d'un recul du trait de côte proportionnel à cette élévation, hypothèse reprise et discutée de manière générale depuis plus de 50 ans avec différents raffinements. La faible intensité de la remontée du niveau de la mer depuis 2000 ans ne permet cependant pas de valider clairement le volet quantitatif de cette règle (Le Cozannet *et al.*, 2019).

Sur le court-terme, plusieurs études ont cependant montré que ces processus érosifs étaient contre-balançés par le retour du sable vers la côte, de manière partielle ou complète et avec des échelles de temps plus ou moins rapides. De manière générale, on peut observer sur nos littoraux une « respiration » de la plage qui se démaigrît en hiver sous l'effet des tempêtes et se reconstruit en été. Lors de tempêtes exceptionnelles, une étude sur la résilience de littoraux sableux en Angleterre a montré la grande diversité des cas rencontrés allant d'une absence quasi-totale de retour du sable à une reconstruction rapide de la plage (Brooks *et al.*, 2017).

²⁷ BP = « Before Present » (anglais) soit en français : « avant le présent ». Datation à partir de l'époque actuelle soit environ l'an 2000

3.7.3. TRANSPORT RÉSIDUEL À LONG-TERME

Sur le long-terme, plusieurs études aux Pays-Bas, en Australie et aux États-Unis ont permis de progresser sur la question. Ainsi, Cowell *et al.* (2000) ont fait le point sur les apports de sables marins à la côte : il s'agit d'un transport résiduel de faible intensité qui est souvent masqué par les fortes variabilités du transport alternatif induit par les courants de marée et les vagues. Des méthodes d'analyse spécifiques ont donc été développées par les géologues pour déduire ces transports de sable à partir de suivis de la stratigraphie de plaines littorales sur plusieurs milliers d'années.

Un exemple est fourni ci-dessous pour la plage australienne de Moruya au sud de Sydney (Cowell *et al.*, 2000) qui s'est développée depuis 6 500 ans en avançant de 2 km environ avec un niveau marin relativement constant. La **Figure 34** détaille la succession des couches de terrain sédimentaire ayant abouti à la situation actuelle du littoral. Cette avancée est expliquée par le fait que les fonds marins étaient trop hauts après la transgression flandrienne. Cela a conduit à une érosion et un transport de sable du large vers la côte estimé à $7 \text{ m}^3/\text{m}/\text{an}$ il y a 6 000 ans, et qui a décréu jusqu'à $3,3 \text{ m}^3/\text{m}/\text{an}$ aujourd'hui (**Figure 35**).

Un point important ici est l'échelle de temps très longue nécessaire au système côtier pour s'adapter à une remontée du niveau de la mer qui s'est stabilisé il y a plus de 6 000 ans. Un autre point important indiqué sur la **Figure 35** est la présence d'un pavage des fonds marins qui limite probablement le transport de sable vers la côte. Enfin, on peut noter que l'érosion des fonds marins s'effectue à un rythme quasiment imperceptible de l'ordre de $1,3 \text{ mm}/\text{an}$ en moyenne et de $0,5 \text{ mm}/\text{an}$ actuellement. De telles épaisseurs ne sont pas accessibles à la mesure à l'échelle humaine.

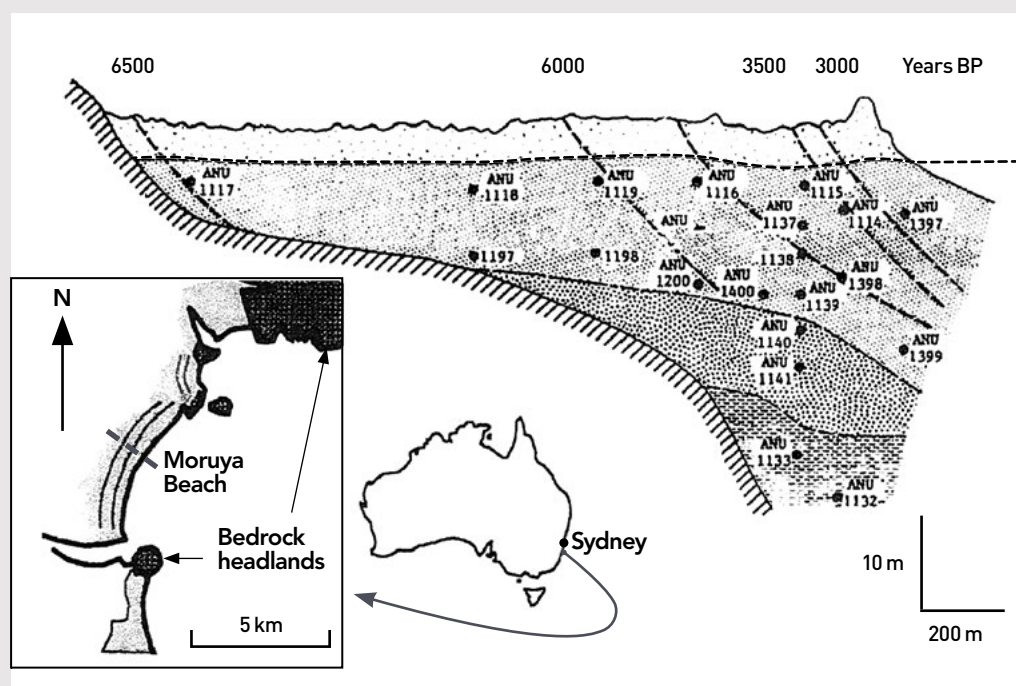


Figure 34 – Relevés et datation carbone de la stratigraphie de la plage de Moruya
(Cowell *et al.*, 2000)

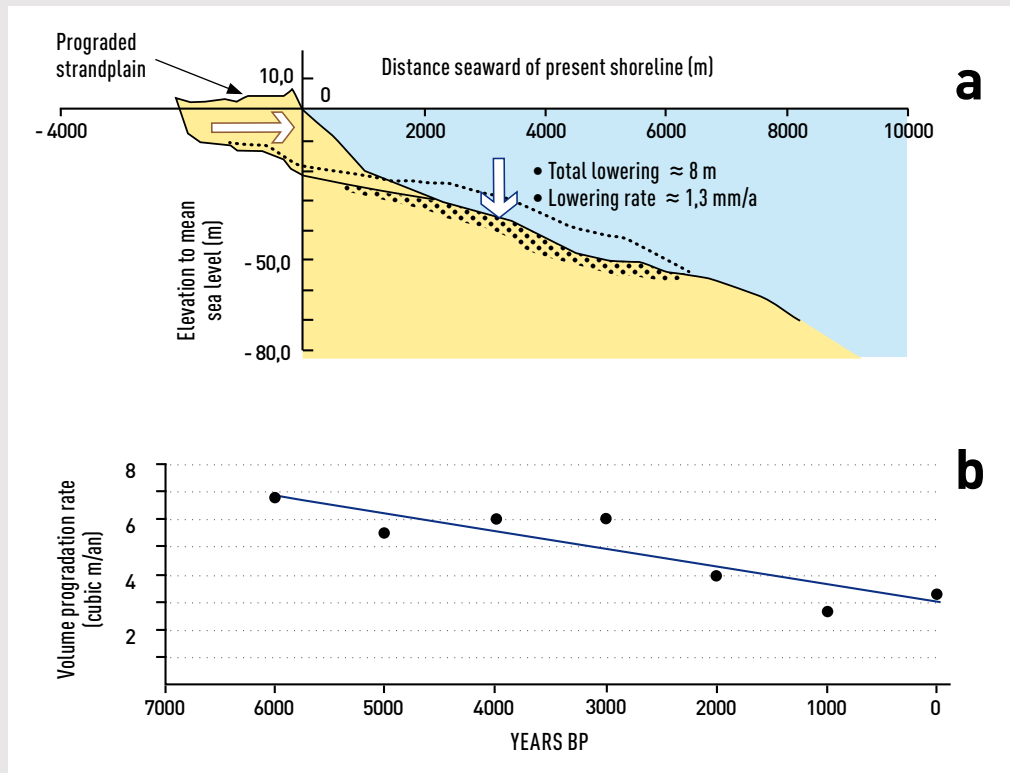


Figure 35 – a) *Processus de construction de la plage de Moruya par érosion des fonds marins et transport des sables du large vers la côte (d'après Cowell et al., 2000) et b) taux de sédimentation de la plage en $m^3/m/an$*

De tels processus ont également été mis en évidence dans d'autres régions comme la Hollande et aux États-Unis (Cowell et al., 2000). Plus récemment, Houston et Dean (2014) ont étudié sur une période de 150 ans entre 1860 et 2008 les évolutions de la côte est de la Floride sur 575 km de long. Ils ont mis en évidence une avancée du trait de côte de 48 m en moyenne dont 25 m pour la période récente comprise entre 1972 et 2008 pendant laquelle des rechargements de plage intensifs ont été effectués. Ils ont ensuite recherché à quantifier les différentes sources d'érosion et de sédimentation et sont arrivés à la conclusion que les apports de sable venant du large étaient une source dominante d'apports qui contrebalançaient les effets de remontée du niveau de la mer et les pertes aux débouchés de lagunes.

Un travail similaire, aboutissant à la même conclusion a également été réalisé sur la côte sud-ouest de Floride permettant ainsi une prévision de l'impact de différents scénarios de changement climatique sur l'évolution moyenne du trait de côte (Dean et Houston, 2016).

3.7.4. LE RÔLE DE LA GÉOLOGIE LOCALE ET DES ACTIONS ANTHROPIQUES

Cependant, une telle prédominance n'est pas la règle sur toutes les côtes et les recherches les plus récentes (Cooper *et al.*, 2018) indiquent que les contraintes géologiques locales, héritées de la transgression flandrienne, jouent un grand rôle dans ces processus à long-terme.

Ainsi, Menier *et al.* (2019) ont recherché en baie d'Étel (Morbihan) la possibilité pour les sables fossiles de l'Holocène, situés entre -25 et -50 m de fonds de venir alimenter le littoral. Leur analyse montre dans ce cas que ces sables sont bloqués dans un substrat rocheux à une profondeur telle qu'ils ne sont pas susceptibles de remonter vers la côte, le haut-fonds rocheux faisant obstacle à leur remontée (Figure 36).

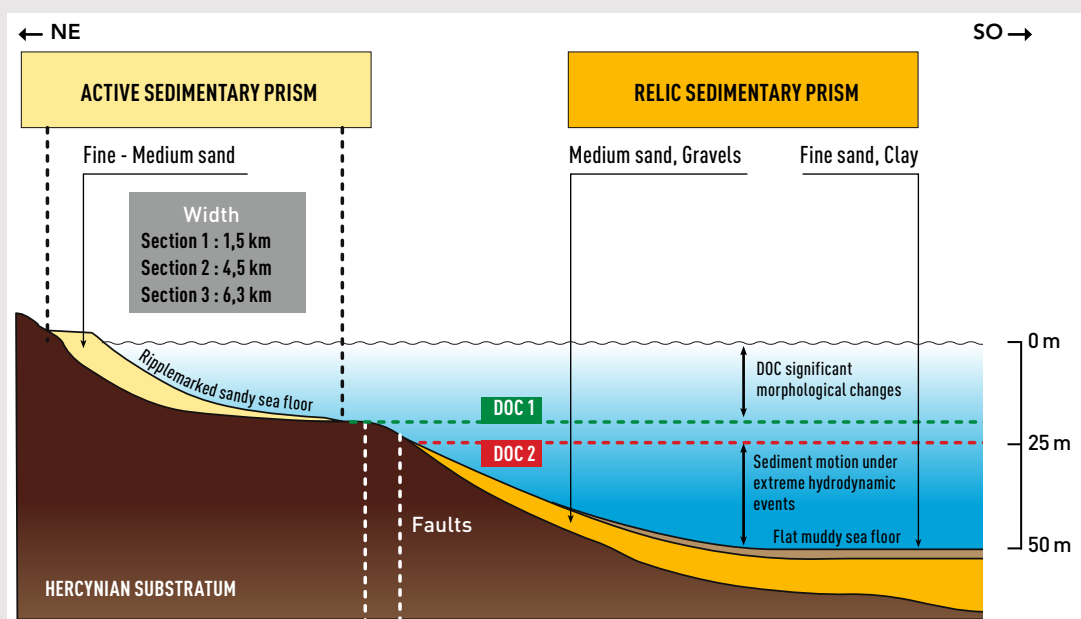


Figure 36 – Déconnexion des prismes sédimentaires actif et fossile en baie d'Étel
(d'après Menier *et al.*, 2019)

Depuis 1950, les actions humaines deviennent suffisamment massives pour peser à l'échelle globale conduisant à une nouvelle ère géologique dénommée anthropocène (Waters *et al.*, 2016).

Sur le littoral deux processus anthropiques majeurs sont ainsi à l'œuvre : les constructions de barrages sur les fleuves stockent le sédiment et empêchent ainsi l'alimentation naturelle en sable des littoraux (Syvitski et Kettner, 2011). D'autre part, de nombreux ouvrages de fixation du trait de côte ont été construits (digues de polderisation depuis le 10^{ème} siècle, perrés en enrochements, épis, brise-lames) qui ne permettent plus au trait de côte de s'adapter aux forçages océano-météorologiques.

Ces deux actions humaines combinées avec la remontée du niveau de la mer peuvent conduire à un rétrécissement de l'espace côtier (coastal narrowing aussi nommé coastal squeeze, Pontee, 2013) c'est-à-dire la diminution des surfaces d'estran, l'érosion des dunes, le raidissement des pentes de plage, voire leur disparition. Cela conduit en Europe occidentale à effectuer des opérations de dépoldérisation afin de réduire les risques littoraux (submersion marine, érosion du trait de côte) et de redonner de l'espace aux écosystèmes côtiers (Goeldner-Gianella, 2013)

Ainsi, une grande variété de cas de figures a été étudiée et publiée aboutissant à des résultats très contrastés. Cooper *et al.* (2018) concluent leur étude en constatant qu'il paraît donc assez difficile de fournir des conclusions simples et uniformes à l'échelle globale.

RETOURS D'EXPÉRIENCE EN FRANCE

Ce chapitre résume l'expérience acquise sur une concession historique au Pilier et trois concessions récemment autorisées à Cairnstrath et au Havre pour en dégager les bonnes pratiques à retenir et à diffuser. Il montre l'évolution du traitement du sujet dans les études d'impacts des dossiers de demande d'exploitation de granulats marins en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques.

4.1. LE PILIER (44)

4.1.1. CONTEXTE

Le site du Pilier est situé à la limite entre l'estuaire externe de la Loire et l'entrée de la baie de Bourgneuf sur l'emplacement d'un paléo-lit par des profondeurs de -16 à -18 m ZH à l'Est. Il est implanté à 8 km des côtes voisines (pointe de Saint-Gildas sur le continent et pointe de l'Herbaudière sur l'île de Noirmoutier) au-delà de la zone des 3 milles marins. Il est constitué de sables moyens à grossiers (diamètre médian de 0,6 mm).

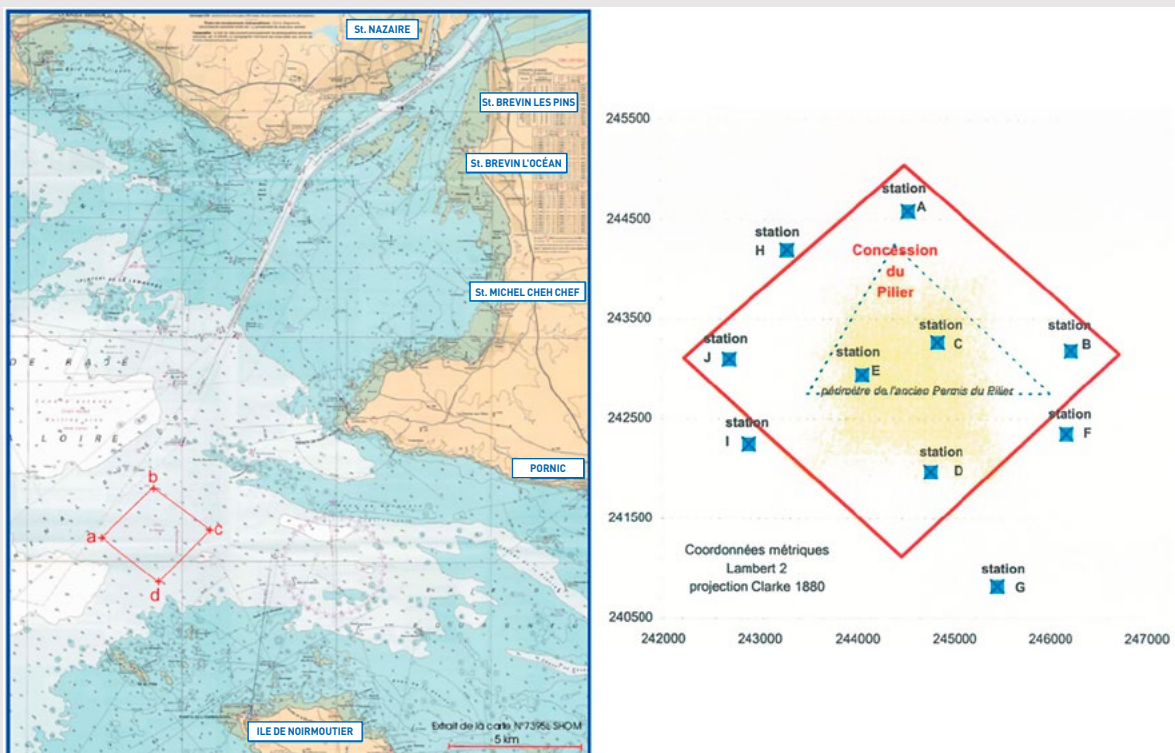


Figure 37 – Localisation de la concession du Pilier et ancien Permis du Pilier (Artelia, 2014)

4.1.2. LES ÉTUDES D'IMPACTS PRÉALABLES

L'exploitation du site a débuté en 1986 sur une première concession triangulaire pendant 13 années au cours desquelles 7,2 millions de m³ ont été extraits. Une étude d'impact a été établie par l'université de Nantes en 1983 pour en appuyer la demande. L'implantation de la souille par des profondeurs à -16 m CM respectait les critères du LCHF et l'application des formules indiquait très peu de mise en mouvement de ces sables dont le diamètre médian est le double de celui testé pour la côte Aquitaine. La profondeur de la souille était limitée à 5 m.

La concession a ensuite été étendue en 1998 sur un carré de 8,2 km² avec une augmentation du volume maximal autorisé porté à 2 260 000 m³/an et une augmentation de la profondeur jusqu'à -26 m CM. Une seconde étude d'impact a été réalisée en 1994. Elle n'apporte pas d'élément nouveau concernant l'impact sur le trait de côte. Les études d'état initial en 1998-1999 ont par contre apporté un complément important sur l'établissement d'un schéma régional de transport des sédiments prenant en compte la complexité des fonds sur la base d'un levé au sonar latéral complétant un levé bathymétrique. En effet, la concession est séparée du littoral nord de Noirmoutier par une série de bancs, de chenaux et de roches émergentes :

- chenal nord, et sa continuité vers le Sud-Est, à des cotes de -15/-20 m CM,
- banc de la Blanche culminant de -3 à -6 m CM, représentant un stock sédimentaire de l'ordre de 4 millions de m³ au-dessus de la côte -6 m CM,
- chenal de la Grise, avec un thalweg situé à des cotes de -5/-15 m CM, rejoignant le chenal nord.

Cette étude ne s'étend cependant pas jusqu'au littoral nord de Noirmoutier. Des calculs d'impact de la souille sur la propagation des vagues ont également été réalisés. Les résultats fournis ne vont cependant pas jusqu'à la côte.

4.1.3. LES BILANS QUINQUENNAUX

Des inquiétudes ont été exprimées par les élus de l'île de Noirmoutier, suite à la présentation du premier bilan quinquennal (1999-2004) en commission locale d'information et de surveillance (CLIS) en 2006. Celles-ci portaient sur les conséquences des extractions sur l'érosion du littoral nord de l'île. Une expertise du BRGM mandatée par le préfet a été réalisée et publiée fin 2008. Elle considère que les études produites jusqu'à présent ne sont pas suffisantes pour lever les inquiétudes des élus. Elle recommande de réaliser une modélisation hydrosédimentaire complète de grande emprise pour apprécier les modifications introduites par le creusement de la souille.

Ces recommandations ont été intégrées par le groupement d'extracteurs à la préparation du second bilan quinquennal (2005-2009). Une expertise bibliographique, complétée par une modélisation hydrosédimentaire complète a été réalisée par Artelia (ex-Sogreah) et soumise à l'administration qui a fait appel à l'expertise de trois instituts publics (BRGM, Cerema et Ifremer) pour en valider les conclusions. Une discussion avec chacun de ces instituts a permis de finaliser l'étude dans une note de synthèse dont les conclusions sont résumées dans une mise à jour de la carte de représentation régionale du transport des sédiments (**Figure 38**).

Sur cette carte, les trois circulations indépendantes de sédiments dans le chenal nord, sur le banc de la Blanche et sur le littoral nord sont représentées. Il a pu être montré en particulier dans l'analyse bibliographique que l'érosion du littoral nord était causée par la construction du port de l'Herbaudière qui bloque l'arrivée des sédiments venant des petits fonds à l'ouest.

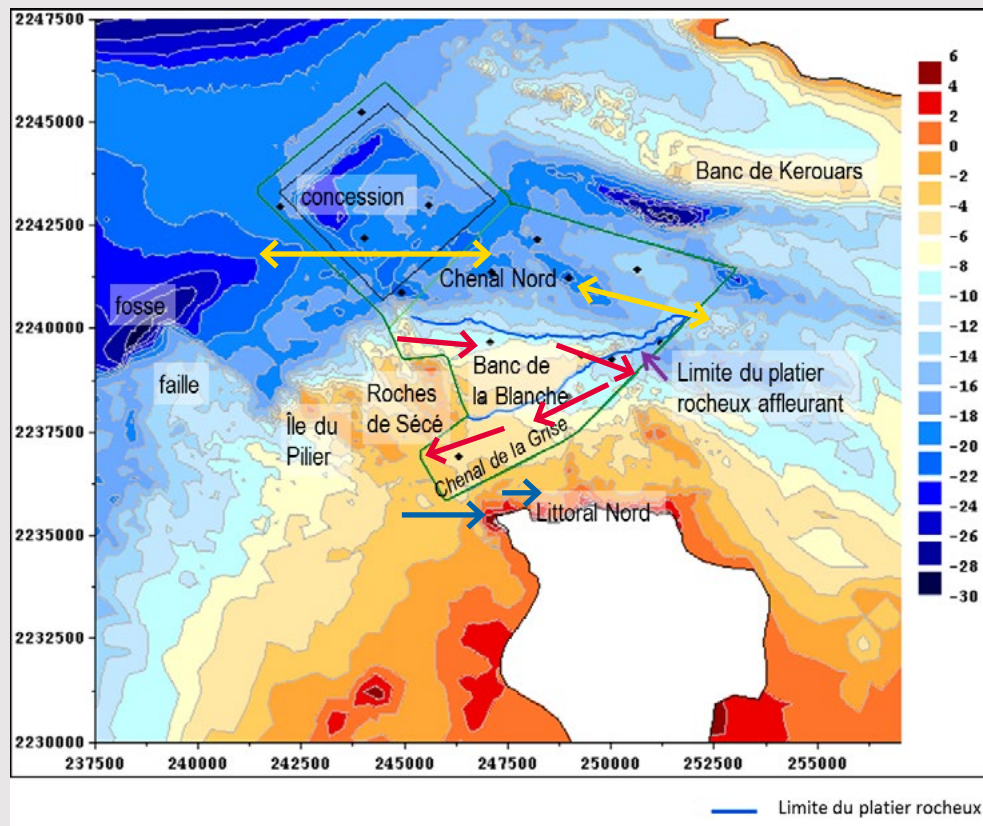


Figure 38 – Le Pilier : Représentation régionale du transport des sédiments (Sogreah, 2012)

4.1.3. MODÉLISATION DES IMPACTS SUR LE TRANSIT LITTORAL

En 2013, l'administration constate, au vu des éléments du bilan annuel 2012, que la côte limite d'exploitation, fixée à -26 m CM a été dépassée localement dans le quart ouest de la concession jusqu'à -28 m CM. Le Préfet ordonne alors une étude d'impact sur les conséquences hydrosédimentaires de ce surcreusement. L'étude est réalisée par Artelia en suivant les recommandations de Latteux (2008) et plus particulièrement le chapitre consacré aux sites en mer ouverte avec courants modérés et action dominante de la houle. Pour cette typologie, Latteux²⁸ indique qu'il convient d'accorder une attention toute particulière à la propagation des vagues jusqu'à la côte ainsi qu'au transit littoral qu'elles engendrent.

Pour cela, un modèle de propagation de houle de grande emprise a été mis en œuvre sur différents états d'exploitation du site et avec des conditions aux limites représentatives du régime des houles incidentes venant essentiellement du secteur ouest. Des calculs théoriques de transit littoral ont ensuite été effectués le long du littoral nord et nord-est de Noirmoutier.

La situation de référence (respect de la côte maximale de -26 m CM sur l'ensemble de la concession) a notamment été comparée avec une situation de surcreusement maximisé de la moitié nord-ouest de la concession (scénario 2). Les cartes suivantes illustrent la propagation d'une houle d'ouest de période 15 secondes sur le scénario de référence ainsi que l'impact du scénario 2.

²⁸ Latteux, B., 2008. Exploitation de matériaux marins et stabilité du littoral. Ed. QUAE, 162 p.

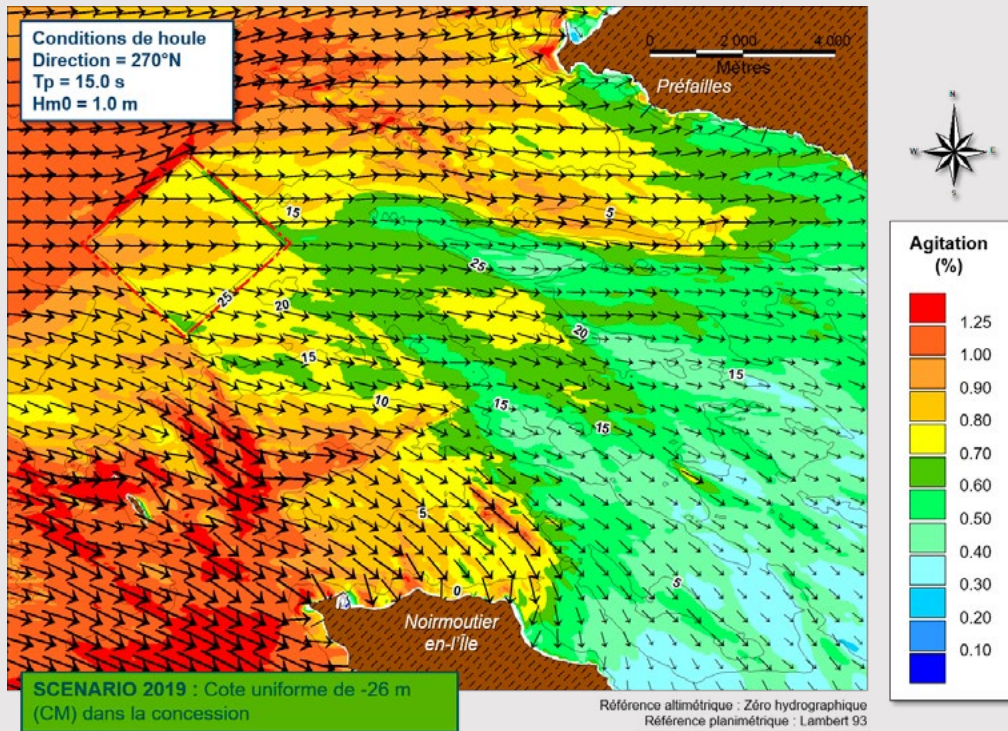


Figure 39 – Le Pilier : propagation d'une houle d'ouest - scénario de référence (Artelia, 2014)

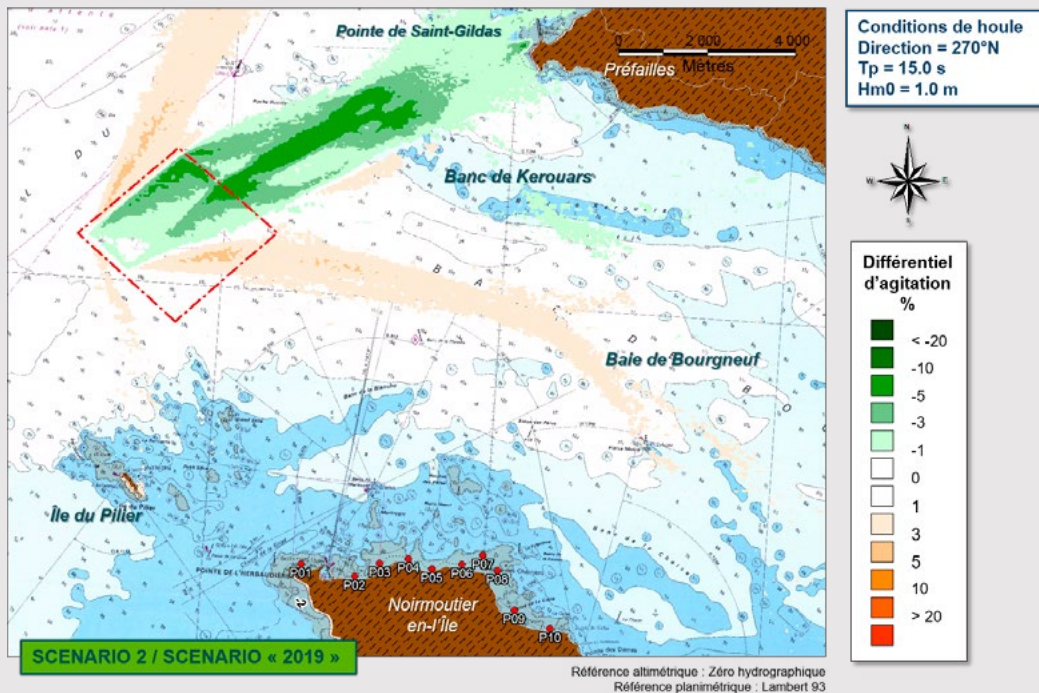


Figure 40 – Le Pilier : propagation d'une houle d'ouest – impact du scénario 2 sur l'agitation (Artelia, 2014)

On observe pour ces conditions défavorables, une diminution d'agitation pouvant atteindre 10 % à la Pointe de Saint-Gildas ce qui est plutôt favorable pour ce littoral de nature non-sédimentaire (falaises vives).

Côté Noirmoutier, les écarts sont inférieurs à 1 % le long du littoral nord. La logique des recommandations de Latteux a néanmoins été poursuivie en effectuant des calculs de transit littoral en 10 points représentatifs sur une statistique annuelle complète de houle pour les différents scénarios.



Figure 41 – Le Pilier : position des points de calcul du transit littoral (Artelia, 2014)

Le calcul montre un écart de l'ordre de quelques dizaines de m³/an pour le scénario 2 ce qui est un résultat non-significatif car très faible (moins de 1 % d'écart par rapport au scénario de référence).

	TRANSIT LITTORAL ANNUEL (m ³ /an)									
	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10
Scénario «2019»	5 245	7 320	3 105	5 492	2 186	4 750	6 839	9 536	10 982	8 121
Scenario 1	5 246	7 326	3 109	5 481	2 179	4 746	6 842	9 550	10 993	8 124
Scenario 2	5 249	7 345	3 113	5 496	2 187	4 770	6 862	9 574	11 044	8 149

Tableau 8 – Calcul de la capacité de transport solide aux points de résultats (formule de CERC)

	DIFFÉRENTIEL DE TRANSIT LITTORAL ANNUEL / SCÉNARIO «2019» (%)									
	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10
Scenario 1	0,0%	0,1%	0,1%	-0,2%	-0,3%	-0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%
Scenario 2	0,1%	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,4%	0,3%	0,4%	0,6%	0,3%

Tableau 9 – Différentiel de transit littoral entre scénarios aux points de résultats

Ces résultats ont été soumis par l'administration au BRGM et au Cerema et une réunion d'échange a eu lieu permettant de confronter les points de vue, notamment sur les limites du guide de Latteux (2008), et d'aboutir à une validation des conclusions de l'étude.

4.1.5. DOSSIER DE FERMETURE

Le site du Pilier a cessé d'être exploité fin 2017. Un bilan de fermeture a été établi en juillet 2018 et soumis aux autorités. Il comprend notamment les levés bathymétriques et morpho-sédimentaire (sonar latéral et prélèvements de sédiments pour analyse granulométrique) de fin d'exploitation qui s'inscrivent en continuité avec le levé initial de 1999 et les 3 levés quinquennaux de 2005, 2010 et 2014. Dans ce dossier, les pétitionnaires ont fait appel à l'expertise du SHOM qui a analysé l'ensemble de ces données, en a reconnu la grande qualité, soulignant notamment l'apport de la technologie du sondeur multi-faisceaux qui seule permet une description beaucoup plus précise des formes de fond (dunes et bancs sableux) dont le suivi est important pour mieux appréhender et quantifier les transports sédimentaires. Le SHOM insiste en effet particulièrement sur la nécessité de mesurer plus précisément les vitesses de déplacement des dunes et bancs sableux pour en déduire les taux de charriage annuels tout autour de la concession, remettant en cause les limites imposées du levé quinquennal qui étaient biaisées vers le sud en direction de l'île de Noirmoutier. Cette conclusion paraît importante à garder à l'esprit car applicable à d'autres sites.

Ce dossier a ensuite été expertisé par le Cerema qui a rendu ses conclusions en février 2020. Le Cerema valide l'ensemble du dossier et notamment les conclusions du SHOM en soulignant que le prochain levé dans 5 ans permettra d'apporter des éléments de connaissance supplémentaires sur une période en dehors de toute exploitation, ce qui ferait du Pilier une zone laboratoire assez unique en France.

Le BRGM a également rendu son avis en mars 2020 avec des recommandations qui portent essentiellement sur des demandes de meilleure appréciation de l'impact hydrosédimentaire local dans et autour de la concession.

4.1.6. CONCLUSIONS SUR LE SITE DU PILIER

Le site du Pilier a cessé d'être exploité fin 2017. L'ensemble des études menées depuis les études d'impact préalables jusqu'aux suivis quinquennaux et au bilan de fermeture constitue un ensemble cohérent, en phase avec l'amélioration des connaissances scientifiques et l'évolution des techniques de mesures de terrain et de simulation numérique entre 1983 et 2017. Ces études ont été soumises à expertise des principaux instituts publics en charge de vérifier ce type d'études. Les échanges approfondis avec le BRGM, le Cerema mais aussi avec les parties prenantes sur le littoral de Noirmoutier ont permis de clarifier les méthodologies et les discussions sur les impacts possibles d'une telle souille sur le littoral. Le blocage du transit littoral induit par la construction du port de l'Herbaudière a ainsi été bien compris.

4.2. CAIRNSTRATH A ET SN2

4.2.1. CONTEXTE

Le site de Cairnstrath est un site situé à environ 16 km au sud-ouest de celui du Pilier (Figure 42) par fonds de 30 m. Les premières études hydrosédimentaires ont été menées par Sogreah et Creocan en 2008 sur la base de deux projets initiaux de concession. Ceux-ci ont été revus en 2011 sous le titre Cairnstrath A & SN2 avec une emprise réduite passant de 14 à 9,2 km² et un approfondissement maximal de 5 m. Les dossiers de 2008 et 2011 ont été expertisés par le CETMEF et le BRGM conduisant à des demandes d'études complémentaires dont le contenu a été discuté et finalisé lors d'une réunion en DREAL Pays de Loire en mars 2015.

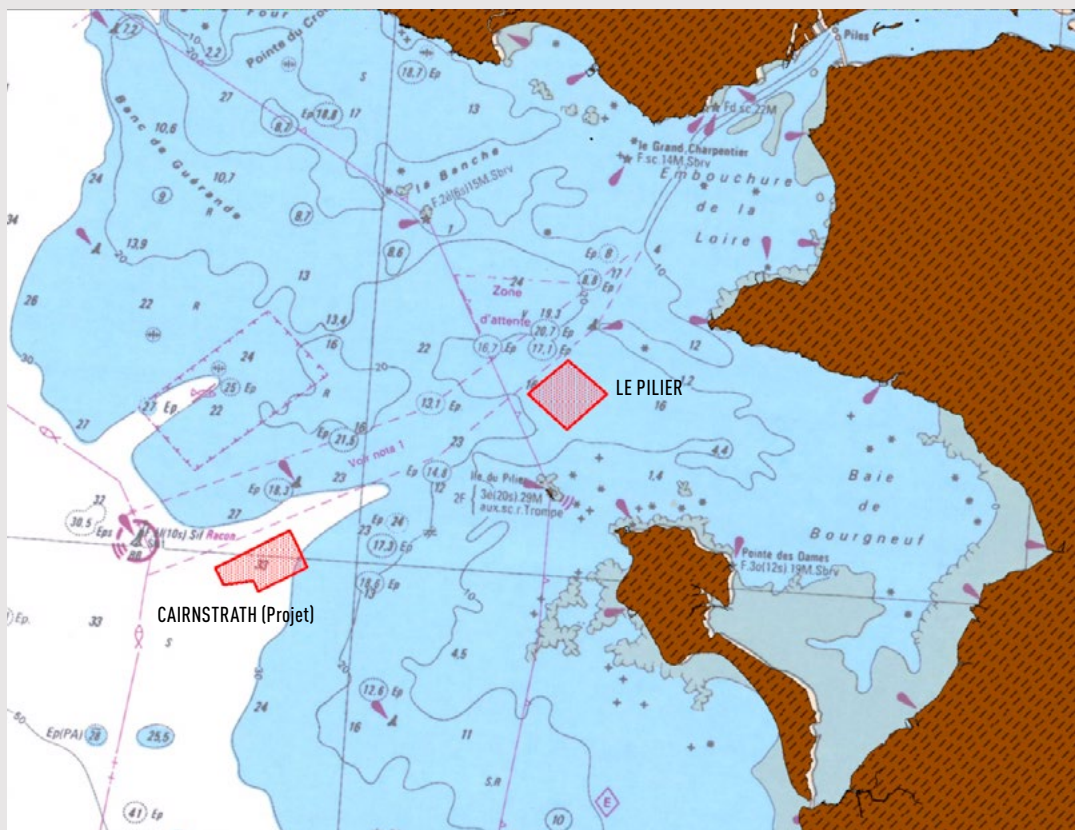


Figure 42 – Localisation du gisement de Cairnstrath (Artelia, 2015a)

Suite à ces discussions, deux études complémentaires ont été effectuées par Artelia (ex-Sogreah) répondant aux questions suivantes :

- impact de l'extraction sur l'agitation et la tenue du trait de côte,
- impact de l'extraction sur les courants et le transport sédimentaire dans la zone d'influence.

Pour ces études, une analyse de l'impact cumulé du projet Cairnstrath et de la concession du Pilier à partir d'un état de référence de mars 2015 a été demandée.

4.2.2. ÉTUDE DE L'AGITATION ET DE SON IMPACT SUR LE TRAIT DE CÔTE

La méthodologie mise en place reprend de celle utilisée pour les études du Pilier avec les améliorations issues des conclusions de la réunion Cairnstrath de mars 2015.

L'emprise du modèle d'agitation a été étendue pour couvrir l'ensemble des zones possiblement impactées. Les conditions aux limites ont été améliorées ; elles sont maintenant issues de la base de données HOMERE, établie et diffusée par l'Ifremer. Il s'agit d'une reconstitution des états de mer sur les côtes Mer du Nord, Manche et Atlantique qui démarre en 1994 et est mise à jour annuellement. Plus précisément, les conditions aux limites ont été extraites de la base de données spectrale qui fournit l'information la plus précise sur l'agitation incidente en fréquence et direction par comparaison avec la base de donnée des paramètres réduits qui fournit uniquement la hauteur significative, période de pic et direction de pic. De plus, les variations de niveau d'eau et l'effet du vent sur l'agitation ont également été inclus dans le modèle.

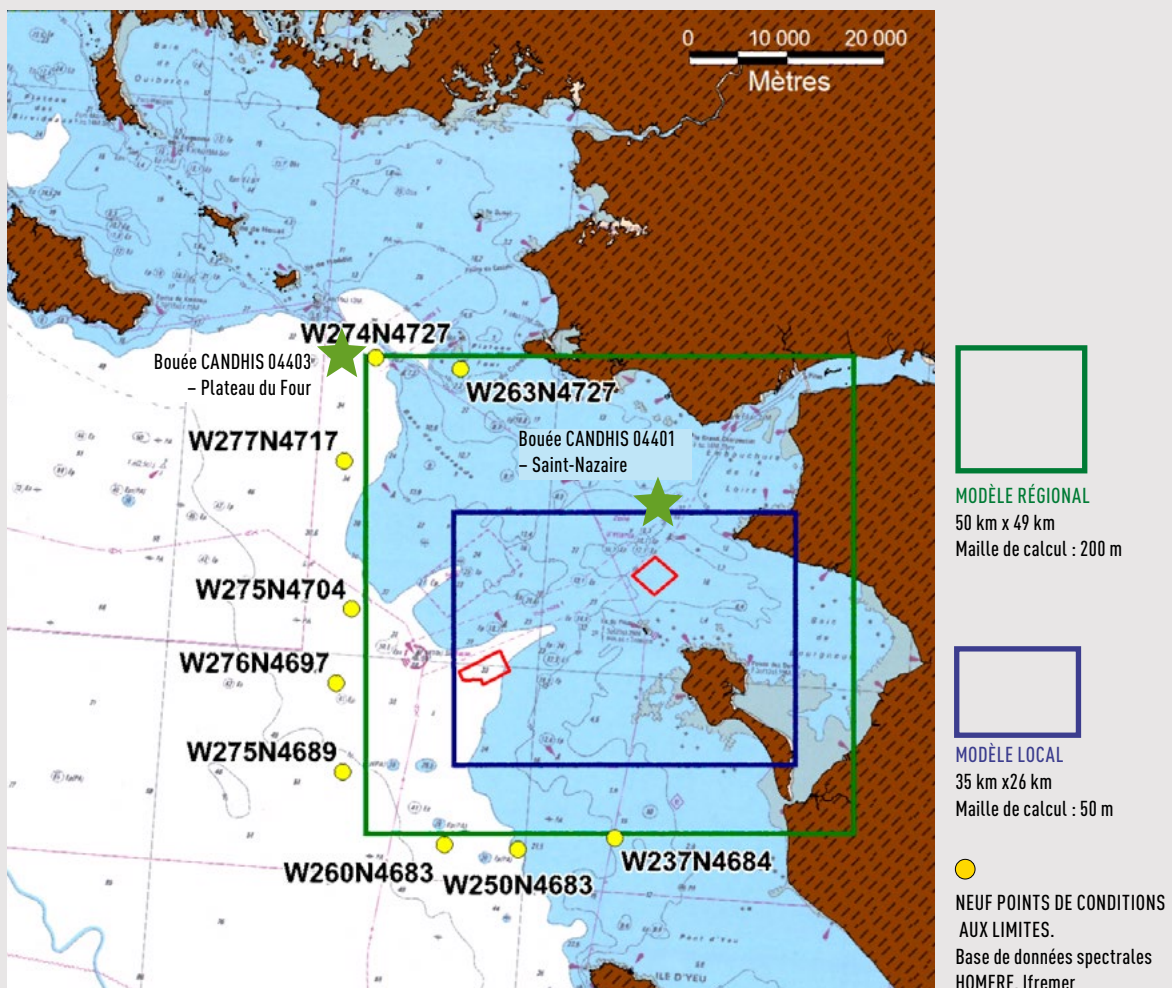


Figure 43 – Emprise du modèle d'agitation (Artelia, 2015a)

Le modèle d'agitation reprend donc les conditions d'agitation incidente en neuf points HOMERE pour les propager jusqu'à la côte. Il a été validé par comparaison avec des mesures en nature à la bouée de Saint-Nazaire et à celle du Plateau du Four, archivées dans la base de données CANDHIS du Cerema.

La **Figure 44** illustre la comparaison entre mesure et modélisation à la bouée de Saint-Nazaire pour le mois d'octobre 2006. La modélisation reproduit bien la succession des états de mer y compris la tempête du 24 octobre.

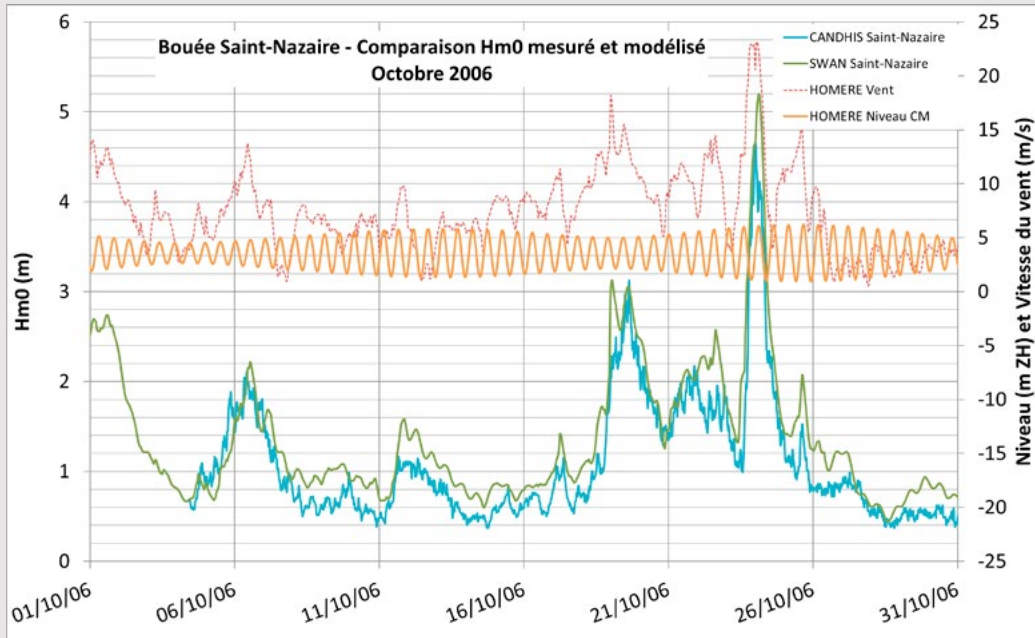


Figure 44 – Comparaison agitations calculée et mesurée à la bouée Saint-Nazaire (Artelia, 2015a)

Dans un second temps, nous avons étudié la climatologie de l'agitation sur la période disponible dans HOMERE (1994-2012) pour sélectionner une période hivernale représentative. Pour cela nous avons calculé la distribution du flux d'énergie de l'agitation incidente par direction et pour différentes périodes en un point situé au centre de la concession Cairnstrath (**Figure 45**). C'est finalement l'hiver 2011-2012, qui est le plus représentatif tant en terme de flux d'énergie que de répartition directionnelle.

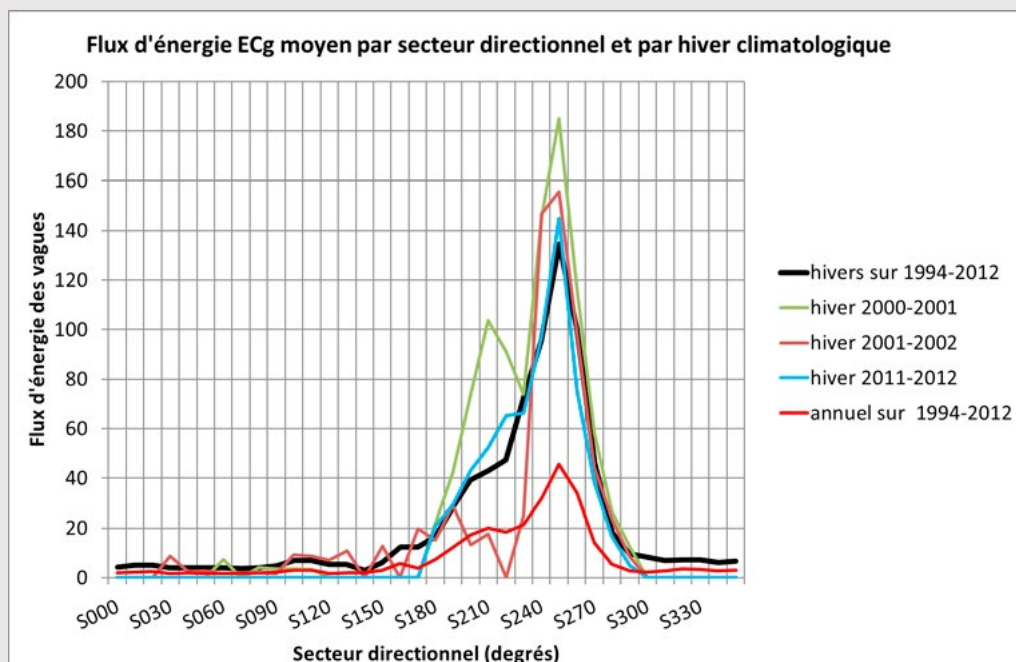


Figure 45 – Flux d'énergie moyen de l'agitation à Cairnstrath (Artelia, 2015a)

L'analyse des tempêtes extrêmes sur la période 1994-2012 a en outre permis de montrer que la tempête du 16 décembre 2011, caractérisée par un pic de hauteur significative de 8,25 m sur le site d'extraction, correspondait à une période de retour de 5 ans. L'hiver caractéristique retenu contient donc une tempête extrême quinquennale comme demandé par le BRGM.

L'impact du projet de concession est similaire à celui déjà observé au Pilier : une réduction de l'agitation à l'aval de la concession est observée ainsi qu'une augmentation sur ses flancs nord et sud, accompagnée par des variations de direction des vagues.

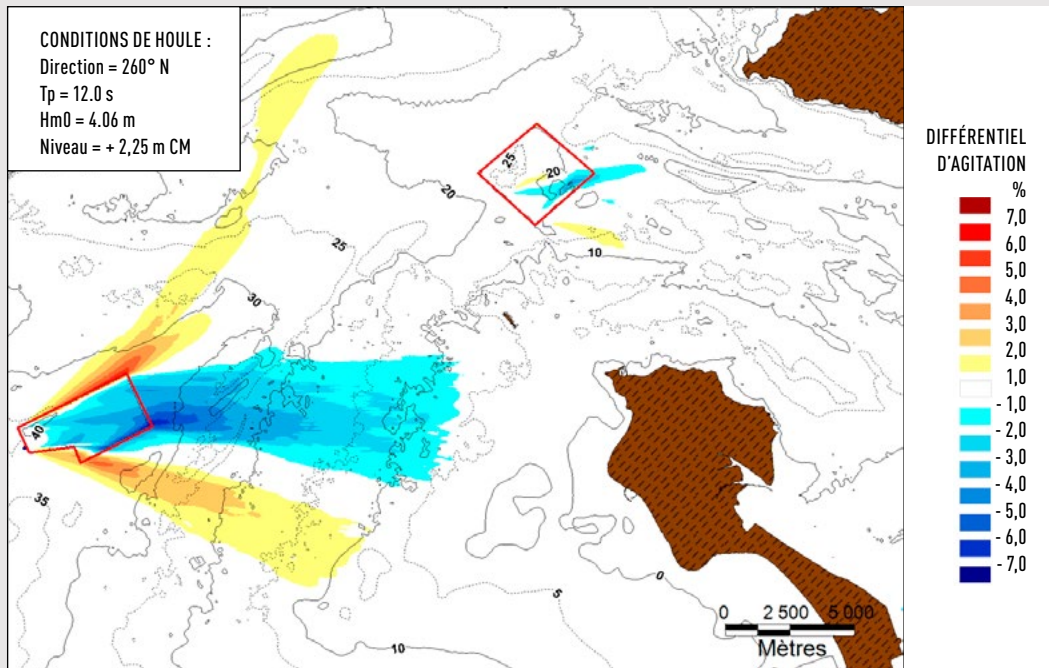


Figure 46 – Exemple d'impact sur l'agitation N260° Cairnstrath (Artelia, 2015a)

Le long du littoral, les variations d'agitation sont quasiment nulles en moyenne (inférieures à 1%) et de l'ordre de +/- 5 cm au maximum.

L'impact sur le transit littoral le long des littoraux nord et ouest de Noirmoutier a été quantifié en estimant ce transit de sable à l'aide d'une formule empirique globale (formule du CERC) qui a été ajustée sur les estimations disponibles.

Les accumulations de sable le long des jetées des ports de l'Herbaudière sur la côte nord de Noirmoutier et du Morin sur la côte ouest ont permis en particulier de vérifier les bons ordres de grandeur du transit ainsi que la représentativité des données de houle utilisées :

- ainsi, il a été vérifié sur la plage d'accumulation de la jetée nord du port du Morin que le basculement d'orientation du trait de côte passant de N213° à N226° (Figure 47) correspondait bien à l'obtention d'un nouvel état d'équilibre avec un transit nul induit par le blocage du transit par la jetée,
- à l'Herbaudière, la plage ouest est saturée et le sable contourne la jetée pour venir sédimenter dans le port et ses accès obligeant ainsi la réalisation de dragages d'entretien réguliers. De plus, cette interruption du transit littoral, liée à la jetée, contribue fortement à l'érosion de la plage de la Linière à l'est du port. Des opérations de transfert de sables entre le port et la plage sont ainsi régulièrement organisées. Le dernier en date a démarré début février 2020 pour un volume de 23 000 m³.



Photos juin 2013

Figure 47 – Points de calcul du transit littoral à Noirmoutier (Artelia, 2015a)

Les calculs comparatifs, permettant ensuite d'estimer l'impact des concessions, ont ainsi pu être menés avec une plus grande confiance dans les résultats obtenus :

- sur le littoral nord, le transit littoral est de l'ordre de 6 000 m³/an. Une très faible réduction de l'ordre de 1,1 % est observée à la Pointe de l'Herbaudière avec la présence de la souille de Cairnstrath. Plus à l'est, les écarts deviennent inférieurs à 1 %,
- sur le littoral ouest, l'intensité et le sens du transit littoral sont plus variables. L'impact est très faible au sud de la pointe de l'Herbaudière jusqu'à Luzéronde et va dans le sens d'une réduction entre -1 et -3 %, ce qui induit une réduction de la tendance à l'érosion de cette partie du littoral. Plus au sud, les écarts deviennent là aussi inférieurs à 1 %.

4.2.3. ÉTUDE DE LA COURANTOLOGIE ET DES TRANSPORTS SÉDIMENTAIRES

Une modélisation des transports hydrosédimentaires sous l'action de la houle et des courants a été mise en place. Elle repose sur un modèle hydrodynamique 3D validé sur des mesures de terrain de niveau d'eau, courant et agitation sur le site de la Lambarde. Ce modèle a été complété par un modèle de transport des sédiments sableux sous l'action combinée de l'agitation et des courants (formule globale de Soulsby).

Les calculs ont porté sur une année hydrologique complète représentative d'octobre 1998 à septembre 1999. Ils ont d'abord permis de mettre en évidence le circuit complexe des flux sableux sur la zone (Figure 48). On observe ainsi que les deux flux principaux (océanique et fluvial) se subdivisent dans l'estuaire externe de la Loire.

Le flux océanique entrant par le sud-ouest se divise en trois branches :

- le flux le plus au sud vient rencontrer l'île de Noirmoutier et redescend la côte ouest de l'île,
- le flux remontant la paléo-vallée rencontre celui rejeté par la Loire et une partie est déviée vers le nord,
- enfin un flux central se dirige vers la baie de Bourgneuf en traversant les concessions de Cairnstrath et du Pilier.

Le flux ligérien, pour sa part, se divise en deux parties : l'une dirigée au sud vers la baie de Bourgneuf et l'autre vers l'estuaire externe qui rencontre le flux océanique l'obligeant à un mouvement giratoire.

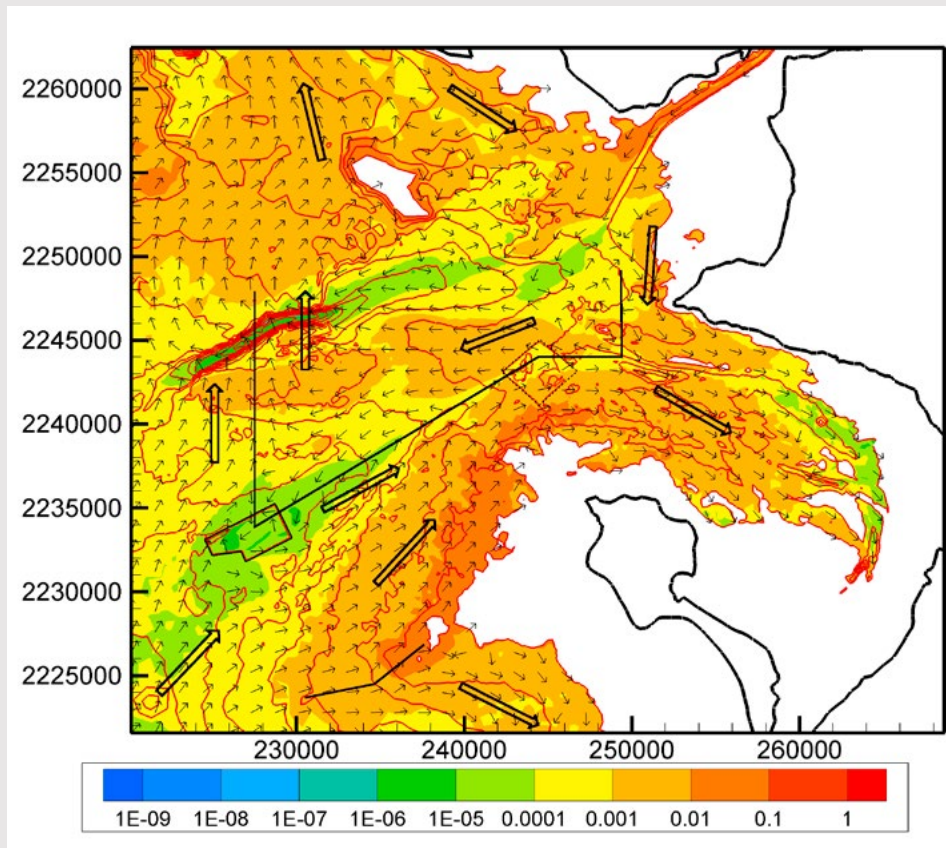


Figure 48 – Cairnstrath – transport solide résiduel (en kg/ms) pour un sable de 0,7 mm état actuel (Artelia, 2015a)

L'impact du projet de concession sur le transport des sables a ensuite été cartographié. Il est cohérent avec l'impact sur l'agitation, à savoir une réduction dans l'ombre des concessions et une augmentation de part et d'autre.

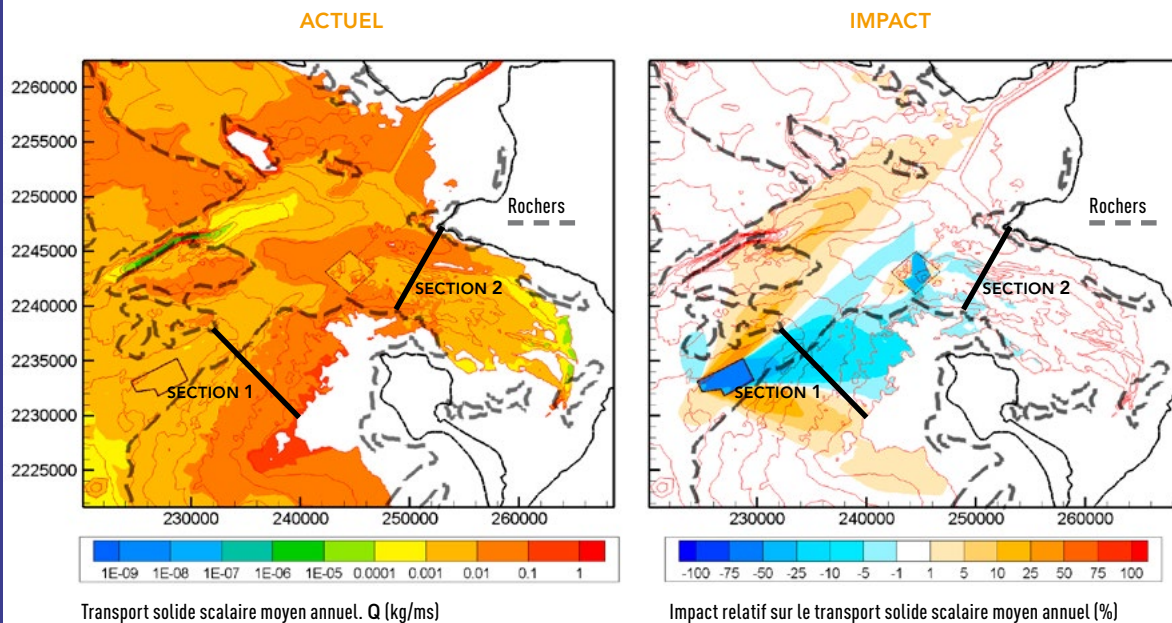


Figure 49 – Cairnstrath – Transport solide moyen annuel pour le diamètre de 0,7 mm en état actuel et Impact (Artelia, 2015a)

Le flux de transport résiduel des sables du large vers la côte (Figure 48) traversant les concessions a été évalué à travers deux sections (Figure 49, section 1 et section 2).

Du point de vue méthodologique, ces flux ne tiennent pas compte du transport littoral, les sections s'arrêtent à la côte -5 m CM. Les volumes sont des capacités maximales que peuvent transporter les écoulements, ils dépendent bien évidemment des sources de sédiment disponibles. D'autre part, ces flux sont calculés en granulométrie unique et il ne faut donc pas les sommer. Si la nature du fond est un mélange, les flux seront proportionnels au pourcentage de sédiment disponible au sol pour chaque classe. Les résultats sont fournis dans le **Tableau 11**.

Sur la section 1, l'impact est positif, avec une augmentation comprise entre 1,6 et 2,8 % suivant le type de sédiment (hors 4 mm car peu représentatif). On aurait pu s'attendre à ce que le transport soit diminué, puisque la position de la section 1 passe principalement sur une zone de diminution de transport (Figure 49). Il faut effectivement remarquer sur cette figure que le transport solide au niveau de la souille est environ 1 000 fois plus faible qu'au niveau de la côte -5 m CM. Or, l'impact est positif aux abords de la côte -5 m CM, ce qui induit au final une augmentation.

diamètre (mm)	SECTION 1 (Millions de m ³) ACTUEL	SECTION 2 (Millions de m ³) ACTUEL	diamètre (mm)	SECTION 1 (Millions de m ³) FUTUR	SECTION 1 (Millions de m ³) FUTUR
0.25	2.70	2.14	0.25	2.74	2.13
0.5	1.56	1.16	0.5	1.59	1.15
0.7	0.97	0.54	0.7	0.99	0.54
1	0.57	0.18	1	0.59	0.18
4	0.03	0.00	4	0.03	0.00

diamètre (mm)	SECTION 1 (M ³) IMPACT	SECTION 2 (M ³) IMPACT	diamètre (mm)	SECTION 1 (%) IMPACT	SECTION 2 (%) IMPACT
0.25	43401	-9163	0.25	1.6	-0.4
0.5	27336	-5121	0.5	1.8	-0.4
0.7	21475	-2762	0.7	2.2	-0.5
1	15867	-1164	1	2.8	-0.6
4	2198	9	4	6.7	-2.7

Tableau 11 – Volume annuel de sédiment (sédiment de diamètre unique) passant par les sections 1 et 2 d'après les flux résiduels pour 5 classes de sédiments, pour l'état actuel, futur et impact (Artelia, 2015a)

Pour la baie de Bourgneuf (section 2, située entre 2 zones de rochers), on assiste à une faible diminution du transport moyen annuel, comprise entre 0,4 et 0,6 % (hors 4 mm car peu représentatif). L'ordre de grandeur sur la côte moyenne des fonds situés au-delà de -5 m CM (surface d'environ 105 km², a ensuite été estimé (Tableau 12).

Évolution moyenne diamètre (mm)	Évolution moyenne (mm) en 100 ans pour une surface estimée de 105 km ² ACTUEL	Évolution moyenne en 100 ans pour une surface estimée de 105 km ² FUTUR	Impact de l'évolution moyenne en 100 ans pour une surface estimée de 105 km ² IMPACT
0.25	20.4	20.3	-0.087
0.5	11.0	11.0	-0.049
0.7	5.2	5.1	-0.026
1	1.7	1.7	-0.011
4	0.0	0.0	0.000

Tableau 12 – Estimation de l'évolution centennale en sable de la baie de Bourgneuf à partir des flux résiduels en fonction du type de sédiment, état actuel, futur et impact (Artelia, 2015a)

L'impact sur la baie de Bourgneuf (hors transport littoral) pour les cotes inférieures à -5 m CM est une diminution de l'évolution moyenne sur 100 ans qui d'après les calculs est inférieure au dixième de millimètre.

4.2.3. CONCLUSION SUR LES ÉTUDES DE CAIRNSTRATH

Les échanges avec le BRGM et le Cerema ont permis la co-construction, par itération, d'une méthodologie pour l'évaluation des impacts sur le littoral à partir de modélisations mathématiques d'agitation et de transport hydrosédimentaire.

4.3. CONCESSION GRANULATS MARINS HAVRAIS (GMH)

4.3.1. CONTEXTE

La demande de concession GMH, déposée par les entreprises LGE (Les Graves de l'estuaire) et MBS (Matériaux Baie de Seine) en juillet 2015, fait suite au Permis exclusif de recherches Granulats Marins Havrais – PER GMH. Elle inclut 7 sous-zones, couvrant une surface totale de 10,3 km² pour un approfondissement moyen de 2,5 m.

Le dossier de demande d'exploitation de la concession comprend une étude d'impact avec notamment l'analyse des impacts de la concession sur l'agitation et le littoral réalisée par Artelia en juin 2015.

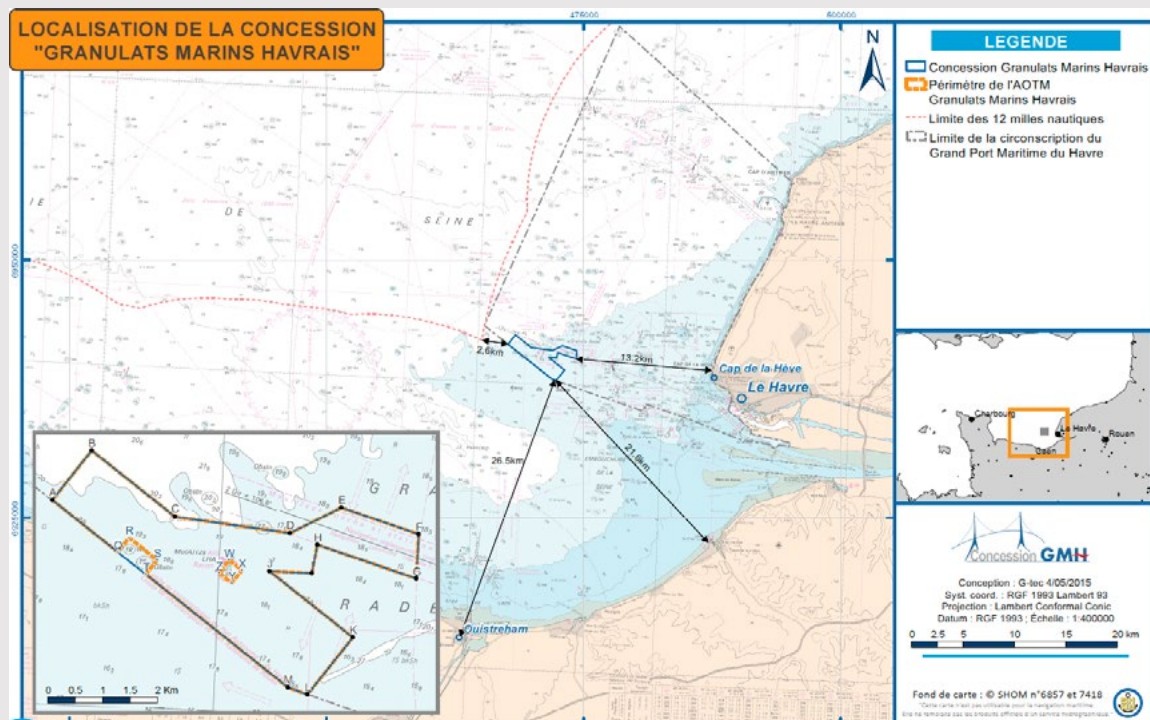


Figure 50 – Localisation de la concession GMH (Artelia, 2015b)

4.3.2. ÉTUDE DES IMPACTS SUR L'AGITATION ET LE LITTORAL

Cette étude reprend la méthodologie co-construite avec le BRGM et le Cerema à l'occasion des études du Pilier et de Cairnstrath décrites précédemment, à savoir :

- une étude de la climatologie des agitations sur le site à partir d'un point de la base de données HOMERE de l'Ifremer, choisi sur l'emprise de la concession,
- une étude des tempêtes extrêmes en ce même point permettant d'estimer le temps de retour de différentes tempêtes historiques,
- la mise en place d'un modèle régional puis local d'agitation, forcé à ses limites par les données spectro-angulaires variables le long de la frontière, les niveaux et le vent issus de la base de données HOMERE,
- la validation de cette modélisation par comparaison avec des mesures en nature à la bouée METZINGER fournies par le réseau CANDHIS (bouée 07606) sur deux périodes,
- le choix d'une année représentative (année 2012), complétée ici par la tempête décennale du 27 octobre 2002,
- le calcul du transit littoral par la formule globale du CERC en un certain nombre de points de contrôle le long du littoral potentiellement impacté,
- la comparaison des résultats obtenus sur une configuration de l'état initial puis d'un état projet.

L'obligation d'étudier l'impact cumulé a également été respecté en considérant l'ensemble des autres sites d'intervention anthropique comme indiqué sur la **Figure 51**.

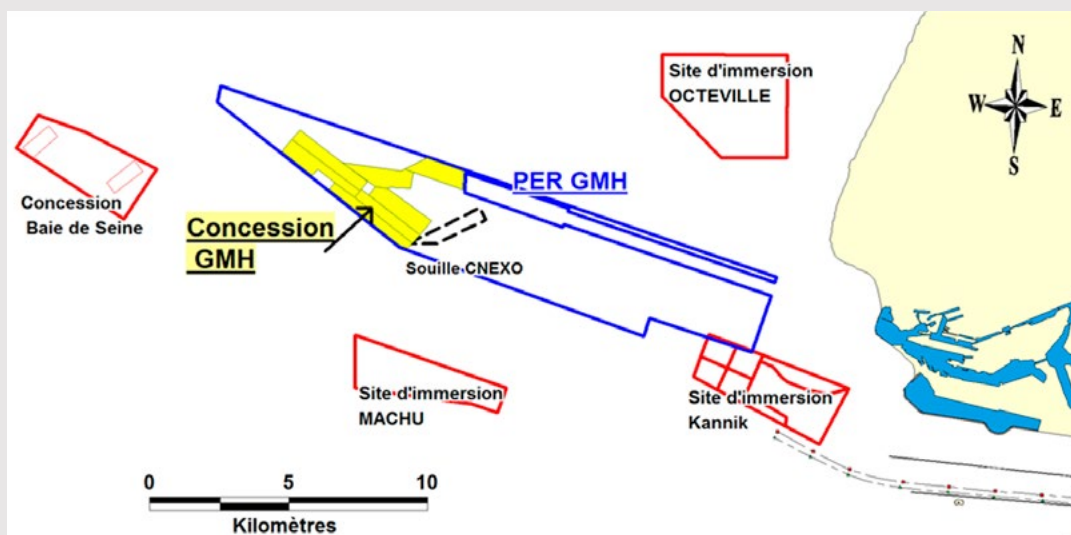


Figure 51 – Localisation de la concession GMH et des autres sites d'intervention anthropique (Artelia, 2015b)

L'emprise du modèle d'agitation ainsi que la position de la bouée Metzinger et des points HOMERE utilisés sont cartographiés sur la **Figure 52**.

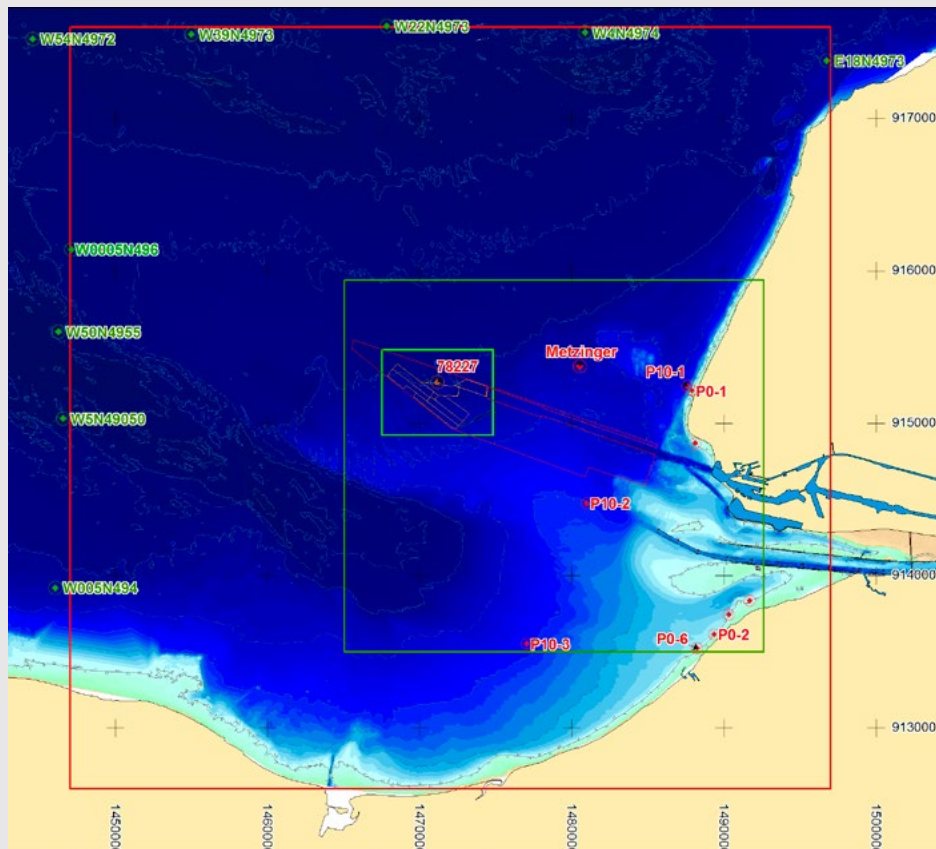


Figure 52 – GMH : limites du modèle régional (tracé rouge) et local (tracé vert) d'agitation et positions des points HOMERE ainsi que de la bouée Metzinger (Artelia, 2015b)

Un exemple de comparaison entre les calculs et les mesures à la bouée est fourni sur la Figure 53 et la Figure 54. On note un très bon accord entre les valeurs mesurées et calculées aussi bien du point de vue des hauteurs significatives que des périodes et des directions.

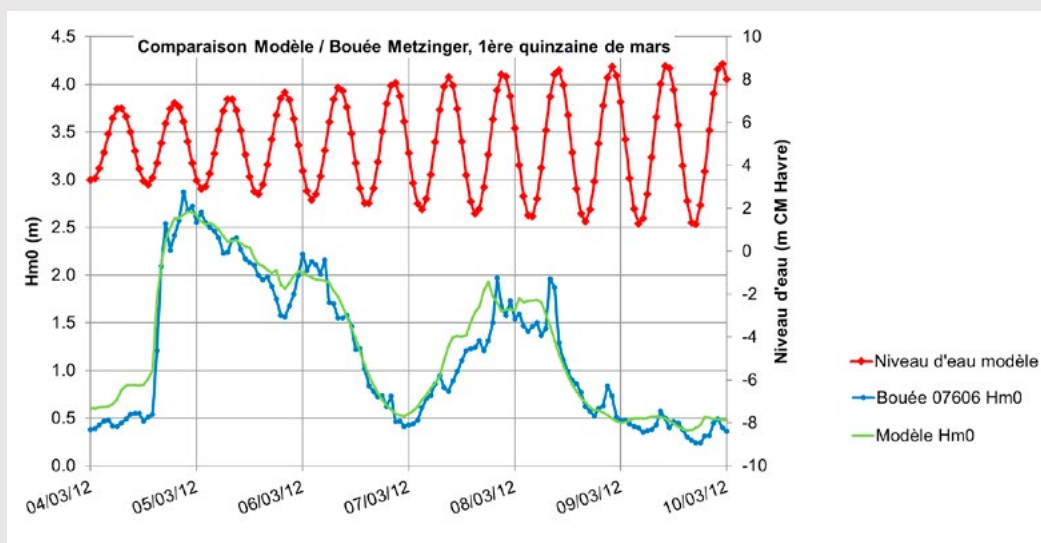


Figure 53 – GMH : Validation du modèle (hauteur significative) à la bouée Metzinger mars 2012 (Artelia, 2015b)

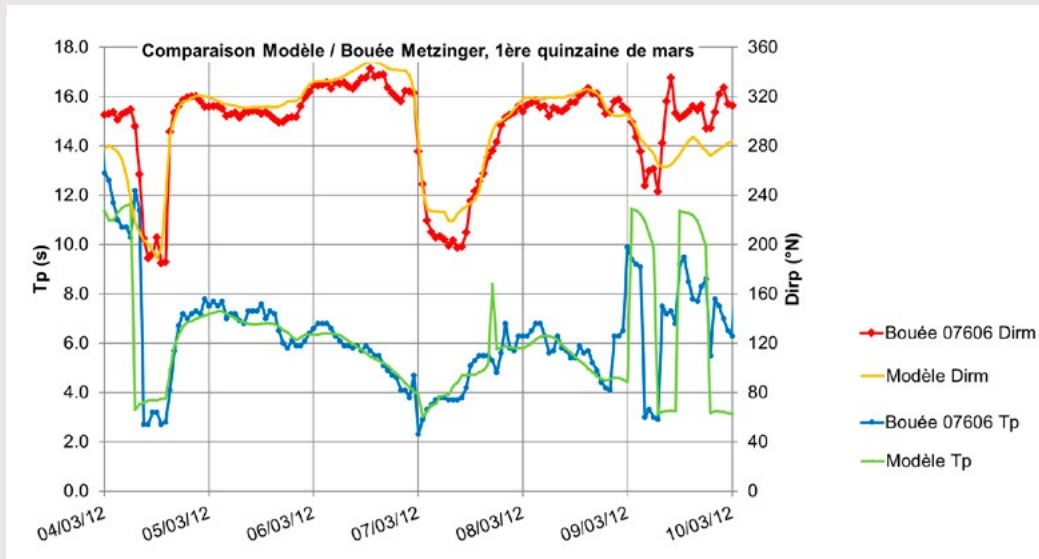


Figure 54 – GMH : Validation du modèle (période et direction) à la bouée Metzinger mars 2012 (Artelia, 2015b)

À la suite de cette validation, l'impact sur l'agitation a été estimé pour différentes conditions de houle. La Figure 55 montre un exemple de propagation sur le site pour la tempête décennale ainsi que la carte différentielle de l'impact (en %) sur la hauteur significative des vagues. On retrouve ici la diminution de l'agitation dans l'ombre de la souille et son augmentation de part et d'autre.

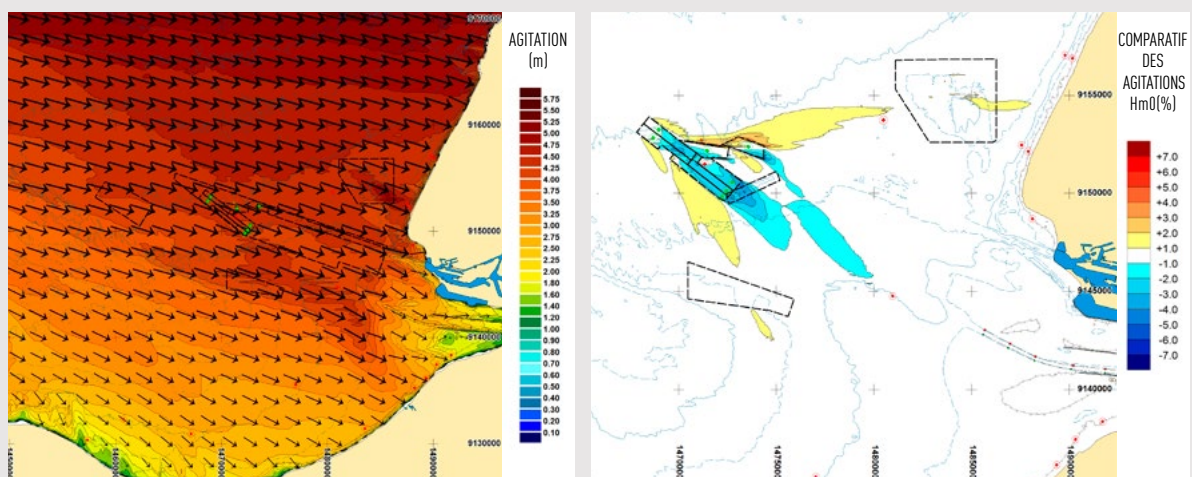


Figure 55 – GMH : Impact de la concession sur la tempête décennale (Artelia, 2015b)

L'étude du transit littoral a ensuite été effectuée en choisissant d'abord une année représentative de l'agitation locale. C'est l'année 2012 qui a été retenue après comparaison avec la moyenne pluri-annuelle (Figure 56). Puis le calcul de l'agitation en plusieurs points de contrôle le long de la côte (Figure 57) a été effectué pour les deux états (initial et projet). Les résultats du calcul indiquent un impact négligeable sur le transit littoral (Tableau 13 et Tableau 14).

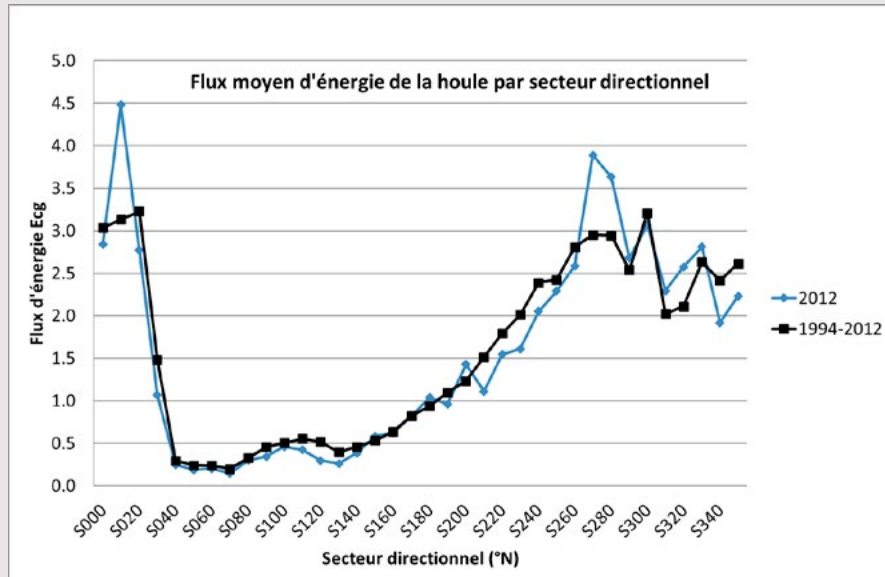


Figure 56 – GMH : flux moyen d'énergie de la houle (Artelia, 2015b)

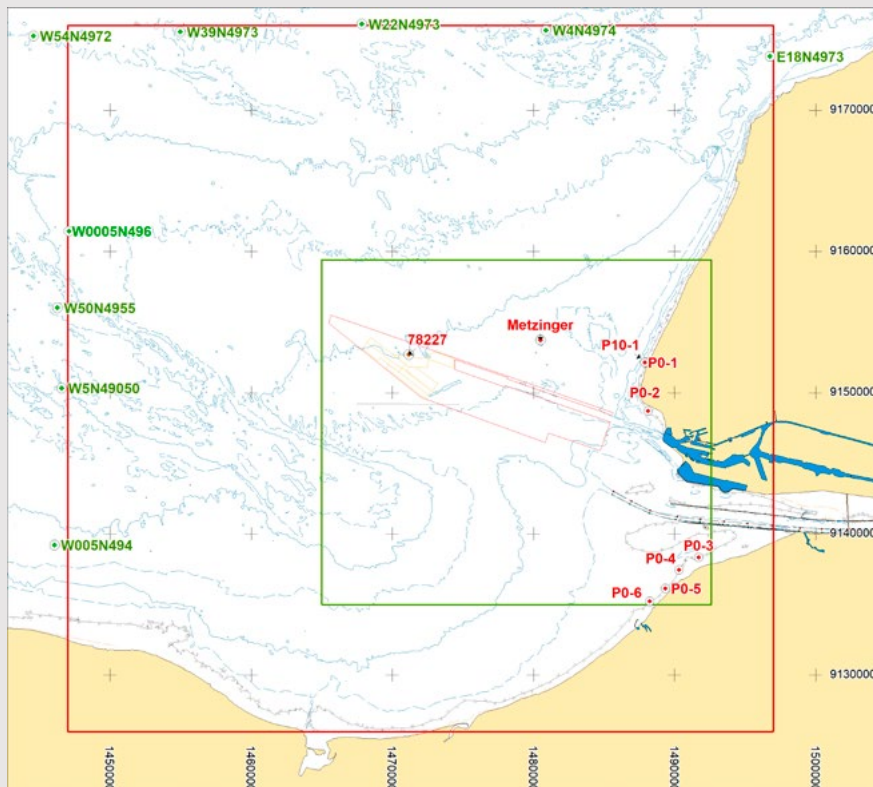


Figure 57 – GMH : Points de contrôle de l'agitation sur le littoral (Artelia, 2015b)

Point	Transit net état actuel	Transit net état aménagé	Écart net	Écart relatif
P0-1 galet + sable	-89 672 m ³ /an	-89 379 m ³ /an	293 m ³ /an	-0,33%
P0-2 galet + sable	-91 313 m ³ /an	-91 655 m ³ /an	-342 m ³ /an	0,37%
P-03 sable	63 345 m ³ /an	63 139 m ³ /an	-206 m ³ /an	-0,33%
P-04 sable	50 580 m ³ /an	50 983 m ³ /an	403 m ³ /an	0,80%
P-05 sable	70 990 m ³ /an	71 193 m ³ /an	203 m ³ /an	0,29%
P-06 sable	88 501 m ³ /an	88 316 m ³ /an	-185 m ³ /an	-0,21%

Tableau 13 – Capacité de transport littoral sur l'année représentative 2012 (Artelia, 2015b)

Point	Transit net état actuel	Transit net état aménagé	Écart net	Écart relatif
P0-1 galet + sable	-4010 m ³	-4087 m ³	-77 m ³	1,90%
P0-2 galet + sable	-3486 m ³	-3476 m ³	10 m ³	-0,30%
P-03 sable	1479 m ³	1477 m ³	-2 m ³	-0,10%
P-04 sable	2371 m ³	2372 m ³	1 m ³	0,00%
P-05 sable	3273 m ³	3274 m ³	1 m ³	0,00%
P-06 sable	3727 m ³	3781 m ³	55 m ³	1,50%

Tableau 14 – Capacité de transport littoral sur une tempête décennale (Artelia, 2015b)

4.3.3. CONCLUSIONS SUR LA CONCESSION GMH

La méthodologie utilisée pour évaluer l'impact sur le littoral de la concession GMH reprend celle développée à l'occasion des études du Pilier et de Cairnstrath. Elle s'appuie sur les connaissances scientifiques du moment et a été transposée avec succès dans un autre contexte hydrographique : cette méthodologie est donc transposable.

4.4. SYNTHÈSE

Le **chapitre 3** a montré que les études effectuées dans les années 1970/80, en France et au Royaume-Uni, sur les différents processus hydrosédimentaires pouvant amener un impact des extractions de granulats sur le trait de côte ont cerné correctement les principaux processus physiques pouvant intervenir, qui comprennent :

- un piégeage par la souille d'extraction du transport sédimentaire induit par la houle
 - par interception directe du transit littoral dans la zone de déferlement,
 - par érosion régressive des petits fonds et de la plage (transport de la côte vers le large),
 - par piégeage du transport en dehors de la zone de déferlement dans le sens de la remontée des sédiments du large vers le littoral.
- une modification de la propagation de la houle à l'approche de la côte susceptible de modifier le régime et l'intensité du transit littoral et donc les évolutions du trait de côte :
 - par réfraction avec une modulation des hauteurs et des directions,
 - par réduction du déferlement (arasement des bancs et barres).
- une modification de la morphodynamique du site lorsque les courants jouent un rôle important.

Des critères simples ont alors été mis en place pour éviter ces impacts en termes de profondeur, de distance à la côte et de géométrie de la souille. Ils ont permis de positionner correctement les concessions exploitées en France ces trente dernières années ce qui conduit aujourd'hui au constat d'une absence d'impact avéré des sites existants sur le littoral.

Plus récemment, la prise en compte des effets du changement climatique a stimulé les études de long-terme mettant en évidence l'importance du transport résiduel des sédiments du large vers la côte dans l'alimentation en sables de certains littoraux. Ce processus est maintenant pris en compte dans l'estimation des impacts.

Les progrès en mesures de terrain (agitation, bathymétrie, géomorphologie) et en modélisation mathématique réalisés depuis 20 ans (courants, agitation, transport des sédiments) ont permis plus récemment d'affiner l'estimation des impacts au cas par cas sur les nouveaux dossiers grâce à des simulations numériques hydrosédimentaires calées sur des mesures de terrain.

Le présent chapitre a présenté les résultats obtenus avec une méthodologie co-construite par itération avec le BRGM et le Cerema, mise au point en Loire-Atlantique et appliquée dans un autre contexte régional (la Manche) avec succès. C'est une méthodologie au niveau de l'état de l'art, robuste, transposable, répondant notamment aux exigences formulées par les organismes techniques de contrôle.

Les retours d'expériences sur les concessions existantes en France et à l'étranger (**chapitres 3 et 4**) montrent la complexité des études à mener pour faire le lien entre extraction et évolution du trait de côte du fait de la dynamique sédimentaire naturelle mais aussi des aménagements côtiers menés en parallèle aux extractions. Cette complexité est actuellement renforcée par les effets du changement climatique. L'analyse de la bibliographie scientifique sur le sujet met en évidence une grande variété de cas de figures et il paraît donc assez difficile de conclure simplement à l'échelle globale (**voir paragraphe 3.6**). Une analyse locale est donc à prévoir pour chaque projet, plus largement que les seuls projets d'exploitation de granulats marins, reposant sur une analyse historique à court-terme mais aussi à long-terme (construction géologique du littoral actuel) permettant d'identifier les processus dominants passés, présents et futurs jouant le plus grand rôle dans l'évolution d'un littoral.

ANNEXE A

A1. BIBLIOGRAPHIE RELATIVE AUX CHAPITRES 1 ET 2

Abellard O., 2011. *Exploitation des granulats marins. Note de travail de la Mission pour un Parc naturel marin du golfe normand-breton.*

Allen G.P., 1972. *Étude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde.* Doctorat d'État Sciences Naturelles. Université de Bordeaux I.

Allen G.P., Castaing P., Froidefond J.M., Migniot C., 1979. *Quelques effets à long terme des aménagements sur la sédimentation dans l'estuaire de la Gironde.* In : Publications du CNEXO : Actes de Colloque n° 9. Brest, 15 mai 1979. pp.115-119.

Artelia, 2018. *Carrière du Hourdel. Étude des effets de l'exploitation de la carrière du Hourdel : aspects géotechnique et hydrogéologique. Examen des risques littoraux. Rapport d'étude d'août 2018 n° 871 6010 établi pour le compte de la société GSM*

Artelia, 2019. *Inventaires des travaux de rechargements hydrauliques en sable de lutte contre l'érosion marine. Rapport n° 871 6038 de septembre 2019 établi pour le compte de la communauté de communes Médoc-Atlantique dans le cadre de sa stratégie communautaire de gestion du phénomène d'érosion de la pointe de la Négade à la jetée de Grave.*

Augris C., Cressard A.P., 1984. *Les granulats marins.* Ifremer, Rapports scientifiques et techniques.

Augris C., Hamon D., 1996. *Atlas thématique de l'environnement marin en baie de Saint-Brieuc (Côtes-d'Armor).* Ifremer, 71p.

Augris C., Clabaut P., Costa S., Gourmelon F., Latteux B., 2004. *Évolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime.* Éditions Ifremer, Bilans et Perspectives, 158p.

Augris C., Simplet L., Maze J.-P., Morvan L., Satra Le Bris C., Fitamant N., Bourillet J.-F., 2006. *Inventaire des ressources en matériaux marins sur les façades « Manche-Est » et « Loire-Gironde ».* Rapport de contrat, Ifremer, 166p.

Bastide J., Anthony E., Dolique F., 2005. *Le littoral des Bas-Champs (Picardie, France) soumis aux risques perpétuels d'inondation.* Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability. Proceedings of the 4th InterCeltic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, Guimarães, Portugal, July 2005. IAHS Publ. 310, 2007. pp.211-223.

Bellin J.-N., 1764. *Petit atlas des côtes de France et des places maritimes sur l'Océan et sur la Méditerranée.*

Benaouda A., 2008. *Dynamique saisonnière des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Gironde : modélisation opérationnelle de la réponse aux forçages hydrodynamiques.* Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I.

Bernon N., Mallet C., Belon R., 2016. *Observatoire de la Côte Aquitaine - Caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur le littoral de la côte aquitaine aux horizons 2025 et 2050.* BRGM - Observatoire de la Côte Aquitaine. Rapport BRGM/RP-66277-FR.

Biausque M., 2018. *Approche multi-proxys de la réponse des plages sableuses ouvertes aux événements de tempêtes, en incluant les phases de récupération.* Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux.

Billy J., Chaumillon E., Féliès H., Poirier C., 2012. *Tidal and fluvial controls on the morphological evolution of a lobate estuarine tidal bar: The Plassac Tidal Bar in the Gironde Estuary (France).* In : *Geomorphology*. 2012. n°169-170, pp.86-97.

Biotopie, 2014. *Document unique de gestion.* Conservatoire du Littoral. 213p. + cartes.

Bonnot-Courtois C., 2012. *Dynamique sédimentaire intertidale en baie du Mont-Saint-Michel entre évolution naturelle et aménagements.* Hommage à Alain L'Homer. XIIèmes Journées nationales Génie côtier - Génie civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012, pp.187-222.

Bousquet-Bressolier C., Bonnot-Courtois C., 1998. *Géomorphologie et vulnérabilité des rivages de la baie de Saint-Brieuc.* Norois, n°179, pp.495-506.

Braud F., 1986. *La dynamique sédimentaire à l'embouchure de la Gironde. Intérêt du sonar latéral à l'étude de la Passe Sud Gironde.* Thèse de 3ème cycle. Université de Bordeaux I.

BRGM, ONF, 2018. *Atlas morphodynamique de la côte sableuse aquitaine. Rapport final.* Rapport BRGM/RP-67152-FR.

Brière C., 2004. *Étude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée : l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet.* Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux 1, 257p.

Buffault P., 1930. *Modifications actuelles et anciennes du littoral de Gascogne.* Rev. Soc. Géogr. Comm. Bordeaux, Vol.1, pp.1-33.

Buffault P., 1942. *Histoire des dunes maritimes de la Gascogne.* Delmas, Bordeaux, 441p.

Camuzar J.P., 2011. *L'exploitation des tangues ou le souvenir des savoirs oubliés.* 32p.

Casset M., 2011. *Des paysans contre la mer. Poldérisation et drainages des terres humides sur le littoral de la baie du Mont Saint-Michel au Moyen Âge (XIe-XVe siècles).* Annales de Normandie 1/2011 (61e année), pp.75-106.

Castelle, B. et al., 2018. *Spatial and temporal patterns of shoreline change of a 280-km high-energy disrupted sandy coast from 1950 to 2014: SW France*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 200 (2018) 212-223

Cetmef, CETE Méditerranée, CETE de l'Ouest, 2011. *Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux. France métropolitaine*. CETMEF, 170p.

Cetmef, Conseil général de Charente-Maritime, 2000. *Gestion intégrée des sédiments sur le littoral charentais. Rapport final*. Ministère de l'équipement, des transports et du logement, 40p. + annexes.

Cerema, 2018. *Dynamiques et évolution du littoral. Fascicule 1 : De la frontière belge à la pointe du Hourdel*. Fascicule et atlas cartographique, collection Connaissances, Cerema, 498p.

Cerema, 2018. *Indicateur national de l'érosion côtière*. Couche SIG.

Cerema, 2019. *Dynamiques et évolution du littoral. Fascicule 6 : De la pointe de Chémoulin à la pointe de Suzac*. Fascicule et atlas cartographique, collection Connaissances, Cerema.

Cerema, MTE, 2017. *Indicateur national de l'érosion côtière*. Couche SIG.

Cerema, MTE, 2018. *Ouvrages et aménagements littoraux (métropole et outre-mer)*. Couche SIG.

CIEM, 2013. *Rapport annuel du Conseil international pour l'exploration de la mer (International Council for Exploration of the Sea)*. 57p.

Claveau D., 2007. *Évolution morpho-sédimentaire quaternaire de la plate-forme continentale de la Côte d'Albâtre (Manche orientale, France)*. Thèse de doctorat de l'Université de Rouen, 259p.

Corbin A., 1988. *Le territoire du vide : L'Occident et le désir du rivage 1750-1840*. Paris, Aubier, 412p.

Costa S., Le Cœur C., Lageat Y., 2007. *Vers une quantification du budget sédimentaire des plages de galets sur le littoral haut-normand*. Hommage au Pr. Alain Godard : « Du continent au bassin versant. Théories et pratiques en géographie physique », Presses Universitaires Blaise Pascal, pp.457-468.

Créocéan, 2009. *Recherche de gisements de granulats marins au large du littoral atlantique de l'estuaire de la Loire jusqu'à la frontière espagnole*. Synthèse bibliographique et analyse des contraintes.

Dallery F., 1955. *Les rivages de la Somme, autrefois, aujourd'hui et demain*. Mémoire de la société d'émulation historique et littéraire d'Abbeville, Paris, Picard, 307p.

Delsinne N., 2005. *Évolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen, 185p.

Deprest F., 1997. *Enquête sur le tourisme de masse : l'écologie face au territoire*. Paris, Belin, collection Mappemonde, 207p.

Desprez M., Lafite R., 2014. *Monitoring the impacts of marine aggregate extraction - Knowledge Synthesis 2012 (GIS SIEGMA)*. Presses universitaires de Rouen et du Havre, Mont-Saint-Aignan, 2014, 44p.

Desprez M., Le Bot S., Duclos P.-A., De Roton G., Villanueva M., Ernande B., Lafite R., 2012. *Monitoring the impacts of marine aggregate extraction. Knowledge synthesis 2012 (GIS SIEGMA)*. Presses universitaires de Rouen et du Havre, 44p.

DHI, Geos, 2007. *Étude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen*. Rapport à la Direction départementale de l'équipement de Vendée, 356p.

DIRM NAMO, 2019. *Annexe 9 : Document d'orientation et de gestion des granulats marins (DOGGM)*. Stratégie de façade maritime. Document stratégique de la façade Nord Atlantique – Manche Ouest, MTE 102p.

Dolique F., 1999. *Le littoral des Bas-Champs de Cayeux (Somme) : conflits et controverses pour une stratégie de défense contre la mer*. Revue de géographie de Lyon, Géocarrefour, 74, pp.59-64.

DRE Haute-Normandie, CETE Normandie-Centre, 2000. *Utilisation des matériaux de Haute-Normandie. Guide technique - Les granulats marins*.

DREAL Bretagne (2014). *Directive inondations. Bassin Loire Bretagne. Territoire à risque important d'inondation. T.R.I. Saint-Malo - Baie du Mont-Saint-Michel. Rapport de présentation de la cartographie des surfaces inondables et des risques d'inondation*. 49p. + annexes.

Duclos P.-A., 2012. *Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats marins - application au bassin oriental de la Manche*. Thèse de doctorat de l'Université de Rouen, 286p.

Elineau S., 2013. *Le risque naturel côtier sur la communauté d'agglomération du Havre (Haute- Normandie) : Une évaluation des aléas*. Thèse de doctorat de l'Université du Havre.

Fabre A., 1939. *Les terrains de revêtement du Médoc*. Thèse de Géologie, Bordeaux.

Férec C., Chauvin T., 1987. *L'exploitation des amendements marins dans le golfe normano-breton*. In: Norois, n°133-135. pp.229-238.

Garnaud S., 2003. *La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale : la baie de Seine sud-orientale (France)*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen, 267p.

Garnier C., 2013. *Suivi de l'exposition aux mouvements de terrain de la route de la Corniche, commune d'Urrugne (64) - État des lieux Octobre 2012. Rapport final*. BRGM - Observatoire de la côte aquitaine. Rapport BRGM/RP-62684-FR.

- Garnier C., Millescamps B., 2014. *Agglomération Côte Basque Adour : Évaluation de l'aléa érosion côtière en 2023 et 2043 dans le cadre de la stratégie locale de gestion de la bande côtière. Rapport final.* Rapport BRGM/RP-63780-FR.
- Genna A., 2004. *Étude géologique simplifiée de la Côte Basque.* BRGM - Observatoire de la côte aquitaine. Rapport BRGM/RP-53258-FR.
- Germain J., 2006. *La mise en perspective des problématiques de gestion du domaine public maritime des havres du secteur Nord de la côte Ouest du Cotentin,* 119p.
- Geslain C., 2014. *Évaluation et suivi de l'impact des extractions de granulats marins sur les écosystèmes et la biodiversité : quelle intégration dans la directive cadre Stratégie pour le milieu marin (DCSMM).* UNPG, 52p.
- GIP Littoral aquitain, 2007. *La MIACA, première politique d'aménagement touristique du littoral aquitain, 1967/1988.*
- GIP Littoral aquitain, 2012. *Gestion de la bande côtière, volet 1 érosion côtière - Guide de l'action locale. Rapport technique.*
- Gouguet, L., 2018. *Guide de gestion des dunes et des plages associées.* Quae, 224p.
- GRESARC, 2000. *Étude globale concernant la défense contre la mer de la côte nord Cotentin. Rapport final.* Conseil général de la Manche, 81p.
- GRESARC, 2002. *Étude hydro-sédimentaire des havres du Cotentin en vue de leur préservation - rapport final.* Université de Caen, 83p. + annexes.
- GRESARC, 2006. *Atlas des risques naturels côtiers sur les communes du suivi de l'évolution du littoral dans le département du Calvados.* Conseil général du Calvados, 62p.
- Hallermeier R.J., 1981. *A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate.* Coastal Engineering, 4, pp.253-277.
- Hénaff A., 1998. *Morphologie dynamique et budget sédimentaire des estrans meubles de la façade occidentale de la Presqu'île de Crozon, de l'anse de Combrit et de l'anse du Pouldu.* Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne occidentale.
- Hénaff A., 2004. *Les aménagements des littoraux de la Région Bretagne en vue de leur défense contre l'érosion depuis 1949 (Protection of the shoreline from coastal erosion since 1949 in Brittany).* Bulletin de l'Association de géographes français, 81(3), pp.346-359.
- Hénaff A., Bodéré J.-C., 2001. *Modifications récentes des apports biodétritiques littoraux : conséquences sur le budget sédimentaire des estrans sableux de l'ouest du Massif Armoricaïn.* Géomorphologie : relief, processus, environnement, 7(1), pp.17-29.
- Heurtaux C., 2004. *Hydrodynamique des sédiments sableux : exemple de l'embouchure de la Gironde.* Rapport de stage, Université de Bordeaux I.
- Hily C., 2005. *Lieux de surveillance du benthos. Région Bretagne-Suivi stationnel des sables intertidaux REBENT.*
- Howa H.L., 1987. *Le littoral du Nord Médoc (Gironde). Évolution d'une côte sableuse en érosion.* Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I.
- Idier D., Castelle B., Charles E., Mallet C., 2013. *Longshore sediment flux hindcast: spatio-temporal variability along the SW Atlantic coast of France.* In : Journal of Coastal Research. 2013. Special Issue 65, pp.1785-1790.
- Ifremer, 2015. *Données extraction de granulats.* Couche SIG.
- I-Sea, 2020. *Concession Platin de Grave. Bilan hydro-sédimentaire et morphodynamique. Phase 1 : Analyse des évolutions du trait de côte.* Rapport d'étude établi pour le compte d'Artelia et de GSM
- Jalon Rojas I., 2016. *Évaluation des changements hydro-sédimentaires de l'estuaire de la Gironde en lien avec les pressions sur le milieu.* Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I.
- Latteux B., 2001. *Synthèse sur les problématiques et enjeux d'évolution du littoral haut-normand et picard. 1-Milieu physique.* Préfecture de la Région Picardie – Direction départementale de l'équipement de la Somme, 464p.
- LCHF, 1959. *Étude de la sédimentation de la grande passe de la Gironde.* Port Autonome de Bordeaux. Rapport R. 59 015
- LCHF, 1969. *Étude hydraulique du Bassin d'Arcachon. Mission d'observation en nature.* DDE de la Gironde. Rapport R. 69 014
- LCHF, 1973. *Desserte hydraulique du fond du Bassin d'Arcachon. Mission Interministérielle pour l'aménagement de la Côte Aquitaine (MIACA).* Rapport R. 73 068
- LCHF, 1979. *Étude en nature de la Côte Aquitaine (entre la Pointe de Grave et l'embouchure de l'Adour).* Mission Interministérielle pour l'Aménagement de la Côte Aquitaine DATAR-MIACA. Rapport R. 79 122
- LCHF, 1982. *Protection du littoral au sud de Soulac-sur-Mer.* Mairie de Soulac-sur-Mer.
- LCHF, 1986a. *Catalogue sédimentologique des côtes françaises - Côtes de la mer du Nord et de la Manche de la frontière belge au Mont-Saint-Michel. Partie B : de la baie de Somme à la baie de Seine.* Direction des études et recherches d'Électricité de France, Ed. Eyrolles, pp.135-230.

LCHF, 1986b. *Catalogue sédimentologique des côtes françaises - Côtes de la mer du Nord et de la Manche de la frontière belge au Mont-Saint-Michel. Partie C : de la baie de Seine au Mont-Saint-Michel*. Direction des études et recherches d'Électricité de France, Ed. Eyrolles, pp.231-406.

LCHF, 1987. *Protection du littoral de Mers-les-Bains*.

LCHF, 1987. *Catalogue sédimentologique des côtes françaises. Côtes de la Manche et de l'Atlantique, de la Baie du Mont-Saint-Michel à la frontière espagnole. Partie C : de l'estuaire de la Gironde à la frontière espagnole*. Direction des études et recherches d'Électricité de France, Ed. Eyrolles, pp.369-559.

Le Bot S., Lafite R., Fournier M., Baltzer A., Desprez M., 2010. *Morphological and sedimentary impacts and recovery on a mixed sandy to pebbly seabed exposed to marine aggregate extraction (Eastern English Channel, France)*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89, pp.221-233.

Lesourd S., 2000. *Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal : zoom temporel du siècle à l'heure ; application à l'estuaire de la Seine*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen.

Letortu P., 2013. *Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen-Basse-Normandie, 414p.

Levoy F., 2007. *Érosion marine et comblement des havres. Synthèse des réflexions engagées*.

Levoy F., Larsonneur C., 1994. *Étude globale concernant la défense contre la mer, synthèse des études*. 141p.

Levoy F., Larsonneur C., 1995. *Étude des risques d'érosion et de submersion sur les côtes du Calvados, synthèse bibliographique*. Conseil général du Calvados, 81p.

Lissak C., Puissant A., Maquaire O., Malet J.-P., 2013. *Analyse spatio-temporelle de glissements de terrain littoraux par l'exploitation de données géospatiales multi-sources*. *Revue internationale de géomatique*, 2, pp.199-225.

Mallet C., 1998. *Étude de la dynamique des sédiments non-cohésifs de l'embouchure de la Gironde*. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I.

Manaud F., 1998. *Élaboration d'un outil de gestion prévisionnelle de la côte Aquitaine - PHASE 1 - Bilan des connaissances sur l'évolution des connaissances sur l'évolution du trait de côte*.

Manaud F., L'Yavanc J., Nègre S., Tougeron C., Trut G., 2001. *Élaboration d'un outil de gestion prévisionnelle de la côte Aquitaine - Phase 3 : diagnostic d'évolution et recommandations*. Contribution de l'Ifremer. Ifremer - Observatoire de la côte aquitaine.

Maquaire O., 1990. *Les mouvements de terrain de la côte du Calvados - Recherche et prévention*. Document du BRGM, n°197, 430p.

Mariou V., Castelle B., Guillot B., 2017. *Suivi drone du système plage-dune girondin*. Atelier Pigma Littoral. Rochefort, 19 septembre 2017. Diaporama, 22p.

Mazières Alais, 2014. *Évolution morphologique et processus sédimentaires actuels du plateau continental interne sud-aquitain : étude comparée des zones de la Salie-Biscarosse (Sud des passes d'Arcachon) et la zone de la tête du canyon de Capbreton*. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I.

MEDDE, 2015. *Développer la connaissance et l'observation du trait de côte. Contribution nationale pour une gestion intégrée*. MEDDE, 28p.

MEDDTL, 2012. *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens*. MEDDTL, 20p.

MEEDDM, 2010. *La gestion du trait de côte*. Quae, 304p.

MEEM, 2014 *Guide méthodologique Plans de prévention des risques littoraux*. Rapport de la Direction générale de la prévention des risques, Service des risques naturels et hydrauliques, 169p.

MEEM, 2017. *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Programme d'actions 2017-2019*. MEEM, 28p.

MEEM, MINEFI, 2016. *Guide méthodologique pour l'élaboration des Documents d'Orientation pour une Gestion durable des Granulats Marins (DOGGM)*. 178p.

Meur-Férec C., 2006. *De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : un itinéraire de géographe*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Nantes, 247p.

Migniot C., 1969. *Estuaire de la Gironde. Synthèse des phénomènes naturels*. LCHF, Rapport R. 69 052.

Migniot C., 1998. *Rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel, synthèse des connaissances hydro-sédimentaires de la baie*. 107p.

OREAP, 1975. *Évolution de la côte picarde et de la baie de Somme*. Préfecture de Région Picardie, 97p.

Peter-Borie M., Riss J., Gentier S., 2009. *Modélisation des instabilités dans les flyschs et les altérites associées sur la Côte Basque (64)*. BRGM - Observatoire de la côte aquitaine, rapport BRGM/RP-57056-FR.

Phan N.V., 2002. *Modélisation numérique tridimensionnelle de la circulation générale, de l'intrusion saline et du transport sédimentaire dans l'estuaire de la Gironde*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen-Basse-Normandie.

Piednoir S., Dubreucq T., Gérome C., 2005. *État des connaissances sur les granulats marins en Aquitaine*. CETE Sud-Ouest.

Quemmerais-Amice F., Simplet L., Augris C., Blanchard M., 2012. *Pressions et impacts – Manche-Mer du Nord. Pressions physiques et impacts associés. Pertes et dommages physiques. Extraction sélective des matériaux*. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Agence des aires marines protégées et Ifremer, 18p.

ROLNP, DREAL Basse-Normandie, 2014. *Analyse des traits de côte historiques de Basse-Normandie*. Notice, 12p.

Saari H.-K., 2008. *Dynamique saisonnière des transferts particuliers dans les systèmes fluviaux-estuariens : application des radioisotopes à courtes périodes : ^{234}Th , ^7Be et ^{210}Pb* . Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I.

Sabatier F., Stive Marcel J.F., Pons F., 2004. *Longshore variation of depth of closure on a micro-tidal wave-dominated coast*. Proceedings of 29th International Conference on Coastal Engineering, 3, pp.2327-2339. DOI: 10.1142/9789812701916_0187

Sogreah, 1992. *Extraction de matériaux au Hourdel. Études d'impact sédimentologique. Rapport général n°5 1294 de février 1992 réalisé pour le compte de la société G.M.F.*

Sogreah, 1994. *Études complémentaires du littoral des Bas-Champs - Fascicule 1 : étude régionale*. Rapport pour l'Association syndicale autorisée des Bas-Champs et la Direction départementale de l'Équipement de la Somme n°51 1436 R1. Sogreah Ingénierie, Paris (France).

Sogreah, 2012. *Étude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire. Fascicule D : Synthèse sur l'érosion et la submersion marine du littoral de Loire-Atlantique*. Rapport à la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays de la Loire, 62p. + 47p. Annexes.

Sottolichio A., Castaing P., 1999. *A synthesis on seasonal dynamics of highly-concentrated structures in the Gironde estuary*. In : Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science. 1999. Vol.329, n°11, pp.795-800.

Stepanian A., 2002. *Évolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres : Omaha Beach (Normandie)*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen.

Stéphan P., Suanez S., 2004. *Mobilité du trait de côte en baie de Saint-Michel-en-Grève (Côtes d'Armor) ou le résultat d'une plage en accretion*. VIIIèmes Journées nationales Génie Côtier - Génie Civil, Compiègne, 7-9 septembre 2004, Vol. 1, pp.273-278.

Stéphan P., Suanez S., Fichaut B., 2010. *Franchissement et migration des cordons de galets par rollover. Impact de la tempête du 10 mars 2008 dans l'évolution récente du Sillon de Talbert (Côtes-d'Armor, Bretagne)*. Norois, 215, pp.59-75.

Teisson C., 1989. *Défense contre la mer de la plage de galets de Criel : Synthèse des conditions hydrodynamiques et sédimentologiques*. Rapport EDF-LNH HE-42/89, 12, 42p.

UNPG, 2013. *Évaluation et suivi de l'impact des extractions de granulats marins sur les écosystèmes et la biodiversité*.

Vaucourt C., Bonnot-Courtois C., 1992. *Dynamique sédimentaire dans les baies de Lancieux et de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*. Norois, n°153, pp.29-44.

Walker P., 2001. *Dynamique sédimentaire dans le golfe normand-breton : intérêt de l'imagerie par sonar à balayage latéral*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen.

Walker P., Ravilly M., Launay R., 2014. *Suivi environnemental des exploitations de granulats marins au large de la pointe de Chassiron. Contribution à la connaissance de la dynamique sédimentaire dans la zone pré-littorale*. XIIIèmes Journées nationales Génie côtier - Génie civil, Dunkerque, 2-4 juillet 2014, pp.849-858.

Site Internet du Cerema :

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/cartographie-ouvrages-amenagements-littoraux-methode>

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/cartographie-ouvrages-amenagements-littoraux-realisee-cerema>

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/cerema-elabore-premiere-cartographie-nationale-ouvrages>

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/indicateur-national-erosion-cotiere>

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/dynamiques-evolution-du-littoral>

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/dynamiques-evolution-du-littoral-fascicule-3-du-cap-antifer>

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/dynamiques-evolution-du-littoral-fascicule-6-pointe>

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/dynamiques-evolution-du-littoral-fascicule-7-pointe-suzac>

Site Internet Géolittoral :

<http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/cartographie-nationale-des-ouvrages-et-r502.html>

<http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/indicateur-national-de-l-erosion-cotiere-r473.html>

<http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/dynamiques-et-evolution-du-littoral-synthese-des-r462.html>

<http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/sites-d-immersion-des-sediments-de-dragages-r396.html>

Site Internet de la ville de Cayeux-sur-Mer :

Article « L'industrie du galet » : <http://www.cayeux-sur-mer.fr/economie-et-developpement/industrie-du-galet/>

Atlas cartographique du ROL :

<https://rolnp.maps.arcgis.com/apps/MinimalGallery/index.html?appid=1a1f60310d0541839a848efeae421c99>

A2. RÉFÉRENCES RELATIVES AU CHAPITRE 3 ET 4

Artelia, 2014. Étude d'impact sur les houles lié à un surcreusement sur le site d'extraction des sables du Pilier. Rapport n°871 3437 de janvier 2014 établi pour le groupement du Pilier et les Sablières de l'Atlantique.

Artelia, 2015a. Projet Cairnstrath. Études hydrosédimentaires complémentaires. Rapports n°871 3539 de juin 2015 établis pour le groupement Cairnstrath SN2 et les Sablières de l'Atlantique. R1 : Étude de l'agitation et de son impact sur le trait de côte, R2 : Courantologie et transport sédimentaire

Artelia, 2015b. Exploitation de granulats en baie de Seine. Étude des impacts hydrosédimentaires et de l'impact sur le trait de côte. Rapports n° 871 3538 de juin 2015 établis pour les entreprises LGE et MDS. R1 : Étude des impacts hydrosédimentaires sur le transport des matières en suspension, R2 : Étude des impacts sur l'agitation et le littoral

BMAPA et The Crown Estate, 2013. Marine aggregate dredging and the coastline: a guidance note. 27 p.

Brooks, S.M.; Spencer, T.; Christie, E.K., 2017. Storm impacts and shoreline recovery: Mechanisms and controls in the southern North Sea. *Geomorphology*, 283, 48–60

Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *J. of Waterways Harbors Div., ASCE*, 88, 117-130

Bulteau T., Mugica J., Mallet C., Garnier C., Rosebery D., Maugard F., Nicolae Lerma A., Nahon A. avec la collaboration de Millescamps B, 2014. –Évaluation de l'impact des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la morphologie de la Côte Aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-63797-FR, 68 p., 138fig., 8 tab., 2ann.

Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K.D., Robinet, A., Senechal, N., Ferreira, S., 2015. Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a doublebarred sandy coast: beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology* 238, 135–148.

Cayocca, F. et du Gardin B., 2003. Assessing the impact of sand extraction on the shore stability : project: for a methodological framework. European marine sand and gravel – shaping the future, EMSAGG Conference 20-21 February 2003, Delft University, The Netherlands

Cefas, 2008. Regional Environmental Assessment: A Framework for the Marine Minerals Sector. 19 p.

Cooper, J.A.G., A.N. Green, C. Loureiro, 2018. Geological constraints on mesoscale coastal barrier behaviour, *Global and Planetary Change*, Volume 168, Pages 15-34,

Dean, R.G. et J.R. Houston, 2016. Determining shoreline response to sea level rise. *Coastal Engineering*, 114, 1-8

Goeldner-Gianella L, 2013, Dépoldériser en Europe occidentale. Pour une géographie et une gestion intégrées du littoral, Publications de la Sorbonne, coll. Territoires en mouvements, Paris, 340 p.

Hallermeier, R.J., 1978. Uses for a calculated limit depth to beach erosion. *Proceedings 16th Int. conf. on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers*, 1493- 1512

Hallermeier, R.J., 1981. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4, 253-277

Hilton, M.J. and Hesp, P., 1996. Nearshore-surfzone system limits and the impacts of sand extraction. *Journal of Coastal Research*, 12, 3, 726-74

HR Wallingford, 2011. Anglian Offshore Dredging Association. Marine Aggregate Regional Environmental Assessment. Technical Note DDR4472-02, 04 et 05 (3 vol.)

Jacobs, 2018. Hemsby Coast Erosion. High Level Review of Options. Report prepared for Great Yarmouth Borough Council, June 2018; [Main report and Appendix A](#)

Kortekaas, S., I. Bagnaviciute, P. Gyssels, J.M. A. Huerta et A. Héquette , 2010. Assessment of the effects of marine aggregate extraction on the coastline: an example from the german baltic sea coast. *J. of Coastal Research*, SI 51, 205-214

Latteux, B. ,2008. Exploitation de matériaux marins et stabilité du littoral. Ed. QUAE, 162 p.

Le Cozannet,G., T. Bulteau, B. Castelle, R. Ranasinghe, G. Woppelmann *et al.*, 2019. Quantifying uncertainties of sandy shoreline change projections as sea level rises. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, 9 (1)

Menier, D.; Mathew, M.; Cherfils J.-B.; Ramkumar, M.; Estournès, G.; Koch, M.; Guillocheau F.; Sedrati, M.; Goubert, E.; Gensac, E.; Le-Gall,R.,and Novico, F., 2019. Holocene sediment mobilization in the inner continental shelf of the Bay of Biscay: Implications for regional sediment budget offshore to onshore. In: Castelle, B. and Chaumillon, E. (eds.), *Coastal Evolution under Climate Change along the Tropical Overseas and Temperate Metropolitan France*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 88, pp.110-121.

Migniot, C. et J. Viguié , 1980. Influence de l'extraction des granulats en mer sur l'équilibre du littoral. *La Houille Blanche*, n°3

Nicholls, R.J., Birkemeier, W.A. and Lee, G.-h., 1998.Evaluation of depth of closure using data from Duck, NC, USA. *Marine Geology*,148(3-4): 179-201.

Pontee, N., 2013. Defining coastal squeeze: a discussion. *Ocean and Coastal management*. 84. 204-207

Posford Haskoning Ltd ; 2004. Marine Aggregate Extraction: Approaching Good Practice in Environmental Impact Assessment. Report prepared, under management by the Mineral Industry Research Organisation, for the Office of the Deputy Prime Minister.

Sogreah, 2012. Deuxième bilan quinquennal de l'exploitation et du suivi environnemental. Note de synthèse sur les aspects hydrosédimentaires. Rapport n° 171 3068 R3 de janvier 2012 établi pour le groupement du Pilier et les Sablières de l'Atlantique.

Syvitski, J. et A. Kettner, 2011. Sediment flux and the Anthropocene. *Philos. Trans. of the Royal Soc. London*, 369, 957-975.

Viguié, J., J.M. Roques et C. Migniot ,1984. Influence de l'extraction des granulats en mer sur l'équilibre du littoral. *Société Hydrotechnique de France, C.R. XVIIIe journées de l'Hydraulique, Marseille, rapport III-13*

Waters *et al.*, 2016. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351 (6269)

ANNEXE B : RÉGLEMENTATION FRANÇAISE SUR LES EXTRACTIONS DE GRANULATS MARINS

B1. DÉFINITIONS

Le terme granulat réunit tous les produits constitués par « un ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 125 mm » (norme NF P 18-540 publiée en 1997). En France, l'exploration et l'exploitation des sables et graviers dépendent de différents régimes selon leur usage ou leur lieu d'extraction :

- **l'exploitation de granulats terrestres** dépend du Code de l'environnement (Articles L 511-1 et suivants) selon la nomenclature ICPE (Installations classées pour la protection de l'environnement).
- **les prélèvements dédiés à la gestion du trait de côte** sont régis par le Code de l'environnement (articles L 211-7, L 214-1 à -629) au titre notamment de la Loi sur l'eau et des milieux aquatiques. Pour les rechargements de plage, les collectivités territoriales françaises sont habilitées à entreprendre l'étude, l'exécution et l'exploitation de tous travaux présentant un intérêt général et visant la défense contre la mer (article L 211-7 du Code de l'environnement). Les prélèvements en lien avec le rechargement de plages sont soumis à déclaration ou autorisation au titre des articles L. 214-1 à 6 du Code de l'environnement. Si le montant des travaux est supérieur à 1 900 000 € ou si l'emprise du rechargement sur la plage est supérieure à 2 000 m², les travaux sont soumis à étude d'impact (article R 122-8 du Code de l'environnement). Dans le cas contraire, seule une notice d'impact est exigible (article R 122-9 du Code de l'environnement). L'extraction de matériaux marins destinés à la gestion du trait de côte n'est pas soumise à la redevance domaniale, que le lieu d'extraction soit situé sur le domaine public maritime (DPM) ou non.
- **les déblais sableux de dragages portuaires** sont régis par le Code de l'environnement (article L 214-1 à 3). La circulaire du 4 juillet 2008 précise les procédures relatives à la gestion des sédiments. Ces dragages sont indispensables pour garantir un accès sécurisé aux infrastructures portuaires. Une petite partie de ces sédiments dragués pour l'entretien des chenaux et des ports est réutilisée pour le rechargement de plage.
- **les granulats marins**, quant à eux, sont régis par le Code minier, y compris les matériaux calcaires (considérés auparavant comme produits de « pêche ») depuis la loi 97-1051 du 18 novembre 1997. Ils font également l'objet d'une évaluation environnementale (article R 122-1 et suivants du Code de l'environnement), et notamment d'une étude d'impact dont le contenu est décrit à l'article R 122-5 du Code de l'environnement. Leur extraction est soumise à redevance.

29 L'article L 321-8 du Code de l'environnement dispose que les extractions de matériaux non visés aux articles L 111-1 et L 111-2 du Code minier sont limitées ou interdites lorsqu'elles risquent de compromettre, directement ou indirectement, l'intégrité des plages, dunes littorales, falaises, marais, vasières, zones d'herbiers, frayères, gisements naturels de coquillages vivants et exploitations de cultures marines. Cette disposition ne peut toutefois faire obstacle aux travaux de dragage effectués dans les ports et leurs chenaux ni à ceux qui ont pour objet la conservation ou la protection d'espaces naturels remarquables.

B2. LES AUTORISATIONS NÉCESSAIRES POUR L'EXPLORATION ET L'EXPLOITATION DES GRANULATS MARINS AU TITRE DU CODE MINIER ³⁰

Avant de pouvoir exploiter in fine des granulats marins, plusieurs phases sont nécessaires :

- **une phase d'exploration** permettant la recherche d'un éventuel gisement, l'évaluation de son volume et la détermination des conditions techniques et économiques de l'exploitation ultérieure. Cette phase peut durer de 5 à 15 ans par périodes de 5 ans,
- **une phase d'exploitation** correspondant à l'exploitation de la ressource et à la fermeture. Les autorisations sont généralement demandées pour 30 ans.

Avant toute exploration ou exploitation de granulats marins, le Code minier impose l'octroi de trois autorisations : un titre minier, une autorisation d'ouverture de travaux de recherches ou d'exploitation et une autorisation domaniale si le site est situé sur le DPM.

B2.1. Le titre minier

Les dispositions réglementaires relatives aux conditions d'instruction des demandes de titre minier sont précisées dans le Code minier (nouveau) et les décrets 71-362, 2006-648, 2006-798 et 2018-62.

Pour l'exploration, les pétitionnaires doivent obtenir :

- soit un **permis exclusif de recherches (PER)**, octroyé par **arrêté ministériel** pour une durée de 5 ans renouvelable,
- soit une **autorisation de prospection préalable (APP)** accordée par l'autorité administrative compétente sans mise en concurrence, ni enquête publique et sans qu'ait été préalablement effectuée la concertation prévue à l'article L. 123-1.

Pour l'exploitation, les pétitionnaires doivent obtenir une concession d'exploitation. Elle est octroyée par décret ministériel, pour une durée maximum de 50 ans. Le décret de concession peut être assorti d'un cahier des charges que le préfet doit prendre en compte dans son arrêté préfectoral relatif aux travaux. Ce cahier des charges peut par exemple demander des mesures particulières de surveillance ou d'encadrement de l'extraction.

B2.2. L'autorisation d'ouverture de travaux de recherches ou d'exploitation

Depuis 2006, les demandes de titre minier et d'ouverture de travaux peuvent être déposées conjointement (décret 2006-798 du 6 juillet 2006). L'ouverture dans la limite de douze milles marins ou dans les eaux intérieures de travaux de prospection, de recherches ou d'exploitation de substances minérales ou fossiles mentionnées à l'article L 111-1 est soumise aux régimes d'autorisation ou de déclaration.

Les autorisations sont octroyées selon les dispositions décrites les articles L 162-1 à L 162-12 du Code minier nouveau et dans le décret 2006-649 relatif aux travaux miniers. Le décret 2014-118 modifie la liste des travaux miniers soumis à déclaration ou à autorisation. Les forages miniers qui ne sont pas susceptibles de présenter des dangers ou inconvénients graves pour l'environnement sont soumis au régime de la déclaration : forages de moins de cent mètres de profondeur, forages de reconnaissance géologique ou géophysique et forages de reconnaissance minière.

Les dispositions propres aux autorisations de travaux en mer sont décrites dans les articles L 162-6 à L 162-9 du Code minier nouveau.

Les autorisations d'ouverture de travaux sont accordées par arrêté préfectoral et fixent les conditions de recherches ou d'exploitation, les volumes maximums autorisés et les modalités de suivi environnemental.

³⁰ La réglementation à jour est disponible sur les sites internet <http://www.mineralinfo.fr/> et www.Sablessetgravieresenmer.fr

B2.3. L'autorisation d'occupation du domaine public maritime

À une distance inférieure à douze milles nautiques (soit environ 22 km), une autorisation d'occupation du domaine public maritime (DPM), régie par l'article L 2122-1 du Code général de la propriété des personnes publiques est nécessaire.

Elle est délivrée sous la forme d'un arrêté par le gestionnaire du DPM : le préfet de département ou le Grand port maritime. Cette autorisation spécifie notamment le montant de la redevance dite « domaniale » (décret 2017-32)³¹.

B3. ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

B3.1. Prise en compte des enjeux environnementaux

En France, la législation nationale est adaptée afin de tenir compte de la Directive européenne « habitats » (92/43/EEC) visant la conservation des habitats naturels, de la faune et de la flore sauvage, en phase avec la convention OSPAR et de la directive 2011/92/UE modifiée concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement.

De plus, les réglementations de 2006 et de 2011 (Ordonnance n° 2011-91 du 20 janvier 2011 portant codification de la partie législative du Code minier) ont renforcé la prise en compte des enjeux environnementaux. En effet, selon l'article 162-7 du Code minier nouveau, si le pétitionnaire dépose simultanément une demande de concession de granulats marins contenus dans les fonds marins du domaine public et du plateau continental et une demande d'autorisation d'ouverture de travaux, l'instruction doit comporter une évaluation environnementale et une enquête publique (conformément respectivement aux chapitres II et III du titre II du livre Ier du Code de l'environnement) et la mise en œuvre d'une concertation.

Les documents d'orientation pour une gestion durable des granulats marins (DOGGM) doivent, quant à eux, s'articuler avec les documents stratégiques de façade (DSF), institués par les articles L 219-1 à L 219-6-1, ainsi que par les articles R 219-1-7 à R 219-1-14 du Code de l'environnement.

Selon la note technique du 17 août 2018, les DSF intègrent à la fois la déclinaison de la stratégie nationale pour la mer et le littoral (art. L 219-1), les plans d'action pour le milieu marin (PAMM) (issus de la directive 2008/56/CE, dite DCSMM) et la planification de l'espace maritime (issue de la directive 2014/89/UE, dite DCPEM).

Concernant l'extraction de granulats marins, les objectifs visés dans les DSF sont principalement axés autour de la mise en œuvre de conditions durables de l'extraction, de la réduction des impacts, de la protection de certaines zones comme les vasières ou les nourriceries, du respect des autres activités maritimes tout en tenant compte des nécessités socio-économiques et des sensibilités environnementales de chaque façade maritime.

Ainsi, dans le cas où un site d'extraction serait situé :

- au sein d'un site Natura 2000 ou à proximité (article R 414-19 du Code de l'environnement), une évaluation d'incidence devra être conduite (décret n°2010-365 du 9 avril 2010 relatif à l'évaluation des incidences Natura 2000),
- dans un parc naturel marin, le conseil de gestion se prononce (procédure d'avis conforme) sur l'opportunité d'autoriser ou non un projet ayant un impact notable sur le milieu marin (art. L 334-5, R 334-33 et R 331-50 du Code de l'environnement),
- dans un parc national, le Code de l'environnement prévoit également des dispositions (article L 331-14).

³¹ Depuis 2017, la redevance domaniale est due également pour les concessions situées au delà des 12 milles nautiques.

B3.2. Les études d'impacts environnementales

Le Code minier impose la fourniture d'une étude d'impact détaillée (dont le contenu est défini par l'article R 122-5 du Code de l'environnement) lors de toute demande simultanée de permis de recherche ou de concession et d'ouverture de travaux. Cette étude d'impact doit être en relation avec l'importance des travaux et aménagements projetés et avec leurs incidences prévisibles sur l'environnement. Elle doit contenir :

- une description du projet : localisation, description des caractéristiques physiques de l'ensemble du projet et une description des principales caractéristiques de la phase opérationnelle du projet (nature des sédiments, volumes, profondeur de prélèvement),
- une description des aspects pertinents de l'état actuel de l'environnement, dénommée « scénario de référence », et de leur évolution en cas de mise en œuvre du projet ainsi qu'un aperçu de l'évolution probable de l'environnement en l'absence de mise en œuvre du projet,
- une description des facteurs mentionnés au III de l'article L 122-1 du Code de l'environnement susceptibles d'être affectés de manière notable par le projet,
- une description des incidences notables attendues du projet sur l'environnement (morphologie, nature des fonds, hydrodynamisme et dynamique sédimentaire, ressources benthiques, ressources halieutiques, mégafaune, qualité physico-chimique de l'eau, patrimoine culturel, activités socio-économiques, sites de protégés),
- une description des incidences notables que le projet est susceptible d'avoir sur l'environnement résultant, notamment du cumul des incidences avec d'autres projets existants ou approuvés (article R 214-6 du Code de l'environnement),
- la description des mesures prévues par le maître de l'ouvrage pour éviter les effets négatifs notables identifiés du projet sur l'environnement ou la santé humaine, les réduire ou les compenser (ERC). La description de ces mesures doit être accompagnée de l'estimation des dépenses correspondantes; le cas échéant, les modalités de suivi des mesures d'évitement, de réduction et de compensation seront proposées.

Pour l'exploitation de granulats marins, les principales mesures de réduction envisagées sont la limitation de la profondeur, le fait de ne pas effectuer de criblage en mer, de ne pas mettre à nu le substratum rocheux, de mettre en place un phasage de l'extraction pour favoriser la recolonisation et de suspendre les extractions pendant certaines périodes définies (période de frai de certaines espèces pondant sur le fond, pêche à la coquille saint-Jacques...). L'étude d'impact est soumise à l'avis de l'autorité environnementale compétente, précisée à l'article R 122-6 du Code de l'environnement.

B3.3. État initial de référence

Avant tout démarrage d'exploitation de granulats marins, les arrêtés préfectoraux autorisant l'ouverture de travaux d'exploitation prévoient un état initial de référence qui comprend :

- une cartographie morpho-bathymétrique,
- une cartographie morpho-sédimentaire,
- un inventaire biologique (biosédimentaire).

B3.4. Suivis pendant la durée de l'exploitation

Selon l'article L 172-1 du Code minier et en vue de permettre la surveillance pendant la durée de l'exploitation, les titulaires de concession adressent chaque année à l'autorité administrative un rapport relatif à ses incidences sur l'occupation des sols et sur les caractéristiques essentielles

du milieu environnant. Les caractéristiques de ce rapport annuel d'exploitation sont définies aux articles 35 et 36 du décret 2006-649. Ce rapport, communiqué aux services intéressés et aux collectivités territoriales concernées, comporte toutes les informations nécessaires à l'appréciation des conditions techniques et économiques de l'exploitation, de l'exécution du programme de travaux, ainsi que les résultats des mesures de suivi prescrites (article 46 du décret 2006-798).

L'exploitant adresse, également annuellement, une déclaration des quantités extraites au cours de l'année précédente, au service des domaines et au directeur régional de l'environnement, de l'aménagement et du logement. Au cas où les résultats ne sont pas conformes aux objectifs fixés, le préfet peut prescrire par arrêté des travaux supplémentaires, dans les conditions prévues (article 46 du décret 2006-798).

En outre, le rapport annuel comporte l'indication, en vue de l'application des dispositions des articles L 163-1 à L 163-9 du Code minier, des conditions d'arrêt des travaux ainsi que l'estimation de leurs coûts.

Un suivi quinquennal, réalisé parfois à plus courte échéance, selon les caractéristiques du site, est défini. Il comprend :

- un suivi morphosédimentaire,
- un suivi faune benthique,
- un suivi halieutique (parfois).

B4. POLICE DES MINES EN MER

Selon les articles 35, 36 et 42 du décret 2006-798, les mesures de police des mines en mer définies par arrêté préfectoral ont pour objet de contrôler que les extractions sont exécutées :

- à l'intérieur des limites du périmètre autorisé : enregistrement de la navigation des navires pendant les phases de dragages transmis aux Affaires maritimes,
- pour des quantités n'excédant pas les quantités annuelles maximales autorisées : contrôle des volumes déclarés dans les ports,
- selon les prescriptions de l'arrêté d'autorisation d'ouverture des travaux.

Sur le plateau continental, l'exploration et l'exploitation des substances minérales ou fossiles sont soumises aux déclarations, au contrôle et à la communication de renseignements prévus aux articles L 411-1 à L 412-2 du Code minier.

B5. REDEVANCES DOMANIALES ET AUTRES TAXES

Sur la base des dispositions de l'article L 132-15-1 du Code minier, de l'article 19 du décret n°2006-798 du 6 juillet 2006, et selon les dispositions du décret n° 2017-32 du 12 janvier 2017, une redevance domaniale pour l'exploitation des ressources minérales non énergétiques des fonds marins du plateau continental ou de la zone économique exclusive est due annuellement pour l'occupation du domaine public maritime par les activités d'extraction de granulats.

Elle est fixée en tenant compte des caractéristiques du gisement, notamment de sa profondeur, de son éloignement des points de déchargement et de la qualité des substances dont l'exploitation est envisagée, dans la limite d'un tarif minimal et maximal indexé le 1er janvier de chaque année en fonction de l'évolution de l'indice TP06 Dragages maritimes et fluviaux publié par l'INSEE.

D'autres taxes auxquelles est soumise l'activité se rapportent à la navigation :

- taxe sur le navire (articles R 212-2 et suivants du Code des ports maritimes),
- frais de pilotage et de lamanage.

D'autres taxes plus spécifiques ciblent l'activité d'extraction, le transport et le traitement des granulats marins, ou encore l'exploitation des dragues :

- taxe sur la marchandise (article R 213-15 du Code des ports maritimes),
- redevance portuaire relative au traitement des déchets issus de l'exploitation des navires,
- redevance d'occupation du domaine public portuaire (en raison de l'exploitation des terminaux sabliers et du traitement à terre),
- péage de navigation des marchandises et service spécial d'éclusage (cas des terminaux sabliers desservis par voie fluviale),
- taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) sur les installations classées (terminaux sabliers). La TGAP comprend une composante relative aux matériaux d'extraction de toutes origines destinées aux secteurs du bâtiment et des travaux publics. Elle doit être payée par les producteurs ou les importateurs en fonction du poids net des matériaux.

B6. TEXTES RÉGLEMENTAIRES

- Directive européenne « habitats » (92/43/CEE) du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels, ainsi que de la faune et de la flore sauvages
- Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau
- Directive 2011/92/UE du parlement européen et du conseil du 13 décembre 2011 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement.
- Directive 2008/56/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (DCSMM).
- Directive 2014/89/UE du Parlement européen et du Conseil du 23 juillet 2014 établissant un cadre pour la planification de l'espace maritime
- Ordonnance n° 2011-91 du 20 janvier 2011 portant codification de la partie législative du code minier
- Ordonnance n° 2016-1687 du 8 décembre 2016 relative aux espaces maritimes relevant de la souveraineté ou de la juridiction de la République française
- Code de l'environnement
- Code général de la propriété des personnes publiques
- Code minier nouveau
- Loi n° 68-1181 du 30 décembre 1968 relative à l'exploration du plateau continental et à l'exploitation de ses ressources naturelles abrogée par l'Ordonnance n°2011-91 du 20 janvier 2011 et par l'Ordonnance n° 2016-1687 du 8 décembre 2016
- Loi n° 76-646 du 16 juillet 1976 relative à la prospection, à la recherche et à l'exploitation des substances minérales non visées à l'article 2 du code minier et contenues dans les fonds marins de domaine public métropolitain abrogée par l'Ordonnance n°2011-91 du 20 janvier 2011

- Décret n°71-362 du 6 mai 1971 relatif aux autorisations de prospections préalables de substances minérales ou fossiles dans le sous-sol du plateau continental
- Décret n°95-696 du 9 mai 1995 relatif à l'ouverture des travaux miniers et à la police des mines abrogé Version abrogée le 3 juin 2006 par le décret n°2006-649 du 2 juin 2006
- Décret n°2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain
- Décret n°2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains
- Décret n°2006-798 du 6 juillet 2006 relatif à la prospection, à la recherche et à l'exploitation de substances minérales ou fossiles contenues dans les fonds marins du domaine public et du plateau continental métropolitains
- Décret n°2014-118 du 11/02/14 modifiant le décret n°2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains ainsi que l'annexe à l'article R 122-2 du Code de l'environnement
- Décret n°2016-1303 du 4 octobre 2016 relatif aux travaux de recherches par forage et d'exploitation par puits de substances minières, et abrogeant l'annexe intitulée « Titre Recherche par forage, exploitation de fluides par puits et traitement de ces fluides » du décret n°80-331 du 7 mai 1980 portant règlement général des industries extractives
- Décret n°2017-32 du 12 janvier 2017 pris pour l'application de l'article L. 132-15-1 du Code minier
- Décret n°2018-62 du 2 février 2018 portant application de l'article L. 611-33 du Code minier
- Instruction du Gouvernement du 17 février 2014 relative à l'articulation entre la directive cadre sur l'eau (DCE) et la directive cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM)
- Note technique du 17 août 2018 : Documents stratégiques de façade maritime



Artelia est un groupe international multidisciplinaire de conseil, d'ingénierie et de management de projet dans les secteurs du bâtiment, des infrastructures et de l'industrie. Fort de 5 900 collaborateurs, Artelia est un acteur de référence de l'ingénierie en Europe et une présence dans plus de 40 pays à travers le monde. Expert en hydrodynamique, dynamique sédimentaire et en génie civil, c'est en particulier un partenaire recherché pour l'ingénierie des infrastructures côtières et portuaires, et le conseil en environnement pour le littoral et les estuaires. Artelia est détenu à 100 % par ses managers et salariés.

Pour en savoir plus : www.arteliagroup.com



Le Cerema est un établissement public, centre de ressources et d'expertises scientifiques et techniques interdisciplinaire. Exerçant son activité au plan national et territorial, il accompagne les collectivités dans la réalisation de leurs projets, notamment sur les champs de l'aménagement, l'urbanisme, la mobilité, les transports, l'énergie, le climat, l'environnement et la prévention des risques.

Pour en savoir plus : www.cerema.fr



UNION NATIONALE DES
PRODUCTEURS DE GRANULATS

L'Union nationale des producteurs de granulats (UNPG) est l'organisation professionnelle qui représente l'ensemble des entreprises qui extraient et produisent des granulats naturels (sable et graviers) terrestres et en mer, ou recyclés (démolition, traitement in situ), pour alimenter le secteur du bâtiment et des travaux publics (1800 entreprises, 2300 carrières, 400 sites de recyclage, et 15 000 emplois directs). La majorité des membres de l'UNPG adhère à la charte environnement des industries de carrières et à l'association entreprises engagées (RSE).

Pour en savoir plus : www.unpg.fr



**POUR ALLER PLUS LOIN :
www.sablessetgraviersenmer.fr**