



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE,  
DE LA BIODIVERSITÉ,  
DE LA FORÊT, DE LA MER  
ET DE LA PÊCHE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

# ÉVALUATION DES EFFETS POTENTIELS DE L'EXPLOITATION DE GRANULATS MARINS SUR L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE GUIDE MÉTHODOLOGIQUE POUR UNE MODÉLISATION NUMÉRIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE



**GUIDE**  
DÉCEMBRE 2024



UNION NATIONALE DES  
PRODUCTEURS DE GRANULATS



DOCUMENT PILOTÉ PAR LA DIRECTION GÉNÉRALE DE L'AMÉNAGEMENT, DU LOGEMENT ET DE LA NATURE (DGALN) ET RÉALISÉ PAR LE BUREAU D'ÉTUDES ARTÉLIA.

## Évaluation des effets potentiels de l'exploitation de granulats marins sur l'évolution du trait de côte

### Guide méthodologique pour une modélisation numérique hydrosédimentaire

#### CONCEPTION, RÉDACTION

Luc HAMM (Artelia) avec la contribution de la DGALN, du BRGM, de l'Ifremer, du Shom, du Cerema, de la DREAL et de l'UNPG.

#### ÉDITION

Cet ouvrage est une co-édition de la DGALN et de l'UNPG, décembre 2024, 150 p.

#### DESIGN ET RÉALISATION GRAPHIQUE

Dominique Constantin

#### Comment citer ce guide.

Ministère de la Transition Écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche (MTEBFMP) et Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG).

Évaluation des effets potentiels de l'exploitation de granulats marins sur l'évolution du trait de côte - Guide méthodologique pour une modélisation numérique hydrosédimentaire.  
Décembre 2024, 150 pages.

#### COMITÉ DE PILOTAGE ET DE VALIDATION

##### BRGM

(Bureau de Recherches Géologiques et Minières) :  
Franck DESMAZES, Olivier BRIVOIS,  
Deborah IDIER

##### CEREMA

(Centre d'étude et d'expertise sur les risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) :  
Amélie ROCHE

##### CGDD

(Commissariat Général du Développement Durable) :  
Daniel MATON (CGDD/SEVS/SDPPD2),

##### DGALN

(Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature) :  
Jean-François GAILLAUD, Cécile CARON,  
Fanny HERAUDEAU (DGALN/DEB/EARM),  
Thibault LUCARI\*, Ella CAZAUX-DEBAT  
(DGALN/DEB/ELM2)

##### DREAL

(Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) :  
Jacques GERMAIN\* (DREAL Nouvelle-Aquitaine),  
Christophe GIRARD (DREAL Bretagne),  
Amel MELLOUK\* (DREAL Pays-de-Loire),  
Frédéric VENTE\* (DREAL Normandie)

##### IFREMER

(Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) :  
Laure SIMPLET

##### SHOM

(Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) :  
Thierry GARLAN\*

##### UNPG

(Union Nationale des Producteurs de Granulats) :  
Laëtitia PAPORE, Agnès GARCON,  
Mathilde RABIET, Frédéric SUIRE,  
Alice MOREAUX

\*en poste lors de la rédaction du guide.

# SOMMAIRE GÉNÉRAL

**PAGE 4**

SOMMAIRE DÉTAILLÉ 

**PAGE 9**

AVANT PROPOS 

**PAGE 22**



SYNTHÈSE  
DES CONNAISSANCES DE BASE 

**PAGE 55**



LES TYPES DE MODÉLISATION 

**PAGE 82**



MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION  
DES EFFETS POTENTIELS 

**PAGE 138**

CONCLUSIONS 

**PAGE 140**

ANNEXES 

## SOMMAIRE

<b>Objet du document</b>	<b>9</b>
<b>Les extractions de granulats en mer</b>	<b>11</b>
<b>Préambule</b>	<b>13</b>
<b>Généalogie du guide</b>	<b>13</b>
<b>Les définitions du trait de côte et de la zone littorale</b>	<b>13</b>
<b>L'évaluation environnementale et l'étude d'impact</b>	<b>14</b>
<b>Séquence Éviter-Réduire-Compenser (dite « ERC »)</b>	<b>15</b>
<b>Suivis sur la durée des projets</b>	<b>16</b>
<b>Les principes de la méthodologie</b>	<b>17</b>
<b>Abréviations, sigles et acronymes</b>	<b>20</b>
<b>Glossaire</b>	<b>20</b>

## A SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES DE BASE **22**

<b>1. LE LITTORAL MÉTROPOLITAIN</b>	<b>23</b>
<b>1.1. La diversité du littoral</b>	<b>23</b>
<b>1.1.1. Côtes basses meubles (plages et dunes)</b>	<b>23</b>
<b>1.1.2. Les embouchures : lagunes, estuaires et deltas</b>	<b>24</b>
<b>1.1.3. Les vasières et marais maritimes</b>	<b>25</b>
<b>1.1.4. Les côtes rocheuses</b>	<b>25</b>
<b>1.1.5. Côtes artificialisées</b>	<b>26</b>
<b>1.2. Facteurs d'évolution du trait de côte</b>	<b>27</b>
<b>1.2.1. Les phénomènes physiques</b>	<b>27</b>
<b>1.2.2. Délimitation de la zone littorale : la profondeur de fermeture morphodynamique</b>	<b>28</b>
<b>1.2.3. Délimitation de la zone côtière : limite d'action des vagues</b>	<b>30</b>
<b>1.2.4. Les actions anthropiques</b>	<b>31</b>
<b>1.3. Synthèse des connaissances sur le littoral mer du Nord – Manche – Atlantique</b>	<b>34</b>
<b>1.3.1. L'actualisation du catalogue sédimentologique des côtes françaises</b>	<b>34</b>
<b>1.3.2. Le découpage en cellules hydrosédimentaires</b>	<b>34</b>
<b>2. FACTEURS ET PROCESSUS PHYSIQUES EN JEU</b>	<b>37</b>
<b>2.1. Hydrodynamique</b>	<b>37</b>
<b>2.1.1. Niveaux marins</b>	<b>37</b>
<b>2.1.2. Courantologie côtière</b>	<b>38</b>
<b>2.1.3. Génération des vagues</b>	<b>40</b>
<b>2.1.4. Propagation des vagues vers la côte</b>	<b>42</b>
<b>2.2. Sédimentologie et dynamique hydrosédimentaire</b>	<b>43</b>
<b>2.2.1. Caractérisation des sédiments</b>	<b>43</b>
<b>2.2.2. Le transport des sédiments non-cohésifs</b>	<b>44</b>
<b>2.2.3. Le forçage hydrodynamique sur le fond</b>	<b>45</b>
<b>2.2.4. Les conditions de début de mouvement</b>	<b>46</b>
<b>2.2.5. Le transport solide</b>	<b>46</b>
<b>2.2.6. Dynamique hydrosédimentaire côtière</b>	<b>47</b>
<b>2.2.7. Dynamique d'une côte basse meuble</b>	<b>47</b>
<b>2.2.8. Dynamique des baies et estuaires</b>	<b>48</b>
<b>2.2.9. Dynamique d'évolution des falaises</b>	<b>48</b>
<b>2.3. Prise en compte du changement climatique</b>	<b>49</b>

<b>3.</b>	<b>EFFETS POTENTIELS SUR LE LITTORAL</b>	<b>50</b>
3.1.	Modification de l'agitation à l'approche de la côte	50
3.1.1.	Par réfraction avec une modulation des hauteurs et des directions	50
3.1.2.	Par réduction du déferlement (arasement des bancs et barres)	50
3.2.	Modification du régime des courants	52
3.2.1.	En mer ouverte	52
3.2.2.	La zone littorale	52
3.2.3.	Modification de la géomorphologie des bancs	52
3.2.4.	Cas des bassins, lagunes et estuaires	52
3.3.	Piégeage par une souille d'extraction du transport sédimentaire	52
3.3.1.	Par interception directe du transit littoral dans la zone de déferlement	53
3.3.2.	Par érosion régressive des petits fonds et de la plage (transport de la côte vers le large)	53
3.3.2.	Par piégeage du transport en dehors de la zone de déferlement dans le sens de la remontée des sédiments du large vers le littoral	54
3.4.	Règles de base à respecter et effets résiduels	54
<b>B</b>	<b>LES TYPES DE MODÉLISATION</b>	<b>55</b>
4.	GÉNÉRATION ET PROPAGATION DES ÉTATS DE MER DU LARGE VERS LA CÔTE	56
5.	MODÉLISATION COURANTOLOGIQUE : NIVEAUX ET COURANTS	58
5.1.	Modélisation 3D	58
5.2.	Modélisation 2DH (intégration sur la verticale)	60
5.3.	Modélisation 1D (profil de plage)	60
5.4.	Interactions houle-courant-bathymétrie	61
5.5.	Les rugosités de fond	62
6.	PRINCIPES DE LA MODÉLISATION HYDROSÉDIMENTAIRE : LE TRANSPORT SOLIDE	63
6.1.	Modélisation du transport solide en zone côtière	63
6.2.	Modélisation du transport solide en zone littorale	65
6.3.	Le transit littoral	66
6.3.1.	Méthode du flux d'énergie	66
6.3.2.	Répartition transversale du transit littoral	69
6.3.3.	Variabilité spatiale du transit littoral	69
6.3.4.	Variabilité temporelle du transit littoral	69
7	LES ÉVOLUTIONS MORPHODYNAMIQUES	71
7.1.	Modèles d'évolution du trait de côte pour les côtes basses meubles sujettes au transit littoral	71
7.1.1.	La conservation du volume de sédiments	71
7.1.2.	L'équation de Pelnard-Considère	75
7.1.3.	Cas particulier des plages de baie	75
7.1.4.	Généralisation : modèles numériques d'évolution du trait de côte	76
7.1.5.	Limites et incertitudes associées	77
7.2.	Modèles d'équilibre dynamique du trait de côte	77
7.3.	Modèles d'érosion d'un profil de plage	79
7.4.	Modèle morphodynamique 3D	80
7.4.1.	Morphodynamique côtière et estuarienne	80
7.4.1.	Morphodynamique littorale	81

<b>C. MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES EFFETS POTENTIELS</b>	<b>82</b>
<b>8 ÉTAT DE RÉFÉRENCE : COLLECTE ET ANALYSE DES DONNÉES DE BASE</b>	<b>83</b>
8.1. Données bathymétriques et sédimentologiques	83
8.1.1. Données régionales	83
8.1.2. Morpho-bathymétrie locale	84
8.1.4. Traitement des données bathymétriques pour la modélisation	89
8.2. Données de niveau et courant	90
8.2.1. Données sur les niveaux marins	90
8.2.2. Données de terrain sur les courants marins	92
8.2.3. Données de niveaux et courants reconstituées par modélisation numérique	92
8.3. Données sur l'agitation (les vagues)	93
8.3.1. Mesure de l'agitation	93
8.3.2. Reconstitution des états de mer par simulation numérique	95
8.3.3. Les tempêtes historiques	97
8.4. Données sur le littoral	97
8.4.1. Étendue des données à collecter	97
8.4.2. Géomorphologie	97
8.4.3. Historique du trait de côte	97
8.4.4. Tendances d'évolution du trait de côte	99
8.4.5. Évolutions du profil de plage (optionnel)	99
8.4.6. Aménagements existants et actions anthropiques	100
8.4.7. Le transit littoral	100
8.4.8. Secteurs sensibles ou à enjeux	100
<b>9. STRATÉGIE D'ÉTUDE POUR LA MISE EN PLACE DE LA MODÉLISATION HYDROSÉDIMENTAIRE</b>	<b>101</b>
9.1. Dynamique hydrosédimentaire et stratégie d'étude	101
9.1.1. Géographie régionale	101
9.1.2. Données physiographiques régionales	102
9.1.3. Identification de l'enveloppe des cellules sédimentaires à inclure dans la modélisation	103
9.1.4. Schéma régional de la dynamique hydrosédimentaire	103
9.1.5. Stratégie d'étude	105
9.2. Organisation des modélisations à mettre en place	105
9.2.1. Organisation générale	105
9.2.2. Mise en place de la modélisation côtière	108
9.3. Calage et validation de la modélisation côtière par rejeux	109
9.3.1. Les principes	109
9.3.2. Mode de validation	110
9.3.3. Calage et validation du modèle de propagation des états de mer	110
9.3.4. Calage et validation du modèle courantologique	112
9.3.5. Calage et validation du transport sédimentaire côtier	115
9.3.6. Calage et validation de la morphodynamique des bancs et embouchures (optionnel)	117
9.4. Calage et validation des modèles d'évolution du trait de côte	120
9.4.1. Calage et validation du transit littoral	120
9.4.2. Calage et validation d'un modèle d'évolution du trait de côte (optionnel)	122
9.4.3. Calage et validation d'un modèle d'érosion d'un profil de plage (optionnel)	122

<b>10. MODÉLISATION DES EFFETS DU PROJET</b>	<b>123</b>
<b>10.1 Méthodologie de base</b>	<b>123</b>
10.1.1. Les grandes étapes	123
10.1.2. État bathymétrique de référence	123
10.1.3. Hypothèses de base du projet	123
10.1.4. Autres projets susceptibles d'être pris en compte au titre des effets cumulés	124
10.1.5. Choix des conditions océano-météo représentatives	125
<b>10.2. Détermination des effets et évaluation</b>	<b>127</b>
10.2.1. Effet sur l'agitation à la côte	127
10.2.2. Effet sur l'érosion du profil de plage	130
10.2.3. Effet sur le transit littoral	131
10.2.4. Effet sur l'évolution du trait de côte	131
10.2.5. Effet sur le transport solide du large vers la côte	133
<b>10.3. Étude des réductions possibles des effets</b>	<b>134</b>
<b>10.4. Incertitudes et limites de validité des résultats</b>	<b>135</b>
<b>11. CRITÈRES D'ABSENCE D'EFFET SIGNIFICATIF</b>	<b>135</b>
11.1. Cas des côtes basses meubles	135
11.2. Cas des côtes rocheuses	136
11.3. Cas des embouchures	136
<b>12. PRESCRIPTIONS RÉGLEMENTAIRES ET SUIVIS ENVIRONNEMENTAUX SUR LA DURÉE DES TRAVAUX</b>	<b>136</b>
12.1. Prescriptions réglementaires	136
12.2. Complément et révision des prescriptions	137
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>138</b>
<b>Références</b>	<b>140</b>
<b>Liste des études citées dans le guide par concession</b>	<b>145</b>
<b>Liste des Tableaux</b>	<b>146</b>
<b>Liste des figures</b>	



## OBJET DU DOCUMENT

Le phénomène d'érosion ou de « recul » du trait de côte apparaît comme l'un des sujets de préoccupation majeure des pouvoirs publics, des populations locales et des élus du littoral.

Le « trait de côte » correspond 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...) 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) (Artelia *et al.*, 2021).

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 (Artelia *et al.*, 2021).

Le code de l'environnement prévoit en son article R. 122-5-II que les études d'impact des projets prennent en compte leurs caractères spécifiques et le type d'incidence sur l'environnement qu'ils sont susceptibles de produire. Le trait de côte fait partie des composantes du milieu naturel à prendre en compte lors de l'analyse des incidences de l'activité d'exploitation des granulats marins sur l'environnement. En raison de l'éloignement des projets au large des côtes, les effets de l'exploitation des concessions marines sont qualifiés d'indirects sur le trait de côte, par opposition aux effets des extractions réalisées directement sur les plages et la zone littorale. Ces pratiques n'ont plus cours en France pour les exploitations relevant du code minier (concessions de granulats marins), mais elles sont encore aujourd'hui en vigueur dans de nombreux pays.

Dans le cadre des études d'impact préalables aux autorisations d'exploitation en France, les porteurs de projet réalisent de manière systématique des modélisations numériques de propagation des états de mers et de courantologie. De manière optionnelle et lorsque la sensibilité le justifie (proximité du site à la côte), ces études sont couplées à des modélisations de transport sédimentaire.

Le guide d'élaboration des Documents d'Orientations pour une Gestion durable des Granulats Marins (DOGGM) paru en 2016 propose de comparer par la modélisation l'intensité du transit littoral entre l'état initial et l'état en fin d'exploitation, de manière à estimer les effets potentiels des projets d'extractions sur le trait de côte. Il indique que l'existence ou non d'impact des extractions peut être contrôlée au moyen de levés bathymétriques réguliers de la concession pour surveiller l'évolution des fonds et du transit sédimentaire et/ou d'un suivi du trait de côte via les observatoires dédiés quand ils existent.

Dans la pratique, la mesure de l'impact indirect<sup>1</sup> des activités anthropiques sur le trait de côte est complexe à appréhender sans le développement de méthodes d'observations spécifiques. Les seules données de terrain en la matière dérivent d'études liées à des projets d'aménagement très ponctuels. Toutefois, l'amélioration des méthodes de modélisation numérique permet dorénavant de proposer des estimations de l'effet de l'activité d'extraction sur le transport sédimentaire littoral.

Les industriels se sont saisis de cette thématique il y a une quinzaine d'années et les dossiers de demande de cette époque jusqu'à aujourd'hui traitent le sujet avec leur méthode propre reposant sur les recommandations existantes (Latteux, 2008).

<sup>1</sup> Voir définition dans le glossaire.

Afin de permettre aux porteurs de projet de mieux cibler leurs études, aux services instructeurs de vérifier la conformité des études d'impact et aux parties prenantes de disposer en toute transparence d'un outil d'évaluation reconnu collégialement par des experts du sujet, il convenait de mettre à disposition une méthodologie unifiée d'évaluation des effets potentiels sur l'évolution du trait de côte, transposable à tous types de projets, en fonction de leur contexte (côtes basses meubles, estuaires, côtes rocheuses...).

Pour ce faire, le bureau de la politique des ressources minérales (DGALN/ DEB/ EARM) et l'UNPG, se sont entourés d'experts du sujet (ARTELIA, BRGM, Cerema, Ifremer, Shom). Les DREALs Normandie, Bretagne, Pays de Loire et Nouvelle Aquitaine ont également participé à son élaboration. Le présent guide méthodologique est mis à disposition des porteurs de projet et des services instructeurs pour l'élaboration et l'analyse des études d'impact consacrées à cette thématique

## À NOTER

Le présent guide n'est pas autoportant. Il ne permet pas de mettre pratiquement en œuvre les modélisations proposées. Il n'existe pas non plus de manuel en langue française permettant cela car les formulations mathématiques et les logiciels scientifiques utilisés sont pour beaucoup développés en langue anglaise. Il conviendra donc de se référer aux manuels utilisateurs de ces logiciels ainsi qu'aux manuels généraux et aux articles scientifiques cités dans la bibliographie. La bonne connaissance du Coastal Engineering Manual publié par l'US Army Corps of Engineers (2002) est plus particulièrement recommandée ici.

## LES EXTRACTIONS DE GRANULATS EN MER

L'exploitation des granulats marins en France est modeste : 8,7 millions de tonnes en 2022 (donnée UNICEM), ce qui représente à peine 2 % de la production nationale de l'ordre de 443 millions de tonnes (310,7 millions de tonnes de granulats naturels et 132,3 millions de tonnes de granulats de recyclage) et 2,8 % de la production de granulats naturels. A titre comparatif, les Pays-Bas extrayaient environ 30 millions de tonnes de matériaux dont 13,5 millions de tonnes de granulats marins pour la construction et la Grande-Bretagne 14,1 millions de tonnes dont 12 millions de tonnes pour la construction en 2022 (CIEM, 2023).

En 2022, les 17 concessions actives totalisent une superficie de 160 km<sup>2</sup> soit 0,04% de la Zone Economique Exclusive de la France métropolitaine. Elles sont exploitées au moyen de 18 navires et correspondent à 900 emplois directs et induits, à terre comme en mer.

La production annuelle française est très majoritairement destinée au marché du béton auquel le granulats recyclé ne peut pas systématiquement prétendre en raison de ses caractéristiques et des normes applicables. Les granulats marins sont des ressources de qualité, plus coûteuses à extraire que les substances de carrières terrestres, mais qui constituent une ressource de proximité pour les territoires littoraux et pour les grandes agglomérations reliées à des ports fluviaux (Paris, Rouen, Nantes, Bordeaux). En effet, les granulats sont des matières pondéreuses dont le rayon de chalandise est d'environ 30 à 50 kilomètres. Ils répondent aux besoins à hauteur de 20 à 60 % en fonction des départements côtiers et sur certaines zones représentent 80% du besoin (Le Havre-Fécamp). Ils sont utilisés suivant la ligne de conduite de la profession du « bon matériau au bon endroit, pour le bon usage ». Ils sont complémentaires aux matériaux terrestres et sont parfois utilisés en mélange.

Sur le littoral métropolitain, les granulats marins constituent une ressource de proximité et de complément aux productions de granulats issues des carrières terrestres de plus en plus contraintes par les protections environnementales et l'épuisement des réserves accessibles.

Sur la façade Sud Atlantique, la consommation par habitant en granulats de toutes origines, quelquefois lointaines, est supérieure à la moyenne nationale. Cette consommation s'explique par la forte attractivité de ces territoires (population en augmentation, développement touristique, etc.) qui génère des besoins de constructions, d'habitations et d'infrastructures.

Sur la façade Nord Atlantique-Manche Ouest dont les territoires côtiers sont également attractifs, les ressources marines principalement exploitées sont, outre les granulats pour la construction, les sables coquilliers qui sont utilisés en amendements agricoles et se substituent à l'extraction du maërl dont l'exploitation industrielle a totalement cessé en France depuis 2013.

Sur la façade Manche Est-Mer du Nord, les ressources marines répondent aux besoins des territoires littoraux, des métropoles du Havre et de Rouen ainsi que de la région parisienne, en déficit structurel en granulats pour bétons et qui devrait voir ses besoins augmenter avec le développement du Grand Paris.

L'extraction des granulats marins est une activité amenant à une occupation de l'espace temporaire, permettant la co-activité et modeste en volume. La multiplicité des usages socio-économiques dans les espaces maritimes et littoraux peut rendre difficile l'estimation de leurs impacts sur les différents milieux. Par ailleurs, certains usages, comme la pêche, l'aquaculture et la production d'énergie marine renouvelable, peuvent compliquer l'accès à la ressource d'où la nécessité d'une réflexion sur la conciliation des usages dans ces espaces.

La « Stratégie nationale de gestion durable des granulats marins et terrestres et des matériaux et substances de carrières » de 2012 inclut un axe stratégique portant sur l'encadrement du développement, de l'utilisation et de l'exploitation des granulats marins dans la définition

et la mise en œuvre d'une politique maritime intégrée. Il est destiné à concilier l'activité d'extraction des granulats marins et les objectifs environnementaux issus de la Directive Cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM) et à répondre à la Directive de planification de l'espace maritime (DPEM). Il a vocation à s'insérer dans la politique maritime intégrée déclinée via les documents stratégiques de façade (DSF).

Dans ce cadre, un « Guide méthodologique pour l'élaboration des documents d'orientation pour une gestion durable des granulats marins (DOGGM) » a été publié en 2016 (MEEM, 2016). Ce guide a, en particulier, identifié les pressions et impacts de l'extraction de granulats marins sur l'état physique du milieu marin et notamment sur les fonds côtiers avec une analyse de la dynamique du trait de côte sur laquelle nous reviendrons au chapitre 2. Il a servi à l'élaboration des annexes spécifiques des DSF dédiées aux granulats marins, les DOGGM, qui fixent les objectifs et les modalités d'une gestion durable et équilibrée de l'exploration et de l'exploitation des granulats marins.

## PRÉAMBULE

### GÉNÉALOGIE DU GUIDE

Les premières recommandations françaises résultant d'études de terrain et sur modèle réduit physique ont été publiées dans les années 80 (Migniot et Viguier, 1980<sup>2</sup> ; Viguier *et al.*, 1984<sup>3</sup>). Un guide plus complet prenant en compte les avancées scientifiques et l'essor de la modélisation numérique sur le sujet a été publié en France à l'initiative de l'Ifremer à la fin des années 2000 (Latteux, 2008<sup>4</sup>).

La stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte a été mise en place en 2012 pour mieux anticiper les évolutions du littoral et faciliter l'adaptation des territoires à ces changements. Sa mise en place a été précédée de la publication du guide sur la gestion du trait de côte (MEEDDM, 2010<sup>5</sup>) qui présente l'état de l'art le plus récent sur le sujet.

Plus spécifiquement, l'état des connaissances sur les pressions et impacts de l'extraction de granulats marins, incluant les possibles modifications de la dynamique hydrosédimentaire du trait de côte, a été publié dans le guide méthodologique pour l'élaboration des documents d'orientation pour une gestion durable des granulats marins (MEEM, 2016<sup>6</sup>).

Ces deux derniers documents publiés à l'initiative du ministère constituent deux guides de référence pour le présent document auxquels s'ajoutent trois autres ouvrages plus pratiques pour la conduite des études à savoir : Études hydrauliques maritimes – Guide à destination des maîtres d'ouvrage (Cerema, 2018<sup>7</sup>), les 17 fascicules Dynamiques et évolution du littoral : Synthèse des connaissances (Cerema, 2021<sup>8</sup>) et les Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte (BRGM et Cerema, 2022).

Enfin, le rapport rédigé par Artelia, le Cerema et l'UNPG en 2021 (Artelia *et al.*, 2021) intitulé « Évolution du trait de côte et extraction de granulats marins ; point sur les connaissances et pratiques actuelles »<sup>9</sup> reprend de manière exhaustive l'ensemble de ces connaissances scientifiques et de leurs évolutions. Il sert de document support et d'introduction au présent guide.

### LES DÉFINITIONS DU TRAIT DE CÔTE ET DE LA ZONE LITTORALE

Les différentes définitions du trait de côte utilisées par les administrations françaises ont récemment fait l'objet d'un inventaire et d'une clarification par le groupe de travail GIMeL de la commission « données » du Conseil National de l'Information Géographique en octobre 2021 (CIMeL, 2021). Dans ses conclusions, seules deux définitions sont à ce jour recommandées, à savoir :

- Les « traits de côtes naturels récents », définis selon le type de côte (Cerema, 2017) dans le cadre de l'indicateur national de l'érosion côtière selon une méthodologie discutée au sein du réseau national des observatoires du trait de côte (<http://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/>),

2 <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1051/lhb/1980018>

3 [https://www.persee.fr/doc/jhydr\\_0000-0001\\_1984\\_act\\_18\\_3\\_4903](https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1984_act_18_3_4903)

4 <https://www.quae.com/produit/66/9782759212422/exploitation-de-materiaux-marins-et-stabilite-du-littoral>

5 <https://www.quae.com/produit/885/9782759209880/la-gestion-du-trait-de-cote>

6 <https://archimer.ifremer.fr/doc/00456/56745/>

7 <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/etudes-hydrauliques-maritimes>

8 <https://www.cerema.fr/fr/actualites/dynamiques-evolutions-du-littoral-synthese-connaissances-0>

9 <https://sablessetgravieresenmer.fr/pages/etude-sur-le-trait-de-cote-or-2021>

- La limite terre-mer (LimTM)<sup>10</sup> qui est un nouveau référentiel à haute résolution mis en place par l'IGN et le Shom en 2021, correspondant à la ligne d'intersection de la surface topographique avec le niveau des plus hautes mers astronomiques (PHMA) dans des conditions atmosphériques normales (1015 hPa, sans vague, sans vent). Il a été édité et mis en ligne en novembre 2021 (<https://geoservices.ign.fr/limite-terre-mer>).

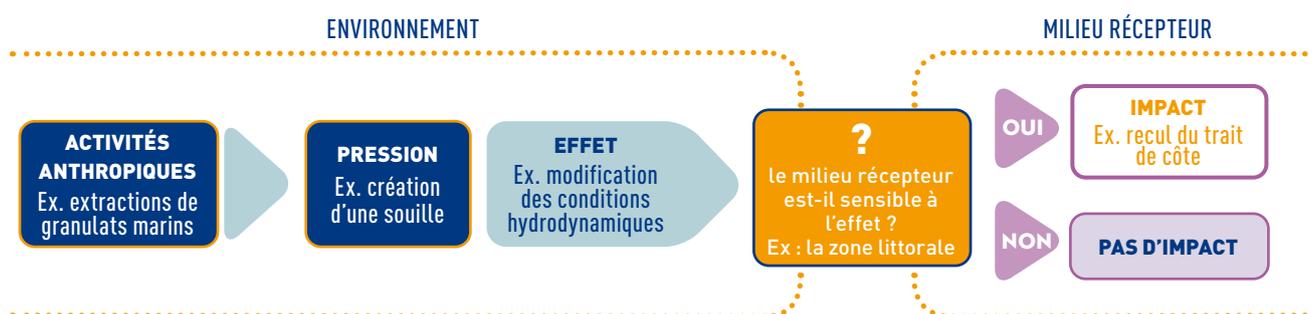
Selon l'IGN, cette limite terre-mer, se connectant géomatiquement avec les trois limites maritimes administratives (limite transversale de la mer, limite de salure des eaux et limite des affaires maritimes), peut être considérée comme un trait de côte administratif (<https://geoservices.ign.fr/limite-terre-mer>).

**C'est la première définition concernant plus directement l'érosion côtière qui sera utilisée dans le présent guide.**

D'autre part, le trait de côte est un indicateur représentatif du littoral qui est une bande à l'intérieur de laquelle les contacts terre-mer se déplacent sous l'action des influences continentales (structure géologique du secteur considéré), marines (niveaux de la mer, vagues et courants) et atmosphériques (vent, température, précipitations). Ces déplacements vont engendrer une mobilité du trait de côte qui peuvent conduire à un recul à l'intérieur des terres (érosion) ou dans certains cas à son avancée vers la mer (accrétion). Nous distinguerons pour les besoins du présent guide :

- La zone littorale qui englobe les parties terrestres et sous-marines en interaction forte à l'échelle journalière, saisonnière et annuelle. C'est la zone la plus active à l'intérieur de laquelle les processus physiques hydrosédimentaires sont dominés par le déferlement des vagues ce qui nécessite une modélisation numérique spécifique,
- Et la zone côtière plus au large, située sur le plateau continental, dans laquelle les interactions entre les vagues, les courants et les fonds marins sont toujours présentes mais moins intenses.

## L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET L'ÉTUDE D'IMPACT



**Figure 1** – Schéma conceptuel de la chaîne d'impact, reliant l'ensemble des notions clés indispensables à l'étude des interactions

L'évaluation environnementale est un processus décrit dans le code de l'environnement visant à intégrer l'environnement dans l'élaboration d'un projet, ou d'un document de planification, et ce dès les phases amont de réflexions. Elle sert à éclairer tout à la fois le porteur de projet, l'administration et le public, notamment sur les enjeux environnementaux du territoire concerné. Elle doit rendre compte des effets et des impacts potentiels ou avérés

<sup>10</sup> La Limite terre-mer a été produite dans le cadre d'un partenariat Shom – IGN – OFB et DGALN/DEB.

sur l'environnement du projet, du plan ou du programme et permet d'analyser et de justifier les choix retenus au regard des enjeux identifiés sur le territoire concerné.

L'évaluation environnementale est un processus comprenant notamment l'élaboration d'un rapport d'évaluation des incidences sur l'environnement : étude d'impact pour les projets et rapport sur les incidences environnementales pour les plans et programmes <sup>11</sup>.

L'enjeu est une valeur prise par une fonction ou un usage, un territoire ou un milieu au regard de préoccupations écologiques, patrimoniales, paysagères, sociologiques, de la qualité de vie et de santé<sup>12</sup>. Définir un enjeu, c'est déterminer les biens, les valeurs environnementales, les fonctions et aménités dont il faut prévenir la dégradation<sup>13</sup>.

L'interaction d'un projet avec son environnement modifie de fait certains paramètres environnementaux. L'effet décrit la conséquence objective de cette interaction sur l'environnement, indépendamment de sa sensibilité. L'impact est la transposition de cette conséquence sur les différents compartiments de l'environnement (écosystème, paysage et patrimoine, usages) selon une échelle de sensibilité (Figure 1).

Ainsi, le croisement des effets attendus du projet avec les sensibilités des composantes environnementales dont les niveaux d'enjeu ont été identifiés lors de l'analyse de l'état initial permet de caractériser les impacts potentiels sur cet environnement (d'après MEEM 2017).

Le guide d'élaboration des études d'impact publié par le MTE en février 2023<sup>14</sup> présente un tableau de synthèse pouvant servir pour la description qualitative des impacts attendus du projet : impact nul ou positif et si négatif selon l'échelle suivante : risque négligeable, très faible, faible, modéré, fort, très fort.

## SÉQUENCE ÉVITER-RÉDUIRE-COMPENSER (DITE « ERC »)

La séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur l'environnement ne se limite pas uniquement à la prise en compte de la biodiversité, mais s'étend à l'ensemble des thématiques de l'environnement (air, bruit, eau, sol, santé des populations...). Elle s'applique, de manière proportionnée aux enjeux, à tous types de plans, programmes et projets dans le cadre des procédures administratives d'autorisation (étude d'impacts ou étude d'incidences thématiques, Natura 2000, espèces protégées...). Sa mise en œuvre contribue également à répondre aux engagements communautaires et internationaux de la France en matière de préservation des milieux naturels.

Dans la conception et la mise en œuvre de leurs plans, programmes ou projets, il est de la responsabilité des maîtres d'ouvrage de définir les mesures adaptées pour éviter, réduire et, lorsque c'est nécessaire et possible, compenser leurs impacts négatifs significatifs sur l'environnement <sup>15</sup>.

La démarche de réduction des impacts à mener par le porteur de projet consiste à analyser les impacts résiduels résultant de l'application de la réglementation, à évaluer leur acceptabilité et au besoin à définir les mesures de réduction supplémentaires ou le cas échéant de compensation, qui seraient nécessaires pour rendre cet impact résiduel acceptable.

La loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages du 08 août 2016 impose aux maîtres d'ouvrage une obligation de résultat, quant à l'efficacité des mesures

<sup>11</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/evaluation-environnementale> (accédé le 17 janvier 2024).

<sup>12</sup> L'étude d'impact sur l'environnement, MEDD, 2001  
<https://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/guide-de-l-etude-d-impact-sur-l-environnement-a617.html>

<sup>13</sup> Guide d'évaluation des impacts sur l'environnement des parcs éoliens en mer, MEEM, 2017.

<sup>14</sup> [https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2023-07/Guide%20Etudes%20d%27impact%20Granulats%20Marins\\_2023.pdf](https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2023-07/Guide%20Etudes%20d%27impact%20Granulats%20Marins_2023.pdf).

<sup>15</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/eviter-reduire-et-compenser-impacts-sur-lenvironnement> (accédé le 17 janvier 2024).

compensatoires qu'ils proposent. Néanmoins, la transposition des mesures de compensation en milieu marin peut s'avérer difficile ; pour autant, elle doit être recherchée par le porteur de projet.

Face à cette difficulté, les porteurs de projet sont alors encouragés à se concentrer davantage sur les mesures d'évitement et de réduction des impacts, comme indiqué dans le guide du ministère de février 2023 (guide ERC <sup>16</sup>).

Dans le cas des projets de concession d'extraction de granulats marins, différents leviers sont disponibles pour mettre en œuvre cette séquence pour le thème de l'évolution du trait de côte, incluant :

- Le choix d'implantation du projet,
- La délimitation précise de la concession en plan et en profondeur en fonction de ses effets sur les conditions hydrodynamiques (réfraction des vagues),
- Le mode d'exploitation de la concession.

Des études de sensibilité par simulation numérique peuvent notamment être réalisées en adaptant les différents leviers pour réduire l'effet sur le trait de côte pour privilégier le projet le moins impactant et optimiser la séquence d'évitement et de réduction.

## SUIVIS SUR LA DURÉE DES PROJETS

### Prescriptions des arrêtés préfectoraux

Les suivis des concessions en exploitation sont régis par les arrêtés préfectoraux d'autorisation d'ouverture des travaux. Ces arrêtés rappellent d'abord les limites d'exploitation à respecter : emprise, volume annuel, profondeur, pente des talus. Concernant l'hydrosédimentaire, ils prescrivent en général un suivi informatisé de l'activité des navires avec un rapport annuel d'exploitation, un levé bathymétrique initial et un suivi bathymétrique régulier, notamment tous les 5 ans (bilan quinquennal) accompagné d'un suivi sédimentologique (levé au sonar latéral, prélèvements granulométriques).

### Les commissions locales d'information et de surveillance

Conformément à l'article L.114-4-1 du code minier, des commissions de suivi, réunissant l'ensemble des parties prenantes (administrations, pêcheurs, autres usagers de la mer, associations environnementales, ... sans que cette liste ne soit exhaustive), peuvent être instaurées par le préfet pendant toute la durée de l'exploitation et dès le dépôt de la demande de titre minier afin de :

- Créer un cadre d'échange et d'information sur les actions et le programme de travaux menés par les explorateurs et exploitants miniers,
- Suivre l'exécution du programme des travaux attachés au titre, de l'institution de la commission de suivi jusqu'à l'échéance du titre minier,
- Assurer la présentation et le suivi des mesures de prévention des risques,
- Créer un cadre d'échange et d'information sur les déclarations d'arrêt de travaux.

Par ailleurs, les travaux d'exploitation au sein des concessions font l'objet d'inspections périodiques par les services de l'Etat au titre de la police des mines.

<sup>16</sup> [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/2guide\\_erc\\_milieu%20marin\\_fevrier\\_2023.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/2guide_erc_milieu%20marin_fevrier_2023.pdf).

## LES PRINCIPES DE LA MÉTHODOLOGIE

Le choix de l'implantation d'une concession dépend des ressources disponibles, de l'existence d'un marché et de la sensibilité du milieu. Une fois défini le périmètre du projet, la demande d'autorisation d'exploitation contient les mesures propres à éviter et réduire de possibles impacts sur l'environnement, dont le trait de côte fait partie.

Les recherches menées depuis la fin des années 1970 (Migniot et Viguier, 1980 ; Viguier *et al.*, 1984) ont conduit à préconiser plusieurs règles d'implantation des concessions. La première et la plus importante est de ne pas extraire dans la zone littorale mais d'implanter la concession plus au large dans la zone côtière. Cette règle a pour objet d'éviter tout effet direct d'une concession dans la zone littorale. Les autres règles (voir chapitre 3) visent à réduire les effets indirects possibles du fait du creusement de la souille d'extraction qui, en modifiant localement la bathymétrie existante, conduit à des modifications hydrodynamiques et de transport de sédiments susceptibles d'influer sur la mobilité du trait de côte.

Ainsi, l'étude de ces effets indirects passe aujourd'hui par la modélisation numérique hydrosédimentaire utilisant des logiciels de calcul scientifiques dûment validés et d'utilisation courante dans l'ingénierie côtière. Cette modélisation a pour objet d'évaluer les effets induits par un projet de concession en comparant une situation de référence (état actuel) avec une situation future incluant le projet de concession (situation en fin d'exploitation) et éventuellement d'autres projets en cours ou prévus sur la même zone (notion d'effets cumulés).

À ce jour, il n'existe pas de logiciel unique capable de simuler tous les processus physiques hydrosédimentaires depuis le large jusqu'à la côte. Le présent guide propose de faire appel à quatre modélisations principales (états de mer, courantologie, transport des sédiments côtiers, transit littoral), complétées par trois modélisations optionnelles comme cela est résumé sur la Figure 2. Ces modélisations peuvent être mobilisées par étapes :

- **La première étape** concerne la modélisation hydrodynamique (modélisations 1 et 2) incluant d'une part la simulation de la propagation des états de mer susceptibles d'être modifiés en hauteur et direction des vagues au passage sur la souille d'extraction et d'autre part la simulation des courants marins (et des niveaux d'eau associés) qui peuvent être localement perturbés par la présence de la souille. Ces deux modélisations sont liées entre elles puisque les courants marins sont susceptibles de modifier la propagation de l'agitation.
- **La deuxième étape** concerne la modélisation du transport solide résiduel côtier (modélisation 3) et sa perturbation par le projet de concession pouvant conduire à réduire les apports de sédiments du large vers la côte.
- **La troisième étape** consiste à simuler le transit littoral (modélisation 5) dont la répartition spatiale, directement en jeu dans l'évolution du trait de côte, peut être influencée par une modification des vagues au passage sur la souille d'extraction. Cette étape peut être menée en parallèle de l'étape 2.
- **La quatrième étape** (optionnelle) concerne la modélisation de l'évolution du trait de côte (modélisation 6) et/ou la modélisation de l'érosion du profil de plage (modélisation 7). Sa mise en œuvre éventuelle sera fonction des résultats obtenus dans les étapes 1 et 3.
- Enfin, **une cinquième étape** (optionnelle) concerne la modélisation morphodynamique (modélisation 4) qui peut être mise en œuvre dans les cas où le projet de concession se situe sur une zone bathymétrique déjà en évolution significative (embouchure ou banc de sable par exemple) et serait susceptible de modifier cette dynamique au-delà du simple creusement induit directement par les opérations d'extraction.

1.  
Modèle de propagation  
des états de mer

2.  
Modèle courantologique  
(niveaux, courants)

3.  
Modèle de transport  
solide côtier

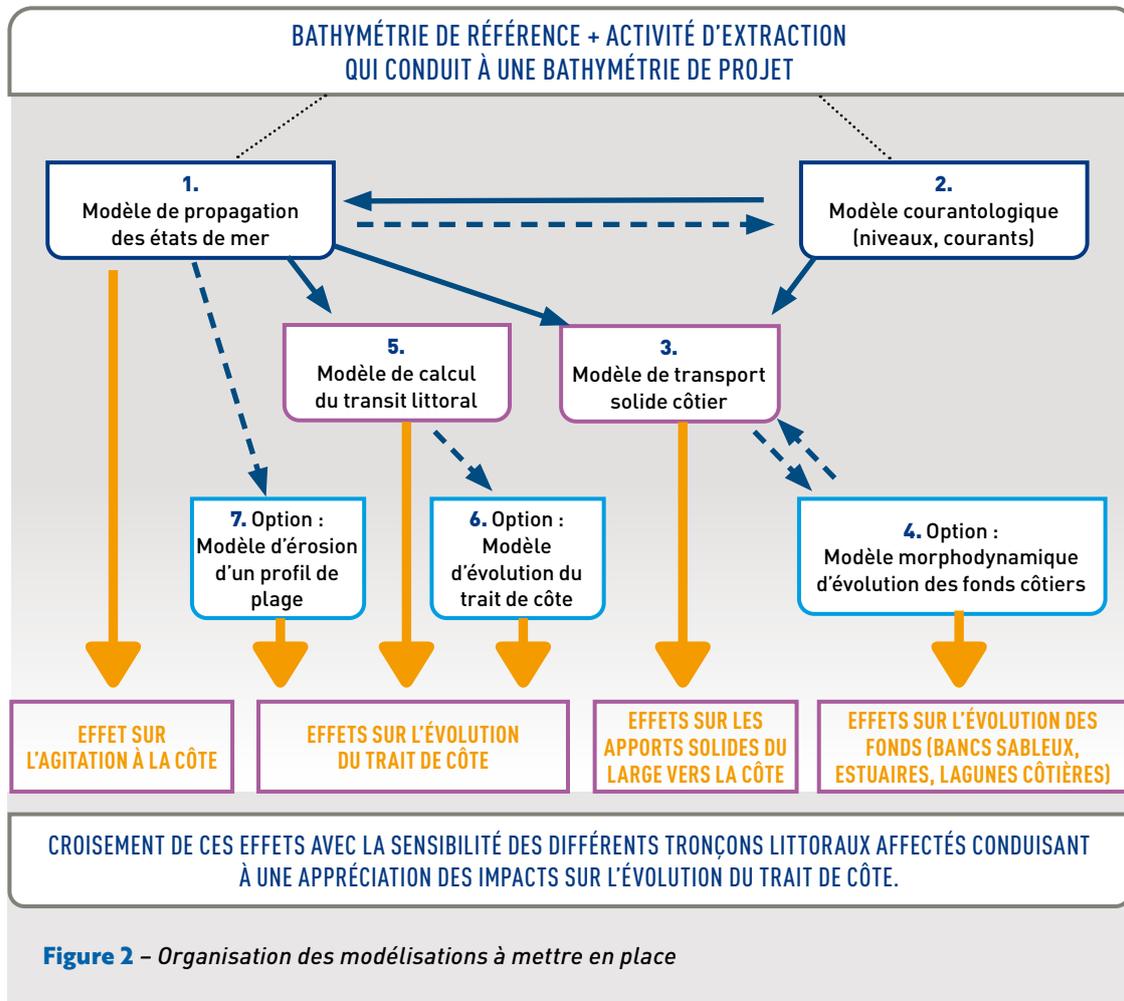
5.  
Modèle de calcul  
du transit littoral

6. Option :  
Modèle  
d'évolution du  
trait de côte

7. Option :  
Modèle d'érosion  
d'un profil de  
plage

4. Option :  
Modèle morphodynamique  
d'évolution des fonds côtiers

Ces différents types de modélisation sont déjà utilisés en ingénierie côtière et leur application dans le présent contexte en constitue donc un cas particulier. La mise en œuvre de cette méthodologie bénéficie donc de tous les acquis développés dans le domaine depuis 50 ans et notamment de la validation de ces modèles dans d'autres études hydrosédimentaire qui restent applicables pour l'étude des projets de concession.



Le chapitre 9 présente en détail la stratégie d'étude et l'organisation des différentes modélisations à mettre en œuvre.

En pratique, la mise en œuvre de cette méthodologie va être fonction des caractéristiques physiques du site d'implantation du projet ainsi que des types de côte susceptibles d'être impactés. C'est pourquoi ce guide est divisé en trois parties. La première partie rend compte de la diversité géographique des littoraux de la Mer du Nord, de la Manche et de la façade atlantique ainsi que des actions météo-océaniques et des processus physiques en jeu dont ils sont le siège. Il résume ainsi les notions essentielles à appréhender pour faire ensuite le choix des logiciels de calcul à utiliser. Ceux-ci sont décrits dans la deuxième partie et incluent non seulement les codes de calcul d'ingénierie déjà bien matures mais également les codes en développement dans plusieurs équipes de recherche en France. Enfin la troisième partie décrit les points-clés pour la mise en œuvre de la méthodologie en insistant plus particulièrement sur les étapes de construction et de validation des différents modèles à mettre en œuvre ainsi que sur l'exploitation et l'interprétation des résultats obtenus.

**ATTENTION**

Ce guide n'est pas applicable pour des études prospectives d'évolution d'un littoral ou des études d'impacts concernant des aménagements littoraux ou des projets de lutte contre l'érosion côtière, notamment parce que toute concession doit être implantée en dehors de la zone littorale. Il n'y a donc aucun effet direct des concessions sur le trait de côte contrairement à tous les aménagements de lutte contre l'érosion côtière. D'autre part, les méthodes décrites dans ce guide visent à comparer les effets induits par deux situations bathymétriques (approche différentielle) sur l'hydrosédimentaire. Elles ne visent pas à faire des projections d'évolution d'un littoral dans le futur.

## ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

**ADCP** : Acoustic Doppler Current Profiler (profileur de courant en français)

**CM** : zéro d'une Carte Marine

**ZH** : zéro hydrographique

**BRGM** : Bureau de recherches géologiques et minières

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

**IGN** : Institut géographique national

**Shom** : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

**CANDHIS** : Centre d'Archivage National de données de Houle In-situ

**REFMAR** : Réseaux Marégraphiques Français

**GIMeL** : groupe de travail Géo-Informations pour la Mer et le Littoral qui dépend de la commission donnée du CNIG

**CNIG** : Conseil National de l'Information Géographique

**Pk** : point kilométrique

**RNOTC** : Réseau national des observatoires du trait de côte

**SMF** : sondeur multi-faisceaux

**SNGITC** : Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte

**DOGGM** : Document d'Orientations et de Gestion des Granulats Marins

## GLOSSAIRE

**Courant sagittal** : courant s'écoulant en direction du large après déferlement à la côte (anglais : rip-current).

**Seiche côtière** : modulation du niveau de l'eau de période comprise entre 5 et 60 minutes environ créée par les variations brusques de pression atmosphérique ou de vent.

**Banc** : accumulation sédimentaire sous-marine observable dans la zone côtière, formant un haut-fond, dont les dimensions peuvent être très importantes.

**Barre** : accumulation sédimentaire sous-marine, longeant les littoraux, observable dans la zone de déferlement au droit d'une côte basse meuble ou d'un débouché en mer.

**Courant littoral** : courant côtier généré dans la zone littorale principalement par déferlement des vagues en faible profondeur. Le vent peut également contribuer à ce courant littoral.

**Dérive littorale** : composante du courant littoral parallèle à la côte. Attention certains auteurs utilisent ce mot pour désigner le transit littoral.

**Effets** : les effets sont les conséquences d'une pression qui entraîne une modification des caractéristiques biotiques ou abiotiques qui peut entraîner un impact en fonction de la sensibilité du milieu récepteur. Les effets sont la conséquence objective de l'interaction d'une activité avec son environnement.

**Effets directs** : un effet direct traduit les conséquences immédiates du projet, dans l'espace et le temps (définition issue du glossaire guide l'étude d'impact sur l'environnement : <https://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/guide-de-l-etude-d-impact-sur-l-environnement-a617.html>).

**Effets indirects** : un effet indirect traduit une relation de cause à effet ayant à l'origine un effet direct. Ils se manifestent souvent à travers des chaînes de causalité (définition issue du glossaire guide de l'étude d'impact sur l'environnement : <https://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/guide-de-l-etude-d-impact-sur-l-environnement-a617.html>).

Dans le cas du guide qui nous intéresse, il s'agit des effets liés aux activités situées au large de la zone littorale mais qui modifient l'hydrodynamique et le transport de sédiment non seulement dans le champ proche mais également dans le champ lointain, possiblement jusque dans la zone littorale.

**Effets cumulatifs** : représentent les conséquences des pressions exercées sur l'environnement par plusieurs activités ou installations. Ils peuvent simplement s'additionner ou se renforcer. Par exemple, la réduction du débit d'une rivière du fait d'un pompage d'eau combiné à des rejets des eaux domestiques et une pollution industrielle peuvent avoir un effet cumulatif plus fort que la simple addition des trois effets pris séparément.

**Ferme de calcul** (syn. Cluster de calcul) : regroupement de plusieurs ordinateurs indépendants appelés nœuds afin de permettre une gestion globale et de dépasser les limitations d'un ordinateur. Les études hydrosédimentaires maritimes peuvent nécessiter plusieurs centaines de nœuds.

**Impact** (ou incidence) : croisement entre l'effet et la sensibilité du territoire ou de la composante de l'environnement touchée par le projet (définition issue du glossaire du guide de l'étude d'impact sur l'environnement : <https://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/guide-de-l-etude-d-impact-sur-l-environnement-a617.html>).

Dans le guide méthodologique d'élaboration des DOGGM, l'impact est défini comme la conséquence d'une ou plusieurs pressions sur un ou plusieurs compartiments de l'environnement (écosystème, paysage, patrimoine, usages, ...) et dépend de la sensibilité des récepteurs.

**Pression** : la pression induit un changement d'état des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du milieu. Une même pression peut être causée par différentes activités. Une pression engendre des effets plus ou moins importants en fonction de son intensité

**Océano-météo** : les paramètres océano-météo incluent notamment les niveaux et courants marins, le vent ainsi que les vagues. Ils jouent un rôle essentiel dans l'hydrodynamique côtière qui pilote le transport des sédiments et les évolutions du trait de côte.

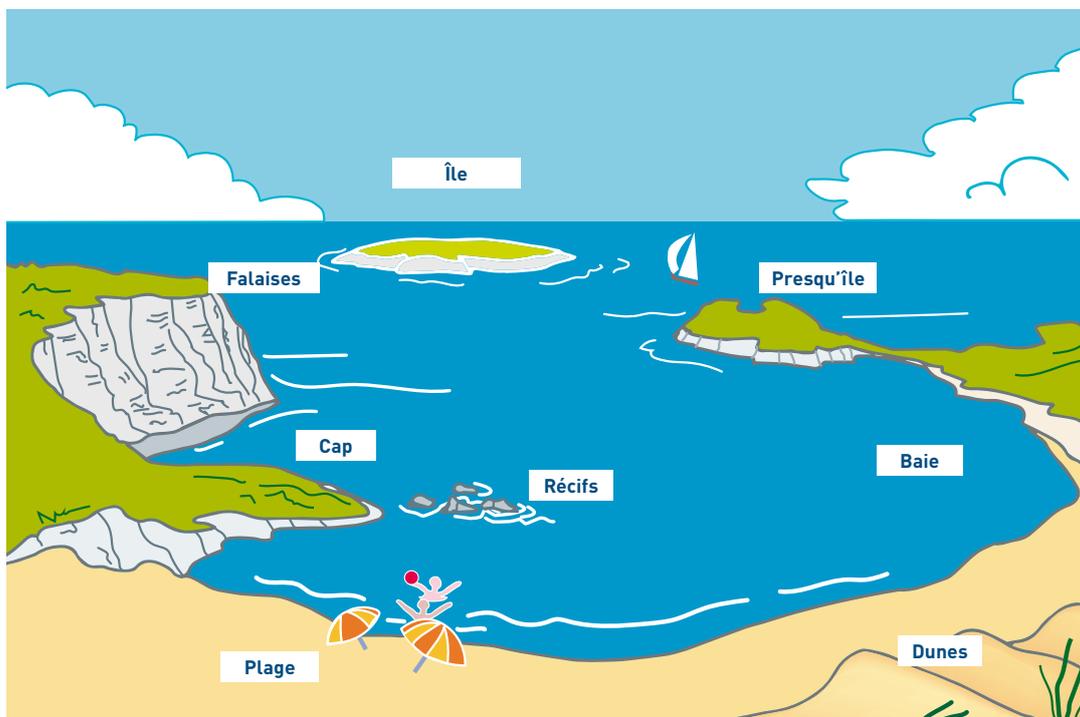
**Transit littoral** : part du transport sédimentaire littoral cheminant le long de la côte.

# SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES DE BASE

# 1. LE LITTORAL MÉTROPOLITAIN

## 1.1. LA DIVERSITÉ DU LITTORAL

La grande diversité des formes morphologiques littorales (Figure 3) résulte d'interactions multiples et complexes liant géologie, climat, océanographie, hydrologie, milieu vivant. Il n'y a donc pas de classification établie de types de côte mais différentes approches selon les disciplines et les objectifs d'étude. La synthèse proposée ici repose essentiellement sur la typologie, fonction de la structure géologique, proposée dans le guide du Ministère de l'Écologie intitulé « La gestion du trait de côte » (MEEDDM, 2010) auquel nous reportons le lecteur pour les détails. Nous avons enrichi cette synthèse pour les deux types de côte non traités spécifiquement dans ce guide, à savoir les côtes rocheuses basses ainsi que les bassins à marée et les fonds de baie.



**Figure 3** - Différentes composantes morphologiques d'un littoral

### 1.1.1. Côtes basses meubles (plages et dunes)

Les côtes basses meubles, sont principalement représentées par les plages et les dunes littorales qui sont soumises à la forte prédominance des actions marines. Elles font partie des côtes d'accumulation qui proviennent de la sédimentation marine ou de l'activité d'organismes vivants. Elles incluent une partie sous-marine, une partie aérienne et une arrière-plage avec la présence (ou non) de dunes bordières (dites aussi dunes de première ligne) et/ou d'ouvrages côtiers. Ces côtes sont constituées de sédiments de taille très variable, allant des sables fins (grains de 63 à 200  $\mu\text{m}$ ) aux blocs (diamètres supérieurs à 0,2 m) en passant par les sables moyens, les sables grossiers, les graviers et les galets. Une grande partie de ces matériaux sédimentaires sont issus d'un stock hérité et leur renouvellement dépend des apports fluviaux actuels. Ces matériaux peuvent être plus ou moins mobiles avec une adaptation continue aux apports de sédiments continentaux, aux agents marins et éoliens et aux actions anthropiques.

Leur forme en plan, et plus généralement leurs caractéristiques morphologiques, sont très diverses et dépendent de leur exposition aux vagues et des caractéristiques morphologiques locales du littoral. On peut ainsi distinguer des plages rectilignes, les plages de fond de baie, les flèches littorales, les îles-barrières ou cordons littoraux (lidos), les saillants et les tombolos (MEEDDM, 2010).

### 1.1.2. Les embouchures : lagunes, estuaires et deltas

Les lagunes, estuaires et deltas (Figure 4) font aussi partie des côtes d'accumulation ; il s'agit de milieux à l'évolution complexe du fait de la différenciation à faire entre les actions de la marée et des vagues et pour lesquelles une interaction plus ou moins marquée avec un ou plusieurs fleuves est aussi observée au niveau des apports en eau douce et en sédiments associés. Ces interactions complexifient la dynamique hydrosédimentaire de ces sites. On les distingue notamment en comparant l'influence relative des agents marins et fluviaux<sup>17</sup> :

Les deltas sont formés par l'accumulation d'alluvions à l'embouchure des fleuves. Les deltas actifs apportent plus de sédiments que les agents marins sont capables d'en transporter ce qui conduit à la création de terres émergées (par exemple delta du Rhône). La composante fluviale l'emporte alors sur la composante marine. Ces embouchures pouvant changer régulièrement de place au cours des siècles, on observe également au droit des embouchures abandonnées des paléo-deltas sous-marins en érosion puisque l'apport en sédiments s'est tari.

Les estuaires, au contraire, voient l'influence marine devenir prépondérante par rapport aux actions fluviales, essentiellement grâce à l'action de la marée et des courants associés. Ils peuvent être en sédimentation ou en érosion selon les volumes d'apports en sédiments et la résultante des forces antagonistes agissant en flot (remplissage de l'estuaire par la marée et apports de sédiments associés) et en jusant (vidange de l'estuaire et débit fluvial, avec expulsion associée de sédiments).

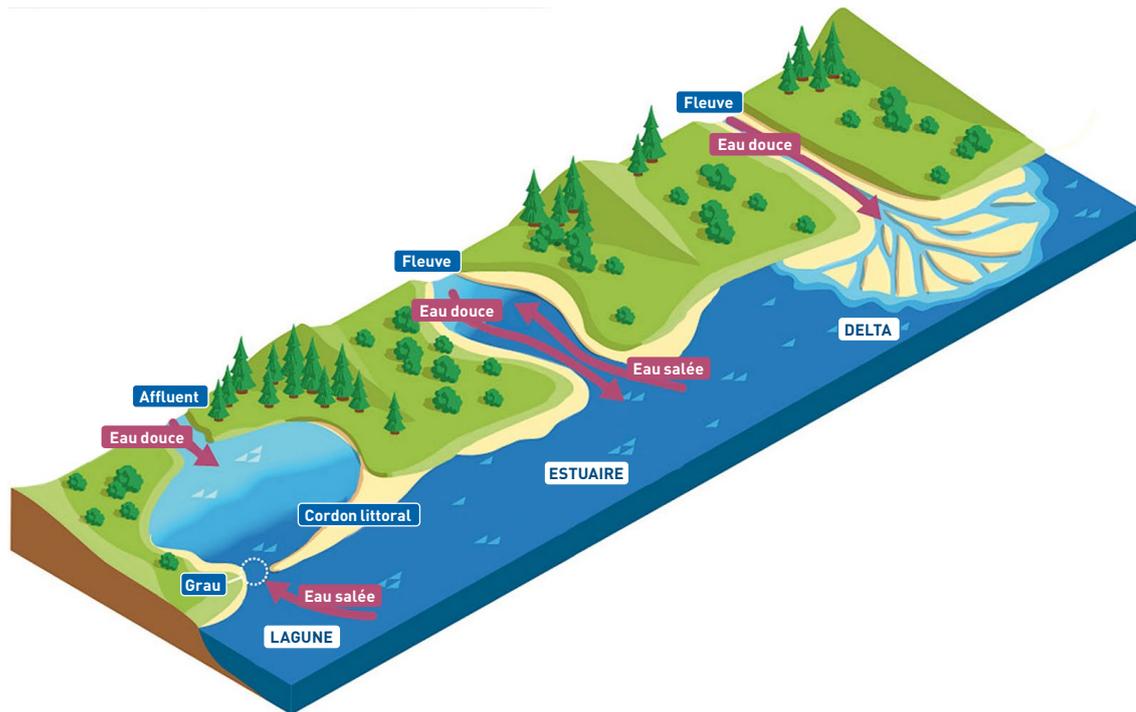
Le terme de lagune (en anglais coastal lagoon) regroupe les fonds de baies ainsi que les bassins à marée, havres, lagunes et étangs. Ce type de littoral a été décrit en détail par Pinot (1998) avec une classification proposée par Nichols et Allen (1981) qui repose sur les processus sédimentaires dominants.

Les fonds de baies constituent des zones ouvertes à la mer dans lesquelles le régime de marée est dominant et le régime fluvial et les vagues jouent un rôle moins important.

Les bassins à marée (ou havres en Normandie) s'observent le long des côtes de l'Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord soumises à un marnage assez important (mésotidal à macro tidal). Il s'agit d'étendues d'eau semi-terrestres communiquant avec la mer par l'intermédiaire d'un débouché ou d'une passe par laquelle transite la marée qui remplit et vide alternativement le bassin. Ils se distinguent des estuaires par leur morphologie avec un débouché relativement étroit comparé à la surface du bassin et par une influence fluviale souvent plus faible. D'autre part la morphologie de la passe, constituée en général de sédiments sableux, varie en fonction de la force relative des courants de marée et des courants littoraux induits par le déferlement des vagues.

Les lagunes et les étangs sont des étendues d'eau mal reliées à la mer dont les sépare un cordon littoral. Il s'agit d'étendues d'eau saumâtre, alimentées par des apports d'eau douce terrestres et par des apports d'eau salée qui circulent à travers une (ou plusieurs) brèche(s) appelées grau, débouché ou passe. Ces brèches peuvent être permanentes (naturellement ou artificiellement) ou temporaires (perçement lors d'une crue d'un fleuve ou d'une tempête avec vagues et forte surcote par exemple). Les lagunes se distinguent des bassins à marée par un marnage plus faible (régime microtidal).

17 Il est également possible de définir la part de différentes origines sédimentaires par étude de la géochimie.



**Figure 4 – Lagunes, estuaires et deltas**

© Agence française pour la biodiversité. Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau, 2018)

Les étangs ne possèdent pas, pour leur part, de débouché en mer, permanent ou temporaire. Les échanges d'eau s'effectuent avec un débit plus faible par percolation à travers le cordon littoral. Un tel cordon peut être fragilisé par l'érosion qui peut conduire à l'ouverture de brèches temporaires ou permanentes.

### 1.1.3. Les vasières et marais maritimes

Ces espaces résultent de la sédimentation de particules fines en suspension dans les eaux marines et fluviales (argiles, silts et sables fins). On les trouve en fond de baie ou dans le lit majeur des estuaires.

Cette sédimentation donne naissance à deux espaces bien distincts (Pinot, 1998 ; MEEDDM, 2010) : la partie inférieure (appelée parfois slikke) correspond à une vasière molle et nue recouverte par toutes les marées et la partie supérieure végétalisée, inondée seulement lors des marées de vives-eaux (on parle de schorre, d'herbus) ou même uniquement lors d'épisodes exceptionnels de submersion marine (on est alors dans un marais maritime).

De tels espaces sont en général sujets à de faibles actions hydrodynamiques propices à la sédimentation des particules fines. Celle-ci peut se poursuivre ensuite par le tassement puis la consolidation des dépôts qui deviennent alors cohésifs et résistants à de futures actions hydrodynamiques.

### 1.1.4. Les côtes rocheuses

Les côtes rocheuses incluent les falaises et les côtes rocheuses basses (Pinot, 1998).

Les falaises, appelées aussi côtes d'ablation (MEEDDM, 2010), sont des escarpements, le plus souvent rocheux (roches dures ou plus friables) mais parfois meubles, de hauteur très variable (de 1 à 500 m) que l'on observe le long des côtes et qui ont été créées par érosion, marine ou terrestre. Elles sont qualifiées de vives si elles sont encore en contact avec la mer ou stabilisées/mortes si elles échappent aux actions marines (MEEDDM, 2010).

Parmi les falaises vives, on peut encore distinguer les falaises plongeantes ou accores qui sont dénuées d'estran (par exemple les calanques, abers, rias) et les falaises à plate-forme d'érosion qui, soumises à l'érosion, reculent par éboulements successifs qui accumulent du matériau devant l'abrupt, créant ainsi une plateforme sédimentaire plus ou moins large et régulière. On observe également différentes formes (ou profils) de falaises selon leurs caractéristiques morpho-structurales : falaises à coulée de boue, à grands glissements, à écroulement, etc....

Sur ces côtes, la vitesse de recul (ou d'ablation) est un facteur difficile à quantifier du fait que les agents érosifs agissent en continu mais que le résultat de leur action (le recul) se fait par à-coups. MEEDDM (2010) différencie les falaises à recul rapide (de l'ordre du centimètre ou décimètre par an) de celles à recul lent (retrait annuel inférieur au centimètre).

Les côtes rocheuses basses, appelées aussi côtes à dénudation (Pinot, 1998), sont aussi des côtes à érosion mais qui ont seulement été dépouillées de leur couverture meuble. La roche solide, en place, est simplement mise à nu, sans avoir souffert, de façon caractéristique, d'une attaque érosive. Elle se présente sous forme de platiers rocheux, submergés et aériens.

### 1.1.5. Côtes artificialisées

L'artificialisation du trait de côte a été estimée par le Cerema à partir d'une cartographie des ouvrages et aménagements littoraux publiée sur le site internet Géolittoral<sup>18</sup>. 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, 2019), dont plus de la moitié (57 %) 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. Le linéaire cumulé d'ouvrages se substituant au trait de côte (digues, murs et perrés) est estimé à 17 % du linéaire de côte. En tout, l'ensemble des aménagements recensés impactent un linéaire côtier de l'ordre de 3 100 km, soit un taux d'artificialisation moyen de l'ordre de 30 % (35 % en métropole et 13 % dans les départements et régions d'outre-mer).

La méthodologie retenue (Cerema, 2019) se décompose en trois étapes :

**a)** Le linéaire de côtes artificialisées est défini par la projection des ouvrages sur le « trait de côte de référence Shom-IGN Histolitt® » :

- Pour les ouvrages longitudinaux, le trait de côte Histolitt® a été segmenté au début et à la fin de chaque ouvrage,
- Pour les ouvrages transversaux, le point central de l'ouvrage a été projeté sur le trait de côte Histolitt®, puis le trait de côte a été considéré comme artificialisé sur un linéaire de deux fois la longueur de l'ouvrage, réparti de part et d'autre de ce point, afin d'approcher d'une manière très simplifiée un linéaire de trait de côte impacté par l'ouvrage.

**b)** Ce linéaire artificialisé est complété par les zones artificialisées à l'intérieur des ports, identifiées par le projet européen Eurosion.

**c)** Le linéaire artificialisé complété est ensuite comparé à l'ensemble du linéaire Histolitt® pour lequel une information sur la nature du trait de côte a été renseignée par le projet européen Eurosion.

Les principaux ouvrages recensés par cette étude sont rassemblés dans la classification proposée par le Cerema (2019, Tableau 1). La présence de ces ouvrages ne constitue pas toujours un remède efficace à long terme contre l'érosion voire accélère, dans de nombreux cas, 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).

<sup>18</sup> <https://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/cartographie-nationale-des-ouvrages-et-a1435.html>

Catégorie	Classe	Type
Ouvrages de protection	Ouvrage se substituant au trait de côte	Digue côtière
		Mur, mur de soutènement
		Perré
	Ouvrage de lutte contre l'érosion	Brise-lames
		Épis
Autres aménagements	Accès	Accès, chemin, voie submersible...
		Cale
	Bâti	Bâtiment, blockhaus, fortification...
		Protection individuelle
	Infrastructure portuaire et de navigation	Jetée
		Quai
	Divers	Aménagement hydraulique (vanne, écluse, barrage...)
		Aménagement de sécurité (poste de secours, signalisation...)
		Autre ou indéterminé

**Tableau 1** – Typologie des ouvrages et aménagements littoraux relevés par le Cerema, 2019

## 1.2. FACTEURS D'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

### 1.2.1. Les phénomènes physiques

Les phénomènes physiques intervenant dans l'évolution du trait de côte ont été décrits en détail dans le chapitre 1 du guide du Ministère de l'Écologie (MEEDDM, 2010) auquel nous reportons le lecteur pour la vue d'ensemble.

Nous détaillerons au chapitre 2 les processus essentiels à prendre en compte pour étudier l'effet d'une concession minière sur le trait de côte à savoir :

**a)** Les processus hydrodynamiques c'est-à-dire les fluctuations du niveau d'eau et les courants associés qui, en mer, se classent en deux catégories principales :

- Les vagues (mers de vent et houles), mesurées par des houlographes, qui induisent des variations très rapides du niveau avec des périodes comprises entre 1 et 30 secondes,
- Le niveau de la mer, mesuré par les marégraphes qui filtrent l'effet des vagues et fournissent traditionnellement des valeurs moyennées sur 5 à 10 minutes et plus récemment (marégraphes numériques) sur 1 minute.

A cela s'ajoutent d'autres processus non modifiés par les extractions de granulats marins tels que :

- Le vent qui est responsable du transport éolien et a un fort effet sur les estrans sableux et la construction et l'évolution des dunes : un vent marin fait migrer les dunes à l'intérieur des terres en l'absence de végétation et un vent de terre (Mistral) fait migrer le sable du haut de plage vers la mer,
- Les apports fluviaux qui contribuent à modifier, aux embouchures, les courants (courants de densité) et les niveaux,
- Les processus météorologiques (eau, précipitations, température) qui conduisent à l'érosion des falaises.

**b)** La dynamique hydrosédimentaire, c'est-à-dire le transport des sédiments par les agents hydrodynamiques et le vent et les évolutions morphodynamiques qui en découlent dont l'évolution de la position du trait de côte, objet du présent guide.

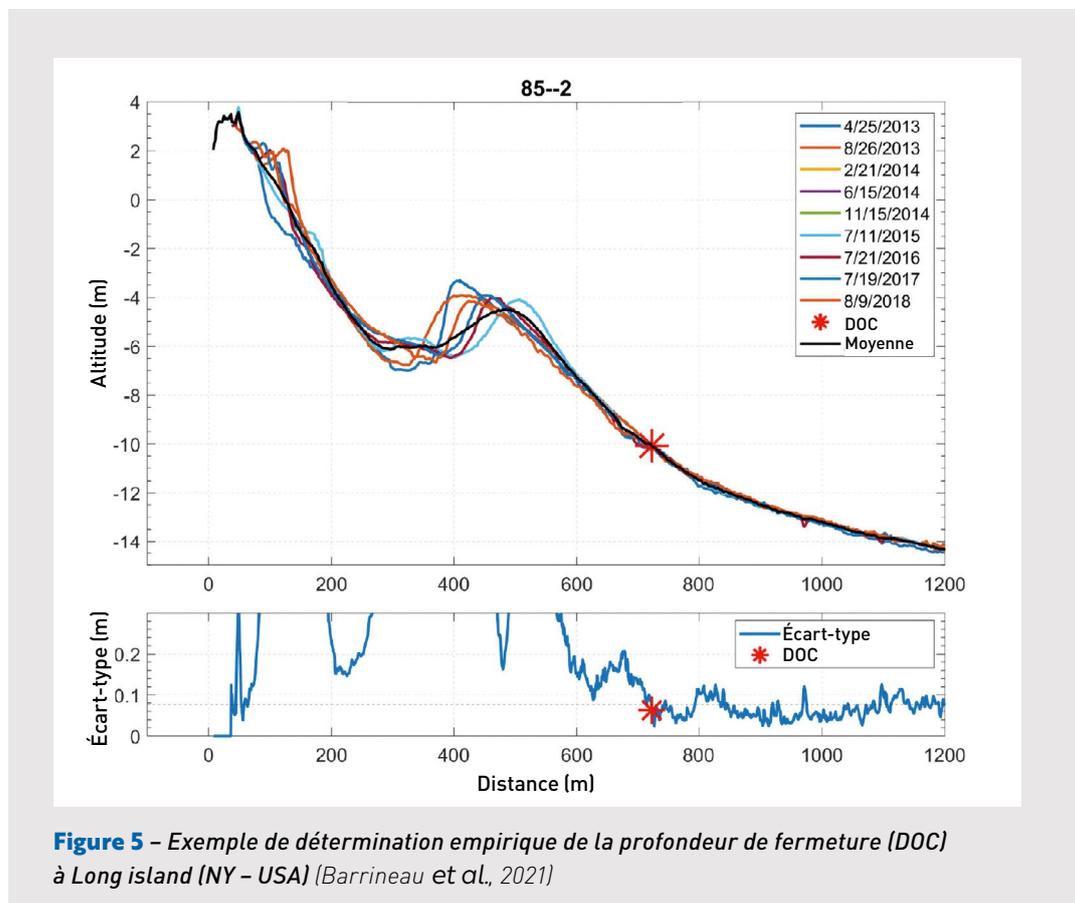
### 1.2.2. Délimitation de la zone littorale : la profondeur de fermeture morphodynamique

Le trait de côte se situe sur la partie émergée du littoral. Il est cependant en interaction forte avec l'estran (la zone de balancement des marées) et les petits fonds sous-marins du fait du déferlement des vagues qui induisent des surélévations du niveau de l'eau, des courants ainsi que des transports sédimentaires et des évolutions morphologiques sur les littoraux meubles.

Dans le cas de littoraux meubles, ces interactions fortes s'observent par une analyse diachronique de relevés topo-bathymétriques de profils des fonds à l'échelle saisonnière, annuelle ou pluri-annuelle, comme cela est illustré sur la Figure 5. On observe sur ce graphique que la succession temporelle des profils varie continûment entre le trait de côte et les petits fonds marins puis se recoupe à partir d'une certaine profondeur, avec une tolérance liée aux incertitudes sur la mesure. Cette profondeur est appelée profondeur de fermeture morphodynamique. Sa détermination va dépendre du seuil d'incertitude<sup>19</sup> retenu : sur cet exemple, le seuil utilisé est de 0,07 m d'écart-type (STD) autour du profil moyen avec une fluctuation plus au large ne dépassant pas 0,15 m (Barrineau *et al.*, 2021).

Empiriquement, on observe que la profondeur de fermeture va plutôt augmenter lorsque l'intervalle de temps entre les levés augmente (ici 5 ans séparent les levés de 2013 et 2018). Cela a été expliqué par le fait que cette profondeur augmentait avec l'intensité de la hauteur significative des vagues enregistrées lors des tempêtes survenues pendant la période des relevés (Capobianco *et al.*, 2002 pour une revue).

Dans les études, on peut estimer la profondeur de fermeture sur un site par une formule empirique à partir de la connaissance du climat d'agitation devant cette côte.



<sup>19</sup> Le seuil d'incertitude dépend essentiellement de la qualité de la donnée et de son repérage altimétrique.

La plus connue est celle développée par Hallermeier (1981) à l'échelle annuelle et étendue par Nicholls *et al.* (1998) à l'échelle pluri-annuelle. Elle s'écrit :

$$\text{DoC}_t = 2,28 H_{S(12h/t)} - 68,5 (H_{S(12h/t)}^2 / gT_s^2)$$

Avec  $\text{DoC}_t$  : profondeur de fermeture morphodynamique calculée par rapport au niveau moyen des basses-mers,  $H_s(12h/t)$  : hauteur significative locale dépassée 12 heures sur  $t$  années,  $T_s$  : période significative associée.

Si on considère par exemple une tempête ayant pour caractéristiques  $H_s(12h) = 7,5$  m et  $T_s = 10$ s, typique de la côte aquitaine, nous obtenons une profondeur de 13,2 mètres. En Méditerranée, Sabatier *et al.* (2004) ont utilisé des relevés de profil de plage du littoral du Languedoc - Roussillon qui les ont conduits à estimer des profondeurs de fermeture comprises entre 1,4 m et 7,4 m sur 3 ans, entre 1998 et 2001 selon le degré d'exposition aux vagues des sites évalués. L'application de la formule conduit plutôt à des valeurs plus fortes d'environ 1,6 m.

De nombreuses études ont été publiées pour cerner la précision et les limites d'utilisation de cette formule. Il en ressort qu'elle est surtout validée sur les côtes basses meubles éloignées des débouchés en mer (Barrineau *et al.*, 2021). Ce concept trouve également ses limites en Manche Est mer du Nord du fait de la présence de courants de marée importants à proximité du rivage en dehors de la zone de déferlement qui contribuent à faire évoluer les fonds et les bancs sableux au-delà de la plage telle que définie ici.

Cette notion permet cependant de distinguer en pratique une zone littorale, qui va du trait de côte jusqu'à la profondeur de fermeture, de la zone côtière qui se situe plus au large (Figure 6). Cette notion a été introduite notamment par Stive *et al.* (1990) sous le nom d'« active zone ». Cette partition diffère de celle usuellement faite entre l'estran et les fonds marins (le subtidal) afin de mettre en évidence la relation serrée entre les évolutions du trait de côte et la dynamique de la zone littorale, y compris dans sa partie sous-marine. Ce point est crucial dans l'appréciation des effets des actions anthropiques.

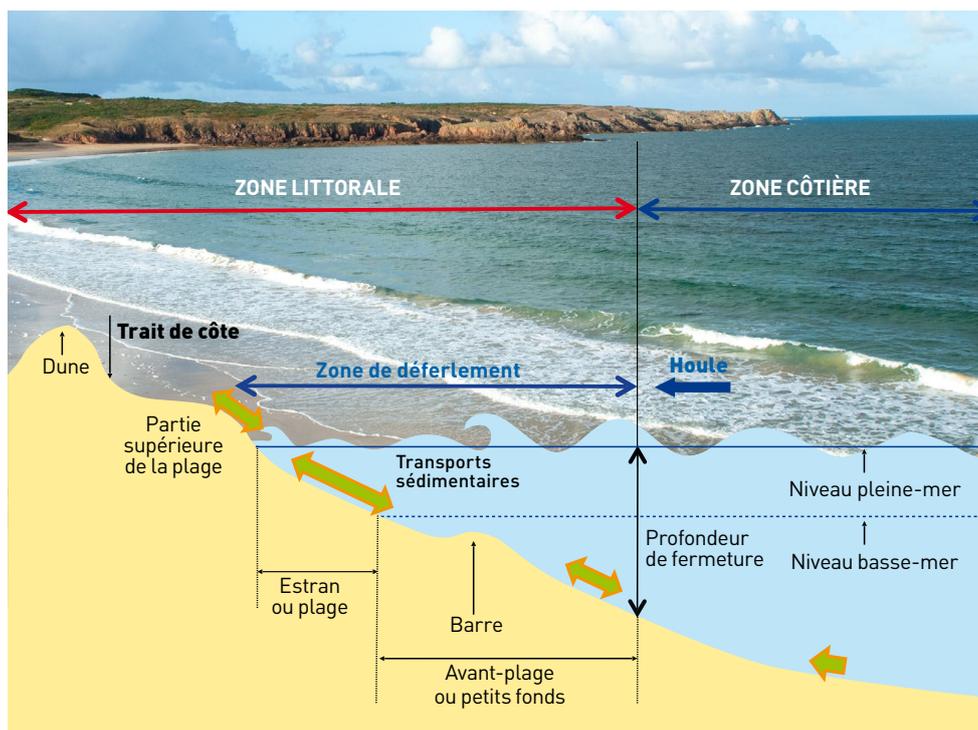


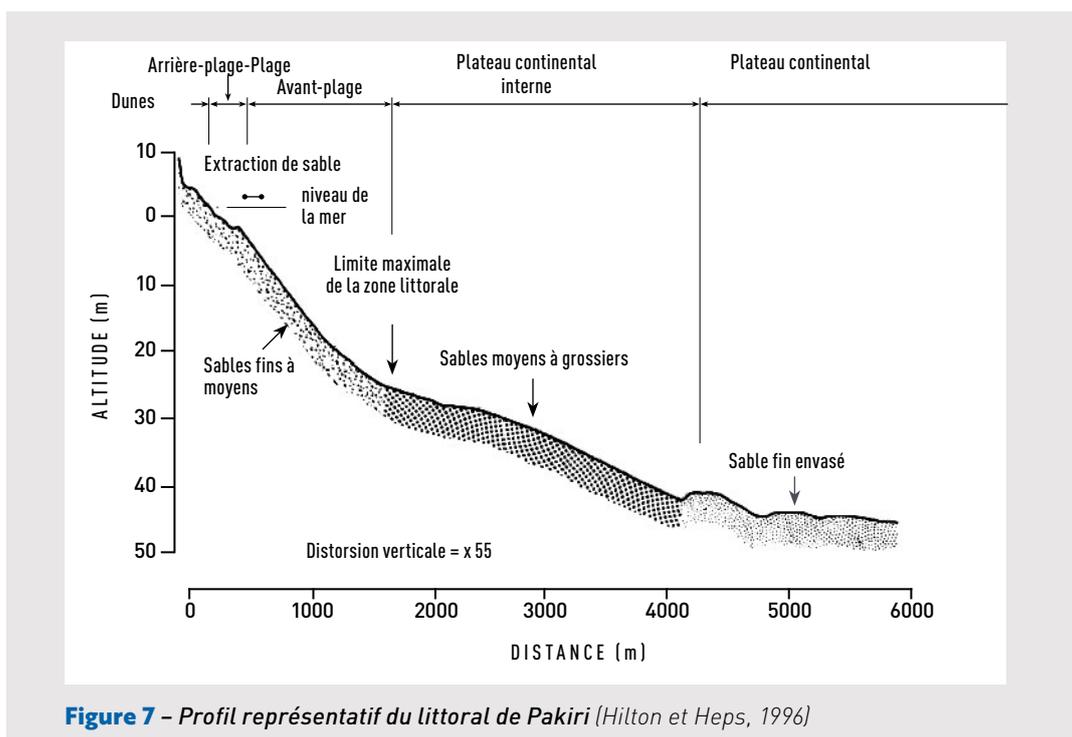
Figure 6 - Les principaux éléments d'un profil littoral (Artelia)

### 1.2.3. Délimitation de la zone côtière : limite d'action des vagues

Cette profondeur de fermeture dite morphodynamique ne doit pas être confondue avec la limite d'action de la houle et des courants qui est plus basse. En effet, les vagues interagissant avec le fond sont susceptibles de mobiliser du sédiment, voire de générer des formes de fonds sans transport important de sédiment sur l'ensemble du plateau continental. Cette limite est difficile à appréhender et fait l'objet de nombreuses recherches dans plusieurs disciplines. Les sédimentologues marins étudient généralement les stratigraphies sédimentaires sur le plateau continental en utilisant les notions de limite d'action des vagues de beau temps, vagues de tempêtes et des vagues érosives<sup>20</sup>. Ces notions sont cependant remises en cause actuellement (Peters et Loss, 2012 ; Rankey et Appendini, 2022).

Dans les études côtières, Hilton et Heps (1996) ont fait l'inventaire des différentes méthodes d'estimation de cette limite d'action qui inclut :

- Le changement de pente des fonds, avec des pentes plus douces au large de cette limite d'action,
- La composition granulométrique des fonds,
- La répartition de la faune benthique le long du profil,
- La limite de l'extension des courants sagittaux vers le large,
- La présence de formes de fonds (rides, dunes),
- Les calculs de contrainte critique de mise en mouvement.



Ils ont appliqué ces critères au littoral de Pakiri qui est situé sur la côte est de l'île du Nord de la Nouvelle-Zélande sur lequel des extractions de granulats marins ont eu lieu. 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 12s pour un temps de retour estimé à 10-30 ans. Ces différents critères 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 (Figure 7). Cette profondeur marque également un changement de pente du

<sup>20</sup> En anglais : "fair-weather wave base", "storm wave base", "swell wave base", "base of wave abrasion".

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 de son côté estimée à -12/-14 m par comparaison de levés bathymétriques, la formule d'Hallermeier (1978) conduisant à une valeur de -10,1 mètres.

Les autres études sur le sujet confirment que la limite d'action des vagues se situe en général par 20 à 30 m de profondeur sur les côtes exposées (Hilton et Heps, 1996).

En France, Migniot et Viguier (1980) ont établi une limite d'action de la houle sur les sables à une profondeur de -30 m CM au large de la côte Aquitaine, pour les conditions de houle de la côte Aquitaine jusqu'à 7 m de hauteur significative et une profondeur de fermeture pluri-annuelle située à -15 m CM. Ils ont également proposé une formule empirique, validée par des mesures de terrain, pour estimer la limite d'action des vagues.

#### 1.2.4. Les actions anthropiques

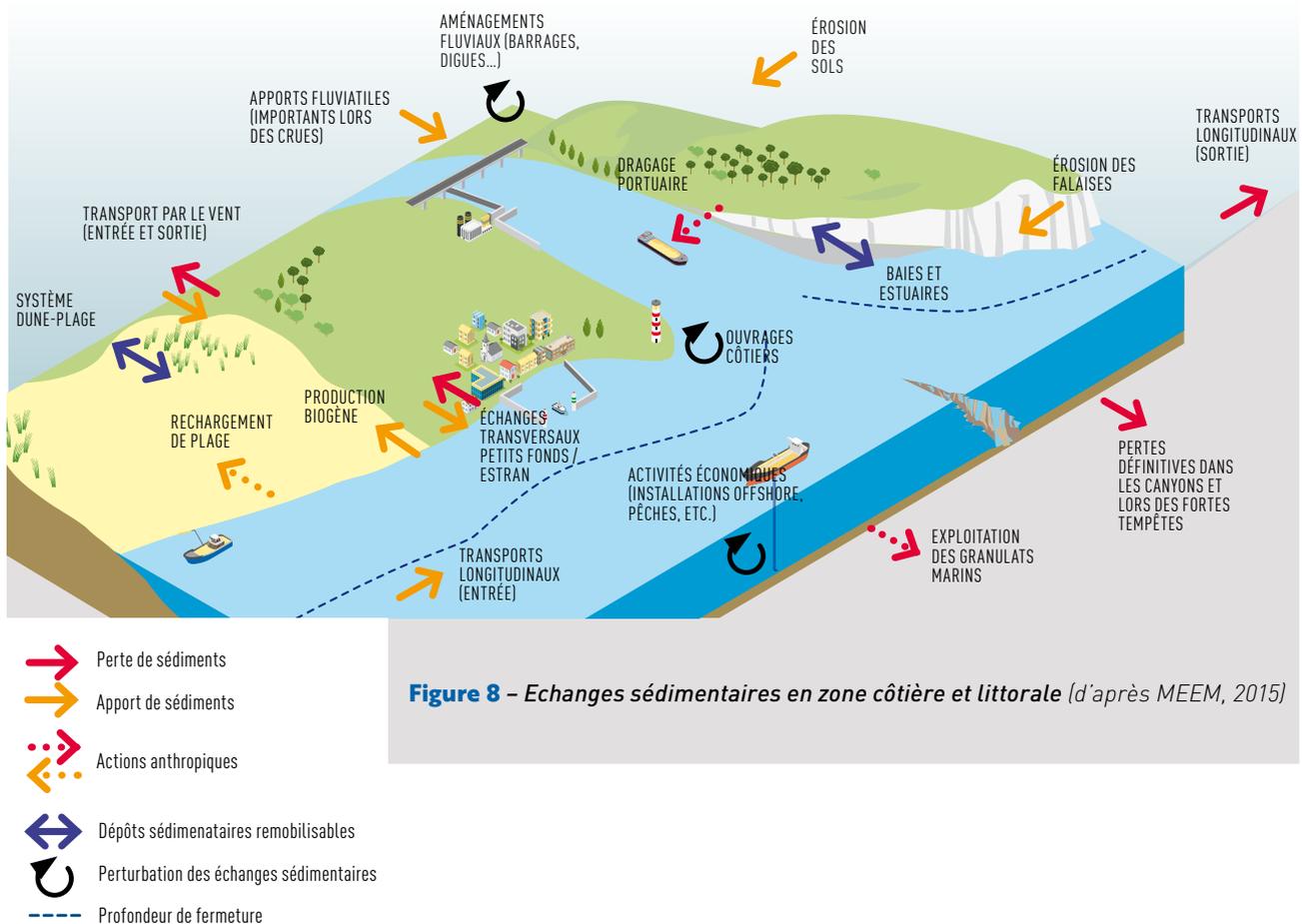
Les interventions humaines sur le littoral sont nombreuses et s'étendent des territoires continentaux au milieu marin. Le principal effet reste l'artificialisation des zones côtières traitée précédemment. Il convient en effet de distinguer les effets directs induits par les activités situées dans la zone littorale proprement dite et les effets indirects liés aux activités situées plus au large mais qui modifient l'hydrodynamique et le transport de sédiment non seulement dans le champ proche mais également dans le champ lointain, possiblement jusque dans la zone littorale. Ainsi :

- 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 extractions passées dans les lits des rivières limitent et diminuent la circulation et les volumes de sédiments parvenant à la côte,
- Les effets cumulés des usages et activités en mer (champs éoliens en mer (Clark *et al.*, 2014 ; Rivier *et al.*, 2016 ; Fischerheit *et al.*, 2022), extractions de granulats, traitement à terre des sédiments de dragage des ports et de leurs accès, pêche via les arts traînants (Mengual *et al.*, 2016), etc.) perturbent l'hydrodynamique et les transports de sédiments et pourraient diminuer le stock sédimentaire disponible dans le système côtier.

Bien que connus qualitativement, ces effets 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.

### 1.2.5. Approche systémique des évolutions du trait de côte : la cellule hydrosédimentaire

La complexité des phénomènes physiques, de leurs interactions auxquelles s'ajoutent d'importantes interventions humaines, nécessite une approche systémique du littoral (MEEDDM, 2010). La Figure 8 illustre les principaux flux de sédiments que l'on peut rencontrer sur le littoral. Leur quantification et les variations morphologiques qui en découlent conduit à une approche morphodynamique des littoraux.



Cette approche se justifie par le fait que pendant plusieurs décennies la mise en œuvre de réponses locales à des problématiques locales d'érosion côtière a mené à des effets indésirables sur les littoraux adjacents. Les exemples les plus communs concernent la mise en place d'épis permettant de stocker des sédiments à un certain endroit. De tels épis provoquaient néanmoins une diminution voire un arrêt complet du transit littoral circulant le long d'une plage conduisant à une érosion du trait de côte à l'aval, ce qui nécessitait de construire de nouveaux épis.

Les conséquences négatives de tels aménagements ont conduit les scientifiques à développer le concept de système hydrosédimentaire reliant les variations morphologiques d'un littoral (topographie et bathymétrie) aux processus physiques (flux de sédiments) et aux actions anthropiques à travers un bilan sédimentaire, ceci à différentes échelles de temps et d'espace.

La cellule hydrosédimentaire constitue l'échelle adaptée pour la prise de décision. Il s'agit d'un compartiment du littoral qui peut être décrit et analysé de manière autonome sur le plan des transports sédimentaires (MEEM, 2015 ; Cerema, 2015). Cette notion a d'abord été développée en Californie (Inman, 2003) puis s'est étendue à l'ensemble des Etats-Unis avec un accent mis sur la quantification des bilans sédimentaires (Rosati, 2005). Des découpages similaires ont également été effectués sur les côtes de la Grande-Bretagne (Cooper *et al.*, 2002) et de l'Australie avec la notion de compartiments côtiers hiérarchisés (Thom *et al.*, 2018) afin de faciliter une gestion intégrée des risques littoraux.

En France, ces principes ont été appliqués pour produire une cartographie nationale homogène du littoral en métropole et sur les outre-mer (MEEM, 2015). Une première identification de « provinces sédimentaires », de plusieurs centaines de kilomètres en moyenne, s'est appuyée sur la délimitation de secteurs où les processus d'évolution étaient considérés comme homogènes et relativement différents des provinces adjacentes. 10 provinces en métropole et 10 provinces ultramarines ont ainsi pu être individualisées. À l'intérieur de ces provinces ont été définies des cellules hydrosédimentaires (de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres). Cependant, lorsque ces définitions fines n'étaient pas possibles, notamment lorsque les limites des cellules sont mobiles ou font encore l'objet de discussions d'experts, le découpage adopté s'est appuyé sur des formes et des natures de côte homogènes, appelées « unités morphosédimentaires » (MEEM, 2015). Ces notions sont illustrées dans le paragraphe 1.3.2.

Un élément utile à la compréhension du fonctionnement d'une cellule hydrosédimentaire est l'établissement du budget sédimentaire qui consiste à effectuer un bilan de masse des sédiments entrants et sortants de la cellule. Ainsi, lorsque le volume des apports est supérieur aux pertes, le système est dit excédentaire et le littoral s'engraisse. Dans le cas contraire il est déficitaire et le littoral démaigrît. Dans un second temps, il peut être également utile de faire un bilan des volumes déplacés au sein de la cellule.

## 1.3. SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SUR LE LITTORAL MER DU NORD – MANCHE – ATLANTIQUE

### 1.3.1. L'actualisation du catalogue sédimentologique des côtes françaises

Les travaux d'actualisation du catalogue sédimentologique des côtes françaises, réalisés par des groupes de travail pluridisciplinaires coordonnés par le Cerema, ont abouti à la publication entre 2018 et 2021 d'un ensemble de documents (Cerema, 2021) publié dans la collection « Dynamiques et évolutions du littoral : Synthèse des connaissances » qui présente, par province sédimentaire, l'état des connaissances sur l'évolution du littoral de France métropolitaine et d'outre-mer. Chaque fascicule et son atlas associé synthétisent les connaissances disponibles sur une province, et sont organisés en cinq grands chapitres thématiques :

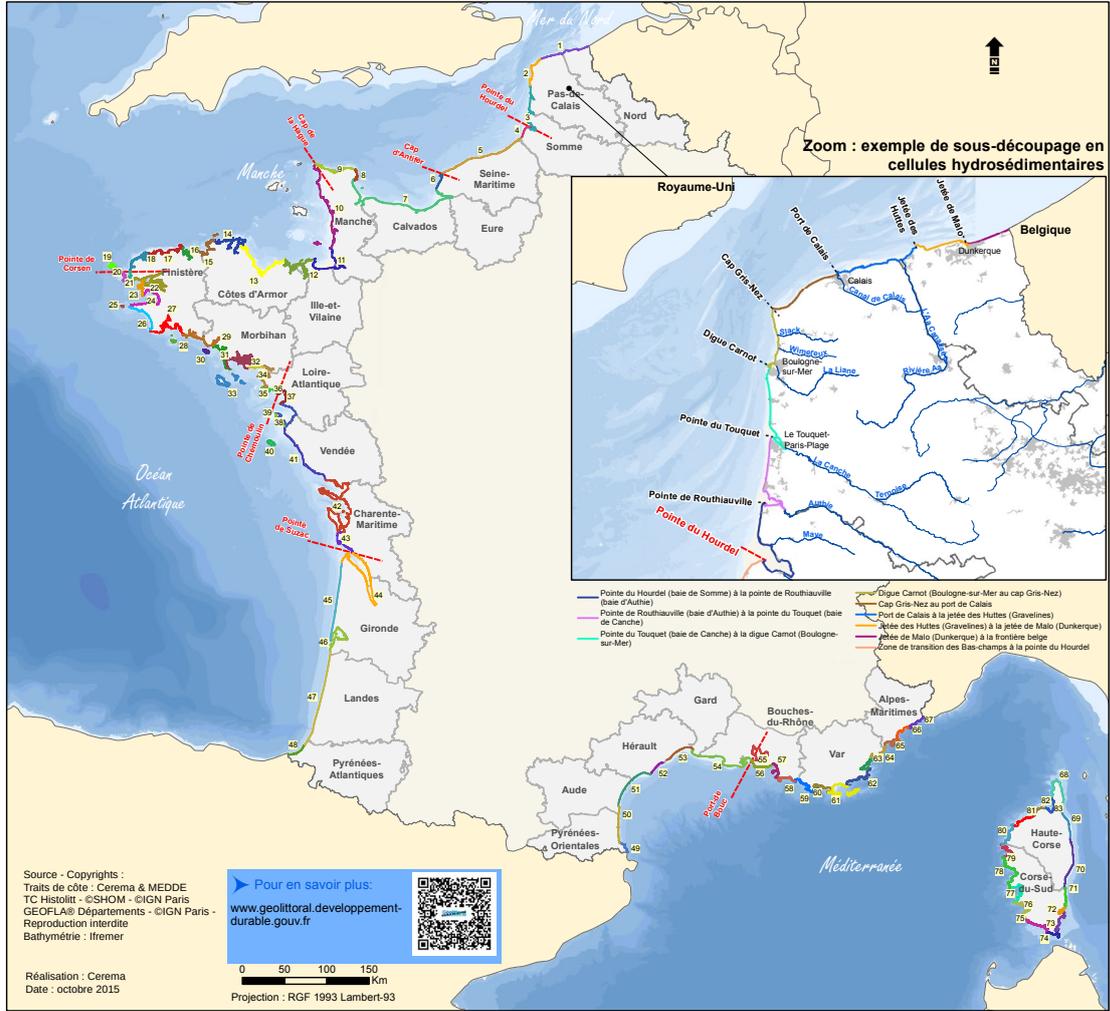
- Le contexte physiographique de la province (principales caractéristiques géologiques et morphologiques et habitats naturels participant à l'évolution du littoral),
- Les facteurs hydrodynamiques (principaux facteurs exogènes tels que les paramètres climatiques, les niveaux et courants marins, les vagues et l'hydrologie des principaux cours d'eau),
- Les données sédimentologiques (nature et répartition des sédiments sur les côtes et les fonds marins, ainsi que leurs mouvements le long du littoral),
- L'effet des activités anthropiques (principaux aménagements réalisés sur les côtes et leur effet sur l'évolution du littoral, ainsi que les mesures prises pour limiter ces effets),
- L'évolution du littoral et des fonds (bilan des tendances passées d'évolution, ainsi que des mouvements sédimentaires ponctuels liés au passage d'événements tempétueux morphogènes).

Ces chapitres traduisent l'état des connaissances actuelles et évaluent la sensibilité du littoral aux dérèglements climatiques en cours. Ils constituent une base documentaire qui devra être actualisée et complétée par des données complémentaires locales lors d'une étude.

### 1.3.2. Le découpage en cellules hydrosédimentaires

Chaque province a ensuite été divisée en unités morphosédimentaires s'appuyant sur des formes et des natures de côtes homogènes. Au total 48 unités morphosédimentaires ont été identifiées dans les 7 provinces citées précédemment (MEEM, 2015). Enfin, chaque unité morphosédimentaire a été subdivisée en cellules hydrosédimentaires lorsque cela était possible.

La Figure 9 indique la position des unités morphosédimentaires et la Figure 10 présente un exemple de découpage en cellules hydrosédimentaires. Lorsque les cellules ne sont pas encore identifiées, il convient de se référer à l'unité morphosédimentaire (MEEM, 2015) ou d'appliquer la méthodologie proposée par Cerema (2015) pour en définir leurs limites.



## Les unités morphosédimentaires en métropole

--- Limite de province sédimentaire

### Jnité morphosédimentaire

- 1, Frontière belge - Sangatte (plaine maritime flamande)
- 2, Sangatte - Hardeiot (Bouloonnais)
- 3, Hardeiot - Pte du Hourdel (plaine maritime picarde)
- 4, Pte du Hourdel - Ault (Bas-Champs de Cayeux)
- 5, Ault - Cap d'Antifer
- 6, Cap d'Antifer - Sainte-Adresse
- 7, Sainte-Adresse - St-Vaast la Hougue
- 8, St-Vaast la Hougue - Barfleur
- 9, Barfleur - Cap de la Hague (Nord Cotentin)
- 10, Cap de la Hague - Pte du Roc (côte des havres)
- 11, Pte du Roc - Pte du Grouin (baie du Mont-Saint-Michel)
- 12, Pte du Grouin - Cap Fréhel
- 13, Cap Fréhel - Pte de la Trinité (baie de Saint-Brieuc)
- 14, Pte de la Trinité - Pte de Men Ruz (côte de granit rose)
- 15, Pte de Men Ruz - Pte de Primel
- 16, Pte de Primel - Pte de Blosson
- 17, Pte de Blosson - Pte Roch Pelguent
- 18, Pte Roch Pelguent - Pte de Corsen (côte des abers)
- 19, Ouessant
- 20, Archipel de Molène
- 21, Pte Corsen - Pte de Saint-Mathieu
- 22, Pte de Saint-Mathieu - Pte des Espagnols
- 23, Pte des Espagnols - Cap de la Chèvre
- 24, Cap de la chèvre - Pte du Raz
- 25, Ile de Sein
- 26, Pte Corsen - Pte de Penmac'h
- 27, Pte de Penmac'h - Pte de Trévignon
- 28, Archipel des Glénan
- 29, Pte de Trévignon - Fort de Port-Louis
- 30, Ile de Groix
- 31, Fort de Port-Louis - Pte du Conguel
- 32, Pte du Conguel - Pte de Saint-Jacques
- 33, Belle-Ile, Houat et Hoëdic
- 34, Pte de Saint-Jacques - Pte de Kervoyal
- 35, Pte de Kervoyal - Pte du Croisic
- 36, Pte du Croisic - Pte de Chémoulin
- 37, Estuaire externe de la Loire
- 38, Pte de Saint-Gildas - Pte de l'Herbaudière (Baie de Bourgneuf)
- 39, Pte de l'Herbaudière - Pte de la Fosse (Facade occidentale de Noirmoullet)
- 40, Île d'Yeu
- 41, Goulet de Fromentine - Pte du Grouin du Cou (domaine vendéen)
- 42, Pte du Grouin du Cou - Pertuis de Maumusson y compris îles d'Aix, Ré, Oléron
- 43, Pertuis de Maumusson - Embouchure de la Gironde
- 44, Estuaire externe de la Gironde
- 45, Pte de la Négade - Pte du Cap Ferrat (côte sableuse aquitaine)
- 46, Bassin d'Arcachon
- 47, Arcachon - Pte Saint-Martin (côte sableuse aquitaine)
- 48, Pte Saint-Martin - Frontière espagnole
- 49, Frontière espagnole - Le Racou (côte Vermeille)
- 50, Le Racou - Cap Leucate (le Roussillon)
- 51, Cap Leucate - Cap d'Agde (le Narbonnais)
- 52, Cap d'Agde - Sète (le lido de Sète)
- 53, Sète - Le Grau-du-Roi (golfe d'Argues-Mortes)
- 54, Le Grau-du-Roi - Port-de-Bouc (la Camargue)
- 55, Etang de Berre
- 56, Port de Bouc - Tunnel du Rove
- 57, Tunnel du Rove - Cap Croisette
- 58, Cap Croisette - Bec de l'Aigle
- 59, Bec de l'Aigle - Pte de Balaguier
- 60, Pte de Balaguier - Pte des Chavalières
- 61, Pte des Chavalières - Cap Benat
- 62, Cap Benat - Pte de la Rabiou
- 63, Pte de la Rabiou - Pte de Saint-Aygulf
- 64, Pte de Saint-Aygulf - Pte de l'Aiguille
- 65, Pte de l'Aiguille - Cap d'Antibes
- 66, Cap d'Antibes - Cap Ferrat
- 67, Cap Ferrat - Frontière italienne
- 68, Pte de Canelle - Miomo
- 69, Miomo - Moriani
- 70, Moriani - Solenzara
- 71, Solenzara - Pinarello (Ile)
- 72, Pinarello (Ile) - Pte de la Chiappa
- 73, Pte de la Chiappa - Pte Capicciola
- 74, Pte Capicciola - Capo di Feno
- 75, Capo di Feno - Pte de Senetosa
- 76, Pte de Senetosa - Capo di Muro
- 77, Capo di Muro - Pte de la Parata
- 78, Pte de la Parata - Capo Rosso
- 79, Capo Rosso - Punta Palazzu
- 80, Punta Palazzu - Pte de la Revellata
- 81, Pte de la Revellata - Lozari
- 82, Lozari - Pte de Curza
- 83, Pte de Curza - Pte de Canelle

Figure 9 – Découpage du littoral métropolitain en unités morphosédimentaires (MEEM, 2015)

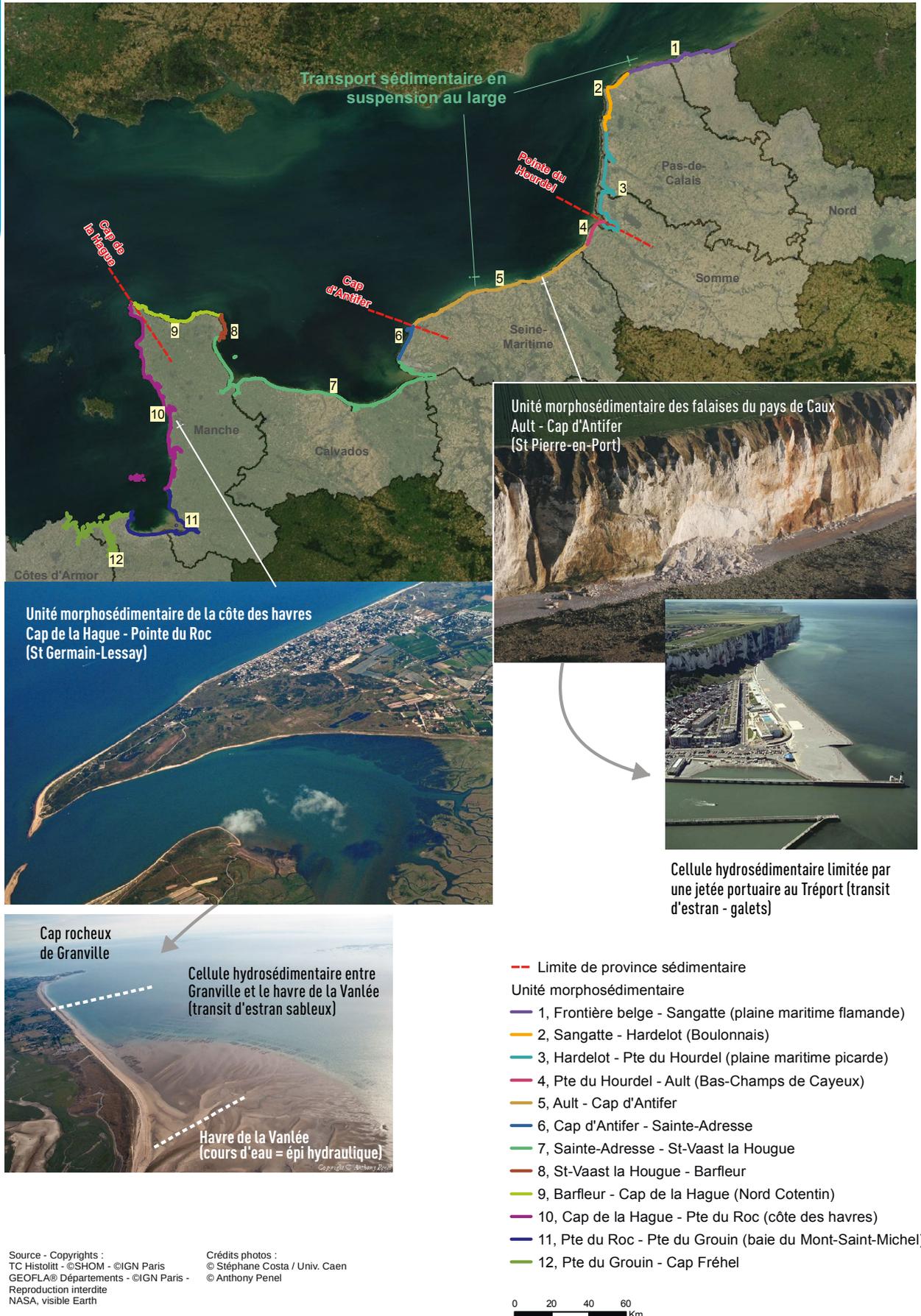


Figure 10 – Exemple de découpage d'unités morphosédimentaires en cellules hydrosédimentaires (MEEM, 2015)

## 2. FACTEURS ET PROCESSUS PHYSIQUES EN JEU

### 2.1. HYDRODYNAMIQUE

#### 2.1.1. Niveaux marins

Les niveaux marins jouent un rôle essentiel dans les évolutions du trait de côte. Ils résultent de l'action combinée de multiples facteurs physiques contribuant aux différentes composantes suivantes, classées dans le Tableau 2 par ordre de vitesse de variation croissante.

**Tableau 2** – Les composantes du niveau marin (hors agitation)

Type de variation du niveau marin	Période caractéristique
Niveau moyen séculaire	Siècle
Marée astronomique	Jour à mois
Marée de tempête (surcotes)	Heures à jours
Ondes basse-fréquence (seiche, wave set-up)	Minutes à heure

Le niveau moyen de la mer comprend une composante séculaire qui fait l'objet de nombreuses études historiques et prospectives dans le cadre des effets du changement climatique. Celui-ci tend en effet à faire monter le niveau moyen de l'ordre de 3 mm/an actuellement. Les rapports du GIEC (Groupement Intergouvernemental pour l'Etude du Climat) fournissent les données globales et régionales pour apprécier l'évolution de ce niveau moyen.

La marée astronomique est la composante variable principale sur les côtes de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique. La variation du niveau de la mer induite par une marée s'appelle le marnage. Ce marnage varie dans le temps, en fonction des cycles astronomiques combinés de la terre, de la lune et du soleil selon les différentes échelles de temps décrites ci-après, et dans l'espace. En France, cette variation temporelle est graduée par le coefficient de marée qui varie sur une échelle de 100 entre 20 (marnage le plus faible) et 120 (marnage le plus fort). Ce coefficient unique pour l'ensemble des côtes françaises est modulé par l'unité de hauteur du lieu qui permet en chaque point du littoral d'estimer le marnage. Une zone soumise à un marnage inférieur à 2 m est qualifiée de microtidale. Elle devient mésotidale pour un marnage compris entre 2 et 4 m et macrotidale lorsque ce marnage dépasse 4 m.

La marée est périodique et quatre échelles de temps principales sont à considérer :

- a)** L'échelle journalières pour laquelle on observe sur nos côtes deux marées par jour (marée semi-diurne) ; la période moyenne principale est de 12,42 h ce qui conduit à un décalage journalier des pleine et basse-mers d'environ une heure par rapport au jour solaire.
- b)** L'échelle des mois lunaires pour les périodes de vives-eaux (coefficient de marée moyen valant 95) et mortes-eaux (coefficient moyen de 45) qui se succèdent environ chaque semaine. On peut ainsi couvrir une large gamme de marées sur une période de 15 jours, appelée cycle de marée, incluant une période de revif (augmentation du marnage) suivie d'une période de déchet (diminution du marnage).
- c)** Le calendrier solaire annuel avec les marées d'équinoxe de mars et septembre qui sont les plus importantes de l'année (coefficients de marée supérieures à 100).
- d)** Le cycle pluri-annuel d'environ 18,6 années qui module les marées exceptionnelles (coefficients entre 110 et 120).

À ces niveaux, prévisibles par l'astronomie, se superposent des surcotes (ou décotes) induites par la météorologie et plus précisément (Idier *et al.*, 2019) :

- Les champs de pression : une baisse de pression statique de 10 hPa peut faire monter le niveau d'eau de 0,10 m. D'autre part, l'avancée rapide des dépressions en Atlantique Nord en direction de l'est peuvent créer une onde amplifiant la surcote sur les côtes européennes,
- Les champs de vent et notamment les vents du large qui poussent une couche d'eau superficielle vers la côte, créant ainsi des surcotes de quelques centimètres à plusieurs mètres en quelques heures dont l'intensité va croître avec la vitesse du vent ainsi qu'avec la rugosité de l'interface air-eau,
- Enfin, ces dépressions génèrent des vagues qui, en déferlant à la côte, transfèrent une large part de leur quantité de mouvement dans la création d'une surcote (ou surélévation; voir paragraphe 2.1.4.) et d'ondes basses fréquence et de courants littoraux. La surcote (wave setup) qui peut se maintenir pendant la durée de la tempête s'additionne aux autres composantes du niveau marin.

On peut également observer localement dans des plans d'eau semi-fermés la génération de seiches côtières de plusieurs minutes à dizaines de minutes de périodes.

Les interactions entre ces différents paramètres ont été passées en revue par Idier *et al.* (2019). Sur la côte Atlantique, l'interaction entre les niveaux de marée et les surcotes jouent un rôle important. Ce sont les niveaux extrêmes les plus hauts qui sont les plus dommageables à la côte (conjonction d'une pleine mer de vive-eau avec une forte surcote) du fait qu'ils permettent une avancée des vagues au plus près du rivage avec en plus un risque de submersion marine.

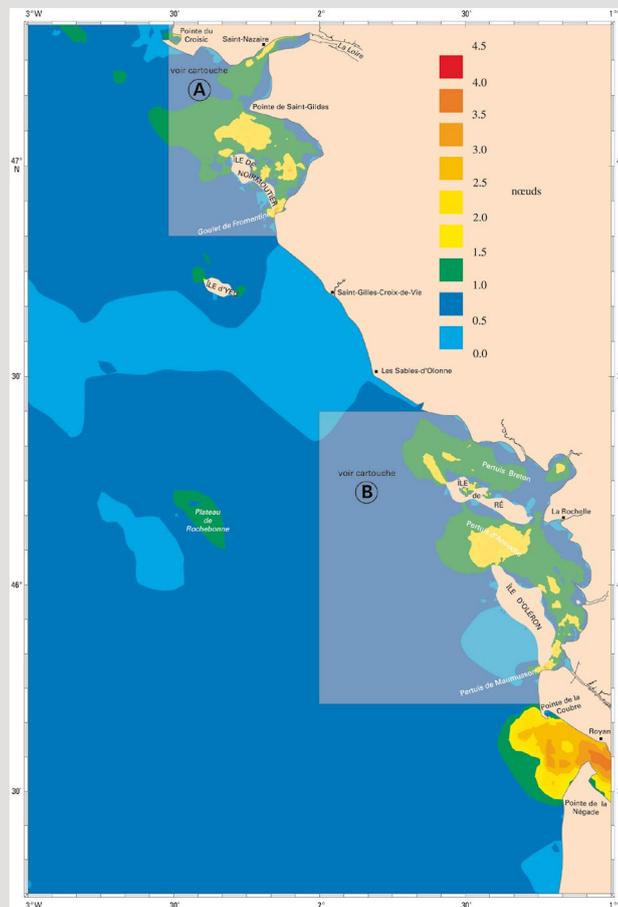
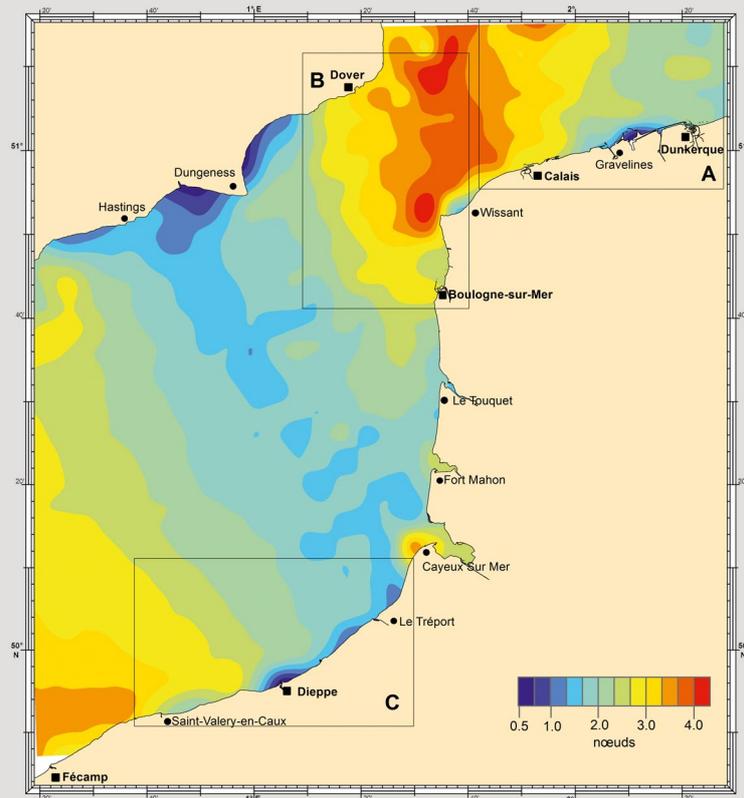
### 2.1.2. Courantologie côtière

En cohérence avec les niveaux marins, la courantologie côtière est dominée par les courants de marée sur la façade Atlantique et Manche Est-Mer du Nord. Ils restent en général faibles dans le golfe de Gascogne, se renforcent à l'entrée de la Manche et sont maximaux au passage de la presqu'île du Cotentin et du Pas de Calais (voir exemples et ordres de grandeur sur la Figure 11).

À la côte, ils sont très affectés par les variations locales de la géométrie du littoral. Ils sont ainsi renforcés dans les zones de communication entre la mer ouverte et les lagunes, havres, baies, bassins et estuaires. Ils sont également accélérés localement aux passages de caps (cap de la Hague par exemple). Ils peuvent également être renforcés au passage de seuils bathymétriques (haut-fonds).

Dans les zones côtières, les courants marins sont affectés par le frottement sur le fond qui est une source de dissipation d'énergie créant une couche limite sur l'ensemble de la tranche d'eau. L'importance de ce frottement dépend de la rugosité des fonds, caractérisée par une hauteur de rugosité  $z_0$  qui dépend non seulement de la nature du fond mais également des formes de fonds (rides, mégarides, dunes) qui causent des déperditions d'énergie supplémentaires du fait de l'effet de trainée derrière ces obstacles (Latteux, 2008).

Ces courants de marée peuvent être modulés par les conditions météorologiques : le vent pousse en effet un courant de surface dans sa direction qui génère un courant sur la verticale, dévié par la force de Coriolis. Les apports d'eau douce créent également des courants de densité dans les estuaires et embouchures avec l'eau douce plus légère qui s'écoule en surface générant un courant d'eau plus salé en profondeur et en sens contraire. C'est pourquoi, les courants en zone côtière ont généralement une structure tridimensionnelle.



**Figure 11** – Cartes de vitesses maximales de courants de marée, en haut : Manche Est – Mer du Nord, en bas : Atlantique (data.shom.fr)

### 2.1.3. Génération des vagues

Les vagues constituent le principal facteur d'évolution des littoraux meubles. Elles sont générées par les champs de vent qui parcourent la planète, dès lors que ce vent entre en contact avec un plan d'eau de quelque dimension qu'il soit. On peut ainsi observer des vagues non seulement dans les océans et les mers côtières mais également dans les lagunes, baies, fleuves, rivières, canaux, lacs et retenues de barrage.

Une vague se caractérise par une hauteur crête à creux, une période, une direction, une longueur d'onde et une célérité (ratio entre longueur d'onde et période). Elles sont générées sur une certaine distance appelée fetch qui varie entre 0,1 et 1000 kilomètres. Leur période varie entre 1 et 30 s et leur hauteur entre 0,1 et 25 m selon la force du vent et la longueur du fetch. Elles forment sur cette distance un système de plusieurs centaines de vagues qui se caractérise par des paramètres statistiques et spectraux estimés à partir de mesures de terrain réalisées en mouillant des houlographes en mer.

L'analyse statistique, ou vague à vague, consiste à identifier les vagues individuelles sur l'enregistrement d'un houlographe par la méthode du passage par le niveau moyen (zero-crossing method), (Figure 12), puis de les classer par ordre décroissant de hauteur et enfin de calculer des paramètres statistiques en suivant les recommandations AIRH/ AIPCN, 1986 (voir aussi Cerema, 2024). Le paramètre le plus utilisé est la hauteur significative des vagues ( $H_{1/3}$ ), calculée comme la moyenne du tiers supérieur de la population classée des vagues.

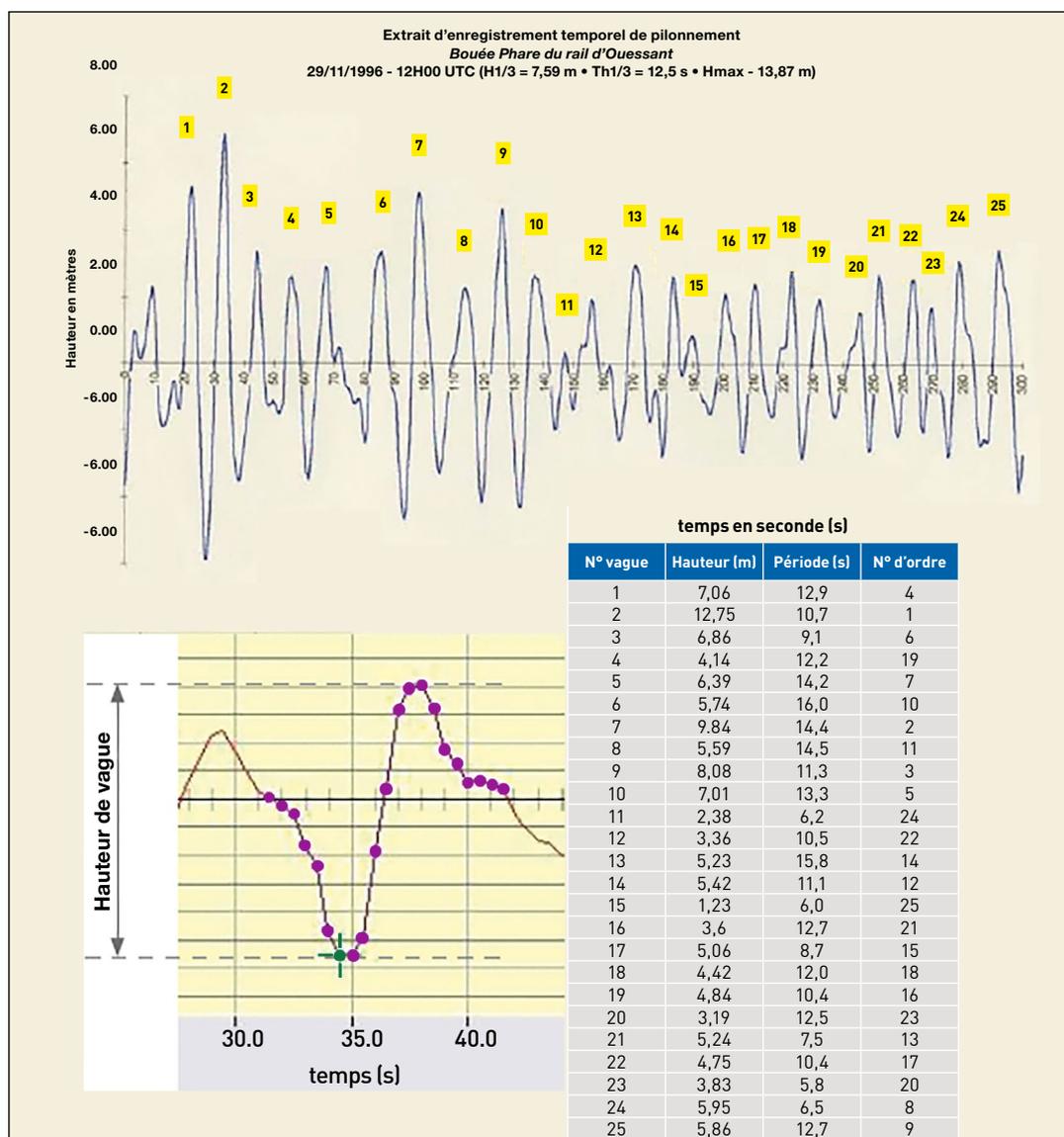
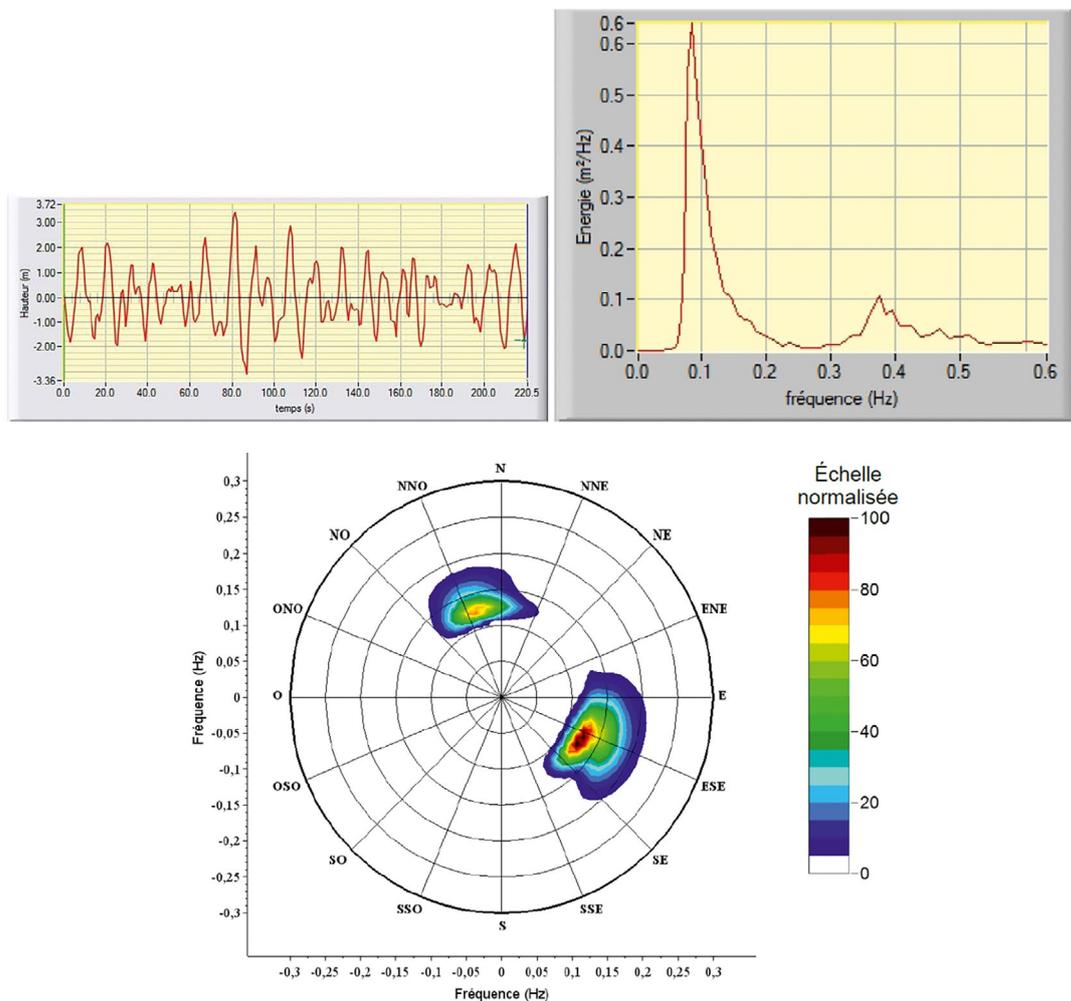


Figure 12 – Exemple d'analyse vague à vague (Cerema, 2024)

Les paramètres spectraux se déduisent du spectre en fréquence et du spectre directionnel obtenus par analyse spectrale des enregistrements (Figure 13). Les plus communément utilisés sont la hauteur significative spectrale ( $H_{m0}$ ), la période de pic du spectre en fréquence ( $T_p$ ), la période moyenne ( $T_{02}$ ) et moyenne énergétique ( $T_{m-10}$  ;  $T_E$ ), la direction de pic ( $Dir_p$ ) et l'étalement directionnel au pic ( $Eta_{lp}$ ). On notera que le spectre d'un état de mer se calcule en fonction de la fréquence des composantes qui est exprimée en Hertz. La période associée correspond à l'inverse la fréquence ; ainsi une fréquence de 0,1 Hz correspond à une période de 10 secondes.

Depuis le début des années 90, les mesures satellitaires permettent d'estimer la hauteur significative spectrale sur la plus grande partie des océans et mers côtières (Arduin *et al*, 2019).

Cette agitation, induite par le vent, va se développer en hauteur de vague, période et célérité tant que cette dernière reste inférieure à la vitesse du vent et que celui-ci garde sensiblement une même direction. L'ensemble des vagues générées prend alors le nom générique de mer de vent. On parle aussi de clapot pour les petits plans d'eau pour lesquels la période des vagues reste inférieure à 4 secondes.



**Figure 13** – Exemple d'analyse spectrale d'un état de mer complexe :  
gauche : signal mesuré ; droite : spectre en fréquence,  
en bas : spectre directionnel (Cerema, 2024)

Lorsque les conditions de vent changent (diminution de la vitesse, changement de direction), les vagues formées continuent à se propager librement en conservant l'énergie acquise qui sera dissipée seulement à l'arrivée sur les côtes par des déferlements massifs. Ces vagues forment alors la houle *stricto sensu* bien que ce terme soit utilisé dans la langue française pour désigner tous les types de vagues.

On désigne, sous le nom d'état de mer, l'agitation présente en un point à un instant donné. Celui-ci peut être constitué d'un ou plusieurs systèmes de vagues, sachant que plusieurs houles, générées à des endroits différents d'un océan et à des périodes différentes, peuvent se retrouver simultanément au même endroit, quelques heures ou quelques jours plus tard en présence ou non d'un vent local. On peut donc observer à un instant donné sur le littoral un état de mer simple (une mer de vent ou une houle) ou complexe et notamment une mer de vent locale et une houle venue de plus loin (état de mer bimodal). Ainsi en Manche, on observe couramment une mer de vent générée par une dépression venue de l'ouest sur laquelle vient se superposer une houle venue de l'Atlantique et générée par la dépression précédente plus au large (Hamm et Gorjux, 2005 ; Mason et Dhoop, 2018).

Les paramètres d'état de mer sont généralement calculés pour l'état de mer complet. Plus récemment, des méthodes de calcul ont été proposées pour séparer les différents systèmes de vagues d'un même état de mer (méthode spectrale) et fournir ainsi les paramètres spectraux pour la mer de vent d'un côté et la houle de l'autre (Portilla *et al.*, 2009 ; Kpogo-Nuwoklo *et al.*, 2015).

#### 2.1.4. Propagation des vagues vers la côte

Au cœur des océans, ces vagues sont générées en surface et elles induisent un mouvement oscillatoire des particules d'eau qui s'amortit avec la profondeur. Il devient nul à une profondeur valant environ une demi-longueur d'onde. À l'approche de la côte, les profondeurs deviennent plus faibles que cette limite et une interaction entre les vagues et le fond marin se développe alors que diminue la célérité des vagues, modifie leur direction de propagation ainsi que leur hauteur sans modifier sensiblement leur période. C'est le phénomène de réfraction qui conduit à différencier localement la hauteur des vagues et leur direction selon la morphologie du site.

Les courants sont également susceptibles d'influer sur les paramètres des vagues lorsque le ratio  $U/C$  ( $U$  : vitesse du courant,  $C$  : célérité de la vague) devient significatif. C'est notamment le cas en zone côtière et aux embouchures de fleuves et de lagunes.

À l'approche de la côte, les vagues déferlent lorsqu'elles arrivent en faible profondeur, c'est-à-dire lorsque la hauteur d'eau devient sensiblement égale à la hauteur de la vague. On entre alors dans la zone de déferlement, très intense du point de vue hydrodynamique et sédimentologique puisque l'énergie dissipée par les vagues dans cette zone est transférée (Figure 14) :

- Vers les hautes-fréquences avec la création de vortex (rouleaux de déferlement) et de turbulence à petite échelle qui remettent localement le sédiment en suspension,
- Vers les basses-fréquences avec le gonflement des ondes basses-fréquences accompagnant les vagues au large qui contribuent au jet de rive, c'est-à-dire à la translation de l'eau vers le haut de la plage au moment de l'arrivée de la vague et à une surélévation locale du niveau de la mer (wave setup),
- Vers les très basses fréquences avec la création de courants littoraux 3D complexes incluant la dérive littorale, les courants sagittaux amplifiés dans les baïnes et les courants de retour près du fond, dirigés de la côte vers le large. Ces courants transportent le sédiment remis en mouvement par la turbulence induite.

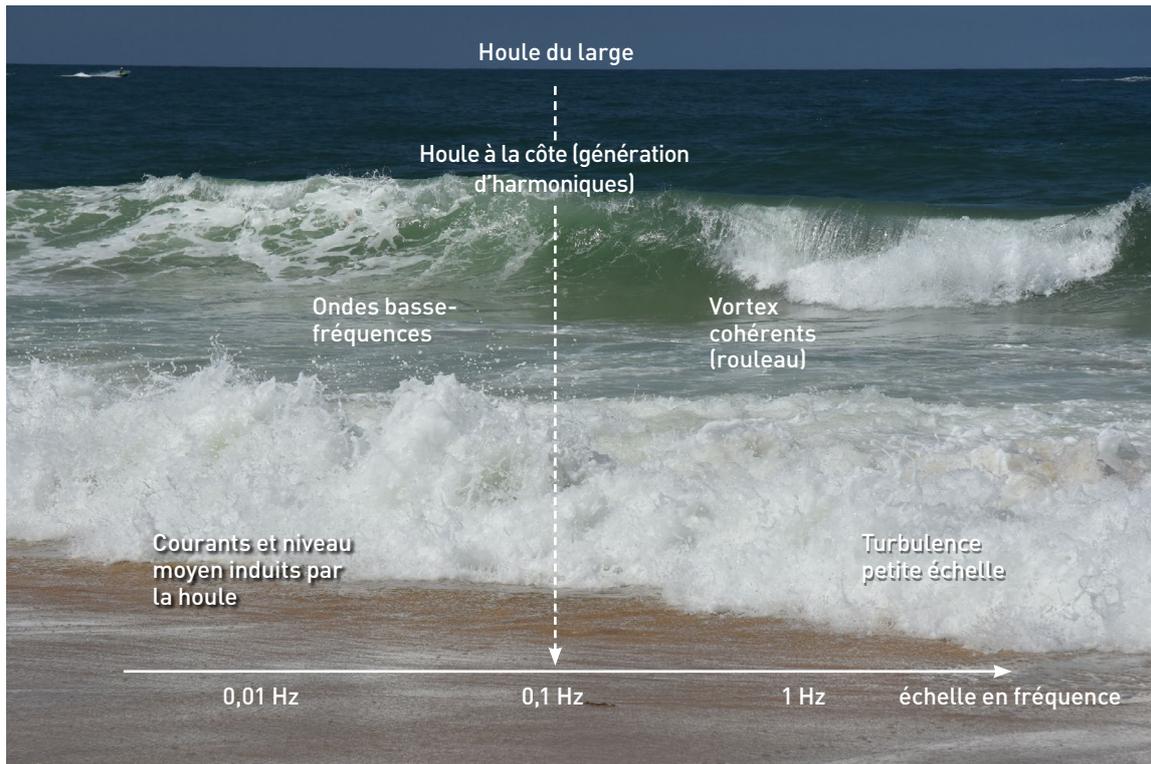


Figure 14 – Processus physiques observables dans la zone de déferlement (Artelia)

## 2.2. SÉDIMENTOLOGIE ET DYNAMIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE

### 2.2.1. Caractérisation des sédiments

On distingue deux grandes catégories de sédiments :

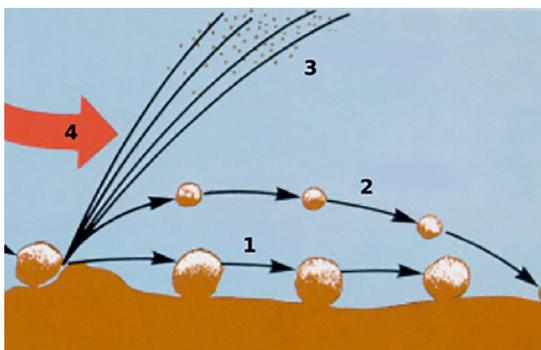
- Les sédiments non-cohésifs, constitués de sables, graviers et galets qui sont transportés sur le fond (transport par charriage), près du fond (transport par saltation ou en suspension pour les sables les plus fins). Ils se caractérisent par leur origine (débris coquilliers ou terrigènes) et leur granulométrie qui fait l'objet d'une normalisation ; on distingue ainsi les sables (entre 0,063 et 2 mm), les graviers (2 à 20 mm) et les galets (20 à 200 mm). Les sables qui constituent une large partie des côtes meubles sont subdivisés en 5 catégories allant des sables très fins (0,063 à 0,125 mm) aux sables très grossiers (1 à 2 mm),
- Les sédiments fins, cohésifs, appelés aussi vases, qui sont constitués d'un mélange de particules d'argiles (inférieures à 2  $\mu\text{m}$ ), de silts (2 à 63  $\mu\text{m}$ ) et de sables très fins (appelés aussi sablons) en des proportions variées. Ils se déplacent en suspension en suivant les mouvements de la masse d'eau et présentent des propriétés cohésives se matérialisant sous la forme de floccs (agglomérats de particules fines) dans la colonne d'eau et de dépôts évolutifs dans le temps sous l'effet des processus de tassement et de consolidation.

*In situ*, on peut aussi observer un mélange de ces deux types de sédiments, ce qui complique les analyses granulométriques effectuées en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur le terrain qui doivent utiliser deux techniques différentes : la diffractométrie laser pour les particules les plus fines et le tamisage pour les plus grossières. Le raccordement des résultats demande alors un ajustement spécifique. Les concessions sont cependant toutes situées sur des fonds sédimentaires non-cohésifs (c'est leur raison d'être) et les vases n'y jouent qu'un rôle marginal.

### 2.2.2. Le transport des sédiments non-cohésifs

Les sables, graviers et galets peuvent être regroupés sous l'appellation de sédiments non-cohésifs. Ils se distinguent en cela des silts et des argiles qui possèdent des propriétés cohésives et forment la vase par floculation (avec également dans certains cas des sablons et de la matière organique).

Les sédiments non-cohésifs, pour leur part, sont transportés individuellement par l'action des courants et des vagues qui génèrent sur le fond une tension de cisaillement (ou vitesse de frottement) qui va d'abord mettre en mouvement et déplacer les particules sur le fond, notamment sous forme de rides mobiles. On parle alors de transport par charriage ou saltation. Lorsque le forçage augmente et que la vitesse de frottement dépasse la vitesse de chute des sédiments, les particules sont alors soulevées par les fluctuations turbulentes de l'écoulement et transportées par celui-ci. On parle alors de transport en suspension (Soulsby, 1997). Du fait de la composition granulométrique des fonds sédimentaires (taille et forme différentes des particules individuelles), toutes les particules ne vont pas se déplacer de la même façon, les plus grossières pouvant rester immobiles ou être transportées par charriage alors que les plus fines seront transportées en suspension.



**Figure 15** – Transport solide sur le fond (1), par saltation (2) et en suspension (3) sous l'effet d'une contrainte de cisaillement (4) (Wikipedia)

### 2.2.3. Le forçage hydrodynamique sur le fond

Le forçage du transport sur le fond à l'interface eau-sédiment est modélisé par une contrainte de cisaillement (ou une vitesse de frottement) qui est une force s'exerçant parallèlement à la pente du fond sur les particules sédimentaires (Figure 16).

Cette contrainte est induite par les vagues et le courant qui peuvent s'exercer séparément ou simultanément. Dans le cas général d'une action simultanée, la contrainte totale est supérieure à la somme des contraintes exercées séparément (Soulsby, 1997).

Elle est la somme de trois contributions liées aux différentes rugosités du fond rencontrées par l'écoulement:

- La contrainte de surface (ou de peau, Le Hir, 2008), localement reliée au diamètre des grains,
- La contrainte de forme induite par la présence de formes de fonds à petite échelle (rides),
- La contrainte de transport solide liée au transfert de quantité de mouvement entre le fluide et le sédiment lorsque celui-ci est mis en mouvement.

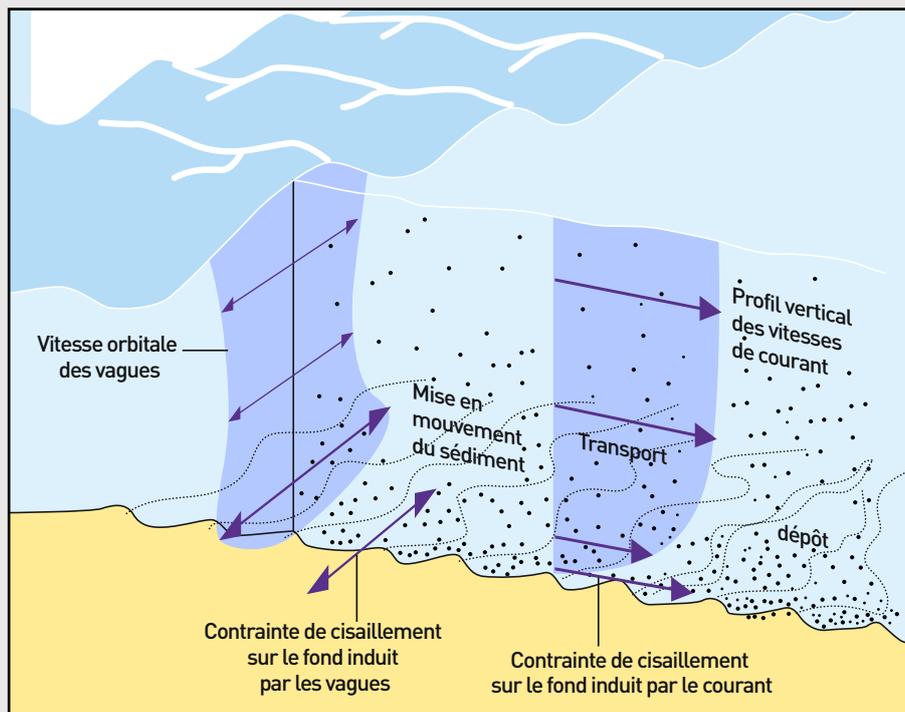


Figure 16 – Contraintes de cisaillement et transport solide (Soulsby, 1997)

Il est important de noter que seule la contrainte de peau régit la mise en mouvement et le transport par charriage du sédiment. Par contre, la contrainte totale exprime la résistance du fond à l'écoulement et est importante pour le calcul hydrodynamique ainsi que pour le profil vertical du transport en suspension.

### 2.2.4. Les conditions de début de mouvement

Les conditions de début de mouvement ont été synthétisées sous la forme du diagramme de Shields reliant le diamètre des grains adimensionnel ( $D^* = 20 d$  (en mm)) à la contrainte de cisaillement adimensionnelle (Figure 17). Soulsby (1997) et van Rijn (2007) fournissent les formules empiriques pratiques à utiliser pour estimer ces différentes contraintes. À noter qu'elles ne s'appliquent pas pour les silts et les argiles du fait de leurs propriétés cohésives.

Usuellement, on observe que la mise en mouvement du sédiment en mer ouverte s'effectue d'abord sous l'effet des vagues, le transport étant assuré ensuite par les courants (la houle soulève et le courant transporte).

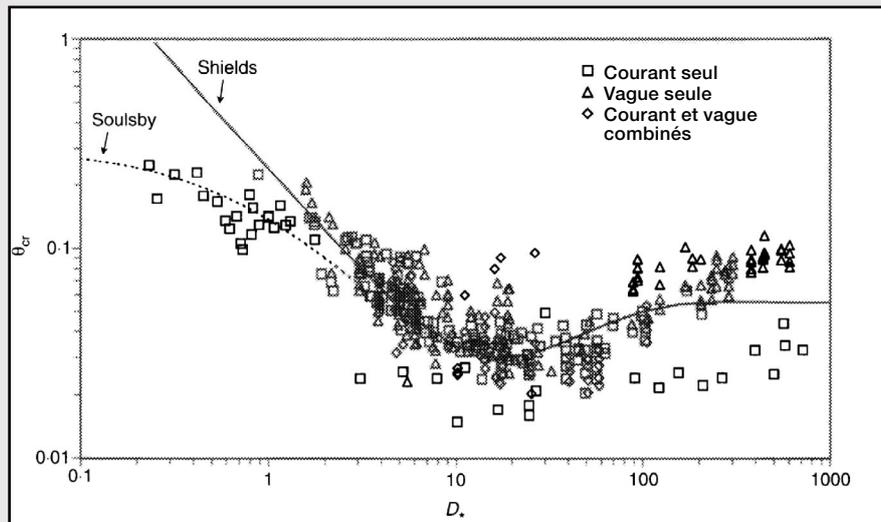


Figure 17 – Contrainte de cisaillement critique de mise en mouvement (Soulsby, 1997)

### 2.2.5. Le transport solide

Il se décompose en un transport par charriage qui est non nul dès que la tension de cisaillement dépasse la tension critique de démarrage et un transport en suspension qui apparaît lorsque la tension de cisaillement dépasse une valeur critique en relation avec la vitesse de chute du sédiment. Les particules sont alors transportées par le courant et soumises à des forces de maintien en suspension (fluctuations turbulentes du courant sur la verticale) et des forces de rappel gravitaire vers le fond (vitesse de chute du sédiment).

Le transport total est la somme du transport par charriage et en suspension. De nombreuses études en laboratoire, complétées par des mesures de terrain, ont permis de mettre au point des formules empiriques plus ou moins complexes de transport total sans passer par la décomposition entre charriage et suspension. La plus utilisée dans le domaine côtier est la formule de Soulsby-van Rijn (Soulsby, 1997). De telles formules supposent que le transport solide est toujours dans la direction du courant ce qui n'est vrai qu'en cas de courant dominant.

Dans le cas général, il peut être nécessaire de séparer charriage et suspension qui peuvent alors avoir des directions différentes. En condition stationnaire, un profil d'équilibre des concentrations de sédiment en suspension peut être calculé par exemple avec la formulation 1DV (1 dimension sur la verticale) de van Rijn (2007) programmée sous le nom TRANSPOR2004. Une réponse instationnaire peut aussi être obtenue en incluant dans le modèle courantologique 3D le transport en suspension du sédiment qui va fournir le profil vertical instationnaire de la suspension. Cela nécessite de connaître une concentration de référence au fond qui peut être estimée par exemple avec la formule de van Rijn (2007).

### 2.2.6. Dynamique hydrosédimentaire côtière

La dynamique hydrosédimentaire traite du transport des sédiments induit par les vagues et les courants en intensité et direction, de leurs conditions de dépôt et d'érosion et des modifications morphologiques des fonds marins et du trait de côte qui en résultent. On distingue habituellement (Cerema, 2018) :

- L'hydrosédimentaire littorale avec la mise en jeu dominante du déferlement des vagues à la côte et de son interaction avec des sédiments non-cohésifs constituant le profil de plage et le trait de côte qui obéit à des processus physiques spécifiques décrits précédemment,
- L'hydrosédimentaire côtière et estuarienne caractérisée par l'interaction entre les courants de marée, le vent, l'agitation, la stratification des eaux en dehors de la zone littorale sur des mélanges de sédiments sables-vases.

Dans la méthodologie proposée ici, la dynamique hydrosédimentaire côtière fait l'objet d'une modélisation séparée dans laquelle les processus purement littoraux ne sont pas représentés. Les progrès récents de la modélisation hydrosédimentaire 3D permettent cependant de commencer à relier ces deux domaines aujourd'hui bien séparés (voir chapitre 7.4.2.).

### 2.2.7. Dynamique d'une côte basse meuble

La dynamique d'une côte basse meuble est dominée par l'action des vagues dans la zone de déferlement qui agit sur les cinq échelles de fréquence décrites précédemment. Cette action déplace constamment les sédiments dans les 3 dimensions conduisant à un déplacement complexe des grains élémentaires.

Dans la méthodologie proposée dans ce guide, le transport sédimentaire sur les côtes basses meubles se modélise selon deux axes géographiques principaux définis localement (MEEDDM, 2010) :

- Le long du trait de côte : c'est le transport longitudinal résumé sous l'appellation transit littoral,
- Perpendiculairement au trait de côte : c'est le transport transversal qui régit notamment les variations quotidiennes et saisonnières du profil de plage.

Il s'agit d'une schématisation, utile dans la majorité des cas pour modéliser la dynamique littorale, qui met en relief l'importance de l'orientation géographique de la côte en relation avec la direction de provenance des vagues. Des vagues normales à la côte vont générer peu de transit littoral mais vont remodeler fréquemment le profil de plage. Des vagues obliques au contraire vont générer un transit littoral important.

Elle trouve cependant ses limites en présence de courants d'arrachement (rip) issus de la dérive littorale longitudinale mais agissant transversalement à la plage. Les morphologies plus complexes comme le développement d'une flèche littorale ou un débouché en mer font également intervenir simultanément le transport solide selon les deux axes.

D'autre part, l'action du vent vient s'ajouter à celle des vagues sur un certain nombre de sites. Ce transport éolien peut agir dans le même sens ou en sens contraire de celui des vagues. Sur les côtes Atlantique et de la Manche, les vents d'ouest dominants transportent le sable de la plage vers la dune ou le long de la plage selon leurs orientations respectives. À l'opposé, un vent de mistral à l'embouchure du Rhône va faire avancer le trait de côte par un transport de sable de la dune vers l'avant-plage (Stive *et al.*, 2002). Ces processus ne sont pas inclus dans la méthodologie proposée car les concessions n'influent pas sur le transport éolien.

### 2.2.8. Dynamique des baies et estuaires

La dynamique des baies (lagunes, bassins) et des estuaires fait intervenir l'action combinée des houles, des niveaux et des courants ainsi que des apports fluviaux d'eau douce et de sédiments. Leur évolution morphologique résulte d'un subtil équilibre entre différents processus fluviaux, côtiers et littoraux. On peut notamment observer des stratifications verticales des courants induits par les interactions eau douce/eau salée ainsi que par la présence d'un système bouchon vaseux / crème de vase qui, dans certains estuaires turbides, concentre les sédiments en suspension avec des teneurs 10 à 100 fois supérieures à ce qui est observé en zone côtière.

De plus, les fonds sédimentaires sont souvent constitués d'une large gamme de sédiments mélangeant sables et vases avec une dynamique de transport, dépôt et érosion spécifique, complexifiant ainsi encore plus la situation.

Le guide du Cerema (2018) détaille dans son chapitre 7 les spécificités de cette dynamique. Dans la méthodologie proposée ici, elle est approchée par la modélisation numérique hydrosédimentaire 3D capable de simuler les différents processus en jeu localement sur le site d'étude (voir paragraphe 7.4.1.).

### 2.2.9. Dynamique d'évolution des falaises

La dynamique d'évolution des falaises est décrite de manière détaillée dans le guide du MEEDDM (2010). Le profil des falaises varie en fonction de la résistance et de la disposition des roches affleurantes mais également selon l'agressivité combinée des processus marins et/ou subaériens. Les vitesses de recul des falaises seront contrastées en fonction de ces différents facteurs. On parlera d'un recul rapide lorsque la vitesse moyenne sur le long-terme est de l'ordre de 0,01 à 0,1 m/an comme, par exemple, les falaises crayeuses du Boulonnais et d'un recul lent, inférieur à 0,01 m/an, comme dans les roches magmatiques et/ou métamorphiques de Bretagne.

D'autre part, il est souvent difficile de déterminer la part respective des agents et processus responsables du retrait (facteurs marins ou subaériens) ainsi que de quantifier les vitesses d'évolution. En effet, l'érosion des falaises est largement discontinue : la préparation du massif rocheux s'effectue sur des pas de temps longs mais le recul (effondrement, glissement) se fait par à-coups.

Dans la méthodologie proposée ici, l'effet sur la dynamique d'évolution des falaises sera uniquement abordé du point de vue de l'attaque de la base de la falaise par les vagues qui est le seul processus pouvant être modifié par la présence d'une concession.

## 2.3. PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'effet principal du changement climatique à considérer ici concerne les risques de submersion marine et d'érosion liés à la remontée du niveau moyen de la mer qui vont faire reculer le trait de côte.

Des incertitudes importantes existent sur la vitesse et l'ampleur de cette remontée du niveau et une approche probabiliste est recommandée lorsque ce phénomène est à prendre en compte (BRGM et Cerema, 2022).

Concernant l'érosion, les premières études (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 (Le Cozannet *et al.*, 2019). Un comité d'experts américains a évalué, trente ans après, cette règle et émis un certain nombre de conclusions sur ses limitations (SCOR-WG89, 1991). D'autre part, la faible intensité de la remontée du niveau de la mer depuis 2000 ans ne permet pas de valider clairement sur le terrain le volet quantitatif de cette règle jusqu'à présent (Le Cozannet, 2016).

Un autre élément à considérer concerne la résilience des littoraux à l'élévation du niveau de la mer. En effet, les géologues ont montré que certaines côtes d'accumulation se sont construites lors de la dernière transgression marine lorsque la mer a poussé devant elle des volumes importants de sédiments qui se trouvaient sur les espaces aujourd'hui submergés. Durant les derniers millénaires, des apports de sédiments de la zone côtière vers la zone littorale ont pu être observés, contribuant ainsi à la résilience du trait de côte (Artelia *et al.*, 2021). Une attention particulière doit donc être portée à la préservation de ce processus de résilience.

Dans la méthodologie proposée ici, nous nous intéresserons uniquement aux possibles modifications des apports de sédiments du large vers la côte, induites par la présence d'une concession de granulats marins. L'élévation du niveau moyen des mers ne sera pas prise en compte car elle tend à faire augmenter la profondeur d'eau au droit des concessions ce qui conduit à réduire les possibles effets sur la propagation des vagues et des courants.

## 3. EFFETS POTENTIELS SUR LE LITTORAL

Le guide méthodologique pour l'élaboration des DOGGM (MEEM, 2016) recense dans son chapitre IV les pressions et effets potentiels de l'extraction de granulats marins. Cela inclut :

- Agents hydrodynamiques : modification de l'hydrodynamisme (agitation et courants), pression de classe 1<sup>21</sup>,
- Interface eau-sédiments : modification de la dynamique sédimentaire, pression de classe 2<sup>22</sup>,
- Fonds côtiers : modification de la dynamique hydrosédimentaire du trait de côte, pression de classe 2.

Ces trois pressions peuvent engendrer, en fonction du milieu récepteur, des effets au niveau de la côte et de la ligne du trait de côte et sont donc à étudier plus particulièrement. Elles ont fait l'objet depuis 40 ans de recherches et d'études (Artelia *et al.*, 2021) qui ont permis de dégager les principaux effets à étudier et d'établir des règles de bases pour l'implantation des sites d'extraction de granulats marins.

### 3.1. MODIFICATION DE L'AGITATION À L'APPROCHE DE LA CÔTE

#### 3.1.1. Par réfraction avec une modulation des hauteurs et des directions

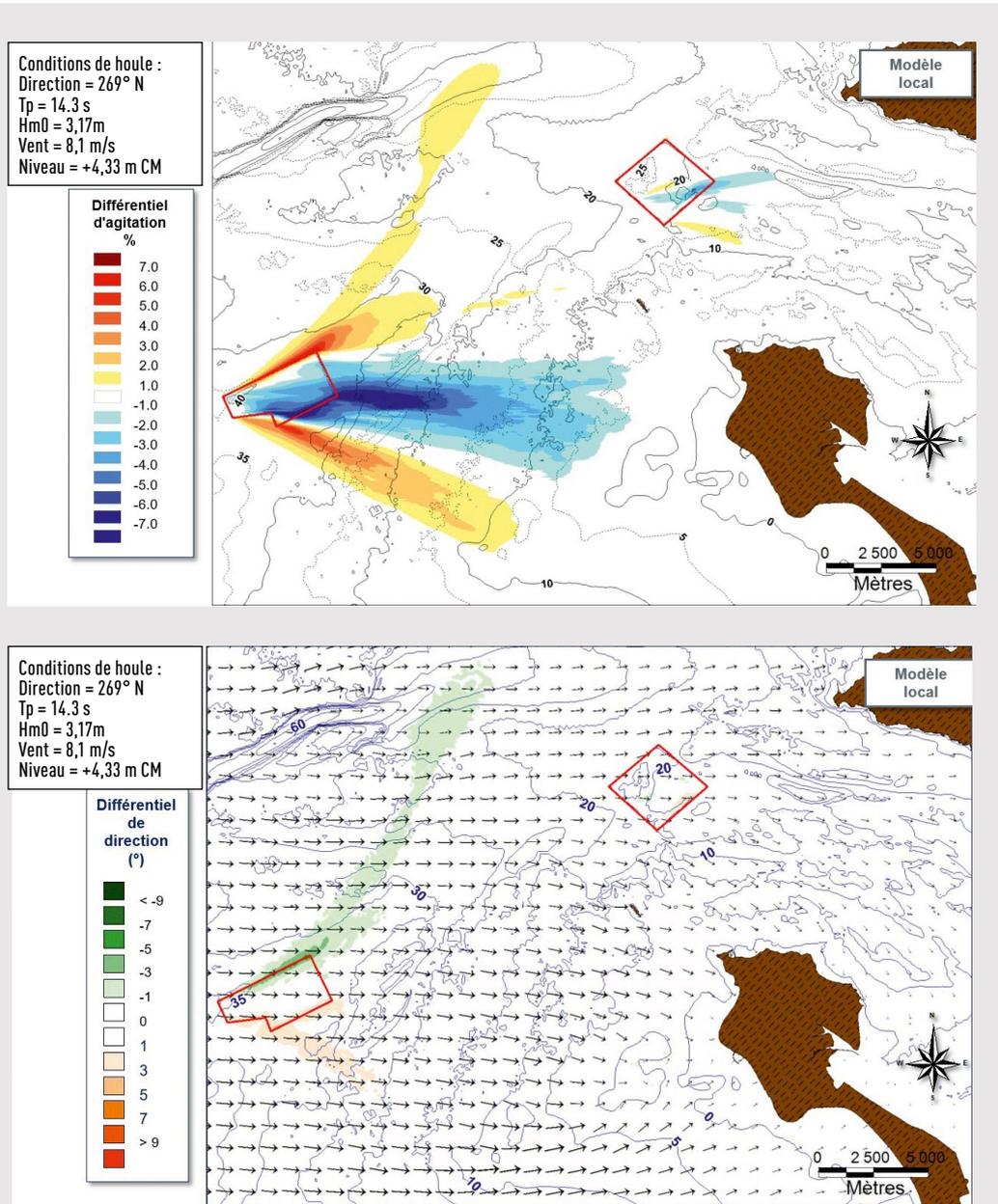
Le creusement engendré par le prélèvement de granulats marins peut modifier les caractéristiques des houles. La célérité des vagues étant supérieure au-dessus de la souille, on observe généralement un déplacement de l'énergie vers les bords de la fosse. La houle est diminuée dans la zone d'ombre du site d'extraction tandis qu'elle est accentuée de part et d'autre de cette zone d'ombre (Cayocca et du Gardin, 2003). Cela entraîne également une modification de la direction de propagation des vagues traversant la souille. La Figure 18 présente un exemple de modification de l'agitation induite par une souille d'extraction.

#### 3.1.2. Par réduction du déferlement (arasement des bancs et barres)

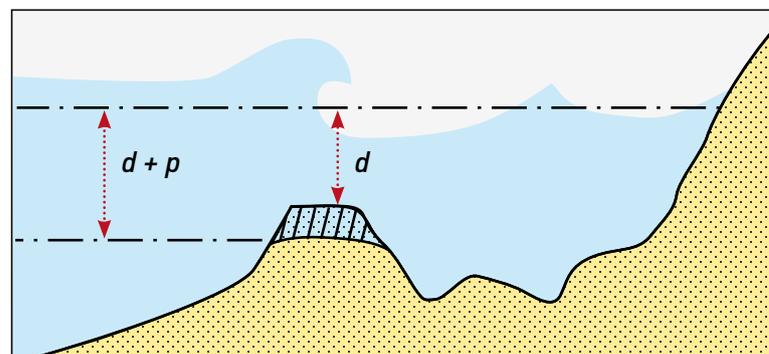
L'exploitation d'un banc peut faire baisser la cote des fonds à son sommet ce qui modifie l'effet différentiel sur les célérités décrit précédemment. De plus, un arasement trop important peut conduire à une réduction sensible des conditions de déferlement des vagues par limitation des profondeurs pouvant aussi mener à une possible érosion du littoral (Figure 19).

**21** Les pressions de classe 1 sont celles qui ont déjà été constatées au cours d'une exploitation et pour lesquelles le niveau de connaissance est suffisant pour permettre leur évaluation avant ou pendant l'exploitation. Leur portée spatiale et leur fréquence dans le temps sont les critères permettant de définir le niveau de précision que doit avoir l'étude d'impact dans leur analyse et les caractéristiques de mesures de gestion à mettre en place (MEEM, 2016).

**22** Les pressions de classe 2 sont les pressions qui ont déjà été constatées au cours d'une exploitation et pour lesquelles le niveau de connaissance, au regard de la littérature et de l'expérience, est faible et ne permet pas de les évaluer dans la pratique (MEEM, 2016).



**Figure 18** – Exemple d'effet d'une souille d'extraction sur l'agitation : en haut : différentiel sur les hauteurs significatives ; en bas : différentiel sur les directions – logiciel SWAN 41.01 (Artelia 2015a)



**Figure 19** – Effet de l'arasement d'un banc de sable sur le déferlement [Cayocca et du Gardin, 2003]

## 3.2. MODIFICATION DU RÉGIME DES COURANTS

### 3.2.1. En mer ouverte

Le creusement d'une souille en mer ouverte a des conséquences directes locales sur les courants traversant cette souille incluant (Latteux, 2008) :

- Une réduction des vitesses dans la souille du fait des plus grandes profondeurs,
- Une accélération à l'amont et à l'aval de la souille dans le sens de l'écoulement,
- Une réduction des vitesses de part et d'autre de la souille du fait de la divergence des lignes de courant.

Ces effets restent assez locaux, les perturbations restant confinées dans un rayon sensiblement égal à la plus grande dimension de la concession.

### 3.2.2. La zone littorale

Les courants de houle, induits par le déferlement des vagues dans la zone littorale des faibles fonds, peuvent être modifiés du fait de la modification de l'agitation à l'approche de la côte et notamment de sa direction incidente. Cela entraînera une modification du transit littoral.

### 3.2.3. Modification de la géomorphologie des bancs

Les courants jouent un rôle important dans les zones de bancs. Sur ces sites, la modification du transport sédimentaire, même en dehors de la zone de déferlement, peut conduire à des effets morphodynamiques locaux et régionaux à étudier spécifiquement. L'arasement d'un banc va faciliter le passage des courants avec une variation de vitesse dans un sens ou l'autre selon l'orientation du banc par rapport à ces courants (Latteux, 2008). Cela va modifier aussi, par compensation, les vitesses situées de part et d'autre de la zone d'extraction. Un exemple typique est l'exploitation des grands bancs de sable dans le sud de la mer du Nord devant les côtes belges, anglaises et néerlandaises (Latteux, 2008).

### 3.2.4. Cas des bassins, lagunes et estuaires

Les courants jouent un rôle important dans les bassins à marée, les lagunes, les estuaires dont la dynamique est souvent fonction d'une loi régionale de continuité des sections mouillées. La modification locale de cette loi peut donc entraîner un effet régional comme par exemple les extractions dans le bassin à marée à l'amont de Nantes qui a perturbé l'ensemble du régime de marée et des courants dans l'estuaire de la Loire jusqu'à son embouchure (Latteux, 2008).

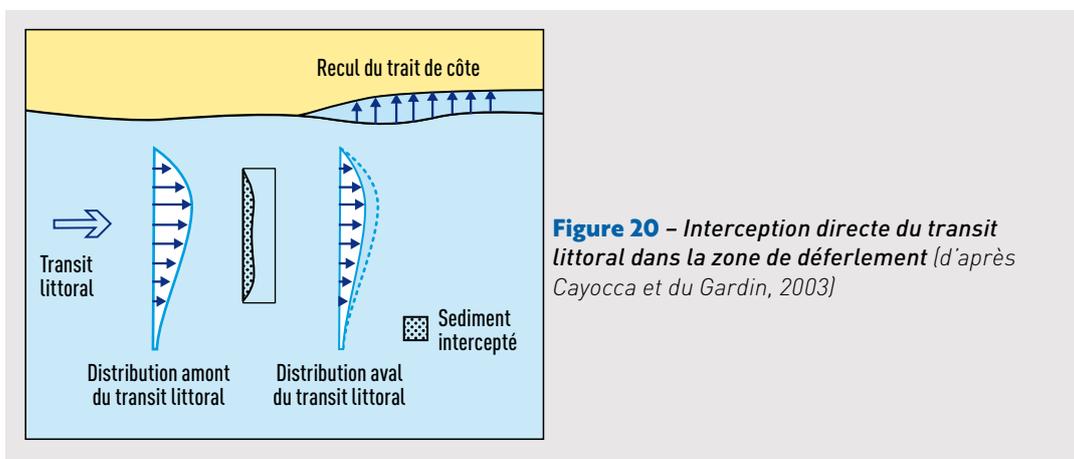
## 3.3. PIÉGEAGE PAR UNE SOUILLE D'EXTRACTION DU TRANSPORT SÉDIMENTAIRE

Le transport sédimentaire induit par les courants et l'agitation peut être affecté par la modification des agents hydrodynamiques. De plus, la présence de la souille d'extraction va alors conduire généralement à un piégeage d'une partie de ce transport selon trois modalités (Cayocca et du Gardin, 2003).

### 3.3.1. Par interception directe du transit littoral dans la zone de déferlement

Le transit littoral sera directement intercepté par la souille d'extraction si celle-ci est située dans la zone littorale. Cette interception va sédimenter notablement dans la souille, engendrer une réduction du transport sédimentaire à l'aval du transit et conduire à une érosion du trait de côte (Figure 20).

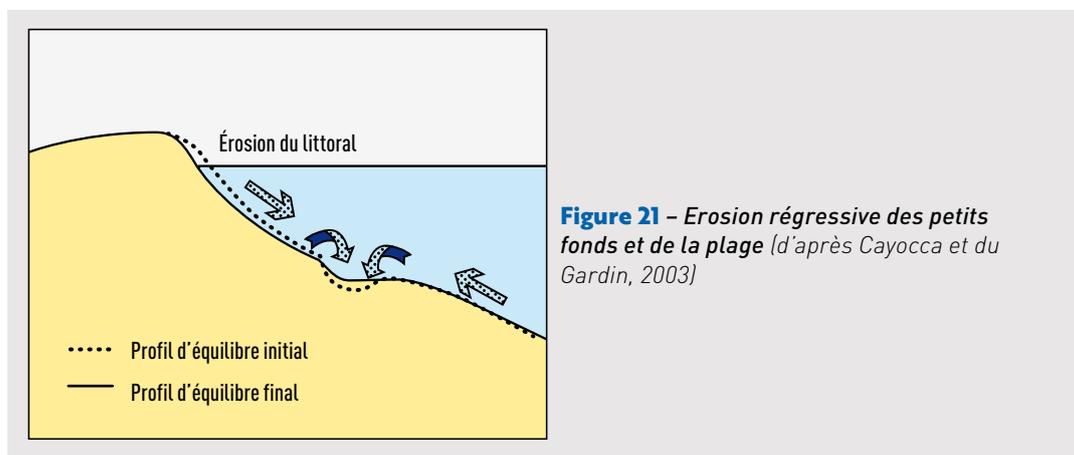
Une telle érosion peut aussi être induite par la perturbation des courants transversaux au trait de côte (courant de retour, courants sagittaux) générés par le déferlement. Un tel effet n'est donc pas acceptable et les recommandations émises dans les années 80 (Migniot et Viguier, 1980 ; Viguier *et al.*, 1984) sur le positionnement des concessions incluent toutes la prescription de les implanter au large de la profondeur de fermeture, au-delà donc de la zone de déferlement.



**Figure 20** – Interception directe du transit littoral dans la zone de déferlement (d'après Cayocca et du Gardin, 2003)

### 3.3.2. Par érosion régressive des petits fonds et de la plage (transport de la côte vers le large)

Dans le cas où les courants de retour perpendiculaires à la plage sont significatifs, on peut observer une sédimentation de la souille par un transport de sédiment dirigé de la côte vers le large (Figure 21). Cet effet, lié à la présence trop proche de la souille d'extraction à l'intérieur de la zone active du déferlement, peut être évité en plaçant la souille au-delà de la profondeur de fermeture.



**Figure 21** – Érosion régressive des petits fonds et de la plage (d'après Cayocca et du Gardin, 2003)

### 3.3.2. Par piégeage du transport en dehors de la zone de déferlement dans le sens de la remontée des sédiments du large vers le littoral

La bonne implantation d'une concession au-delà de la profondeur de fermeture n'est pas suffisante pour éviter tout effet sur le trait de côte. Il existe en effet sur de nombreux sites un transport sédimentaire côtier, en dehors de la zone de déferlement, susceptible de faire remonter du sédiment du large vers la côte. Dans ces conditions, un piégeage trop important de ce transport par la souille peut conduire à une réduction de ces apports vers la côte et donc limiter son alimentation en sédiment.

## 3.4. RÈGLES DE BASE À RESPECTER ET EFFETS RÉSIDUELS

Les études menées dès les années 80 ont conduit à préconiser une première règle de base consistant à implanter les concessions au-delà de la profondeur de fermeture de façon à éviter tout effet direct sur les transports sédimentaires dans la zone de déferlement, aussi bien sur le transit littoral (longitudinal) que sur les mouvements dans le profil de plage.

Ensuite les recommandations ont porté sur les études préalables à réaliser pour vérifier l'absence d'effet indirect résiduel significatif sur la dynamique sédimentaire côtière et le trait de côte. Ces études doivent porter sur les points suivants :

- **Propagation des états de mer**

1. Vérifier que les modifications de la propagation des vagues induites par le projet de concession n'augmentent pas sensiblement les hauteurs significatives de houle à la côte : cette vérification doit se faire pour tous types de côte.
2. Pour les côtes basses meubles, il faut en outre vérifier que les modifications de la direction de propagation des vagues ne modifient pas sensiblement le transit littoral à la côte. Dans les cas où des différences significatives apparaissent, l'analyse doit alors se poursuivre pour estimer les effets sur l'évolution du trait de côte.

En présence de courants de marée significatifs, susceptibles d'être eux-mêmes modifiés localement par la présence de la concession, les simulations numériques de propagation des états de mer doivent tenir compte de leur interaction avec les vagues.

- **Transport sédimentaire côtier**

Pour les côtes basses meubles, vérifier que le transport sédimentaire côtier induit par la houle et les courants ne modifie pas sensiblement les possibles apports de sables du large vers la côte.

- **Morphodynamique des bancs et des embouchures**

Dans le cas où le projet de concession se situe sur un banc sédimentaire, dans une embouchure d'estuaire ou de lagune côtière, vérifier que le projet ne modifie pas sensiblement la morphologie côtière dans un sens pouvant conduire à aggraver les effets sur la propagation des états de mer ou le transport sédimentaire côtier.

# LES TYPES DE MODÉLISATION

Nous décrivons dans cette seconde partie du guide un certain nombre de modélisations utilisables pour étudier l'effet d'un projet de concession sur le trait de côte. Il n'existe, en effet, pas de modèle unique capable de simuler à une échelle spatio-temporelle régionale l'ensemble des processus physiques décrits en première partie. Il va donc s'agir d'assembler des modélisations spécialisées que nous avons classées en quatre catégories :

- Les modèles de génération et propagation des états de mer,
- Les modèles courantologiques<sup>23</sup> (niveaux et courants),
- Les modèles de transport solide en distinguant le transit littoral et le transport sédimentaire côtier,
- Les modèles morphodynamiques qui se subdivisent eux-mêmes en 4 sous catégories : évolution du trait de côte dominée par le transit littoral, équilibre dynamique du trait de côte, évolution d'un profil de plage et morphodynamique 3D.

Ces modèles couvrent un domaine d'application très large et nous nous sommes efforcés d'aller à l'essentiel sans entrer dans tous les détails. Cette seconde partie fournit une description synthétique du fonctionnement de ces modèles en détaillant plus spécialement les calculs de transit littoral et d'évolution du trait de côte. Les applications pratiques sont décrites ensuite dans la troisième partie du guide.

## 4. GÉNÉRATION ET PROPAGATION DES ÉTATS DE MER DU LARGE VERS LA CÔTE

La simulation numérique des états de mer à l'échelle régionale et leur propagation du large vers la côte constitue la modélisation de base pour évaluer l'effet d'un projet de concession sur le trait de côte. Elle peut être accompagnée d'une modélisation courantologique si les courants jouent un rôle significatif sur le site d'étude (voir chapitre 5).

C'est une modélisation aujourd'hui bien banalisée grâce notamment à la diffusion de logiciels libres industrialisés. Elle s'effectue essentiellement par des modèles spectraux dit de troisième génération (MEEDDM, 2010) qui prennent en compte la plupart des phénomènes impliqués dans la génération et la propagation des états de mer du large jusqu'à la côte (modèles régionaux). Ces phénomènes sont complexes et les équations mises en œuvre par ces modèles spectraux comportent un certain nombre d'équations empiriques paramétrant l'interaction atmosphère/océan pour la génération des vagues et leur dissipation sous l'effet du moutonnement, du frottement sur le fond et du déferlement bathymétrique. Le choix des paramètres empiriques est une source d'incertitudes. Hamm et Gorjux (2005) ont notamment montré que l'absence de prise en compte de la stabilité thermique de l'interface air/eau pouvait conduire à des résultats de calcul pouvant s'écarter sensiblement de la mesure.

Les interactions vague-courant-bathymétrie font également l'objet d'hypothèses simplificatrices qui peuvent conduire à des écarts (voir chapitre 5.4.).

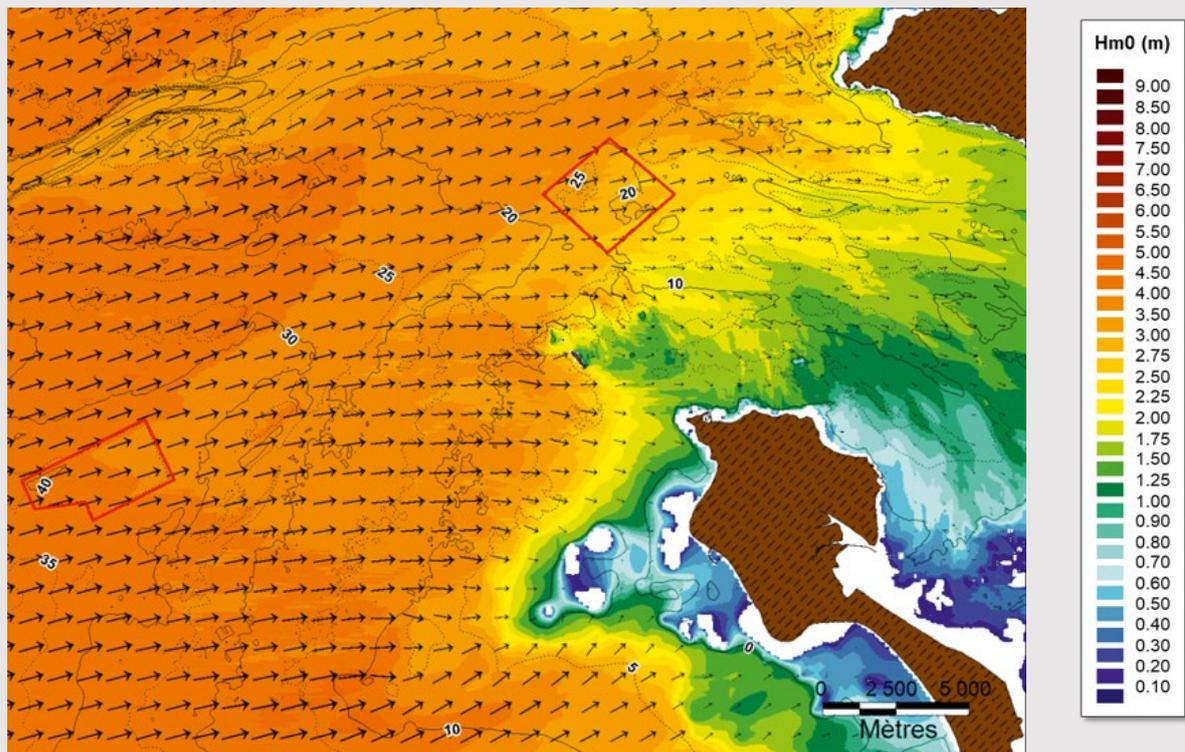
Le guide du MEEDDM (2010, pages 176 à 183) fournit un panorama des principaux logiciels utilisables dans ce cadre et qui reposent soit sur un maillage régulier (ou structuré) ou non-structuré (maillage triangulaire généralement). Il s'agit des logiciels suivants : STWAVE, SWAN, MIKE 21 NSW et SW et TOMAWAC. On peut ajouter à ce panorama du MEEDDM le logiciel WavewatchIII (WWIII) développé en partie en France et utilisé notamment pour construire

<sup>23</sup> Certains auteurs utilisent le terme « modèle hydrodynamique » pour caractériser ces modèles. Dans le présent guide, l'expression « modèle hydrodynamique » ou « l'hydrodynamique » recouvre la combinaison d'un modèle courantologique et d'un modèle de génération/propagation des états de mer.

la base de données HOMERE (Maisondieu *et al.*, 2017) ainsi que la base BOBWA (Charles *et al.*, 2012). Dans le domaine de la recherche on peut citer le logiciel BOSZ (Varing *et al.*, 2021) qui résout les équations régissant les fluctuations du niveau de l'eau pour chaque vague individuelle.

Ces modèles fournissent donc les caractéristiques spectrales des états de mer telles que la hauteur significative spectrale ( $H_{m0}$ ) et les périodes associées. Ils ne donnent, par contre, pas d'indication sur la distribution statistique des vagues ( $H_{1/3}$ ,  $H_{2\%}$ ,  $H_{max}$ ). Les résultats sont généralement illustrés par une ou plusieurs épures de réfraction donnant la distribution spatiale des hauteurs significatives et des directions sur une carte bathymétrique simplifiée (Figure 22).

On peut aussi, dans certains cas, réduire la complexité de la modélisation en faisant l'hypothèse de l'invariance du profil de plage et des fonds le long du littoral sur une certaine distance (plage cylindrique). Dans ces conditions, les équations deviennent unidimensionnelles (1D), uniquement fonction de la distance au rivage. On peut ainsi calculer plus facilement la propagation des vagues du large à la côte ainsi que le courant littoral qui en résulte (voir détails au chapitre 5.3).



**Figure 22** – Exemple d'épure de réfraction pour une houle N260,  $H_{m0} = 4m$ ,  $T_p = 12s$  – logiciel SWAN 41.01 (Artelia, 2015a)

## 5. MODÉLISATION COURANTOLOGIQUE : NIVEAUX ET COURANTS

La modélisation courantologique (niveaux et courants), quelquefois appelée modélisation hydrodynamique, ne fournit pas de résultats exploitables en tant que tels pour estimer l'effet d'une concession sur le trait de côte. Elle constitue néanmoins un élément indispensable d'analyse des sites d'étude pour lesquels les courants hors zone littorale peuvent significativement influencer sur le transport sédimentaire côtier, voire sur la propagation des vagues.

On distingue 3 niveaux de complexité spatiale de ces modèles :

1. Les modélisations 3D qui fournissent le champ de courant horizontal en 3 dimensions dans l'espace,
2. Les modélisations 2D horizontales (2DH) qui fournissent le courant moyen intégré sur la verticale,
3. Les modélisations 1D le long d'un profil de plage.

### 5.1. MODÉLISATION 3D

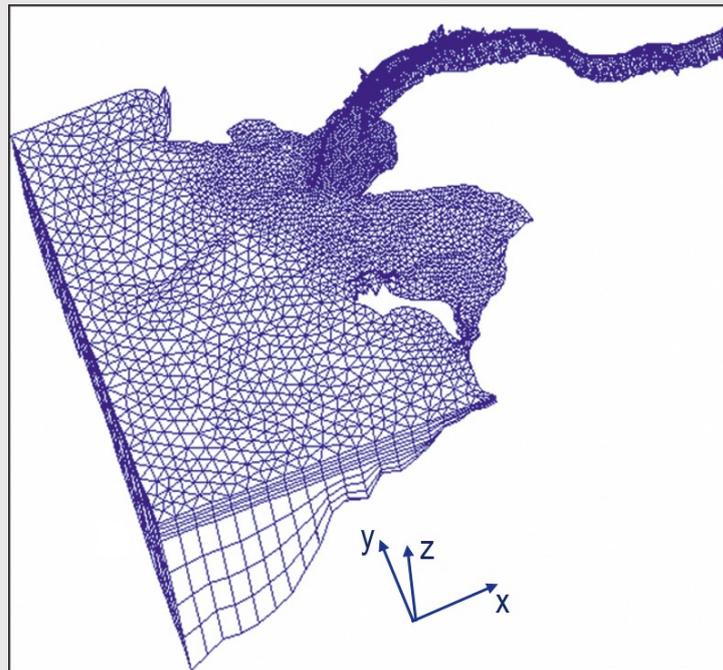
La modélisation numérique tridimensionnelle (3D) des courants (et niveaux associés) est maintenant parfaitement accessible grâce aux progrès continus de la puissance des calculateurs. Les fermes (clusters) de calcul permettent notamment de profiter de la programmation parallélisée des principaux logiciels disponibles, ce qui réduit grandement les temps de calcul.

Elle peut accompagner la modélisation de la propagation des vagues qui peut être couplée ou non au calcul courantologique selon 3 modalités :

- Découplage : Pas d'échange de données entre les deux calculs qui s'effectuent indépendamment,
- Couplage faible : le forçage par les courants est intégré dans le modèle de propagation des états de mer, ou bien le forçage par les tensions de radiation induites par les vagues déferlantes est intégré dans le modèle 3D courantologique,
- Couplage fort : les deux logiciels échangent leurs forçages respectifs jusqu'à convergence des calculs.

Le choix du couplage dépend de la problématique locale identifiée au préalable (comme précisé dans la partie C du guide) et de la stratégie de modélisation mise en place pour y répondre.

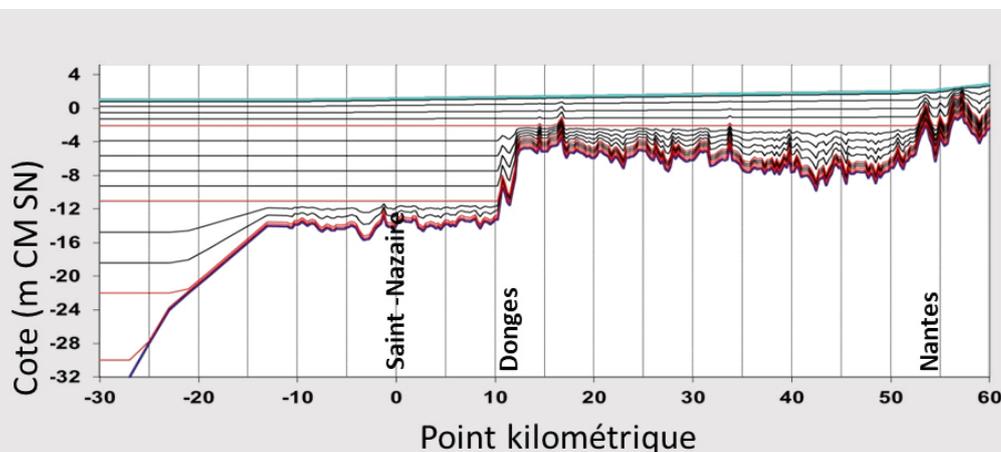
Les équations courantologiques résolues sont les équations générales de la mécanique des fluides incompressibles dites de Navier-Stokes qui couvrent les trois dimensions spatiales et la dimension temporelle. Les écoulements en zone côtières étant turbulents, ils sont moyennés en utilisant l'hypothèse de Reynolds (Hervouet, 2007). Leur résolution numérique nécessite de les discrétiser sur un maillage en 3 dimensions (Figure 23) qui se construit en zone côtière en différenciant le plan horizontal et la cote verticale.



**Figure 23** – Exemple d'un maillage non-structuré en 3 dimensions de l'estuaire de la Loire et de son embouchure (Walther et al., 2012)

Le maillage horizontal peut être régulier ou non-structuré et couvrir des centaines de kilomètres carrés. Le maillage vertical doit, de son côté, s'adapter à des hauteurs d'eau allant de l'ordre du décimètre à la centaine de mètres. Il est généralement conçu de façon à obtenir une plus grande résolution :

- Près du fond pour calculer plus précisément l'interaction entre les écoulements et les fonds dans la couche limite,
- En surface pour la modélisation de l'interface écoulement-atmosphère (cisaillement de la surface libre par le vent, processus de déferlement des vagues),
- Un exemple de maillage vertical est fourni sur la Figure 24.



**Figure 24** – Maillage vertical du modèle de l'estuaire de la Loire et de son embouchure (Walther et al., 2012)

La résolution de ces équations nécessite d'une part des équations de fermeture empiriques (données terrain) sur la modélisation de la turbulence ainsi que sur les interfaces du modèle avec le fond et l'atmosphère et d'autre part un forçage adéquat comme cela est détaillé ci-après :

- La composition géologique du fonds marin ainsi que les formes de fonds créent une hauteur de rugosité  $z_o$  à définir localement à partir d'observations de terrain (voir chapitre 5.5). Dans la colonne d'eau, la turbulence doit être traitée par des équations adéquates aussi bien horizontalement, pour simuler correctement les zones tourbillonnaires, que verticalement, notamment pour traiter le cas des stratifications induites par le vent sur la verticale, la température et la salinité. Hervouet (2007) fournit des recommandations pratiques sur les équations à utiliser en fonction du type d'écoulement à modéliser au chapitre 2 de son livre,
- Le forçage, de son côté, concerne la surface libre (forçage par le vent et la pression atmosphérique notamment), la colonne d'eau (gradients de salinité, action de la houle déferlante) ainsi que les limites amont et aval du modèle (forçage par la marée et les surcotes, débits des fleuves).

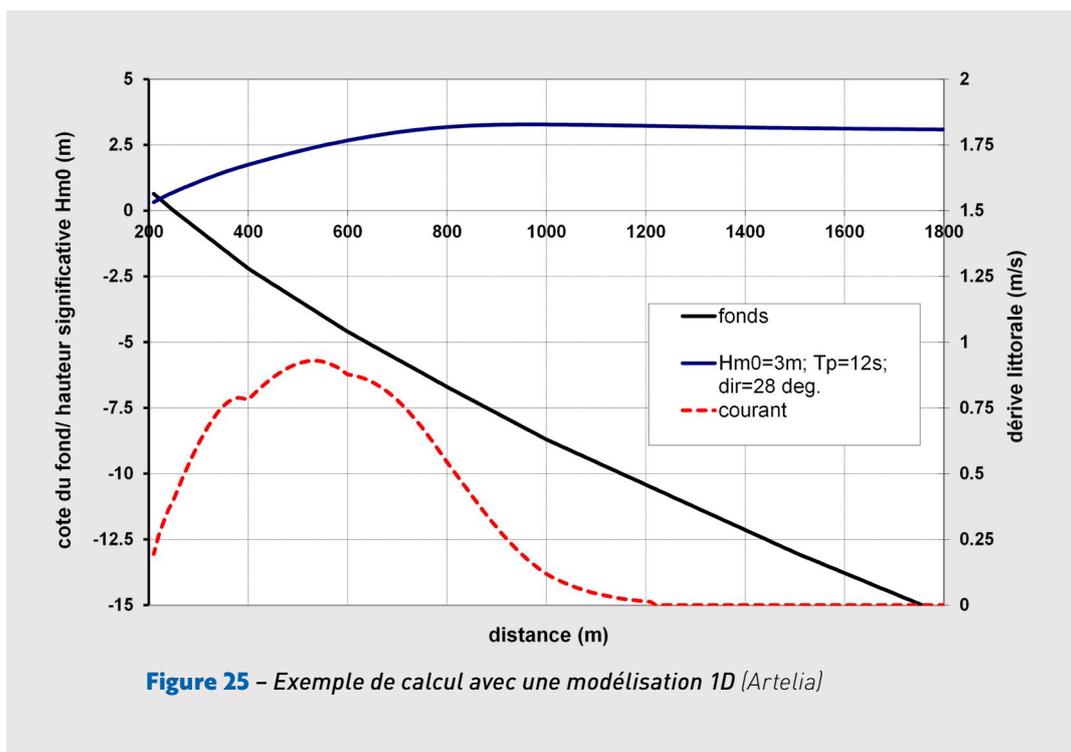
Le guide du MEEDDM (2010, pages 176 à 183) fournit un panorama à jour des principaux logiciels utilisables dans ce cadre. Il s'agit des logiciels DELFT3D-flow, MIKE2I HD, MIKE 3 HD, TELEMAC2D ET TELEMAC 3D. On peut ajouter à ce panorama MARS3D (Lazure et Dumas, 2008), XBEACH (Roelvink et al., 2009), CROCO (Warner et al., 2008) et SCHISM (Zhang et al., 2016).

## 5.2. MODÉLISATION 2DH (INTÉGRATION SUR LA VERTICALE)

Les équations 3D peuvent être intégrées sur la verticale lorsque les effets de stratification verticale sont négligeables. On obtient alors les équations de Saint-Venant. Les principes et modalités pratiques de mise en œuvre sont les mêmes que pour une modélisation 3D. Historiquement très utilisés au 20<sup>ème</sup> siècle lors de la première phase de développement de la modélisation numérique côtière, ils sont actuellement remplacés de plus en plus par la modélisation 3D qui représente de façon plus réaliste la courantologie près du fond notamment en cas de forçages météorologiques qui créent une stratification des courants sur la verticale.

## 5.3. MODÉLISATION 1D (PROFIL DE PLAGE)

La modélisation numérique la plus simple du courant littoral fait l'hypothèse de l'invariance du profil de plage le long du littoral sur une certaine distance (plage cylindrique ou profil uniforme le long du littoral). Dans ces conditions, les équations de l'hydrodynamique peuvent se simplifier en ne conservant qu'une seule dimension spatiale, le long du profil de plage, et en ne traitant que des états stationnaires (un seul état de mer). On peut ainsi calculer la propagation des vagues et la dérive littorale induites par le déferlement. On obtient alors les conditions de houle à la côte et la répartition de la dérive littorale le long du profil de plage (Figure 25). Ces logiciels ne sont pas commercialisés car facilement développables. Les équations de base ont été publiées par Thornton et Guza (1986), Goda et Watanabe (1991) et améliorées notamment par Reniers et Battjes (1997), Feddersen et Guza (2003) et Goda (2006).



#### 5.4. INTERACTIONS HOULE-COURANT-BATHYMÉTRIE

Les modélisations courantologiques et de propagation d'états de mer décrites précédemment sont issues d'équations mathématiques séparant les deux types de processus physiques tout en introduisant des termes d'interaction entre eux particulièrement complexes à mettre en œuvre dans les modèles (Bennis, 2017) et qui font toujours l'objet actuellement de travaux de recherche<sup>24</sup>.

Historiquement, l'effet des courants sur les vagues a été introduit dans l'équation cinématique (effet Doppler) et l'équation dynamique pour rendre compte de processus clairement visibles aux embouchures soumises à des courants de marée significatifs. Ainsi, en flot, lorsque les courants et les vagues vont dans la même direction, les vagues augmentent leur longueur d'onde apparente et leur hauteur diminue ; à l'inverse, en jusant, les longueurs d'onde raccourcissent et les hauteurs augmentent possiblement jusqu'au déferlement ou au blocage des vagues lorsque la vitesse du courant devient supérieure à la célérité de groupe des vagues (Suastika, 2004). Ces effets deviennent visibles lorsque le rapport vitesse du courant / célérité de la vague devient supérieur à 5 %.

Dans le cas de l'effet des vagues sur les courants, les vagues contribuent à la génération de la dérive littorale lors du déferlement et ce processus est modélisé par l'intermédiaire des contraintes de radiation. Les gradients de courants jouent également un rôle important dans la modulation des vagues.

<sup>24</sup> Voir par exemple les projets de recherche MORHOC'H 1 & 2 en cours

<https://www.mio.osupytheas.fr/fr/impact-societal-et-technologie/morhoch-2-modelisation-de-linteraction-de-la-houle-et-dun-courant>

Les recherches récentes ont mis en évidence d'autres interactions (Bennis, 2017) telles que :

- L'augmentation non-linéaire de la contrainte de cisaillement courant + houle sur le fond (Soulsby, 1997),
- L'effet des houles sur la contrainte de cisaillement en surface induite par le vent et forçant le modèle de courant,
- Le profil de courant et de turbulence verticale modifiés par la présence des vitesses orbitales,
- La dispersion horizontale notamment dans la zone de déferlement,
- La dérive de Stokes induite par la houle,
- Le rouleau de déferlement.

D'autre part, dans la zone littorale, la mise en équations de ces différents processus n'est pas simple et doit donner lieu à des choix discutés actuellement par les chercheurs (Bennis, 2017).

Sur les sites pour lesquels les courants de marée sont significatifs, il est recommandé que la base de la modélisation comporte un module de propagation des états de mer et un module de simulation courantologique 2DH ou 3D qui peuvent être combinés selon 3 possibilités :

1. On peut intégrer l'effet des courants dans la propagation des vagues lorsque ceux-ci sont suffisamment importants pour modifier la propagation,
2. On peut aussi intégrer l'effet des vagues sur les niveaux et les courants dans la zone littorale pour simuler la dérive littorale et la surélévation de niveau due aux vagues. Cela implique un raffinement important du maillage de la zone littorale,
3. Enfin, le couplage complet avec prise en compte simultanée des deux interactions précédentes constitue la modélisation la plus complète.

Ces trois niveaux croissants de complexité ont un coût notamment de puissance informatique à mettre en œuvre ainsi que de délais de calcul, ces deux paramètres évoluant au fil des années avec une tendance à l'augmentation des puissances de calcul et une diminution des délais.

## 5.5. LES RUGOSITÉS DE FOND

Les tailles de maille utilisées dans les modèles courantologiques ne permettent pas de prendre en compte les figures sédimentaires de faible emprise dont la longueur d'onde est inférieure à la taille de la maille. Leur action sur l'écoulement est alors prise en compte par l'intermédiaire d'une hauteur de rugosité de fond  $z_o$  à définir localement à partir d'observations de terrain. En pratique, les formules utilisent le coefficient de Nikuradse  $k_s$  qui vaut environ  $33 z_o$ . Soulsby (1997), repris par Latteux (2008, page 35) fournit les valeurs caractéristiques de  $z_o$  couramment utilisées dans les modélisations. On peut également utiliser les formules proposées par van Rijn (2007).

## 6. PRINCIPES DE LA MODÉLISATION HYDROSÉDIMENTAIRE : LE TRANSPORT SOLIDE

### 6.1. MODÉLISATION DU TRANSPORT SOLIDE EN ZONE CÔTIÈRE

Le transport solide en zone côtière est distingué ici de celui en zone littorale, discuté au paragraphe suivant, en cohérence avec les définitions des zones littorale et côtière fournies aux paragraphes 1.2.2. et 1.2.3. En effet, le transport solide en zone littorale est d'un ou deux ordres de grandeur plus important qu'en zone côtière située plus au large. C'est donc lui qui règle l'évolution du trait de côte à court et moyen terme.

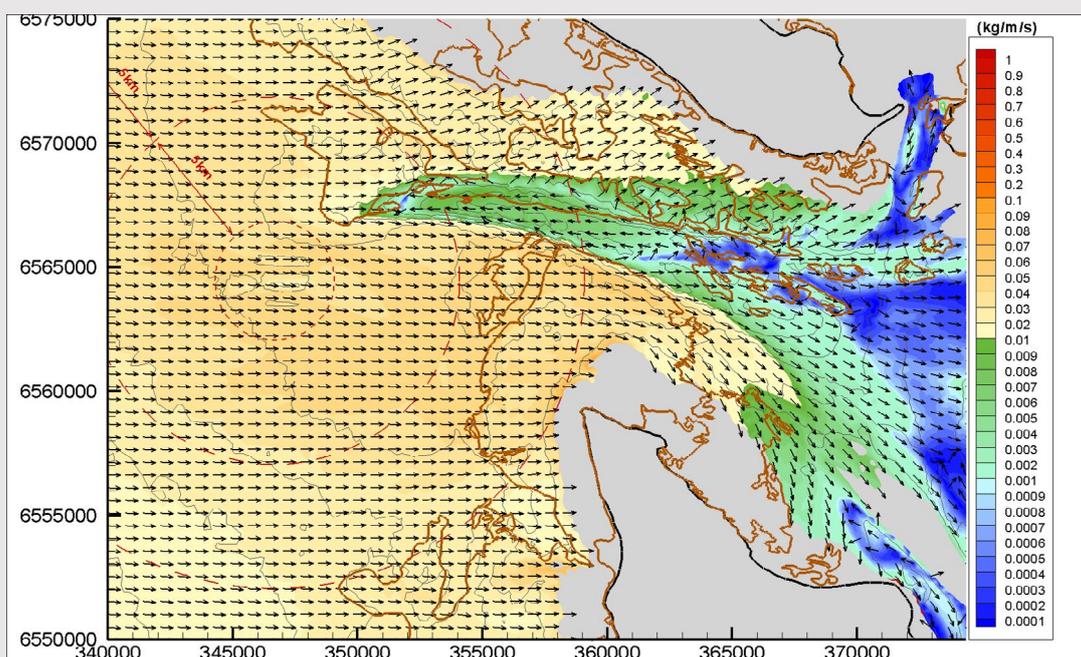
Les apports de sable depuis la zone côtière vers le trait de côte ne sont visibles que sur le long terme à l'échelle de siècles ou de millénaires comme l'ont montré différentes recherches spécifiques développées par les géologues (Cowell *et al.*, 2000). La modélisation actuelle en ingénierie ne permet pas de calculer correctement ces effets du transport solide côtier sur l'évolution du trait de côte à ces échelles de temps longues. C'est la raison pour laquelle nous proposons dans ce guide de limiter la modélisation aux effets d'un projet sur le transport solide côtier résiduel annuel qui sont ensuite à interpréter dans le contexte particulier de chaque projet.

Le transport solide en zone côtière est induit par les vagues et les courants comme détaillé au chapitre 2.2.2.. Sa modélisation s'appuie donc sur une modélisation préalable d'une part de la propagation des vagues et d'autre part de la courantologie (niveaux, courants). La connaissance en tout point d'un maillage de ces forçages permet d'appliquer les formules décrites précédemment (chapitre 2.2.2.).

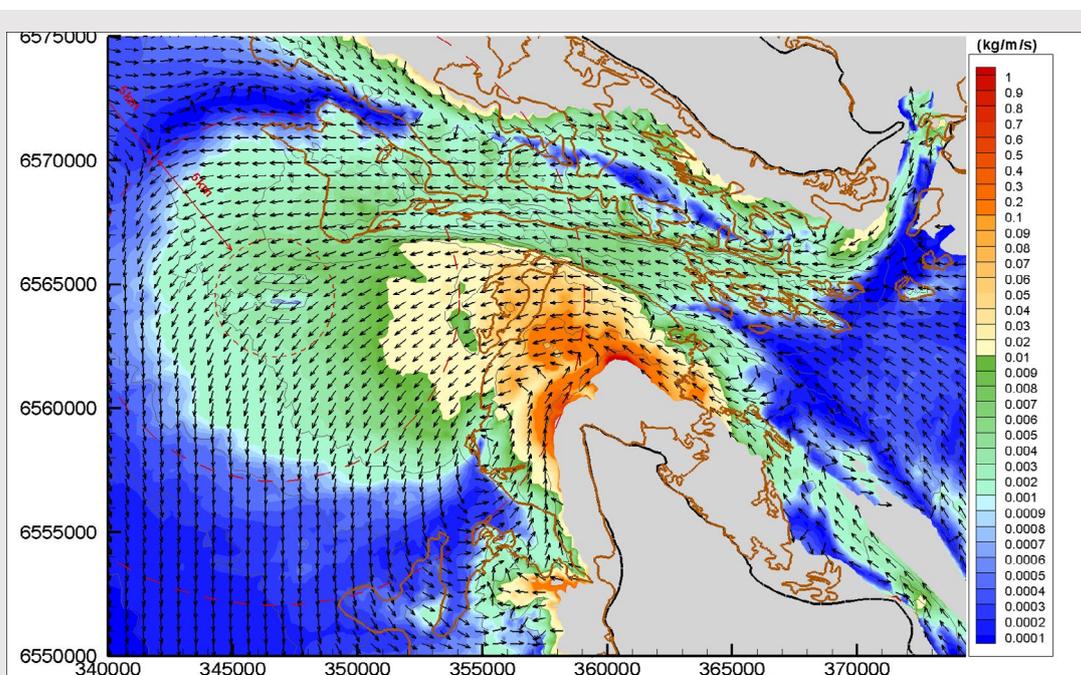
Le calcul séparé du transport solide par charriage et par suspension (chapitre 2.2.2.) est recommandé car il permet de représenter plus correctement les différentes composantes du transport résiduel. On distingue en effet :

- Le transport résiduel du large vers la côte, qui est lié à un transport par charriage induit par la houle,
- Le transport résiduel induit par les courants de marée, générant le transport par suspension, qui, à proximité de la côte, devient généralement parallèle à celle-ci.

Cette différenciation est illustrée sur la Figure 26 (transport par charriage) et la Figure 27 (transport par suspension) qui sont issues du même calcul couplant un modèle 3D courantologique utilisant le logiciel Telemac 3D, un modèle de propagation des vagues utilisant le logiciel Tomawac et un module de calcul du transport solide utilisant le logiciel TRANSPOR2004 (voir chapitre 2.2.5.).



**Figure 26** – Exemple de calcul de transport solide résiduel annuel : partie charriage (Artelia, 2020)



**Figure 27** – Exemple de calcul de transport solide résiduel annuel : partie suspension (Artelia, 2020)

## 6.2. MODÉLISATION DU TRANSPORT SOLIDE EN ZONE LITTORALE

La complexité de la propagation des vagues dans la zone de déferlement, de l'hydrodynamique qu'elles engendrent, des transports solides associés et des évolutions morphodynamiques des petits fonds qui en résultent est d'un niveau très élevé de sorte qu'il n'est pas possible actuellement de procéder à des simulations numériques précises de tous ces processus physiques.

Pour simplifier la représentation de ces processus complexes, on distingue habituellement (MEEDDM, 2010) le transport longitudinal des sédiments (transit littoral) induit par le déferlement des vagues obliques au rivage et le transport transversal conduisant à des variations du profil de plage.

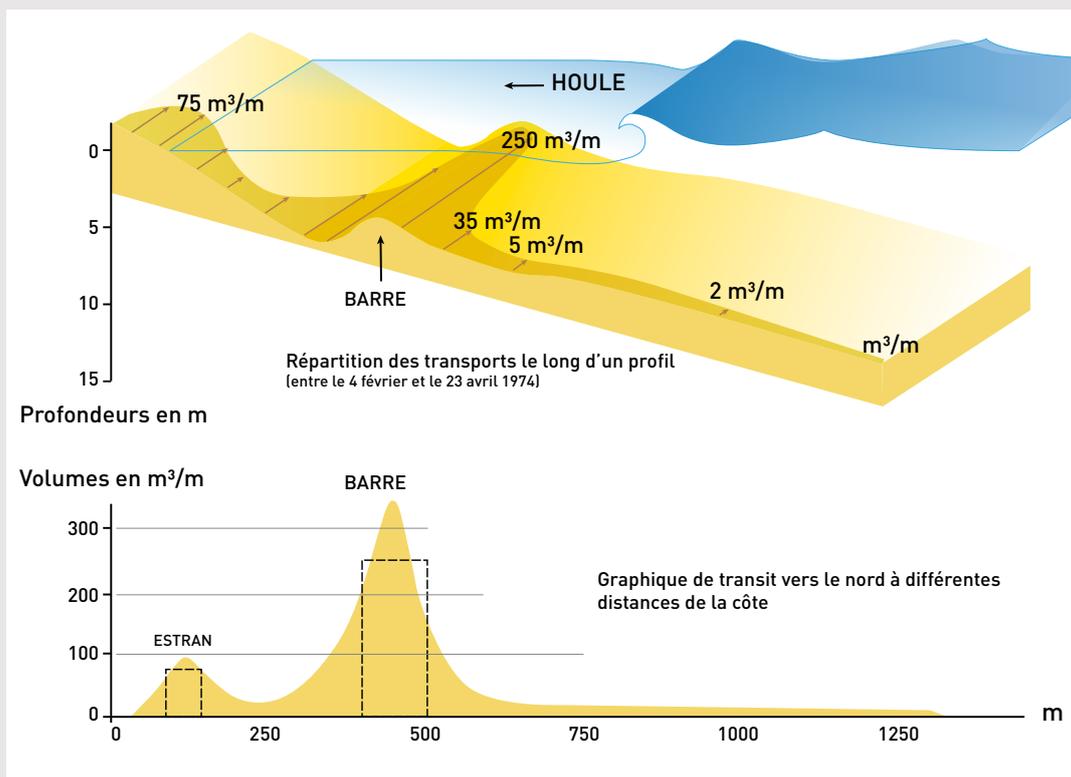
Le transport transversal est lié aux variations de l'énergie des vagues qui forcent le profil de plage. Il est dirigé de la côte vers le large en période de tempête et du large vers la côte sous l'action des vagues modérées. Il conduit à des variations saisonnières de la position du trait de côte y compris pour les plages stables, ainsi qu'à une érosion plus durable après des phénomènes extrêmes. Ainsi Bulteau *et al.* (2014) ont évalué l'effet des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la côte aquitaine à partir de relevés du trait de côte et d'un certain nombre de suivis de profils de plage. Ils notent des reculs du littoral dépassant souvent 20 m et atteignant par endroit 30 à 40 m. Un bilan complémentaire de l'érosion puis du rechargement naturel de ces plages après ces tempêtes a été publié par Ayache *et al.* (2018) en comparant trois levés Lidar de 2011, 2014 et 2017. Ils confirment une perte très importante de sable au niveau du contact plage/dune entre 2011 et 2014 avec un déficit de sable en moyenne de 63 m<sup>3</sup>/ml principalement dû aux tempêtes de l'hiver 2013-2014. Ils notent, par contre, un gain massif en sédiments sur la même interface de 55 m<sup>3</sup>/ml en moyenne entre 2014 et 2017.

Les mécanismes de transport transversal ne sont pas encore bien élucidés et il n'existe pas à l'heure actuelle de formule d'ingénierie permettant de l'estimer directement à partir du forçage des vagues. L'énergie des vagues étant proportionnelle au carré de leur hauteur, ce guide propose d'évaluer les possibles effets d'un projet de concession sur ce transport en analysant les différences de hauteur de vague possiblement induites par un tel projet.

Le transport longitudinal ou transit littoral est lié à l'obliquité des vagues incidentes au trait de côte. Cette obliquité est observée sur un très grand nombre de côtes basses meubles. Ce transit est donc fondamental en géomorphologie littorale puisqu'il est responsable du déplacement de volumes sédimentaires considérables (MEEDDM, 2010) pouvant par exemple atteindre 700 000 m<sup>3</sup>/an sur la côte aquitaine. Ses variations longitudinales (ou gradient spatial) sont responsables des avancées ou reculs du trait de côte comme cela est détaillé au chapitre 7.1. Des formules d'ingénierie simples ont été développées pour calculer ce transit que nous allons maintenant détailler.

### 6.3. LE TRANSIT LITTORAL

Le transit littoral représente la composante du transport sédimentaire parallèle au trait de côte. Il comprend deux composantes, l'une liée à la dérive littorale et l'autre au jet de rive. Il s'étend donc transversalement depuis la ligne du haut de jet de rive jusque vers la profondeur de fermeture. La Figure 28 présente un exemple de répartition du transit le long d'un profil de plage (Migniot, 1977).



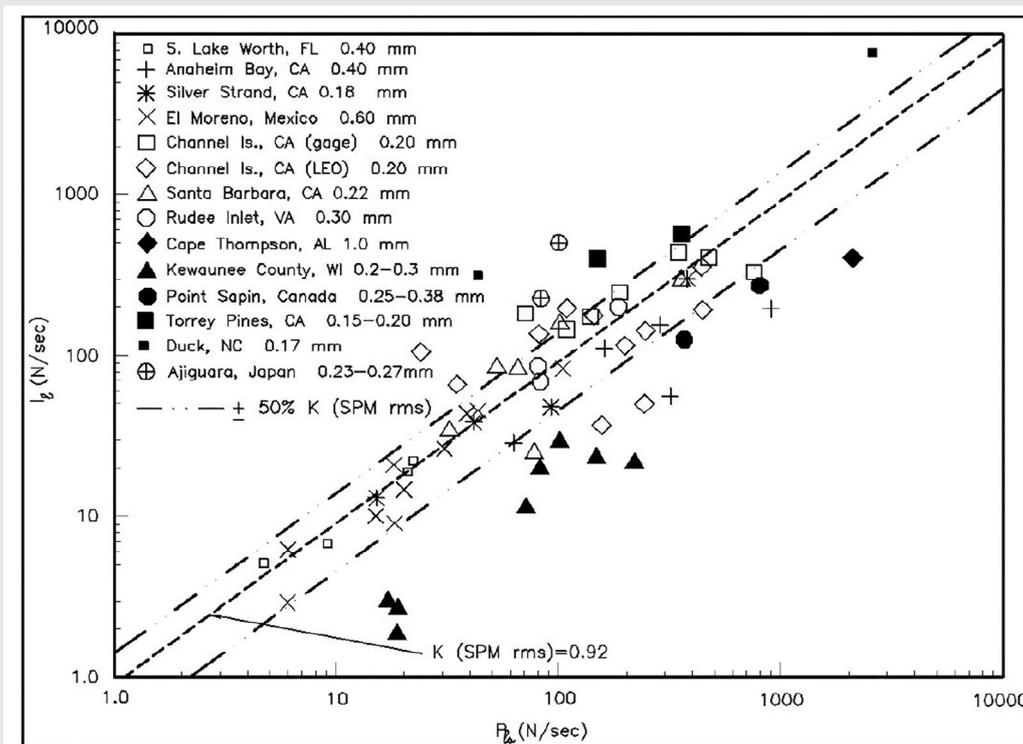
**Figure 28** – Exemple de répartition du transit littoral le long d'un profil de plage  
(d'après Migniot, 1977)

Le transit littoral peut être estimé par des formules globales utilisant le flux d'énergie des vagues à l'entrée de la zone de déferlement ou par des formules locales de transport solide qui nécessitent alors de bien connaître les différentes composantes hydrodynamiques de la zone littorale. La première option est pertinente pour le présent guide et est de plus très largement utilisée en ingénierie. La seconde est également possible mais nécessite plus de moyens de modélisation.

#### 6.3.1. Méthode du flux d'énergie

Le transit littoral peut être estimé par différentes formules globales publiées dans la littérature. Historiquement la première formule empirique globale la plus connue et utilisée est celle développée aux États-Unis par le centre de recherche côtier (CERC : Coastal Engineering Research Center) du corps des ingénieurs de l'armée américaine (USACE). Elle a été publiée en 1984 sous sa forme actuelle et sa pertinence a été confirmée par plusieurs recherches qui ont été synthétisées dans le manuel de génie côtier du même institut (USACE, 2002, Coastal Engineering Manual, vol. III, chap. III-2-3).

Le transit littoral exprimé en poids<sup>25</sup> ( $I$  en N/s) est proportionnel au flux local d'énergie des vagues à l'entrée de la zone de déferlement ( $P$ ), projeté le long du littoral, modulé par un coefficient de proportionnalité empirique  $K$  qui a été estimé à partir de mesures de terrain sur des plages entièrement sableuses exposées aux houles du large. Il vaut en moyenne 0,92 lorsqu'on utilise la hauteur de houle moyenne quadratique (Figure 29), ou bien 0,39 lorsqu'on utilise la hauteur significative.



**Figure 29** – Estimation du coefficient empirique  $K$  de la formule du CERC par régression linéaire (USACE, 2002)

Cette moyenne s'accompagne d'une forte variabilité locale et temporelle des données de terrain comme cela est bien visible sur la Figure 29, qui a conduit à supposer que le transit littoral devait dépendre d'autres paramètres que ceux introduits dans la formule, comme par exemple, la granulométrie du sédiment, la pente de la plage, la période des vagues. De nombreuses recherches ont été effectuées en ce sens et Zarifsanayei *et al.* (2020) ont publié un état de l'art récent sur cette question. Ainsi, les recherches ont montré que l'augmentation de la granulométrie conduisait à une baisse du coefficient  $K$ . Cela est particulièrement visible lorsqu'on compare des plages en sable, en gravier et en galet. Pour les graviers et galets, il est même recommandé de filtrer le climat annuel d'agitation en ne conservant que des états de mer efficaces c'est-à-dire susceptibles de déplacer effectivement ces sédiments très grossiers (Elshinnawy *et al.*, 2017).

Il a également été montré que les houles longues, de grande période, augmentaient le coefficient  $K$  du fait du déferlement plongeant qui s'installait et augmentait la turbulence et la remise en suspension du sédiment. Enfin, certains auteurs incluent la pente de la plage dans leur formule mais cela est sujet à discussion au vu de la difficulté à estimer ce paramètre qui varie continûment, voire brutalement (cas des barres sous-marines).

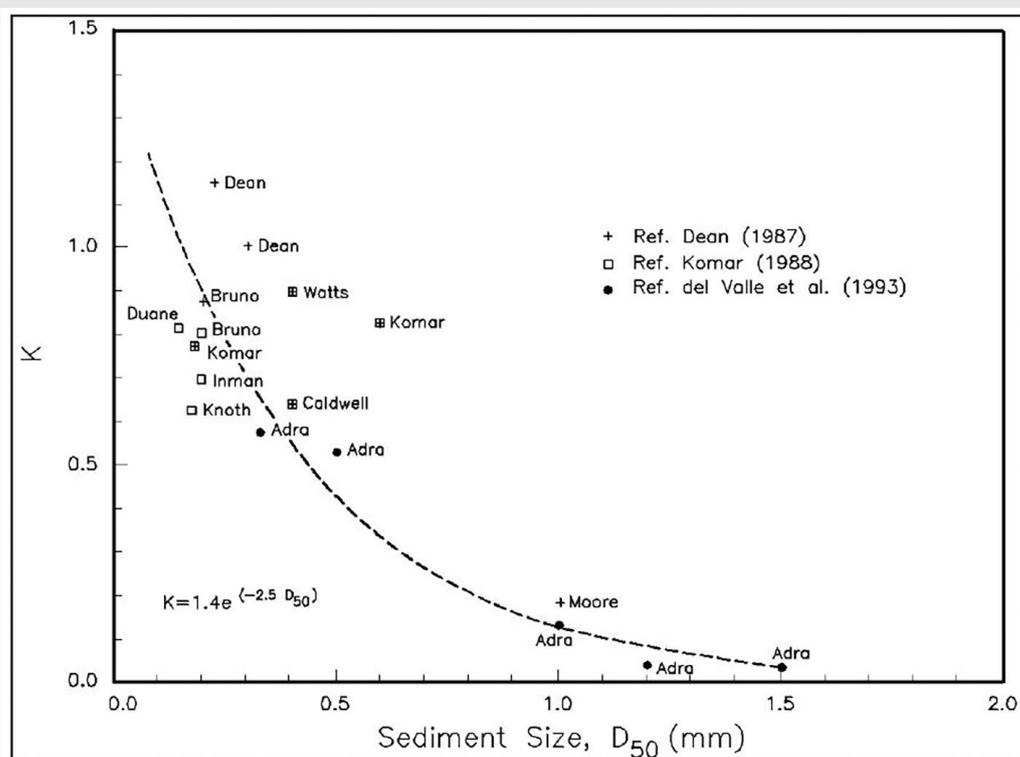
**25** Le transit littoral global peut être exprimé en poids de sédiment ( $I$  en N/s) ou en volume ( $Q$  en m<sup>3</sup>/s). La conversion est fonction des masses volumiques de l'eau, du sédiment et de la porosité du dépôt sédimentaire (USACE, 2002).

Au final, toutes les formules nécessitent en pratique une correction par un coefficient empirique pour se recalibrer à des mesures de terrain sur un site particulier (Zarifsanayei *et al.*, 2020). Cela est d'autant plus vrai lorsque la géologie perturbe le transit comme c'est le cas par exemple en présence d'un platier rocheux ou de grès de plage (beachrock) ou lorsque la plage se trouve moins exposée aux houles du large. Dans ces cas particuliers, le coefficient K peut devenir très faible. C'est la raison pour laquelle la formule du CERC (et similaire) avec les coefficients empiriques moyens proposés dans la littérature calcule une capacité de transport solide et non pas un transport solide effectif.

**Pour toutes ces raisons, le calage du coefficient K sur des données de terrain locales d'estimation du transit littoral permet de réduire fortement les incertitudes de calcul.**

Les méthodes de terrain permettant d'estimer ce transit sont décrites dans le Coastal Engineering Manual (USACE, 2002) au chapitre III-2-2. Il n'existe pas d'instruments pour mesurer directement le transit littoral sur une plage pendant une année. En pratique, il est donc recommandé d'utiliser des méthodes indirectes permettant d'estimer le transit littoral à partir des évolutions du trait de côte (modélisation inverse). Cela suppose que sur le long-terme les évolutions transversales dans le profil sont négligeables ce qui n'est pas toujours le cas.

Cela inclut des estimations de dépôts de sédiments le long d'épis, derrière des brise-lames ou sur des flèches de sable sur des périodes de temps bien déterminées. On peut également procéder à une modélisation inverse de l'évolution du trait de côte comme détaillé au chapitre 7.1. Des mesures de court-terme par suivi de traceurs sont également possibles notamment pour les plages de galets avec la mise en œuvre de galets fluorescents. Ces données de terrain doivent être accompagnées par les séries temporelles de conditions de houle devant le site durant la période de mesure afin de permettre de corréler flux d'énergie des vagues et transit littoral. Dans le cas où aucune donnée n'est disponible,



**Figure 30** – Variation du coefficient empirique K de la formule du CERC avec le diamètre du sédiment (USACE, 2002)

on peut estimer le coefficient K en fonction de la granulométrie du sédiment (Figure 30), de la géologie du site et de son niveau d'exposition.

En pratique, la formule du CERC et les formulations alternatives sont détaillées dans Latteux (2008, pages 62-63). Elles nécessitent de connaître les conditions de houle ( $H_{sb}$  et  $\alpha_b$ )<sup>26</sup> au point de déferlement qui varient avec le niveau d'eau, la hauteur des vagues au large et leur direction d'incidence. D'autre part, le transit littoral s'opère sur toute une largeur de plage également variable en position et en dimension. Les modélisations numériques, de leur côté, calculent les conditions de houle et de niveau d'eau sur un maillage fixe. Pour faire le lien entre les deux approches, le CEM (USACE, 2002) recommande de choisir un point de maillage situé au large immédiat de la zone de déferlement puis d'appliquer une méthode de calcul décrite en détail au chapitre II-2-3 du manuel.

### 6.3.2. Répartition transversale du transit littoral

Des formules plus élaborées donnant la répartition transversale du transit littoral le long d'un profil de plage ont également été développées par différents auteurs. Elles considèrent un calcul hydrodynamique simplifié dans la zone de déferlement avec une dérive littorale schématisée comme un courant parallèle au rivage. On peut utiliser pour cela une modélisation 1D simplifiée de plage de profil uniforme le long du littoral comme cela est détaillé au chapitre 5.3. mais aussi avec une modélisation 2DH ou 3D pour des cas de littoraux plus complexes. Une fois connues les conditions de houle et de courant, on peut ensuite appliquer une formule de transport solide (voir chapitre 2.2.5.). Bayram *et al.* (2001) ont comparé six formules communément utilisées à l'époque, et ont conclu que la formule de Van Rijn (1984 actualisé en 2007) donnait les meilleurs résultats sans calage des coefficients empiriques.

La modélisation 1D de Kuriyama et Sakamoto (2014) sur le littoral d'Hazaki au Japon illustre bien l'intérêt que l'on peut avoir à connaître la répartition transversale du transit littoral dans certains cas très particuliers pour lesquels la méthode globale ne rend pas compte des observations. Cette modélisation a en effet permis, dans ce cas précis, de mettre en évidence un changement de direction du transit littoral annuel entre les petits fonds (0 à -2 m ZH) et les profondeurs plus importantes entre -2 m et -8 m qui s'explique par l'importance relative des différents secteurs de provenance des vagues.

### 6.3.3. Variabilité spatiale du transit littoral

La méthode du flux d'énergie fait intervenir l'angle  $\alpha_b$  qui est la direction d'incidence d'un état de mer par rapport à l'orientation locale du trait de côte. La variation spatiale de cette orientation à une date donnée conduit donc à une variation spatiale du transit littoral qui peut être très importante lors des changements brusques d'orientation autour d'un cap par exemple.

### 6.3.4. Variabilité temporelle du transit littoral

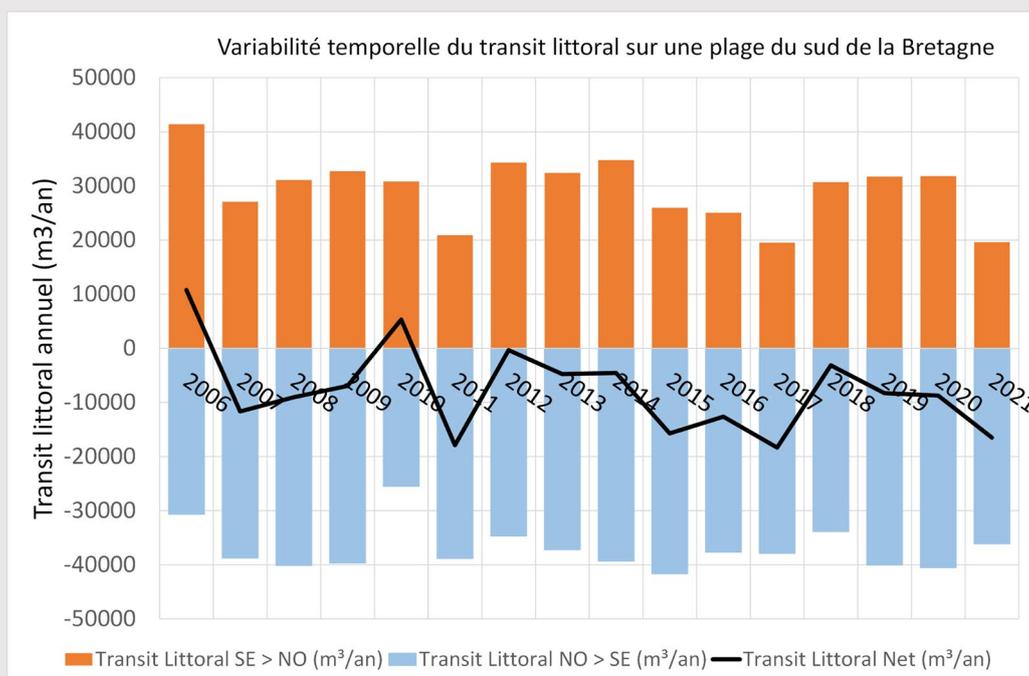
La méthode du flux d'énergie est suffisamment simple pour pouvoir être appliquée sur des séries temporelles d'états de mer importants de l'ordre de l'année, voire d'une à plusieurs décennies. On peut dans ce cas étudier les variations saisonnières, annuelles et pluriannuelles du transit littoral qui peuvent conditionner les évolutions du trait de côte à moyen et long-terme. À titre d'exemple, la Figure 31 présente la variabilité pluriannuelle calculée sur une plage du sud de la Bretagne.

<sup>26</sup>  $H_{sb}$  est la hauteur significative de l'état de mer au point de déferlement et  $\alpha_b$  est sa direction d'incidence par rapport à l'orientation locale du trait de côte. Le calcul de  $\alpha_b$  nécessite donc de bien connaître cette orientation.

Kelley et al. (2004) ont proposé une analyse de la variabilité interannuelle du transit littoral sur une durée de 20 ans. Le transit annuel est calculé pour chacune des 20 années le long du littoral (par exemple tous les 200 m dans les exemples proposés). Puis une moyenne de ces 20 valeurs et un écart-type sont calculés. Un ratio de variabilité valant un demi-écart-type sur la moyenne est ensuite calculé. Un ratio important va se traduire par des évolutions du trait de côte fréquentes pour s'adapter à ces variations. A contrario, un ratio faible va se traduire par une tendance persistante de l'évolution du trait de côte.

Le Tableau 3 présente l'exemple d'un tel calcul sur une plage de Bretagne sud (16 années de données). Un calcul similaire a ensuite été effectué sur deux sites en baie de Seine (27 années de données). Le ratio sur le transit littoral net vaut respectivement 54 %, 34 % et 19 % sur ces trois cas.

Les calculs ont ensuite été effectués en deux points sur la côte béninoise en Afrique de l'Ouest réputée pour son climat de vagues très régulier (25 années de données). Le ratio descend alors à 10 % et 5 %.



**Figure 31** – Exemple de variabilité temporelle du transit littoral sur une plage du sud de la Bretagne (Artelia)

**Tableau 3** – Exemple de calcul du ratio de Kelley et al. (2004) pour une plage du sud de la Bretagne (Artelia)

	Transit Littoral SE > NO (m³/an)	Transit Littoral NO > SE (m³/an)	Transit Littoral Net (m³/an)	Transit Littoral Brut (m³/an)
<b>Moyenne</b>	29375	-37025	-7650	66401
<b>Min</b>	19541	-41660	-18345	55712
<b>Max</b>	41399	-25490	10768	74119
<b>Écart-type</b>	5982	4184	8192	6283
<b>ratio Kelley</b>	10%	6%	54%	5%

## 7 LES ÉVOLUTIONS MORPHODYNAMIQUES

### 7.1. MODÈLES D'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE POUR LES CÔTES BASSES MEUBLES SUJETTES AU TRANSIT LITTORAL

#### 7.1.1. La conservation du volume de sédiments

Une estimation de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte peut se calculer en définissant des tronçons (ou secteurs) de littoral, de longueur variable selon le découpage de la côte, et en appliquant la loi de conservation du volume de sédiments sur un intervalle de temps allant de quelques jours à quelques décennies (Pelnard-Considère, 1956). Celle-ci fait l'hypothèse que le gradient spatial du transport sédimentaire peut être relié aux évolutions temporelles de la position du trait de côte.

Dans le cas simplifié où l'on considère uniquement la partie transit littoral du transport sédimentaire, cette loi peut s'écrire algébriquement en volume de la façon suivante :

$$(1) \Delta V = (Q \text{ entrant} - Q \text{ sortant}) \Delta t$$

avec :

- $\Delta V$  : variation de volume de sédiment actif (en m<sup>3</sup>) dans la section
- $\Delta t$  : nombre de jours entre les deux levés ayant permis l'estimation de la variation de volume
- $Q$  : transit littoral (m<sup>3</sup>/jour)

Dans le cas où la courbure du trait de côte est faible, on peut assimiler la surface active de chaque tronçon à un rectangle<sup>27</sup>. Avec cette hypothèse, la variation de volume se calcule comme suit :

$$(2) \Delta V = \Delta X \Delta Y h_a$$

avec :

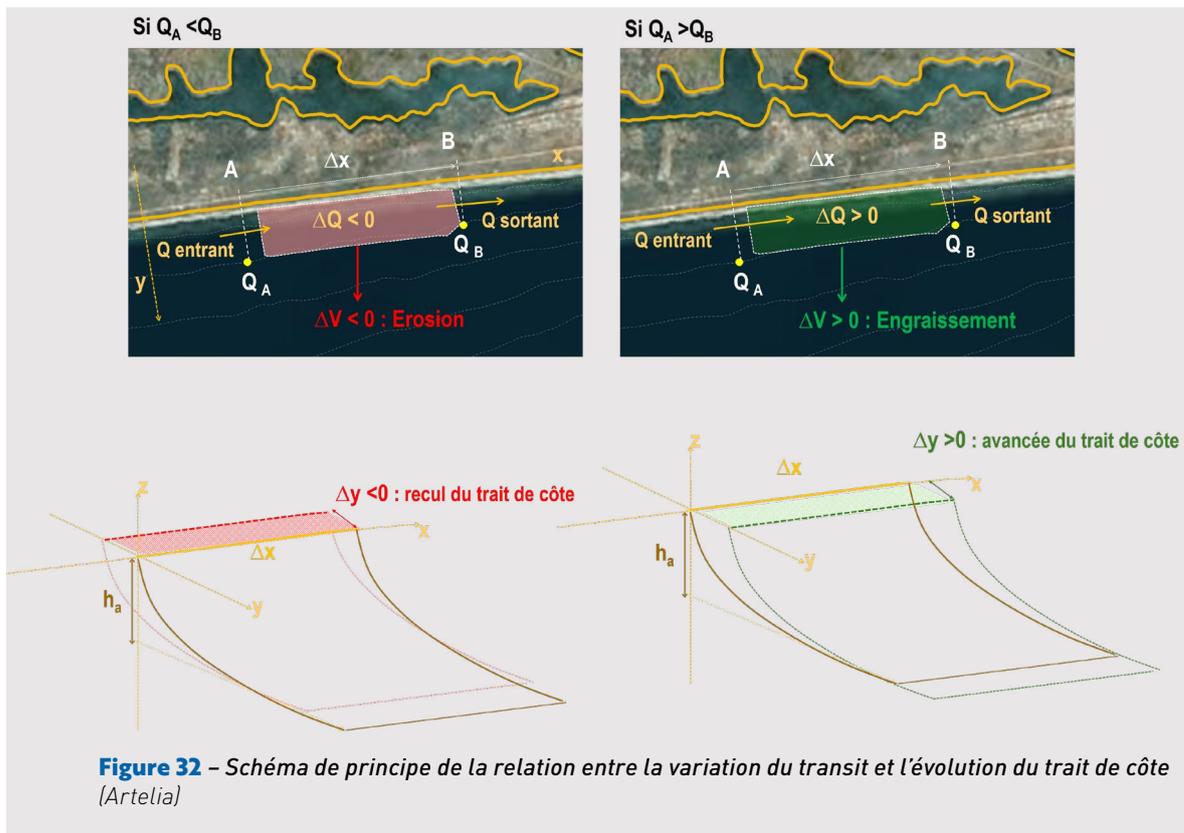
- $\Delta X$  : longueur du tronçon de calcul
- $\Delta Y$  : variation de position du trait de côte moyenné sur ce tronçon
- $h_a$  : hauteur active moyenne du tronçon. Celle-ci s'estime par différence entre la cote de crête de la dune ou du sommet de la plage et la profondeur de fermeture (voir chapitre 1.2.2).

On en déduit alors l'équation suivante simplifiée d'évolution du trait de côte (voir Figure 32) :

$$(3) \Delta Y = \frac{(Q \text{ entrant} - Q \text{ sortant}) \Delta t}{\Delta X h_a}$$

Bien entendu d'autres processus physiques entrent en jeu dans l'évolution du trait de côte comme la déflation éolienne sur les plages et les transports transversaux de sédiments entre la plage et l'océan à l'échelle saisonnière et lors des grosses tempêtes. Les actions anthropiques (rechargement de plage, construction d'ouvrages de génie côtiers) modifient également ce bilan. On peut alors compléter l'équation en y ajoutant des termes source/puits quantifiant ces apports et prendre en compte l'effet des ouvrages côtiers.

<sup>27</sup> On peut affiner cette équation en travaillant en coordonnées curvilignes et en corrigeant le calcul du volume avec une surface active de section prenant alors la forme d'un trapèze.



Cet indicateur « évolution du trait de côte » complète le simple calcul du transit littoral et permet notamment une approche comparative pour estimer les possibles effets d'un projet d'extraction de granulats marins.

On peut également inverser cette équation pour calculer une estimation du transit littoral à partir des évolutions du trait de côte. On obtient alors l'équation :

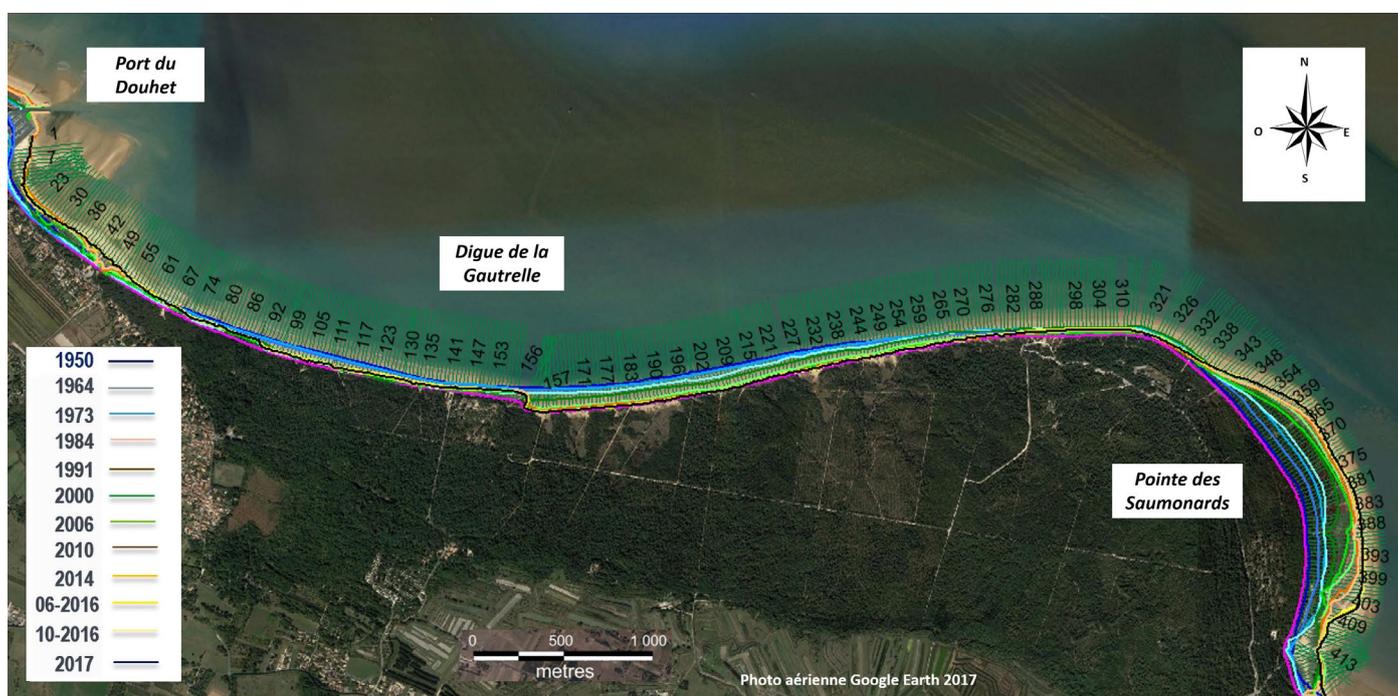
$$(4) Q(n+1) = Q(n) + \frac{\Delta X \Delta Y h_a}{\Delta t}$$

avec  $Q(n)$  : transit littoral en entrée du tronçon n.

La Figure 34 présente une application de l'équation (3) le long du littoral nord-est de l'île d'Oléron entre le port du Douhet et la pointe des Saumonards pour lequel des relevés du trait de côte sont disponibles entre 1950 et 2017 (Figure 33). Ce littoral a fait l'objet de travaux de protection avec la mise en place d'une série d'épis et de défenses longitudinales entre le port du Douhet et la Gautrelle entre 1972 et 1988.

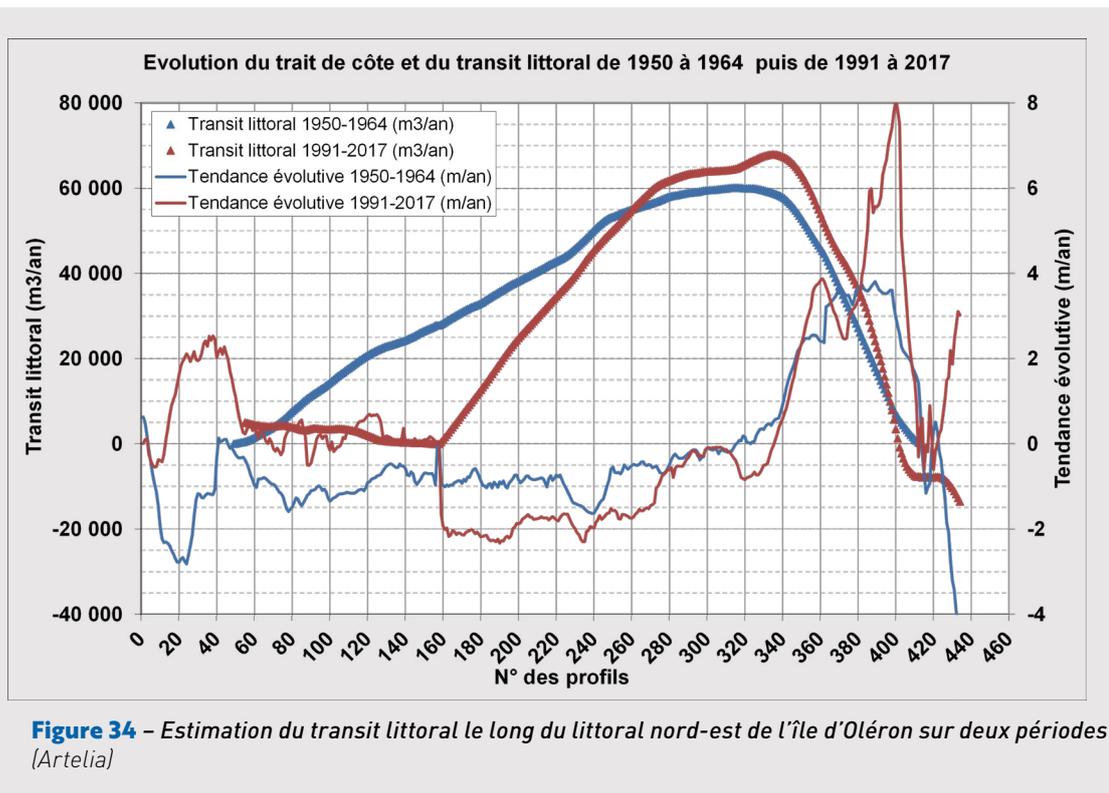
La période 1950-1964 a été choisie pour estimer le transit littoral le long de cette côte avant tout aménagement. Pour cela, le trait de côte a été subdivisé en 460 tronçons de 20 m de long. Une hauteur active unique de 14 m, définie par la différence entre la cote moyenne de la crête de dune (+9 m IGN69) et la profondeur de fermeture (-5 m IGN69) a été estimée grâce à des relevés topo-bathymétriques disponibles. L'application de la loi de conservation du volume en modélisation inverse nécessite de connaître le transit littoral en un point de la côte. Au vu des positions historiques du trait de côte et du blocage du transit par le port du Douhet, une hypothèse de transit nul à l'est du port du Douhet a été faite (profil n°50 sur Figure 33).

La variation  $\Delta Y$  de la position du trait de côte entre 1950 et 1964 a d'abord été calculée puis le transit littoral est déduit de proche en proche à partir du profil n° 50 par l'équation (3). La Figure 34 illustre le résultat de ces calculs. On observe une augmentation du transit qui passe de 0 à 60 000 m<sup>3</sup>/an au profil n°320 pour lequel l'évolution du trait de côte est nulle sur la période. Cette augmentation conduit à l'érosion constatée de l'ordre de 1 m/an en moyenne. Puis la tendance s'inverse avec une sédimentation le long de la pointe des Saumonards qui est causée par un ralentissement du transit qui retombe à zéro sur le profil n°420.



**Figure 33** – Relevés du trait de côte entre 1950 et 2017 le long du littoral nord-est de l'île d'Oléron et position des profils (Artelia)

Une seconde estimation a été faite sur la période 1991-2017 après la fin des travaux de protection avec une hypothèse de transit totalement bloqué au droit des aménagements de la Gautrelle (profil n°160). On observe alors que le transit littoral a été presque complètement bloqué à l'amont par les ouvrages entre le port du Douhet et la Gautrelle. À l'aval, le transit reprend avec une intensité redoublée pour culminer à 68 000 m<sup>3</sup>/an au droit du profil n° 340, sensiblement au même point que dans la période 1950-1964. Il redescend ensuite à zéro au profil n°400.



Au final, les deux estimations sont cohérentes puisqu'elles aboutissent à des courbes de distribution du transit sensiblement similaires sur la partie « naturelle » de la plage à la pointe des Saumonards. On peut constater, d'autre part, que le transit retombe à zéro à l'extrémité de la pointe de Saumonards (profil 420) dans les deux cas. Ces constatations justifient l'hypothèse que les évolutions du trait de côte sur le long terme sont pilotées par le gradient de transit littoral dans ce cas particulier. Elles permettent ainsi d'avoir une estimation « terrain » du transit littoral annuel moyen sur ce littoral qui peut être ensuite utilisée pour caler une formule de transit littoral dans une modélisation.

### 7.1.2. L'équation de Pelnard-Considère

L'équation de base (3) présentée au chapitre 7.1.1. a été étendue dans le domaine temporel par les travaux de Pelnard-Considère (1956) qui a considéré une succession de pas de temps et proposé une équation différentielle simplifiée d'évolution du trait de côte avec le temps qui peut se résoudre analytiquement dans un certain nombre de configurations simples comme l'effet d'un épi, l'avancée d'un delta, le rechargement ou l'extraction de sable sur une plage. D'autres cas de figure ont également fait l'objet de solutions publiées plus récemment dans la littérature (par exemple Larson *et al.*, 1997).

Ces solutions analytiques peuvent aussi être utiles pour effectuer une modélisation inverse à partir de suivis de terrain de positions du trait de côte pour en déduire une estimation de la valeur moyenne du transit littoral, notamment dans le cas d'une accumulation de sable contre un épi.

La Figure 35 présente un exemple d'une telle modélisation inverse sur la plage du Pentagone à port Pothuau sur la commune d'Hyères (Var). Ce port est protégé par une digue le long de laquelle du sable s'accumule depuis sa construction en 1920. Des levés du trait de côte de 1971, 1998 et 2017 ont permis d'estimer le transit littoral moyen à 1100 m<sup>3</sup>/an sur 46 ans en simulant l'avancée du trait de côte par la solution de Pelnard-Considère. Ce calcul a nécessité l'estimation d'une profondeur de fermeture à 5,5 m et d'une hauteur active à 7 m.

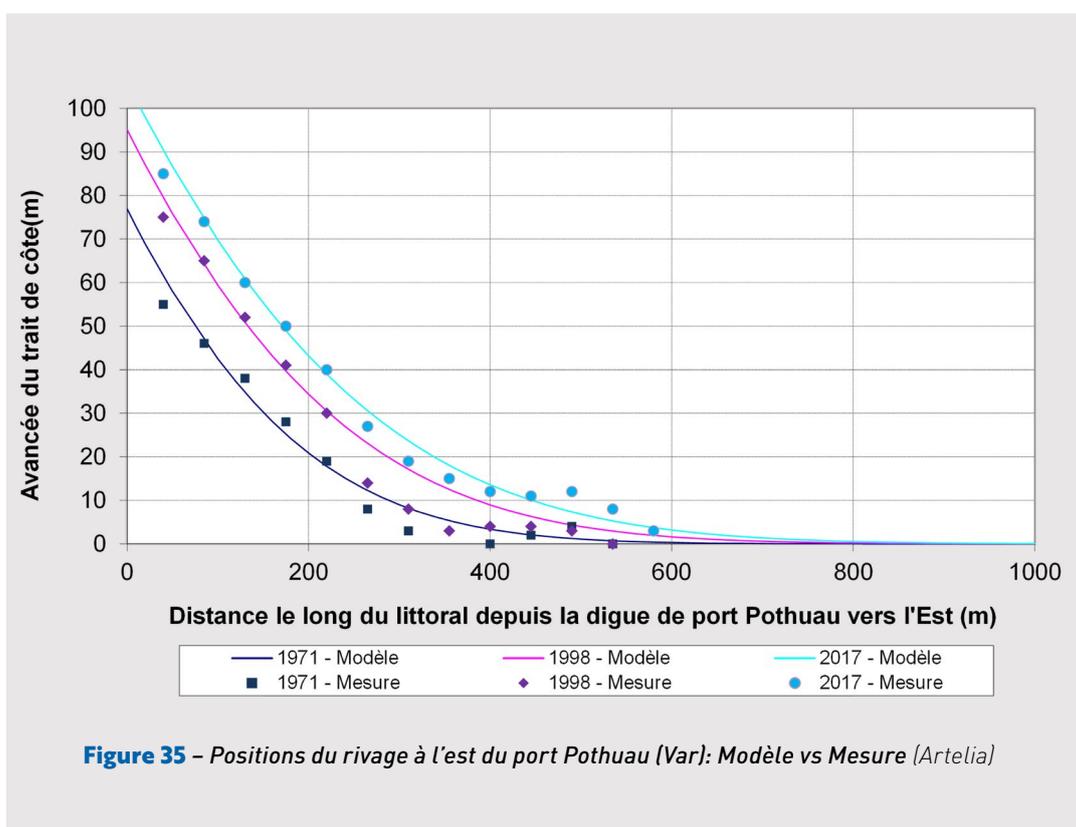


Figure 35 – Positions du rivage à l'est du port Pothuau (Var): Modèle vs Mesure (Artelia)

### 7.1.3. Cas particulier des plages de baie

Les plages de baie (pocket beach) sont des plages de petite taille qui se sont formées à l'abri d'un ou deux caps ou d'ouvrages côtiers (jetée, épi long, brise-lames forain) provoquant une diffraction des vagues. Les observations de terrain ont montré que le trait de côte prenait rapidement une forme d'équilibre stable, conduisant à un transit littoral net nul le long de la plage, en relation avec la direction des vagues incidentes aux points de contrôle de la diffraction. Plusieurs formulations ont été proposées pour estimer la position du trait de

côte. Le modèle parabolique de Hsu et Evans est actuellement le plus utilisé en ingénierie (voir Hsu *et al.* (2010) pour un état de l'art). Un tel modèle est donc complémentaire des modèles précédents puisqu'il prend en compte la forte courbure que prennent ces plages dans la zone de diffraction des vagues. La Figure 36 présente un exemple d'application d'un tel modèle avec l'indication des points de diffraction, de la direction des vagues à ces points et des traits de côte estimés.



**Figure 36** – Exemple d'application du modèle parabolique de Hsu et Evans sur les côtes de la commune de Meschers-sur-Gironde (Artelia, 2022)

#### 7.1.4. Généralisation : modèles numériques d'évolution du trait de côte

Ces équations peuvent se généraliser au cas d'un littoral plus complexe incluant des ouvrages de défense et de protection tels que épis, brise-lames, perrés mais aussi inclure des rechargements de plage, du transport éolien et des apports fluviaux. Il est alors possible d'estimer les évolutions possibles d'un trait de côte sur l'ensemble d'une cellule hydrosédimentaire à partir des variations (gradients) du transit littoral le long de cette côte.

Outre le logiciel GENESIS décrit dans le guide du MEEDDM (2010), on peut citer par exemple les logiciels UNIBEST (Pays-Bas), LITPACK (Danemark) et GENCADE (USA, Suède) qui ont fait récemment l'objet d'une comparaison par le corps des ingénieurs américain (Thomas et Frey, 2013 et Townsend *et al.*, 2014).

### 7.1.5. Limites et incertitudes associées

Les méthodes de calcul d'évolution du trait de côte proposées ici sont au niveau de l'état de l'art en génie côtier. Elles nécessitent la mise en œuvre d'une modélisation de propagation des états de mer pour transférer les conditions de houle au large vers la côte sur une année représentative (voir chapitre 10.1.5.) conduisant à une agitation côtière assez fiable<sup>28</sup>. Les incertitudes viennent donc principalement de l'estimation du transport des sédiments et des évolutions du trait de côte qui en résultent.

Les modélisations les plus simples proposées ici considèrent que le transit littoral (longshore transport) est prépondérant dans l'estimation des effets d'une concession sur les évolutions à moyen-terme du trait de côte. Le transport transversal (cross-shore transport) est négligé. L'incertitude associée se concentre alors sur le paramètre empirique K des formules globales (voir chapitre 6.3.1.) dont la valeur moyenne peut être assez largement modulée en fonction de la taille des sédiments et de leur disponibilité (cas des fonds rocheux).

Les actions humaines comme le rechargement de plage et la construction d'ouvrages de protection perturbent également cette estimation. La fiabilisation de la modélisation doit donc passer par la comparaison des résultats avec des suivis d'évolution du trait de côte observés par le passé. Tout écart significatif doit faire l'objet d'une étude spécifique.

L'analyse de différentiels topo-bathymétriques existants permet également de réduire les incertitudes en améliorant la connaissance du bilan de masse.

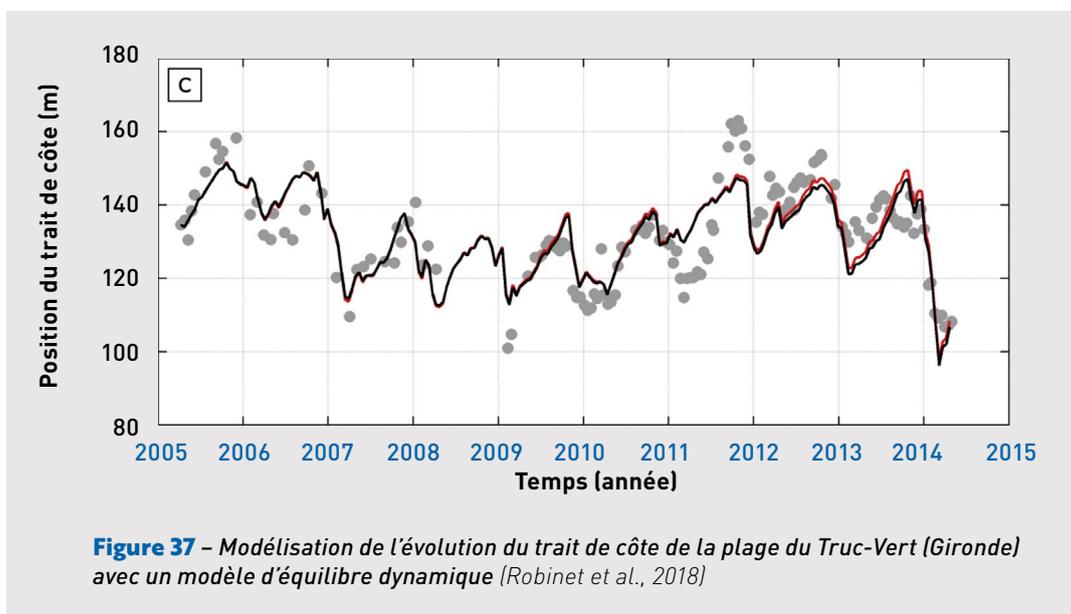
## 7.2. MODÈLES D'ÉQUILIBRE DYNAMIQUE DU TRAIT DE CÔTE

Dans le cas où les variations du transit littoral sont faibles le long d'une plage, on observe une prépondérance des transports solides transversaux qui expliquent notamment la variabilité saisonnière du trait de côte et du profil de plage jusqu'à la profondeur de fermeture. De manière générale, les tempêtes d'hiver font reculer rapidement le trait de côte alors que les houles d'intensité plus faible d'été le font lentement avancer.

Des modélisations empiriques d'évolution du trait de côte soumises à ce transport transversal ont été développées pour fournir une modélisation simple permettant des simulations sur plusieurs années avec un pas de temps horaire qui permet de suivre finement les évolutions du trait de côte en fonction de la succession des états de mer. Ces modèles de comportement ne cherchent pas à simuler dans le détail les processus physiques hydrosédimentaires mais reposent sur l'hypothèse d'une position d'équilibre du trait de côte (et plus généralement du profil de plage) en présence d'un état de mer. Tout écart par rapport à cette position d'équilibre entraîne un recul ou une avancée du trait de côte pour revenir à cet équilibre à un rythme très variable, dépendant du type de plage (Splinter *et al.*, 2014). En pratique un proxy du trait de côte est choisi pour un site donné et les coefficients empiriques sont calés sur des relevés historiques de terrain sur ce site pour permettre ensuite de faire des prévisions.

<sup>28</sup> On peut parler de modèle fiable lorsque la configuration utilisée pour le modèle d'agitation a été validée sur le site d'étude, soit par comparaison avec des modèles existants eux-mêmes validés par rapport à des observations, soit directement par rapport à des observations.

Le premier modèle de ce type validé avec succès est celui de Yates *et al.* (2009) qui a ensuite donné lieu à divers développements et notamment celui de Splinter *et al.* (2014) qui est maintenant utilisé par plusieurs équipes de recherche en France (Castelle *et al.*, 2014 ; Robinet *et al.*, 2018 ; Tran et Barthelemy, 2020 ; Robinet *et al.*, 2020). La Figure 37 présente le résultat d'un tel modèle simulant l'évolution du trait de côte de la plage du Truc-Vert en Gironde (Robinet *et al.*, 2018).



L'influence du gradient de transit littoral a été récemment inclus dans ce type de modèle (Robinet *et al.*, 2018 ; Tran et Barthelemy, 2020 ; Robinet *et al.*, 2020) ce qui les rend plus applicables à tous types de plages.

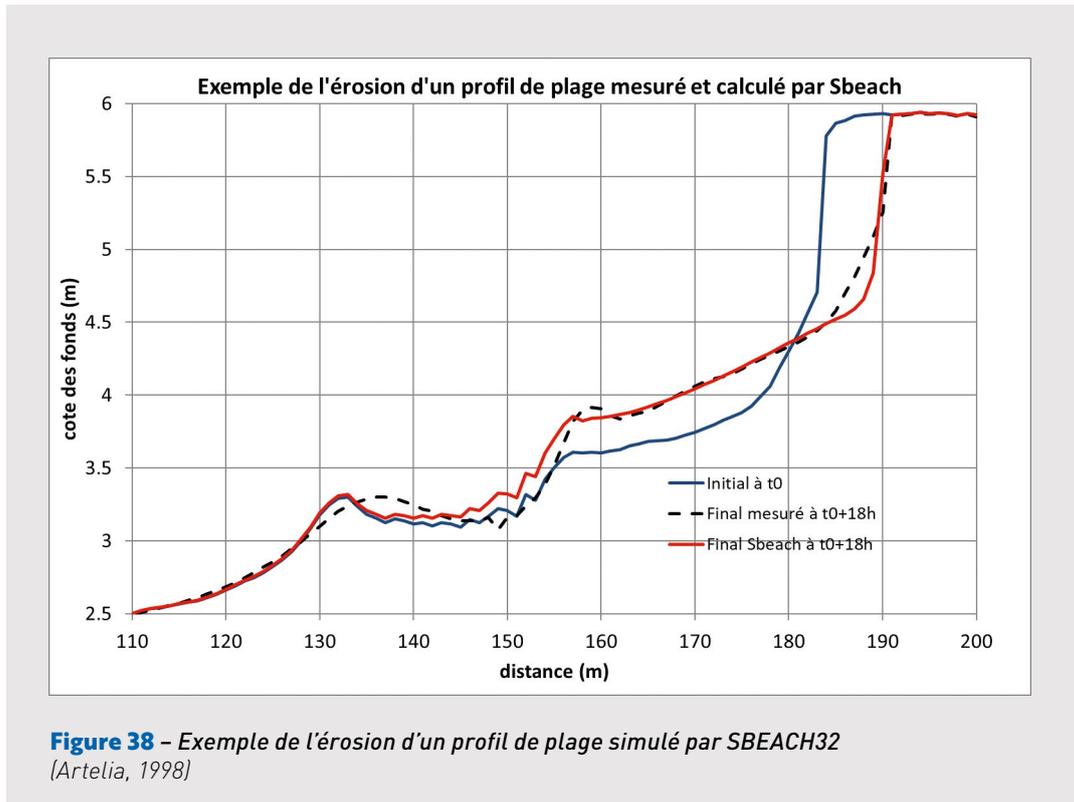
Une comparaison internationale de ces modèles sur le cas de la plage de Tairua en Nouvelle-Zélande a été récemment publiée par Montano *et al.* (2020). Cette étude conclut que la plupart des modèles a été capable de reproduire les évolutions du trait de côte sur la période de calibration (1999-2014) mais que leur capacité de prévision a décliné sur la période de vérification (2014-2017) pour laquelle les évolutions du trait de côte n'étaient pas connues des modélisateurs. Les coefficients de corrélation sont en effet passés de 0,50-0,75 à 0,10-0,40.

Ainsi, on peut conclure que l'utilisation de ces modèles nécessite pour l'instant des jeux de données (trait de côte) de couverture et résolution temporelle conséquents (ex : levé mensuel sur plusieurs années) ce qui limite leur application pour des sites avec très peu de données. De plus leur capacité prédictive est assez réduite actuellement.

Au final, nous ne retiendrons pas ce type de modèles dans la partie C du guide en l'état actuel des développements.

### 7.3. MODÈLES D'ÉROSION D'UN PROFIL DE PLAGE

L'étude des profils de plage a démarré dans les années 50 avec la recherche de la forme géométrique des profils naturels des plages à l'équilibre. Un profil concave de la forme  $h(x) = A x^{2/3}$  a été proposé suite à des raisonnements physiques de dissipation uniforme de l'énergie des vagues déferlantes validé par des mesures de terrain. Le coefficient A est une fonction de la vitesse de chute du sédiment (Dean, 1991).



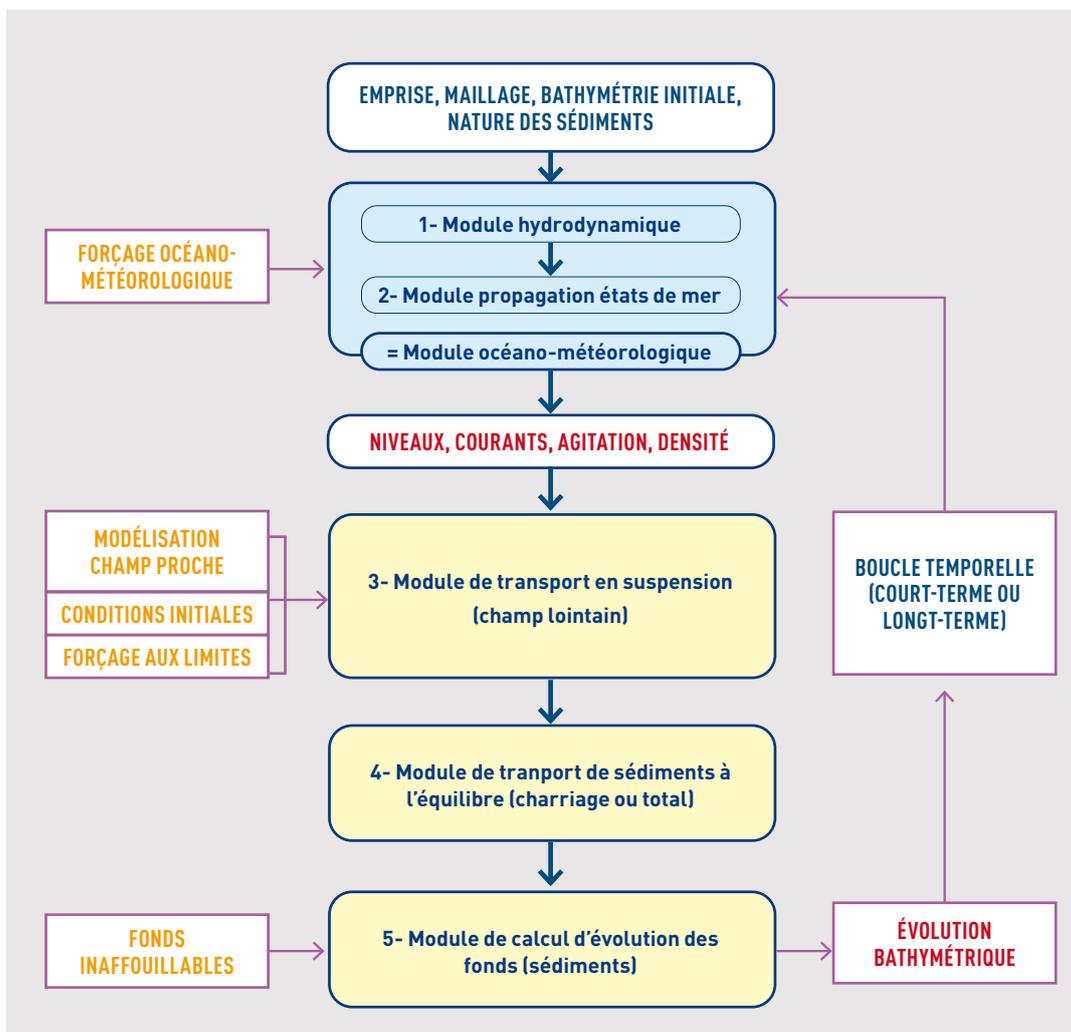
À partir de ces travaux reliant énergie dissipée et profil de plage, les modélisations numériques d'évolution d'un profil de plage se sont ensuite focalisées sur les érosions brutales des plages et des dunes induites par l'action des tempêtes (Larson et Kraus, 1989). Des modèles bien validés sont applicables et fournissent les distances de recul du pied de dune et les volumes érodés associés (Wise et al., 1996 ; Sabatier, 2008). La Figure 38 présente un exemple de validation d'un tel modèle sur des essais réalisés dans le canal à houle géant de l'université d'Hanovre à l'échelle 1. Le logiciel utilisé est SBEACH32 qui comprend cinq coefficients empiriques qui ont été calés sur des données terrain et de laboratoire (Wise et al., 1996).

La compréhension des processus physiques responsables de la reconstruction de profils de plage érodés par les houles de beau temps s'est heurtée à beaucoup plus de difficultés. Pour y pallier, Castelle et al. (2014) et Mariou et al. (2014) ont proposé d'étendre l'application d'un modèle d'équilibre dynamique du trait de côte (voir paragraphe 7.2) à une série de proxys permettant d'estimer l'évolution de l'ensemble d'un profil de plage. Ces recherches sur la reconstruction d'un profil sont encore en cours et il n'existe pas de modèle d'ingénierie établi sur le sujet.

## 7.4. MODÈLE MORPHODYNAMIQUE 3D

La modélisation morphodynamique 3D vise à simuler les évolutions bathymétriques de tout type de côte, naturelle ou artificialisée avec l'influence possible de la géologie (fonds « inaffouillables »). Plusieurs classes de modèles sont disponibles selon les concepts de base sur lesquels ils ont été développés.

### 7.4.1. Morphodynamique côtière et estuarienne



**Figure 39** – Schématisation du déroulement des modélisations hydrosédimentaires numériques 3D (Cerema, 2018)

En zone côtière et estuarienne et en présence de plusieurs types de sédiments (sables et vases), la modélisation par simulation fine des processus physiques représente l'outil de simulation numérique le plus avancé actuellement (Delinares *et al.*, 2015). Il est composé d'un ensemble de logiciels de calcul qui s'enchaînent les uns avec les autres à l'intérieur d'une boucle temporelle. Cinq modules peuvent être mis en œuvre comme indiqué sur la Figure 39 :

- Le module courantologique, appelé hydrodynamique sur la Figure 39, qui calcule l'évolution des niveaux, des courants marins et de la salinité,
- Le module de génération / propagation des états de mer,

- Le module de transport en suspension,
- Le module de transport total ou par charriage,
- Le module d'évolution bathymétrique qui inclut une ou plusieurs couches sur la verticale pour rendre compte des processus de pavage, de tassement et de consolidation dans les dépôts sédimentaires.

Ces modules peuvent être utilisés séparément ou couplés entre eux lorsque des interactions fortes existent par exemple entre l'hydrodynamique et l'évolution des fonds à travers le coefficient de frottement sur le fond (voir paragraphe 5.1.) par exemple (Walther *et al.*, 2012). De tels modèles peuvent actuellement simuler cinq à dix années d'évolutions morphodynamiques.

Le guide des études hydrauliques maritimes du Cerema (2018) détaille la procédure à suivre pour mettre en œuvre une telle modélisation.

### 7.4.1. Morphodynamique littorale

Les modélisations morphodynamiques côtières ne sont pas actuellement en mesure de traiter avec la même précision les processus littoraux sur de longues périodes. C'est pourquoi des approches ciblées ont été développées.

À l'échelle événementielle (une tempête), Roelvink *et al.* (2009) ont étendu les simulations d'érosion 1D des dunes avec SBEACH au cas général 2DH en développant le logiciel XBEACH qui est maintenant assez couramment utilisé.

Sur le moyen-terme (quelques années), Kristensen *et al.* (2016) et Oudart *et al.* (2021) ont développé de leur côté une approche hybride alliant modélisation hydrosédimentaire côtière au-delà de la zone de déferlement et modélisation littorale paramétrique permettant de simuler le développement de flèches littorales et plus généralement toute évolution du trait de côte à très forte courbure.

Dans le domaine de la recherche, le logiciel CROCO (Warner *et al.*, 2008) est utilisé par plusieurs équipes françaises et une comparaison avec XBEACH a récemment été publiée à partir des campagnes de mesures terrain sur la plage du Truc Vert en Aquitaine (Chauchat *et al.*, 2020). Le logiciel SCHISM (Zhang *et al.*, 2016) est également développé avec une récente application sur le pertuis de Maumusson en Charente Maritime (Bertin *et al.*, 2020).

Sur le long-terme (une à plusieurs décades), Robinet *et al.* (2018) ont de leur côté construit une modélisation simplifiée, dénommée LX-Shore reposant notamment sur les concepts de modélisation cellulaire et d'équilibre dynamique du trait de côte et du profil de plage. Ce modèle intègre un couplage avec un modèle de propagation des états de mer (logiciel SWAN) de manière dynamique : les conditions de vagues induisent une évolution du trait de côte qui induit elle-même une évolution de la bathymétrie qui induit elle-même une modification des états de mer. La modélisation cellulaire permet en outre d'intégrer des ouvrages et des fonds « inaffouillables ».

# MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES EFFETS POTENTIELS

## 8 ÉTAT DE RÉFÉRENCE : COLLECTE ET ANALYSE DES DONNÉES DE BASE

Ce chapitre établit la liste des données nécessaires à l'établissement des modélisations à mettre en place et l'analyse des effets de l'activité sur le domaine littoral. Il comprend quatre parties recouvrant les différentes modélisations pouvant être mises en place :

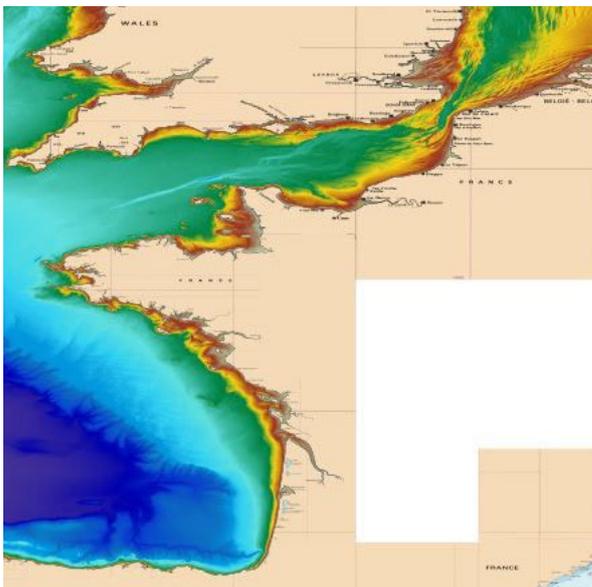
- Les données bathymétriques et sédimentologiques (chapitre 8.1) vont servir à la mise en place de la modélisation côtière décrite au chapitre 9.2.2.
- Les données de niveau, de courant (chapitre 8.2.) et d'agitation (chapitre 8.3.) sont nécessaires pour le forçage et la validation de la modélisation côtière (chapitre 9.3.).
- Enfin, les données sur le littoral (chapitre 8.4.) sont nécessaires pour le calage et la validation des modèles d'évolution du trait de côte (chapitre 9.4.).

De manière générale, les porteurs de projets doivent s'assurer de la qualité des paramètres d'entrée des modèles. Sans qu'elles aient un caractère obligatoire ou systématique, en particulier si des données de qualité existent déjà (qu'elles soient elles-mêmes issues de mesures ou de modélisations hydrauliques couvrant le site étudié), il peut être envisagé que des campagnes de mesures complémentaires soient réalisées par la profession, en particulier pour la courantologie locale.

### 8.1. DONNÉES BATHYMÉTRIQUES ET SÉDIMENTOLOGIQUES

#### 8.1.1. Données régionales

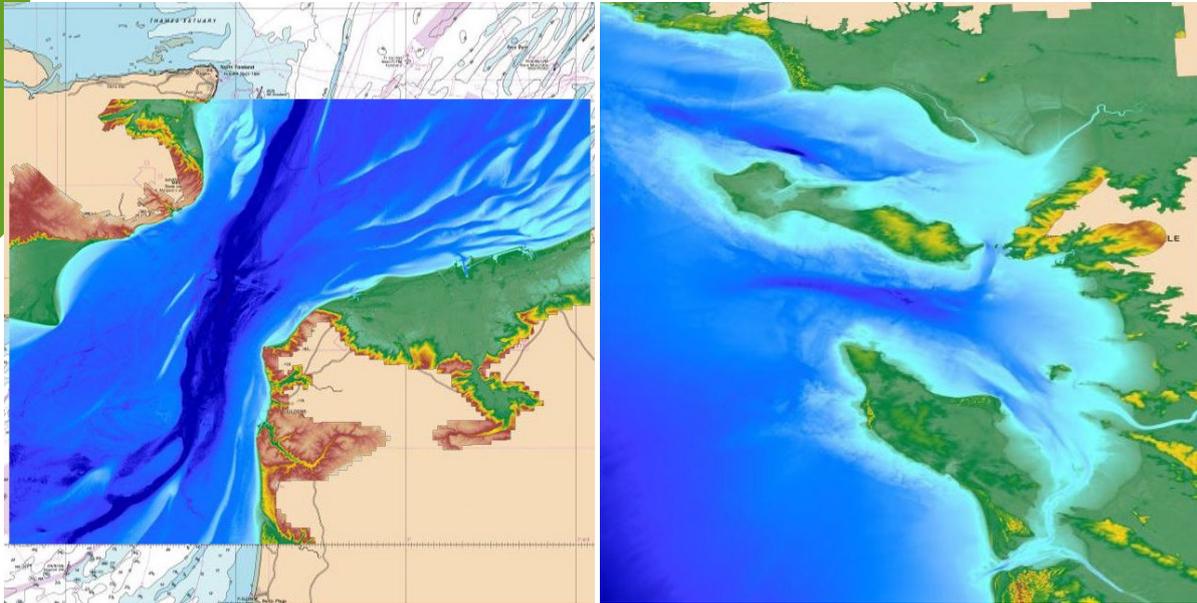
Les données bathymétriques régionales le long de la façade Atlantique sont mises à disposition par le Shom. Le modèle numérique de terrain (MNT) bathymétrique de la façade Atlantique à une résolution de 0.001° (~111 m) englobe une partie de Mer du Nord, la Manche ainsi que le Golfe de Gascogne (Figure 40). Ce MNT a été développé afin d'être implémenté dans les modèles hydrodynamiques afin de produire des prévisions aussi précises que possible des hauteurs d'eau et des états de mer à la côte<sup>29</sup>. Il est disponible gratuitement en téléchargement sur le site suivant : <https://diffusion.shom.fr/pro/risques/bathymetrie.html>.



**Figure 40** – Exemple de rendu du modèle numérique de terrain bathymétrique de façade Atlantique (Shom, 2015)

<sup>29</sup> Shom, 2015. MNT Bathymétrique de façade Atlantique (Projet Homonim). [http://dx.doi.org/10.17183/MNT\\_ATL100m\\_HOMONIM\\_WGS84](http://dx.doi.org/10.17183/MNT_ATL100m_HOMONIM_WGS84)

Il peut être complété par un MNT topo-bathymétrique côtier s'il est disponible sur le même site internet. Ces produits ont une résolution de  $0,0002^\circ$  (~20 m) et couvrent la bathymétrie et la topographie côtière (voir exemples sur la Figure 41).



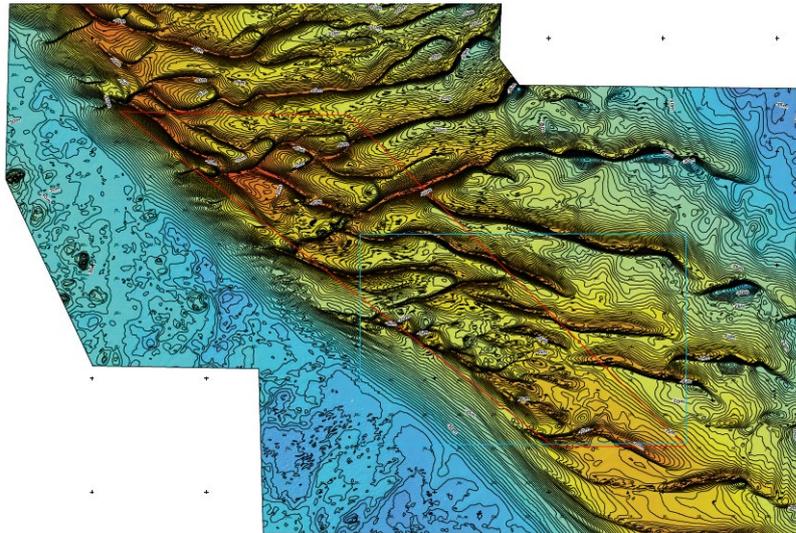
**Figure 41** – Exemple de MNT topo-bathymétriques côtiers : gauche : détroit du Pas-de-Calais et droite : pertuis charentais (Shom)

Les données sédimentologiques régionales sont accessibles dans les fascicules de synthèse des connaissances (Cerema, 2021) qui fournissent, dans leur chapitre 4, des cartes régionales de nature et répartition des sédiments couvrant les fonds marins. Ces données proviennent notamment des cartes sédimentologiques publiées par le Shom (cartes G) à des échelles proches du 1/50 000 ainsi que de campagnes de terrain menées par différents laboratoires de recherche et donnant lieu à la réalisation de cartes à beaucoup plus haute résolution.

### 8.1.2. Morpho-bathymétrie locale

Les levés morpho-bathymétriques du site d'extraction ainsi que de son environnement proche (500 m autour de la concession conformément au protocole conseillé par Ifremer) constituent une donnée de base plus spécifique à l'étude. Des progrès très importants réalisés dans le domaine de la métrologie en hydrographie (sondeur multifaisceaux, Lidar) permettant d'obtenir une densité de points de mesures atteignant 4 à 8 points par mètre carré, 100 fois supérieure aux levés mono-faisceaux antérieurs. Cette technique de mesure est celle préconisée par l'Ifremer pour la mise en œuvre des campagnes de terrain nécessaires à la réalisation de tels levés.

Ceux-ci fournissent des informations très précises sur la morphologie du fond (notamment les figures sédimentaires ou formes de fond) à différentes échelles spatiales allant des rides métriques jusqu'aux bancs kilométriques. La Figure 42 présente un exemple de levé multifaisceaux sur le site de la Horaine qui est un gisement de sables coquilliers moyens et grossiers situé à l'entrée ouest de la baie de Saint-Brieuc, en face de Paimpol, à plus de 9 km de la côte. Il s'agit d'un banc représentant une importante accumulation sédimentaire de près de 8 km de long et 1,8 km de large qui culmine à une cote de l'ordre de -10 m sur des fonds adjacents autour de -32 m ZH. Le marnage sur le site peut atteindre 10 m. Ce banc est parcouru par une cinquantaine de dunes de sable de 6 m de hauteur en moyenne (max. 14 m) et 160 m de longueur d'onde. En outre, le flanc doux de ces dunes est modelé par des mégarides de longueurs d'ondes comprises entre 3 et 8 m (Asterie, 2010).



**Figure 42** – Exemple de levé multifaisceaux mettant en évidence la présence de dunes sur un banc de sable sur le site de La Horaine (isobathe tous les 0,5 m ; IXBlue, 2017)

Les figures sédimentaires peuvent donc apparaître à plusieurs échelles spatiales. Elles ont fait l'objet d'une classification internationale selon leur taille (Ashley *et al.*, 1990) qui est résumée dans le Tableau 4. Chamley (1987) a proposé une autre classification reposant sur la granulométrie moyenne et la puissance des écoulements sur le fond (Figure 43). Il met notamment en évidence une différence entre les vagues de sable, générées par des courants entre 0,3 et 0,8 m/s avec des longueurs d'ondes de plusieurs mètres à plusieurs centaines de mètres et des hauteurs atteignant plusieurs mètres, et les mégarides ou dunes générées par des courants plus importants, au-delà de 0,6 m/s, mais présentant des caractéristiques géométriques plus courtes (longueurs d'onde de 0,5 à 10 m et hauteurs de 0,06 à 1,5 m). Plus récemment, en France, Gangloff *et al.* (2023) proposent d'utiliser le terme unique de dunes pour couvrir l'ensemble des formes de fonds hydrauliques couvertes par le Tableau 4.

**Tableau 4** – Classification internationale des dunes hydrauliques (Ashley *et al.*, 1990)

Dénomination	Petite	Moyenne	Grande	Très grande
Longueur d'onde	0,6 – 5 m	5 – 10 m	10 -100 m	> 100 m
Hauteur	0,075 – 0,4 m	0,4 – 0,75 m	0,75 – 5 m	> 5 m

Les équations de l'hydrodynamique, qui moyennent les processus à une échelle spatio-temporelle donnée, vont moyenner également les formes de fond dont la taille spatiale est plus petite que la taille de la maille horizontale de calcul. Pour cela, leur influence sur les écoulements sera alors modélisée par un coefficient de frottement empirique. Cette reconnaissance des formes de fond est donc importante pour la modélisation hydrodynamique à mettre en place.

Enfin, il faut noter que l'activité d'extraction elle-même génère des formes de fonds (voir Figure 44) induites par le passage des élinde d'aspiration du granulat qui crée des sillons longitudinaux ; la répétition de ce passage sur un même périmètre pouvant alors provoquer une dépression de plusieurs mètres par endroit (Figure 45).

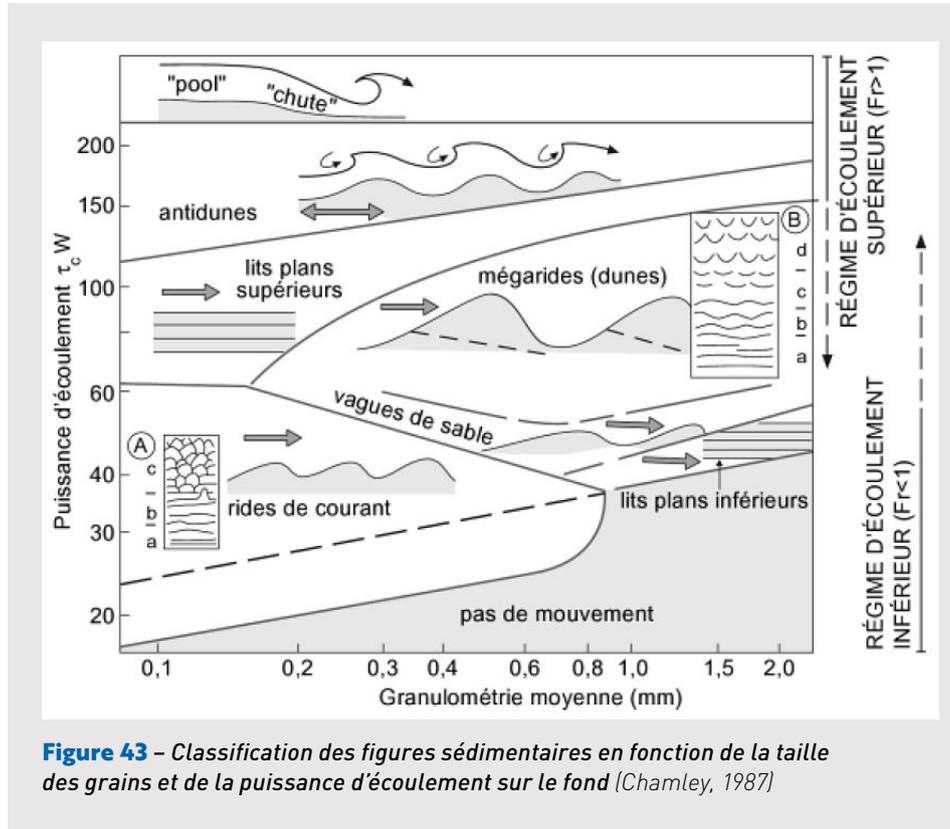


Figure 43 - Classification des figures sédimentaires en fonction de la taille des grains et de la puissance d'écoulement sur le fond (Chamley, 1987)

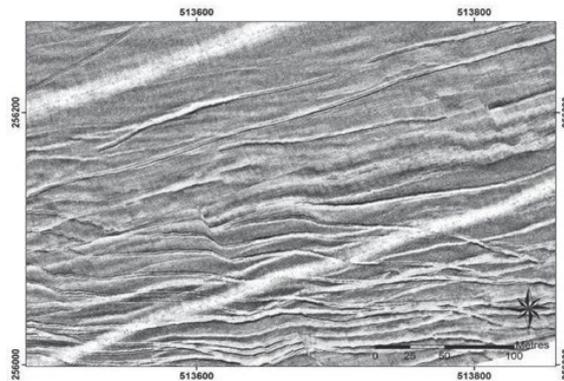


Figure 44 - Mesure par imagerie acoustique de sillons d'extraction sur le site de Dieppe (GIS SIEGMA, 2012)

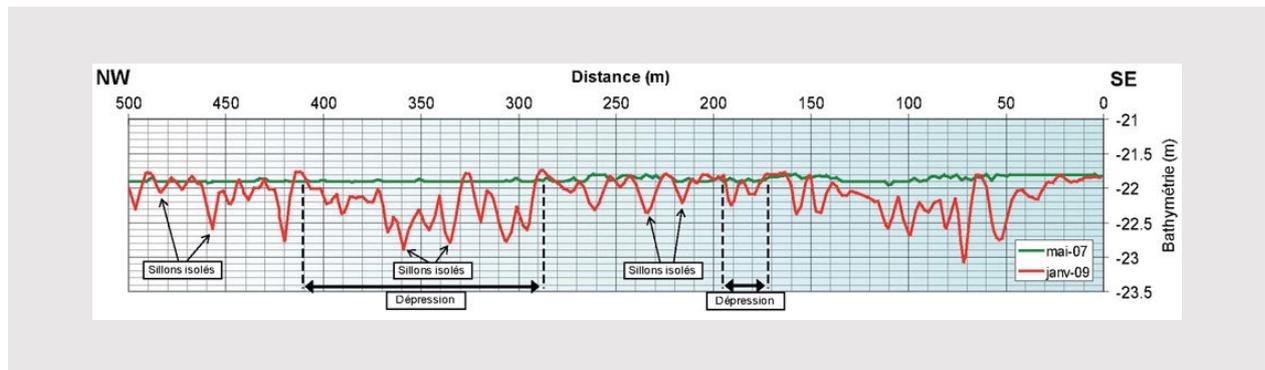


Figure 45 - Sillons d'extraction récents (moins d'un an) en Baie de Seine. Topographie transversale du fond avant (courbe verte) et après extraction (courbe rouge); exagération de l'échelle verticale x 25 (GIS SIEGMA, 2012)

### 8.1.3. Caractérisation locale des fonds marins et des sédiments

La caractérisation locale des fonds marins superficiels, complémentaire aux données régionales, s'obtient par des levés au sonar à balayage latéral ou par imagerie SMF (sondeur multi-faisceaux), complétés par des prélèvements d'échantillons de sédiments superficiels qui ne permettent pas la reconnaissance de gisements dans toute l'épaisseur du dépôt<sup>30</sup>.

Un exemple de caractérisation sur le site de la concession de Cairnstrath, au large de l'île de Noirmoutier est fourni ci-dessous. Les levés permettent de cartographier les faciès (Figure 46 et Figure 47) ainsi que les figures sédimentaires (Figure 48, voir aussi le chapitre 8.1.2.). Les échantillons, de leur côté, font l'objet d'analyses en laboratoire pour déterminer le pourcentage de carbonates (débris coquilliers), le pourcentage de fines et la granulométrie des sables et graviers (Figure 49).

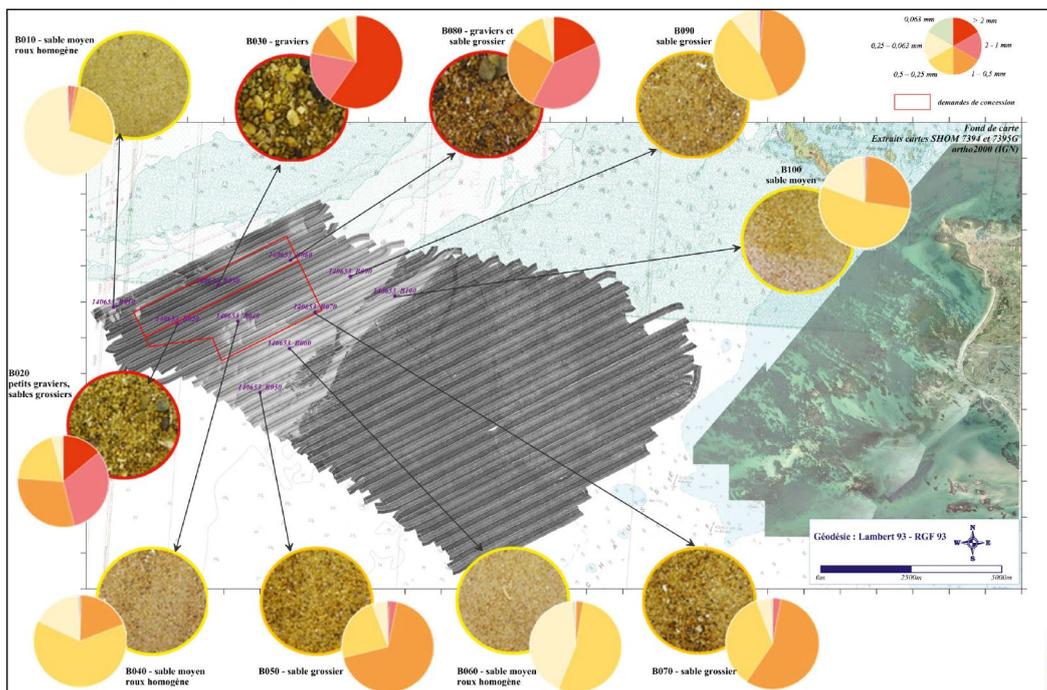


Figure 46 – Caractérisation des fonds sur le site de Cairnstrath (Creocean, 2015)

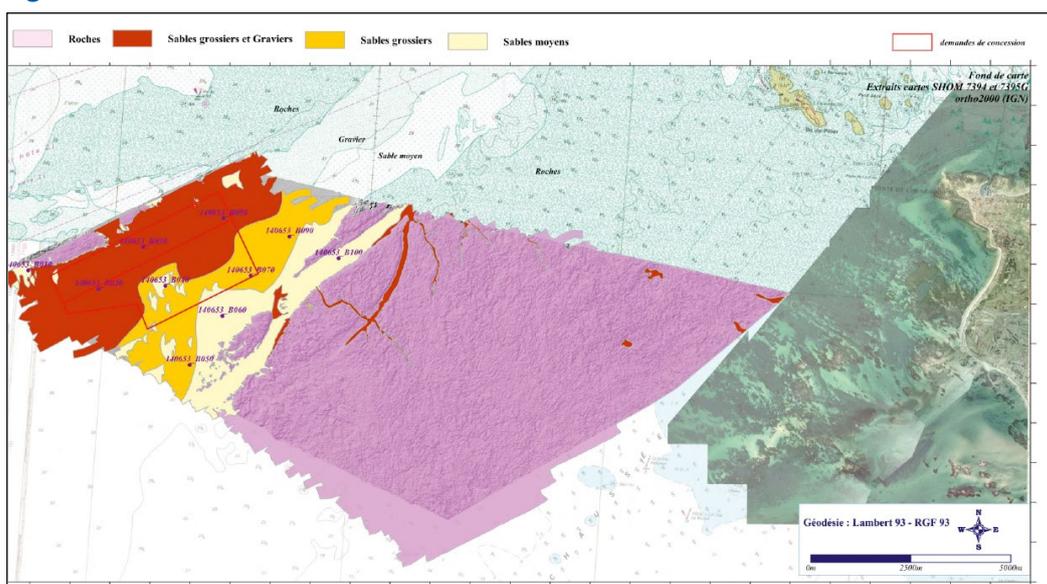


Figure 47 – Carte de synthèse de la caractérisation des fonds sur le site de Cairnstrath (Creocean, 2015)

<sup>30</sup> La caractérisation de gisement nécessite la mise en œuvre de campagnes de sismique et de carottages. Le code minier ne permettant pas de reconnaissance du gisement sans autorisation, il sera nécessaire de demander l'autorisation au préalable.

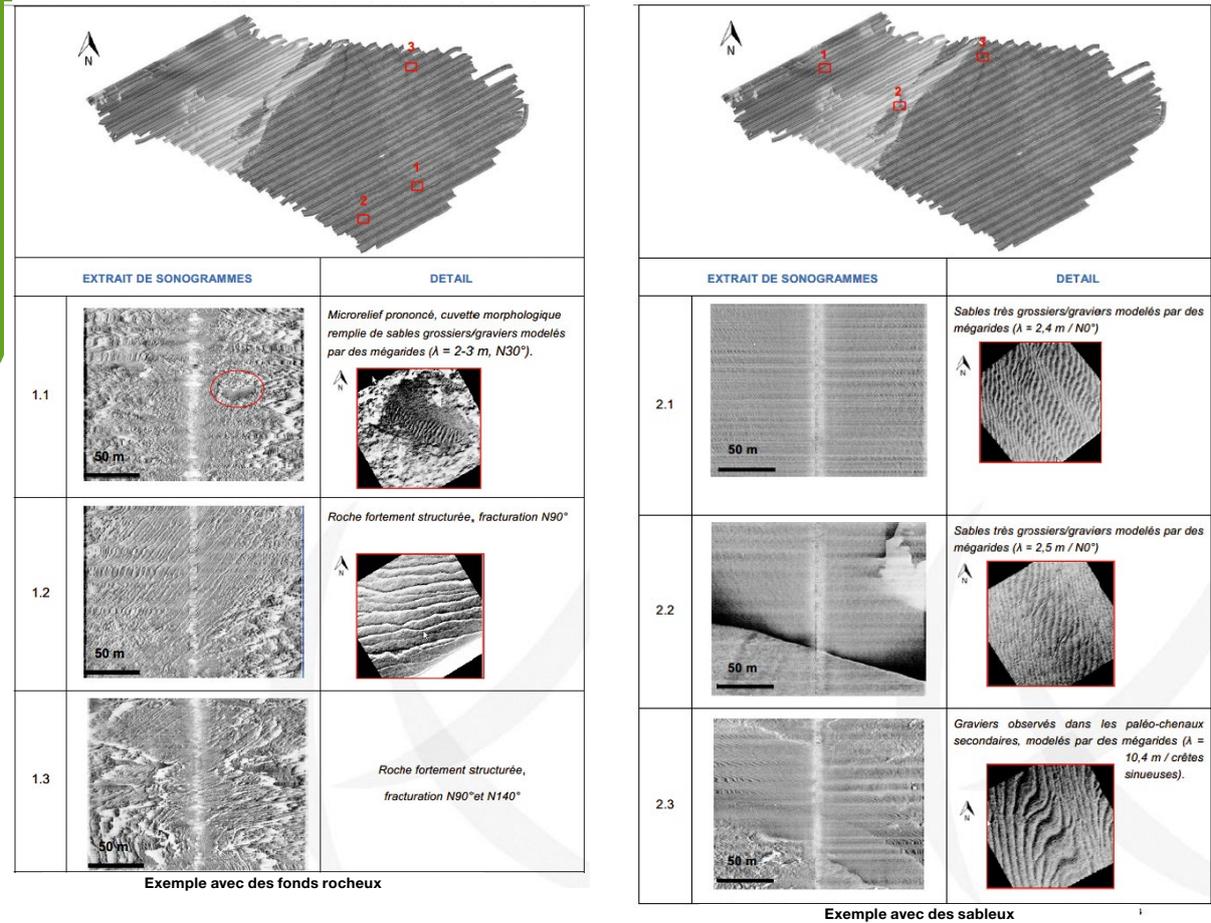


Figure 48 – Détails sur la caractérisation des fonds sur le site de Cairnstrath (Creocean, 2015)  
 À gauche: fond rocheux, à droite: fond sableux

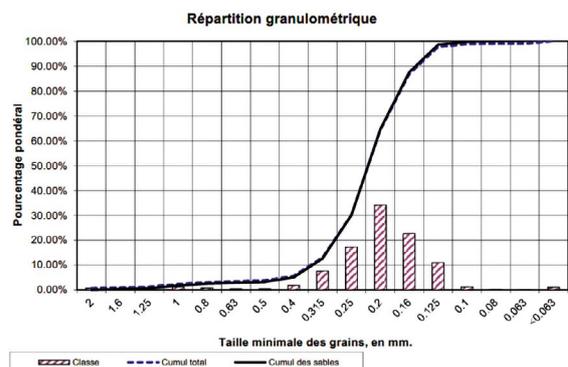
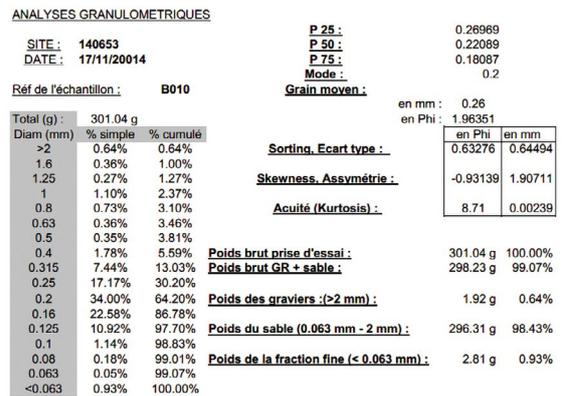
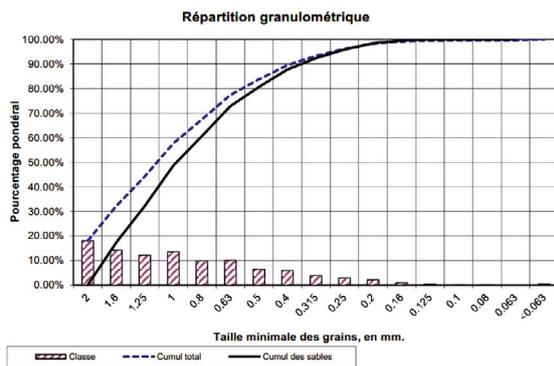
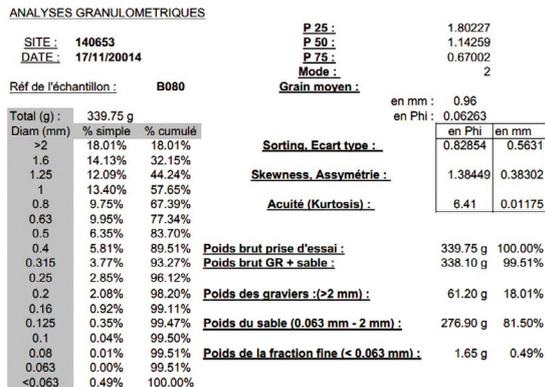


Figure 49 – Exemples d'analyses granulométriques sur le site de Cairnstrath (Creocean, 2015)  
 À gauche: sable grossier, à droite: sable fin

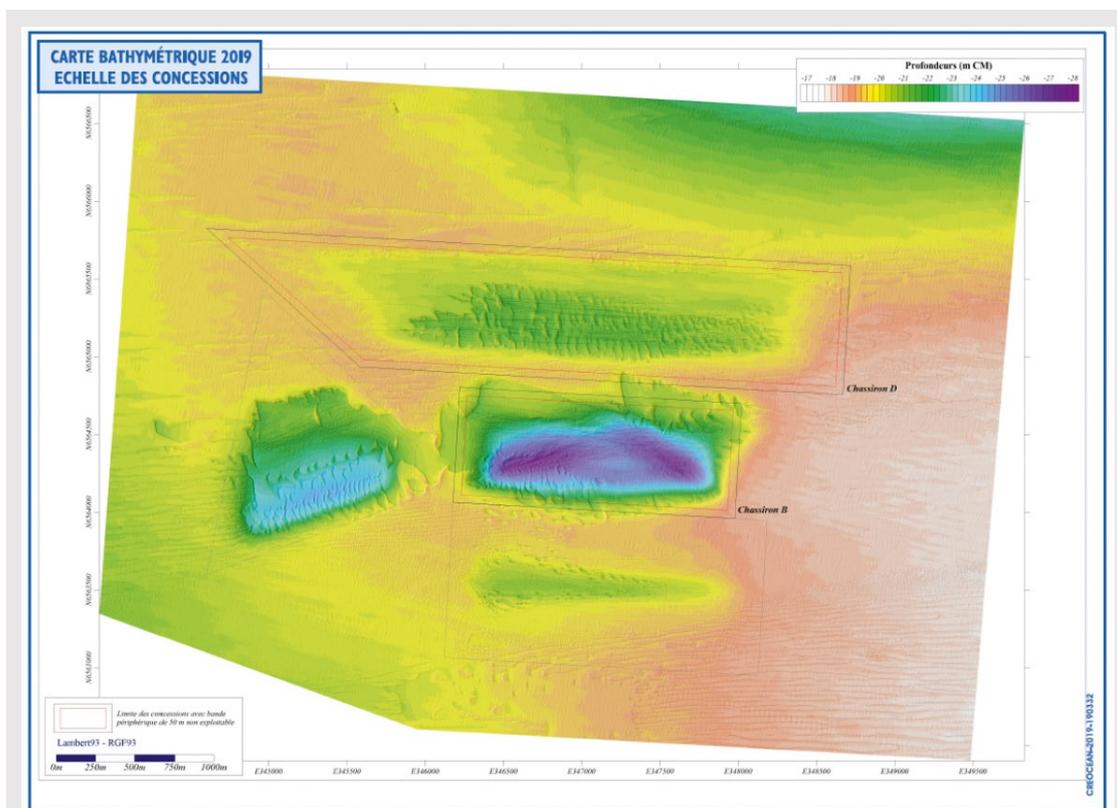
### 8.1.4. Traitement des données bathymétriques pour la modélisation

L'emprise de la modélisation va généralement nécessiter de combiner une mosaïque de données incluant les MNT bathymétriques régionaux, les levés du site de la concession et éventuellement des levés récents intéressant la zone d'étude. L'assemblage de ces différents types de données nécessitera des précautions particulières qui sont de deux ordres : d'une part, la conciliation des densités de points entre eux et avec le maillage de calcul, et d'autre part, l'ajustement de leurs incertitudes en référencement, notamment vertical.

La levée des incertitudes sur le référencement vertical et la mise en cohérence des données sur une même référence verticale constitue une étape préliminaire. Dans un second temps il faudra veiller à éviter des discontinuités factices aux frontières entre deux levés ce qui peut nécessiter usuellement d'ajuster le référencement vertical de certaines données.

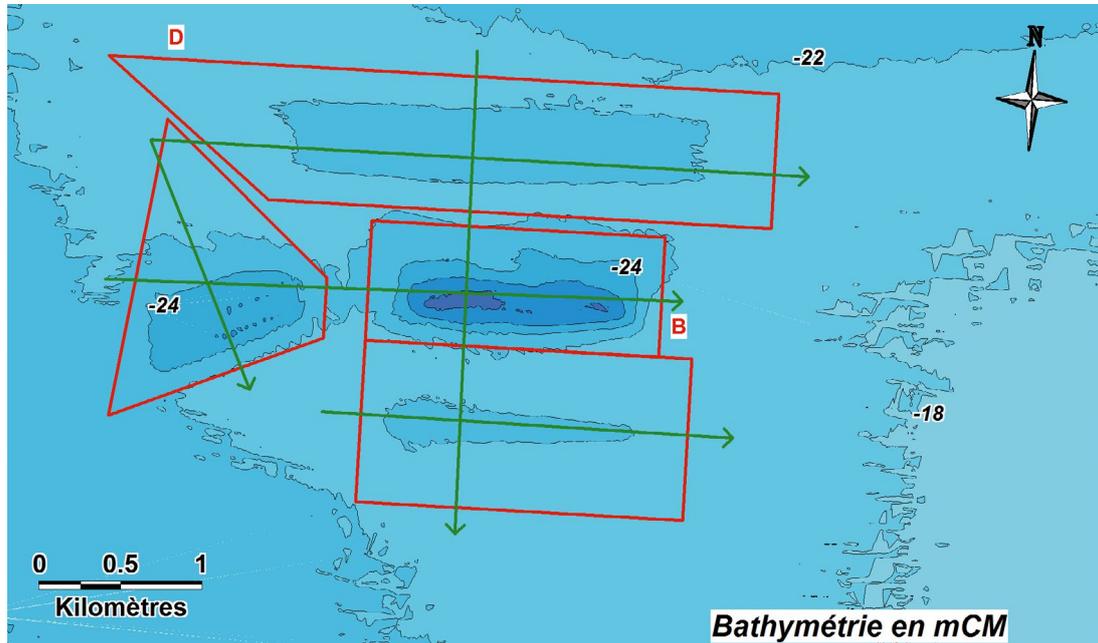
Sur le premier point, les levés bruts obtenus par sondeur multi-faisceaux présentent une densité de points très supérieure au maillage de calcul et qui capturent les figures sédimentaires les plus fines comme les rides et les mégarides. Les concepts physiques actuels sur le transport de sédiments et les modélisations numériques associées nécessitent alors de filtrer ces données de façon pertinente afin de fournir séparément deux types d'information en tout point du maillage de calcul ; c'est-à-dire d'une part la cote moyenne du fond en un point donné et d'autre part les caractéristiques des figures sédimentaires (hauteur, longueur d'onde) mises en évidence par le levé morpho-bathymétrique local au moment de la mesure.

Le maillage de calcul sera établi au préalable avec une taille de maille comprise entre 20 et 100 m sur le site d'extraction de façon à reproduire correctement les pentes et les détails bathymétriques de la souille. Les données morpho-bathymétriques seront alors projetées sur ce maillage en utilisant les algorithmes de lissage disponibles dans les logiciels établissant le modèle numérique de terrain pour la modélisation côtière. Un exemple de ce traitement est fourni sur les Figure 50 et Figure 51. Un calcul de l'écart-type entre la donnée de base et la donnée projetée sur le maillage pourra être effectué et cartographié.



**Figure 50** – MNT sur une maille de 1 m issu du levé bathymétrique de 2019 réalisé à l'aide d'un sondeur multi-faisceaux des concessions du Chassiron (Creocean, 2019)

La rugosité des fonds à introduire dans la modélisation sera estimée de son côté à partir des caractéristiques des figures sédimentaires observées en utilisant, par exemple, les formulations de van Rijn (2007) comme indiqué au chapitre 5.5.



**Figure 51** – MNT lissé du levé 2019 des concessions du Chassiron pour la modélisation sur une maille de 80m (Artelia, 2020)

## 8.2. DONNÉES DE NIVEAU ET COURANT

### 8.2.1. Données sur les niveaux marins

Les niveaux d'eau sont mesurés à l'aide de marégraphes installés dans les principaux ports de la façade. Les mesures sont analysées par le Shom qui sépare le signal en marée prédite et résidu qui représente les surcotes.

Pour la marée prédite, le Shom publie tous les ans les Références Altimétriques Maritimes (RAM) téléchargeables sur le site <https://diffusion.shom.fr/pro/risques/references-verticales/references-altimetriques-maritimes-ram.html>. Ce document fournit, pour les ports instrumentés, les niveaux caractéristiques essentiels à connaître ainsi que les niveaux de référence (niveau moyen de la mer, zéro hydrographique, niveau terrestre IGN69) comme cela est illustré sur la Figure 52.

Les surcotes et les niveaux marins extrêmes ont fait l'objet de plusieurs études nationales réalisées par le Shom et le Cerema (ex- Cetmef) en 2008, 2012, 2013, 2018 et mises à jour en 2022 (Shom et Cerema, 2022). Le résultat est une étude statistique des niveaux marins extrêmes de pleine-mer et basse-mer, réalisée à partir de l'ensemble des données marégraphiques disponibles au Shom. Ce produit, diffusé gratuitement par le Shom et le Cerema est téléchargeable sur le site <https://diffusion.shom.fr/niveaux-extremes-edition-2022.html>. Un exemple est fourni sur la Figure 53.

À noter également que l'estimation des surcotes liées au déferlement des vagues fait aujourd'hui l'objet d'une attention particulière dans le cadre des risques de submersion marine (par exemple vigilance vagues submersion de Météo France). Cette estimation n'est, en général, pas nécessaire pour vérifier l'absence d'effet d'une concession sur le trait de côte car elle n'apparaît que dans la zone littorale qui n'est pas modélisée en détail dans la méthodologie proposée. On se référera à Kergadallan (2013) pour plus de détails sur les méthodes d'estimation de cette surcote.

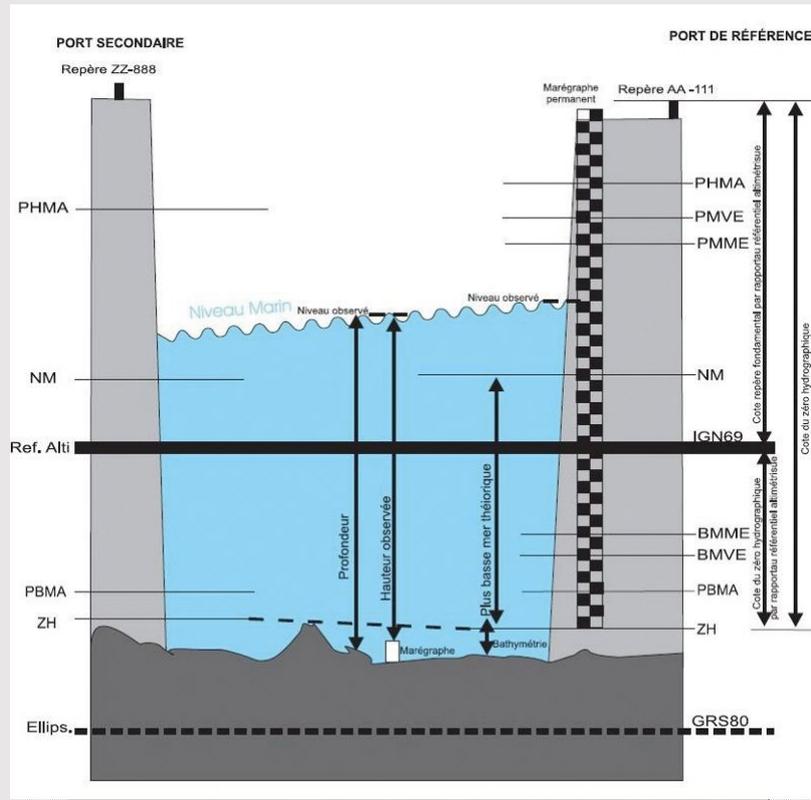


Figure 52 – Niveaux marins caractéristiques fournis par les RAM (document Shom)

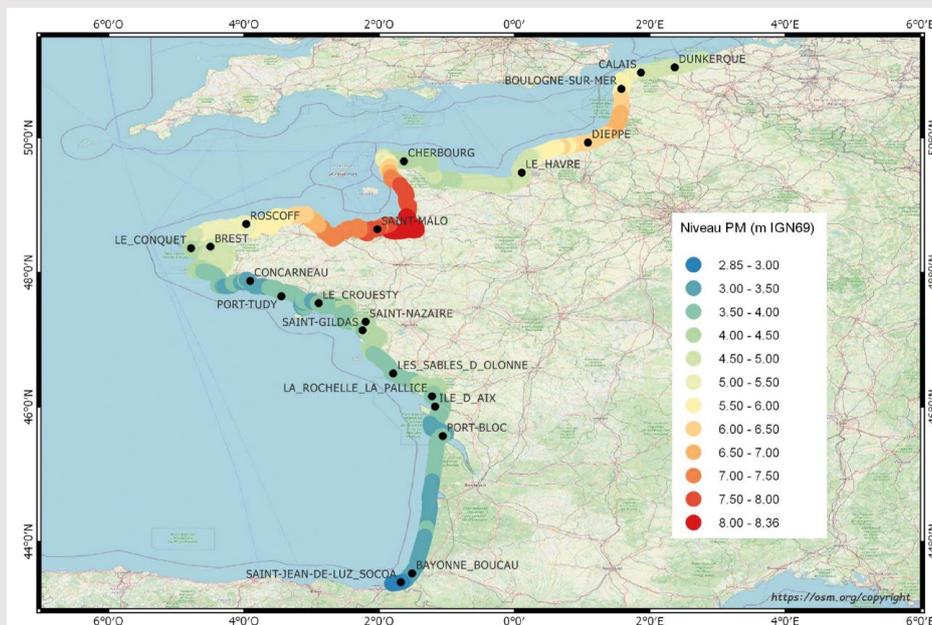


Figure 53 – Niveaux marins centennaux de pleine-mer (document Shom)

Enfin, l'élévation du niveau moyen de la mer induite par le changement climatique (voir chapitre 2.3.) va augmenter les hauteurs d'eau au-dessus des concessions ce qui va conduire à atténuer l'effet des souilles d'extraction sur l'hydrodynamisme. En conséquence, cette thématique n'est pas à prendre en compte dans la présente méthodologie.

### 8.2.2. Données de terrain sur les courants marins

Le Shom détient une grande partie des observations des courants marins réalisées aux abords des côtes françaises et outre-mer (base de données Shom - BD COURANTS). Elles sont en général effectuées pour les besoins de l'hydrographie, dans les sites intéressants pour la navigation maritime. L'Ifremer, les laboratoires universitaires côtiers et différents bureaux d'étude effectuent également des campagnes de mesures à des fins de recherche ou pour alimenter des études environnementales.

Les données courantologiques de terrain les plus fréquentes sont les mesures eulériennes à point fixe de la vitesse horizontale en intensité et direction, obtenues à partir du mouillage d'un ou plusieurs courantomètres en un point fixe. Les courantomètres à effet Doppler remplacent aujourd'hui les courantomètres classiques à hélice (ex. Aandera RCM9). D'autre part, des profileurs de courants (ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler) ont également été développés par différents constructeurs afin de mesurer le profil de courant sur une colonne d'eau. Ils sont généralement accompagnés d'un capteur de pression pour mesurer en parallèle les niveaux d'eau. Une sonde de mesures multi-paramètres peut également être installée pour profiter du mouillage (voir exemple sur la Figure 54).

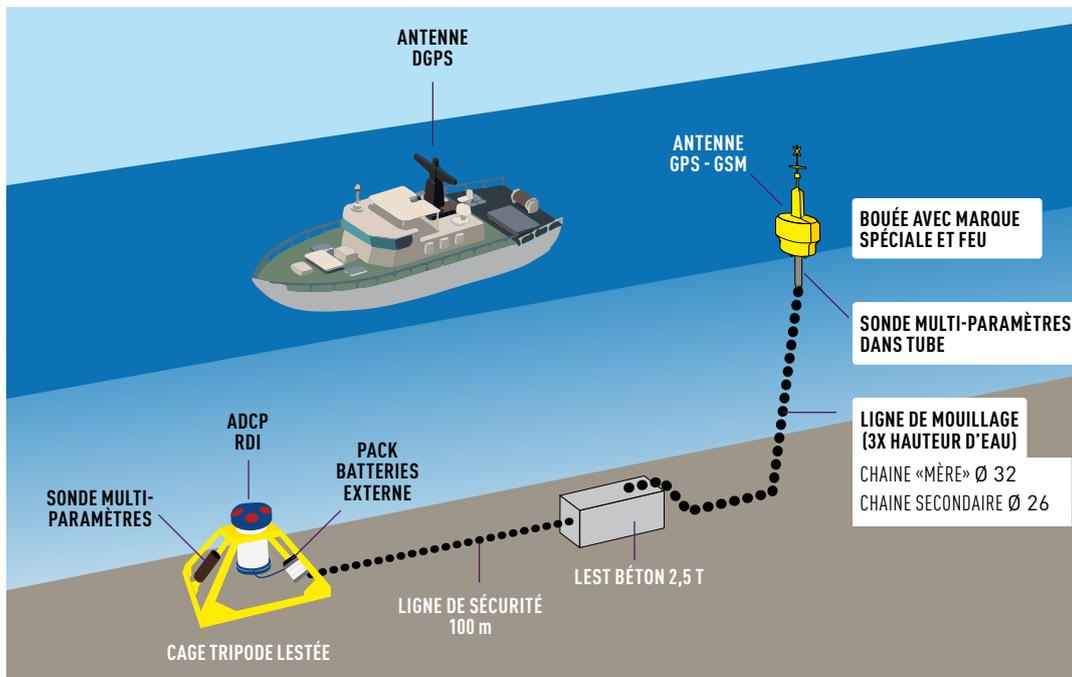


Figure 54 – Exemple de mouillage d'un courantomètre (Créocéan)

Les courantomètres à effet Doppler ont une fréquence d'acquisition beaucoup plus élevée (de 1 à 30 s) que les courantomètres classiques (5 à 10 min) ; il est donc important de traiter et filtrer le signal mesuré afin de limiter la fluctuation turbulente du signal et le rendre ainsi compatible avec la modélisation numérique.

### 8.2.3. Données de niveaux et courants reconstituées par modélisation numérique

Les modélisations numériques courantologiques classiques 2DH et 3D permettent de reconstituer régionalement et localement des données de niveau et de courant à la côte prenant en compte les effets de la marée, des surcotes météorologiques et le débit des fleuves (Simon, 2007 ; Desmare et Nicolle, 2012).

Toutes les façades métropolitaines sont couvertes par différents modèles 2D et 3D à l'échelle océanique, régionale et locale développés par différents organismes (voir par exemple <https://marc.ifremer.fr>). Les modèles régionaux golfe de Gascogne et Manche, régulièrement mis à jour, servent souvent à définir les conditions aux limites pour les modèles côtiers utilisés pour une étude de site.

## 8.3. DONNÉES SUR L'AGITATION (LES VAGUES)

### 8.3.1. Mesure de l'agitation

L'agitation est mesurée le long des côtes françaises par un réseau de houlographes côtiers dont les mesures sont archivées au sein du réseau CANDHIS géré par le Cerema (Figure 55). Les signaux bruts sont analysés selon deux méthodes : l'approche temporelle, dite aussi vague par vague et l'approche spectrale linéaire. Ces deux méthodes d'analyse fournissent les paramètres caractéristiques de l'état de mer qui sont alors archivés et accessibles en temps réel ou différé via le site internet <https://candhis.cerema.fr/>.

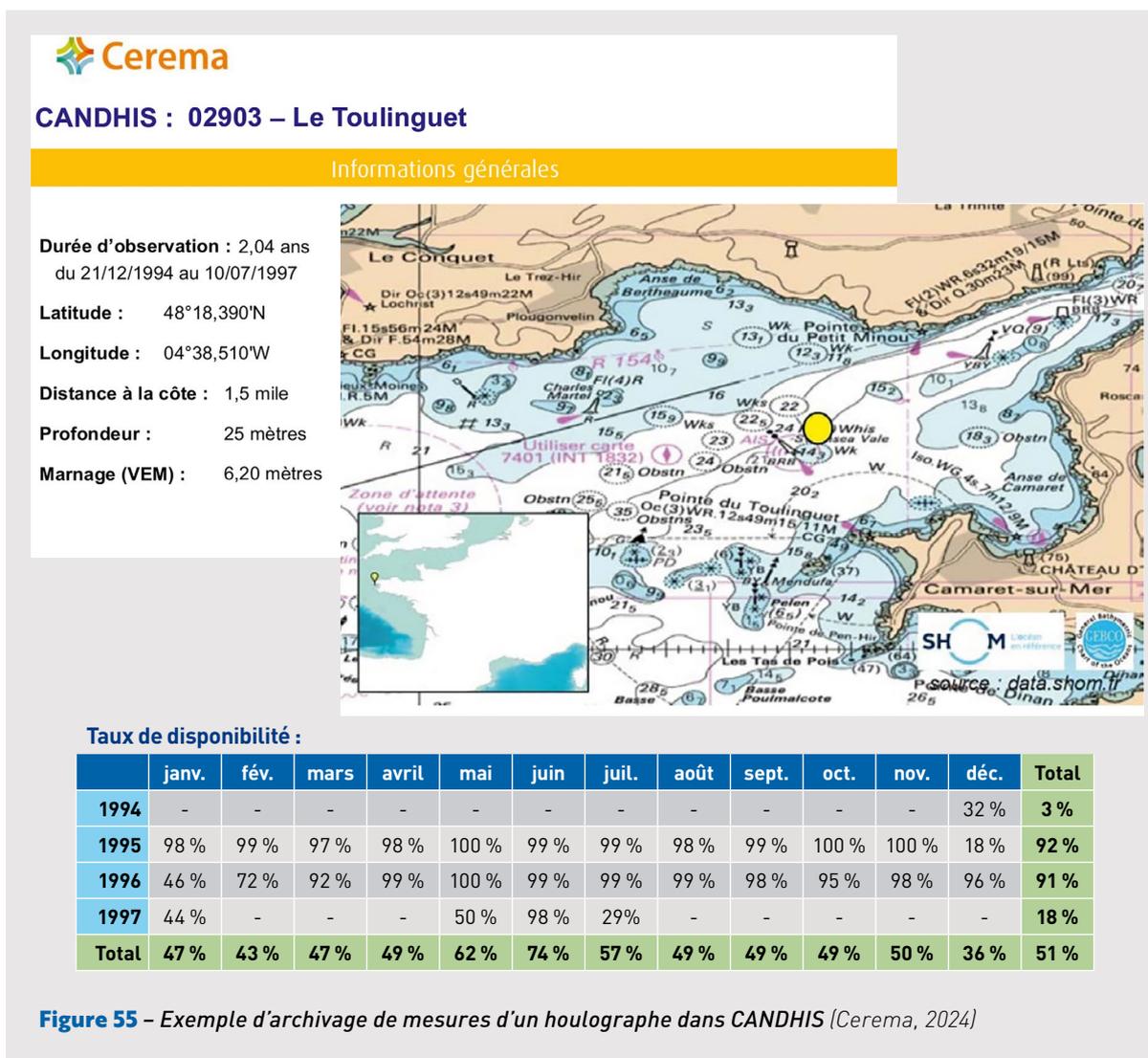


Figure 55 – Exemple d'archivage de mesures d'un houlographe dans CANDHIS (Cerema, 2024)

Les paramètres principaux de l'analyse temporelle d'un état de mer sont la hauteur significative  $H_{1/3}$  et la hauteur de la vague maximale  $H_{max}$ . Les données spectrales comprennent les paramètres réduits que sont la hauteur significative spectrale ( $H_{m0}$ ), la période de pic du spectre de fréquence ( $T_p$ ) et la direction de pic de la densité spectro-angulaire ( $Dir_p$ ). Ce sont les plus utilisées pour les études hydrosédimentaires. Le Cerema édite également des fiches synthétiques d'analyse détaillée fournissant des statistiques long-terme du climat des vagues (Figure 56) ainsi que des données sur les tempêtes remarquables (Figure 57).

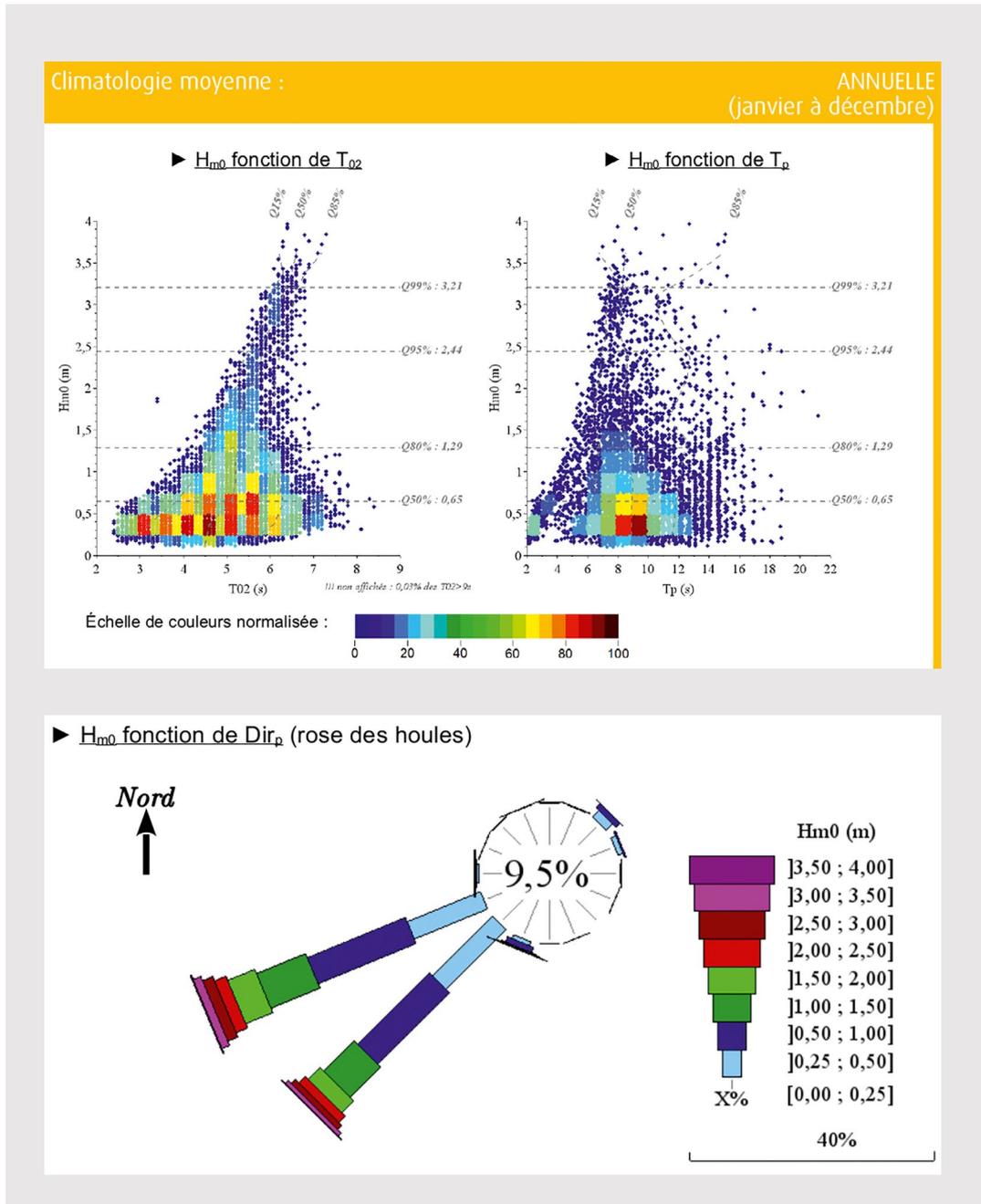
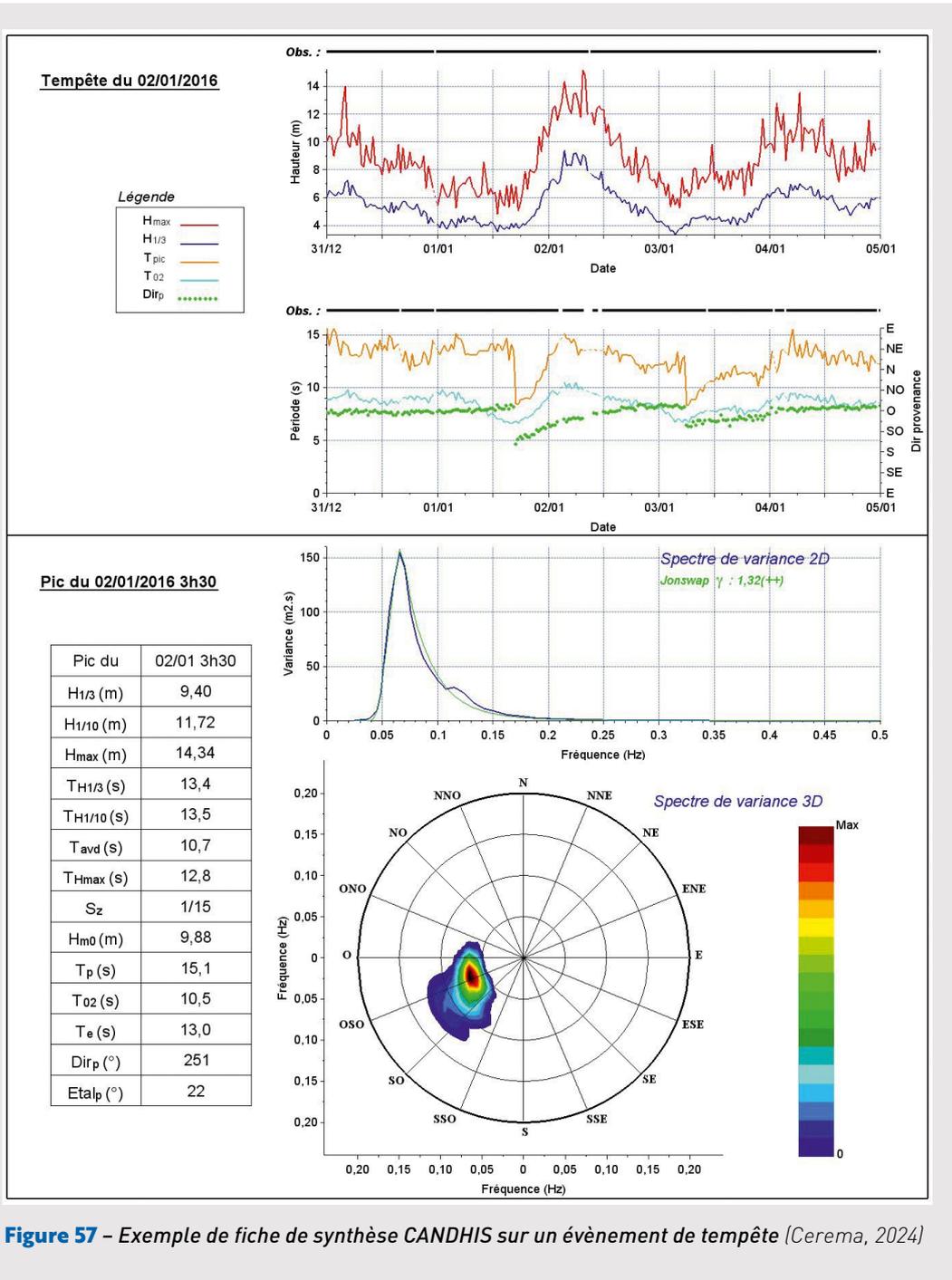


Figure 56 – Exemple de fiche de climatologie CANDHIS [Cerema, 2024]



### 8.3.2. Reconstitution des états de mer par simulation numérique

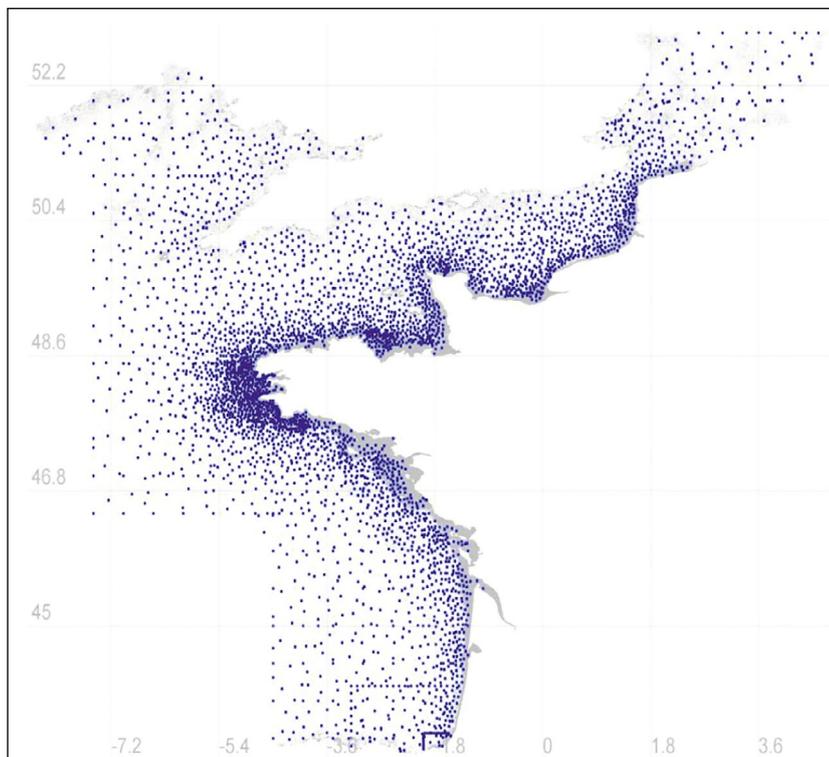
Le développement de la simulation numérique en météorologie marine et la bancarisation des données historiques de circulation atmosphérique ont permis la reconstitution historique des états de mer sur l'Atlantique nord sur plus d'un siècle (Bertin *et al.*, 2013) avec une précision croissante à partir des années 50 puis des années 80 (Saha *et al.*, 2010).

Plusieurs bases de données de reconstitution historique couvrant les côtes françaises Atlantique – Manche – Mer du Nord sont actuellement disponibles :

- La base de données ANEMOC a été développée conjointement par le Cerema (ex-Cetmef) et EDF R&D – LNHE. Elle couvre la période 1979-2010 et en est actuellement

à sa troisième version qui prend en compte les effets de variations de niveau d'eau et de courant liées à la marée et aux conditions météorologiques (surcotes) sur la dynamique des états de mer (ANEMOC-3, Raoult *et al.*, 2018). Elle a été développée à partir des logiciels de calcul Telemac-2D et Tomawac,

- La base de données BOBWA-H a été constituée dans le cadre d'un projet de recherche associant le BRGM et CNRM-GAME (URAI357 ; CNRS-Météo-France) au travers de la thèse d'Elodie Charles (Charles *et al.*, 2012). Elle a été obtenue à partir d'une simulation rétrospective (hindcast) sur une période de 44 ans et 8 mois, du 10/01/1958 au 31/08/2002 effectuée avec le modèle de vagues de troisième génération WAVEWATCH III™ (WW3), modèle spectral permettant de calculer les caractéristiques des vagues (spectre directionnel d'énergie, hauteurs, périodes, directions, etc.) sur des domaines océaniques à côtiers. Les données peuvent être demandées au BRGM via le site <https://bobwa.brgm.fr/>,
- L'Ifremer a développé et met à disposition la base de données HOMERE constituée initialement d'un rejeu océano-météo entre 1994 et 2012 couvrant l'ensemble des côtes Atlantique-Manche-Mer du Nord (Boudière *et al.*, 2013) qui a été étendue jusqu'en 2016 (Maisondieu *et al.*, 2017). Cette base de données fournit l'ensemble des paramètres globaux océano-météo utiles sur 110 000 points pour l'analyse des états de mer au large et le long des côtes françaises incluant le niveau d'eau, les courants moyens sur la verticale, le vent et les vagues ainsi que d'autres paramètres plus spécialisés comme le partitionnement des états de mer et les paramètres utiles pour estimer le transport sédimentaire (Maisondieu *et al.*, 2017). De plus, il est possible d'extraire de cette base les spectres directionnels sur 4096 points représentatifs incluant notamment les sites de mesures *in situ* du réseau CANDHIS (Figure 58). Ces spectres détaillés sont très utiles pour forcer des modèles locaux de propagation des états de mer. L'ensemble des données est accessible via le site <http://doi.org/10.12770/cf47e08d-1455-4254-955e-d66225c9dc90>.



**Figure 58** – HOMERE : Points de sortie spectres directionnels (Maisondieu *et al.*, 2017)

- Citons également le travail du Shom (2023) qui a récemment mis en ligne le rejeu HYWAT couvrant les données de niveaux d'eau, courants et états de mer sur l'ensemble de la façade Atlantique pour la période 1979-2022 ([https://diffusion.shom.fr/oceanographie/rejeux\\_climatologiques\\_19792022\\_de\\_marees\\_surcotes\\_et\\_vagues\\_sur\\_la\\_facade\\_atlantique.html](https://diffusion.shom.fr/oceanographie/rejeux_climatologiques_19792022_de_marees_surcotes_et_vagues_sur_la_facade_atlantique.html)).

### 8.3.3. Les tempêtes historiques

La connaissance et l'analyse des tempêtes historiques est importante pour caractériser les événements les plus marquants en termes de recul du trait de côte et d'érosion<sup>31</sup>. Elles peuvent être extraites des bases de données décrites précédemment. Les fascicules de synthèse des connaissances (Cerema, 2021) recensent l'ensemble de ces tempêtes historiques et fournissent également des données caractéristiques utiles. Des fiches de statistiques d'extrêmes avec des éléments concernant les tempêtes passées ont été réalisées tout le long du littoral par le BRGM à partir du jeu de données BOBWA (Bulteau *et al.*, 2013). Les tempêtes plus anciennes ont été recensées par le projet VIMERS<sup>32</sup>.

Les effets des événements extrêmes sont variables selon les sites et il est recommandé d'en considérer plusieurs *a priori* pour les simulations.

## 8.4. DONNÉES SUR LE LITTORAL

### 8.4.1. Étendue des données à collecter

L'étendue des données à collecter pour la connaissance de la mobilité du littoral va être fonction de la stratégie de modélisation retenue comme cela est détaillé au chapitre 9.1. En effet, toutes les modélisations décrites dans la partie B n'ont pas vocation à être mises en œuvre de manière systématique. Les Figure 66 et Figure 67 fournissent les arbres de décision pour définir les modélisations à mettre en place. La collecte des données doit être cohérente avec les choix effectués.

### 8.4.2. Géomorphologie

Les données géomorphologiques générales du littoral sont recensées dans les fascicules de synthèse des connaissances (Cerema, 2021) avec notamment la cartographie des types de côte.

### 8.4.3. Historique du trait de côte

La connaissance de l'historique des évolutions du trait de côte est une donnée importante dans le cas des côtes basses meubles situées dans une zone potentiellement affectée par le projet. Ces évolutions peuvent en particulier servir à évaluer plus précisément le transit littoral par modélisation inverse (voir 8.4.7). C'est une donnée indispensable lorsque la stratégie d'étude retenue inclut une modélisation de l'évolution du trait de côte.

Dans ce cas, des levés passés et présents du trait de côte sur la ou les cellules sédimentaires possiblement affectées par le projet, sont nécessaires pour établir un état de référence mais également un bilan des évolutions passées et présentes. Ces données sont disponibles dans la plupart des observatoires du trait de côte rassemblés au sein d'un réseau national

<sup>31</sup> Pour la région Nouvelle-Aquitaine voir <http://www.observatoire-cote-aquitaine.fr/Le-reseau-tempetes>

<sup>32</sup> <http://tempetes.meteo.fr/Tempetes-et-submersion-marine-le-projet-VIMERS.html>

coordonné par le ministère en charge de l'environnement (<http://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/>) ou dans certains laboratoires de recherche. Si l'observatoire concerné n'est pas en mesure de fournir l'ensemble de ces données, il est possible de se référer à l'indicateur national d'érosion côtière<sup>33</sup> ou de se procurer des orthophotos littorales à différentes dates sur le portail de l'Institut Géographique National (IGN) pour en extraire des positions historiques du trait de côte. Enfin, les données satellitaires en accès public issues des satellites Landsat 1 à 8, ASTER et plus récemment Sentinel2 constituent une source de plus en plus utilisée pour reconstituer cet historique. Ces données bénéficient d'une facilité d'accès grâce à Google Earth Engine et de traitement grâce à la boîte à outils CoastSat<sup>34</sup> disponible en open source (Vos *et al.*, 2019).

Les fiches techniques 2.1 et 2.2 du rapport BRGM et Cerema (2022) fournissent des liens utiles et des recommandations détaillées sur les méthodes d'observation et de suivi du trait de côte ainsi que sur les relevés de trait de côte. La Figure 59 illustre l'évolution du trait de côte de la partie océanique du littoral du Verdon-sur-mer à l'embouchure de la Gironde face à la concession du Platin de Grave entre 1965 et 2019. Les données sont issues d'un travail de recherche du laboratoire EPOC (Castelle *et al.*, 2018) combinant digitalisation par photo-interprétation d'images aériennes et satellitaires pour les années les plus anciennes (1965 à 2012) et levés de terrain par quad et DGPS entre 2014 et 2019. On y observe une accumulation de sable avec une avancée très importante du trait de côte entre 1974 et 1996, suivi d'une accrétion plus lente entre 1996 et 2019.



**Figure 59** – Historique du trait de côte au Verdon-sur-mer en Gironde entre 1965 et 2019 sur orthophoto 2013 (iSea, 2020, données EPOC)

<sup>33</sup> <https://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/indicateur-national-de-l-erosion-cotiere-a1434.html>

<sup>34</sup> <https://github.com/kvos/CoastSat>

#### 8.4.4. Tendances d'évolution du trait de côte

Les études d'évolution historiques du trait de côte (dites aussi études diachroniques) s'évaluent à trois niveaux temporels :

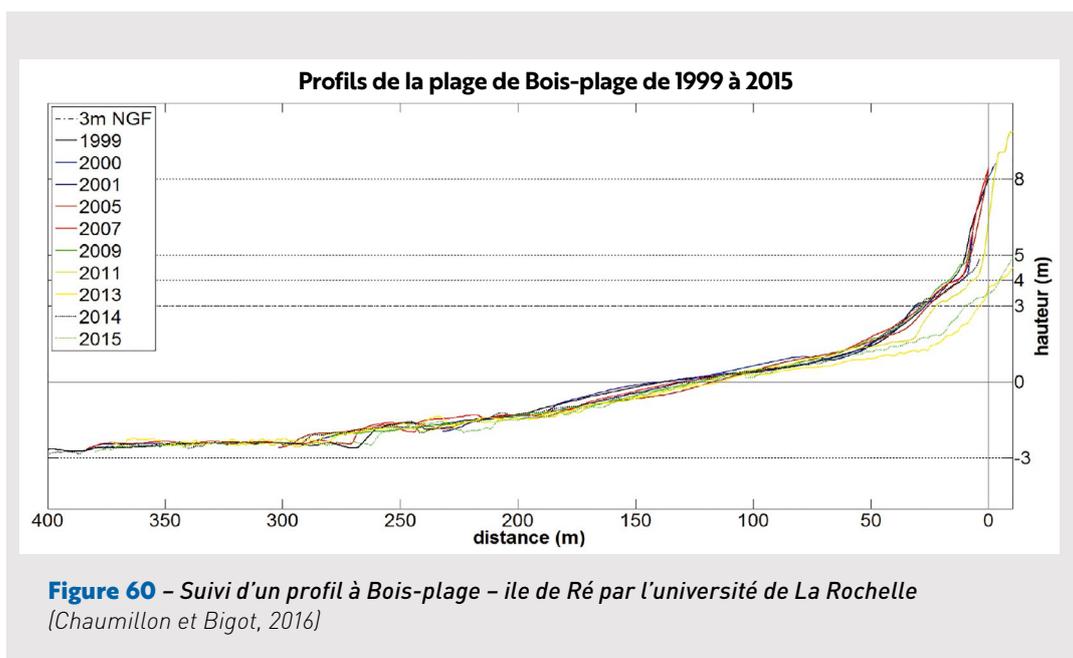
- À court-terme, les évolutions journalières et notamment lors des grosses tempêtes d'hiver qui peuvent faire reculer la position du trait de côte de plusieurs mètres en 24 heures<sup>35</sup>.
- À l'échelle annuelle, les évolutions saisonnières qui sont souvent réversibles avec un trait de côte avancé en fin d'été et en recul à la fin de l'hiver,
- À l'échelle pluriannuelle, une tendance à long-terme à la stabilité, à l'érosion ou l'accrétion se dessine avec une moyenne sur la période étudiée et des fluctuations pluriannuelles possibles liées à différents facteurs naturels par exemple les oscillations atmosphériques de type oscillation nord-Atlantique (Castelle *et al.*, 2018 ; Poirier *et al.*, 2021).

Des bifurcations plus brutales d'évolution peuvent aussi être observées notamment aux embouchures de fleuves et de lagunes et doivent être repérées.

Dans le présent guide, les évolutions à court-terme sont utiles à connaître dans le cas où une modélisation d'évolution d'un profil de plage est à mettre en œuvre. Les évolutions pluriannuelles doivent être déterminées dans le cas où un modèle d'évolution du trait de côte doit être mis en œuvre.

#### 8.4.5. Évolutions du profil de plage (optionnel)

Dans le cas où un modèle d'érosion de profil de plage doit être mis en œuvre, des informations topo-bathymétriques concernant la forme et possiblement l'évolution d'un profil représentatif des secteurs concernés sont à rechercher. Dans l'idéal, les informations topo-bathymétriques à obtenir doivent couvrir une zone allant de la dune jusqu'à la profondeur de fermeture si possible (voir chapitre 1.2.2.). Là encore les observatoires régionaux peuvent être source de telles données (Figure 60)



35 Pour la nouvelle-Aquitaine, on peut consulter le site <http://www.observatoire-cote-aquitaine.fr/Le-reseau-tempetes>

À noter également la réalisation par le Shom, en collaboration avec l'IGN, d'un référentiel continu terre-mer sur le littoral, Litto3D, qui est utilisable en particulier pour l'identification des risques de submersion marine et l'aménagement du territoire. Les données sont disponibles sur le site de diffusion du Shom (<https://diffusion.shom.fr/pro/amenagement/altimetrie-littorale.html>). Elles permettent d'extraire notamment des profils de plage sur les zones d'intérêt. Dans le cas où aucune donnée ne serait disponible, il est recommandé d'effectuer un levé du profil à étudier.

#### 8.4.6. Aménagements existants et actions anthropiques

Les conséquences des aménagements côtiers sur l'évolution du trait de côte et notamment des ouvrages rigides, ont été largement documentées (MEEDDM, 2010). Leur construction constitue généralement un facteur de rupture d'évolution significatif (arrêt d'une érosion ou au contraire exacerbation au voisinage) à considérer en se renseignant sur les dates de construction des différents ouvrages présents sur un site.

Ainsi, il est indispensable de recenser les interventions sur le littoral, les aménagements qui artificialisent le trait de côte, ainsi que la construction d'ouvrages de protection et de choisir en conséquence les périodes d'étude pour les modélisations ou d'en tenir compte pour l'interprétation des résultats. Les rechargements ou remaniements de plage qui modifient les évolutions naturelles du littoral, perturbent notamment les analyses diachroniques, et doivent être répertoriés. Les sites d'extraction de granulats marins existants, en exploitation ou non, doivent également être recensés ici.

Les fascicules de synthèse des connaissances (Cerema, 2021) recensent, dans leur chapitre 5, les interventions humaines sur le littoral, connues à l'époque de leur rédaction. Le Cerema (2019) a également établi une cartographie des ouvrages et aménagements littoraux et une base de données utile à consulter. Ces documents sont généralement à mettre à jour localement au moment de l'étude.

#### 8.4.7. Le transit littoral

Des données relatives au transit littoral sont disponibles sur un certain nombre de cellules littorales le long des côtes Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord. Les fascicules de synthèse des connaissances (Cerema, 2021) recensent ces données qui sont souvent synthétisées sur les schémas régionaux de la dynamique hydrosédimentaire (voir exemple sur la Figure 65). En cas d'insuffisance de ces données, une modélisation inverse peut être mise en œuvre à partir de différentes positions historiques du trait de côte comme cela est détaillé au chapitre 7.1.1. Celle-ci peut mettre en évidence une variabilité pluriannuelle du transit selon la période retenue pour les calculs ; un exemple est fourni sur la Figure 74 pour le littoral médocain (paragraphe 9.3.5).

Enfin, de nouvelles méthodes d'acquisition de données topo-bathymétriques tels que le Lidar fixe ou aéroporté, les drones aériens et marins, la photogrammétrie peuvent permettre de réaliser des levés complets de la zone littorale. La répétition de ces levés sur une période pluriannuelle peut permettre de réaliser des bilans volumiques sur des surfaces complètes et des estimations de transit sédimentaire.

#### 8.4.8. Secteurs sensibles ou à enjeux

Au-delà des aspects purement physiques traités dans le présent guide, il est important de rassembler une connaissance plus large des secteurs sensibles ou à enjeux aussi bien du point de vue économique que sociétal et environnemental.

À ce titre, des informations pertinentes peuvent être collectées, pour la réalisation de l'étude d'impact, dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL érosion, submersion marine), les Schémas de Cohérence Territoriale (SCOT), les Plans Locaux d'Urbanisme Intercommunaux (PLUi), les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) et les stratégies locales ou régionales de gestion durable du trait de côte lorsqu'ils existent.

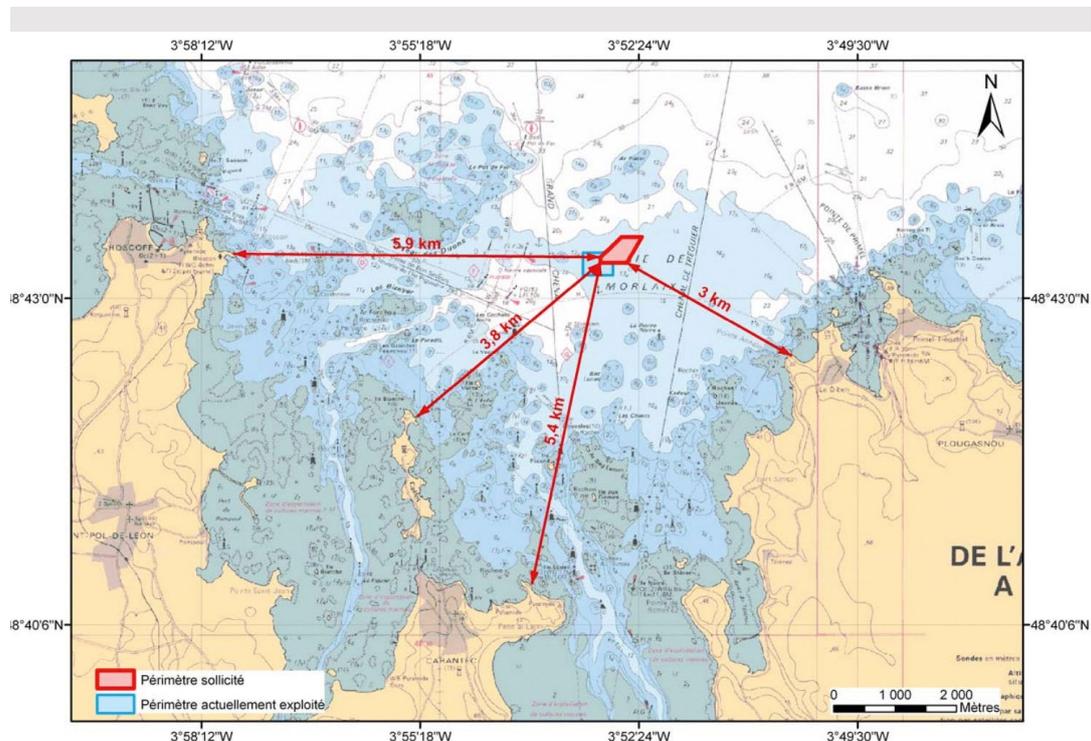
À l'avenir, les futures cartographies de recul du trait de côte réalisées par les collectivités désignées dans le cadre de la nouvelle loi « Climat et Résilience » du 22 août 2021 pourront également être une source de données utile. Elles peuvent permettre de moduler les critères d'impact (ou de non-impact) en fonction de la sensibilité locale aux évolutions du trait de côte et plus généralement du domaine littoral.

## 9. STRATÉGIE D'ÉTUDE POUR LA MISE EN PLACE DE LA MODÉLISATION HYDROSÉDIMENTAIRE

### 9.1. DYNAMIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE ET STRATÉGIE D'ÉTUDE

#### 9.1.1. Géographie régionale

La géographie régionale dans laquelle se situe la concession à étudier constitue le premier facteur physique à considérer. Elle est facilement visualisable sur les cartes marines détaillées à l'échelle d'environ 1/50 000<sup>e</sup> (voire du 1/150 000<sup>e</sup> pour la vue générale, si besoin) éditées par le Shom. Une fois située sur ces cartes, on obtient une vue d'ensemble de la situation du site étudié et notamment en relation avec le littoral comme cela est illustré sur la Figure 61.



**Figure 61** – Localisation du gisement des Duons (bleu : ancien périmètre ; rouge : nouveau périmètre, (Asterie, 2007)

### 9.1.2. Données physiographiques régionales

Ces données sont disponibles dans les fascicules et les atlas de la synthèse des connaissances par province sédimentaire publiés par le Cerema (2021). Ils fournissent des éléments de géographie, géologie, géomorphologie avec notamment la délimitation des unités et des cellules hydrosédimentaires ainsi que le type de côte<sup>36</sup>.

Chaque unité morphosédimentaire est ensuite décrite plus en détail. La Figure 62 extraite du fascicule 3 fournit par exemple une typologie des côtes dans l'unité morphosédimentaire de la baie de Seine orientale.

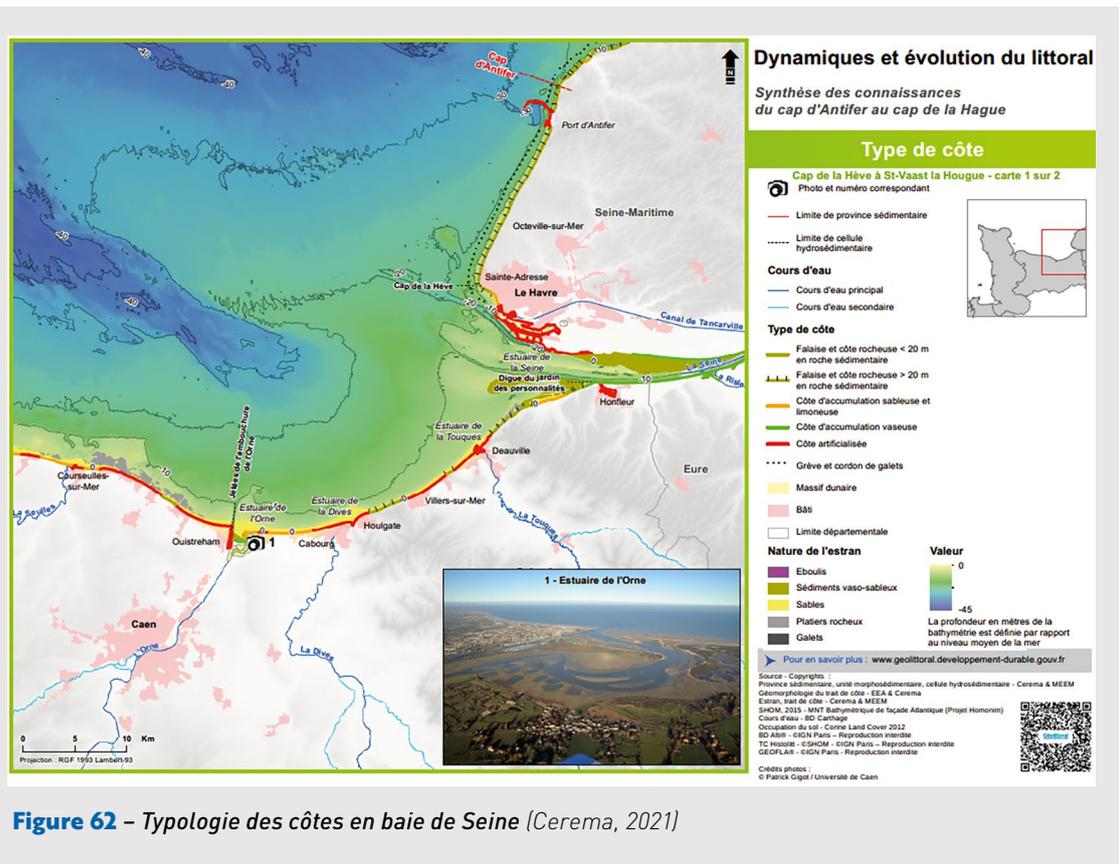
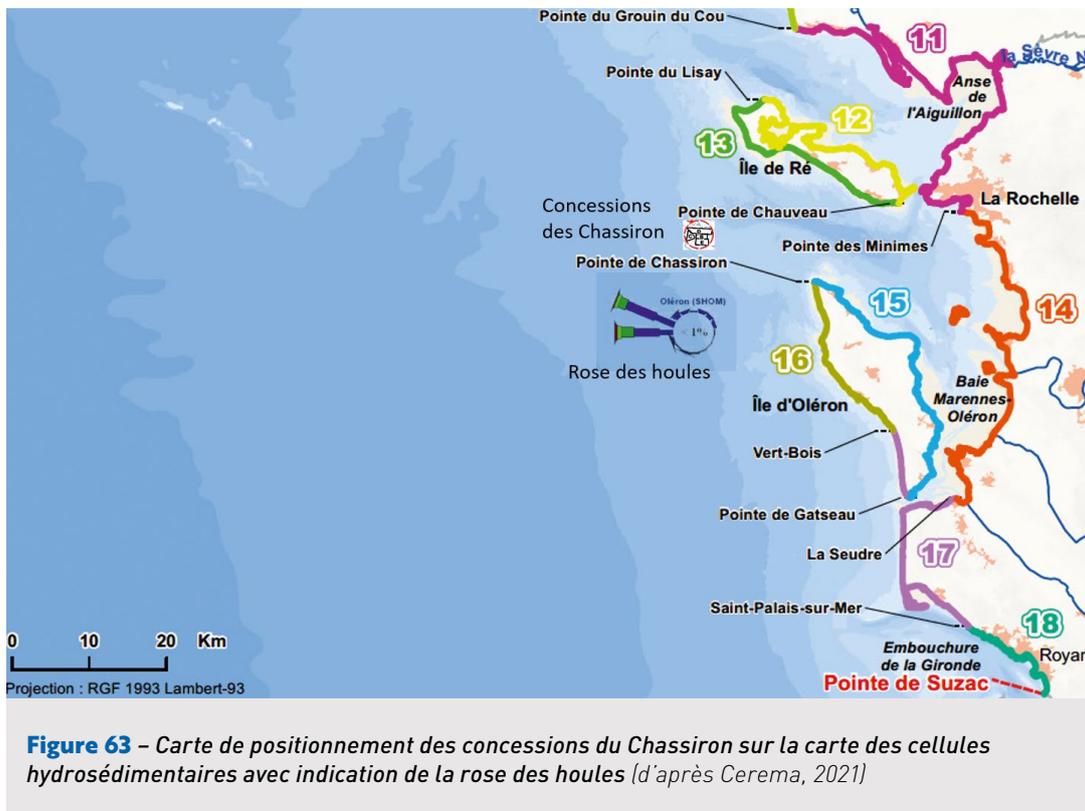


Figure 62 – Typologie des côtes en baie de Seine (Cerema, 2021)

<sup>36</sup> Lorsque les cellules ne sont pas encore identifiées, il convient de se référer à l'unité morphosédimentaire (MEEM, 2015) ou d'appliquer la méthode proposée par Cerema (2015) pour en définir les limites.

### 9.1.3. Identification de l'enveloppe des cellules sédimentaires à inclure dans la modélisation

La définition des cellules ou unités hydrosédimentaires littorales à inclure dans la modélisation résulte d'une analyse combinée de la géographie régionale, du climat d'agitation et de la mise en place de la grille de calcul pour la modélisation. Il s'agit ici de couvrir largement la zone d'étude de façon à être capable de fournir des informations utiles à l'étude d'impact, pour définir finement les zones du littoral susceptibles de subir un effet. Ainsi par exemple, les concessions du Chassiron, sont soumises à une agitation allant de N250° à N280° pouvant concerner essentiellement les cellules n° 13, 14, 15 et 16 du littoral de Charente Maritime (Figure 63).



**Figure 63** – Carte de positionnement des concessions du Chassiron sur la carte des cellules hydrosédimentaires avec indication de la rose des houles (d'après Cerema, 2021)

### 9.1.4. Schéma régional de la dynamique hydrosédimentaire

Les fascicules de synthèse des connaissances (Cerema, 2021) fournissent une vue d'ensemble des différents modes de transport sédimentaire et de la quantification des échanges lorsqu'ils sont disponibles. Ces informations peuvent être mises à jour localement sur les zones d'étude comme indiqué au chapitre 8.

Ainsi, la Figure 64 indique qu'en baie de Seine, le transit littoral mais aussi le transport par les courants sont à considérer. La Figure 65 rassemble l'ensemble des estimations quantitatives de l'intensité et du sens du transit littoral résultant le long des côtes charentaises.

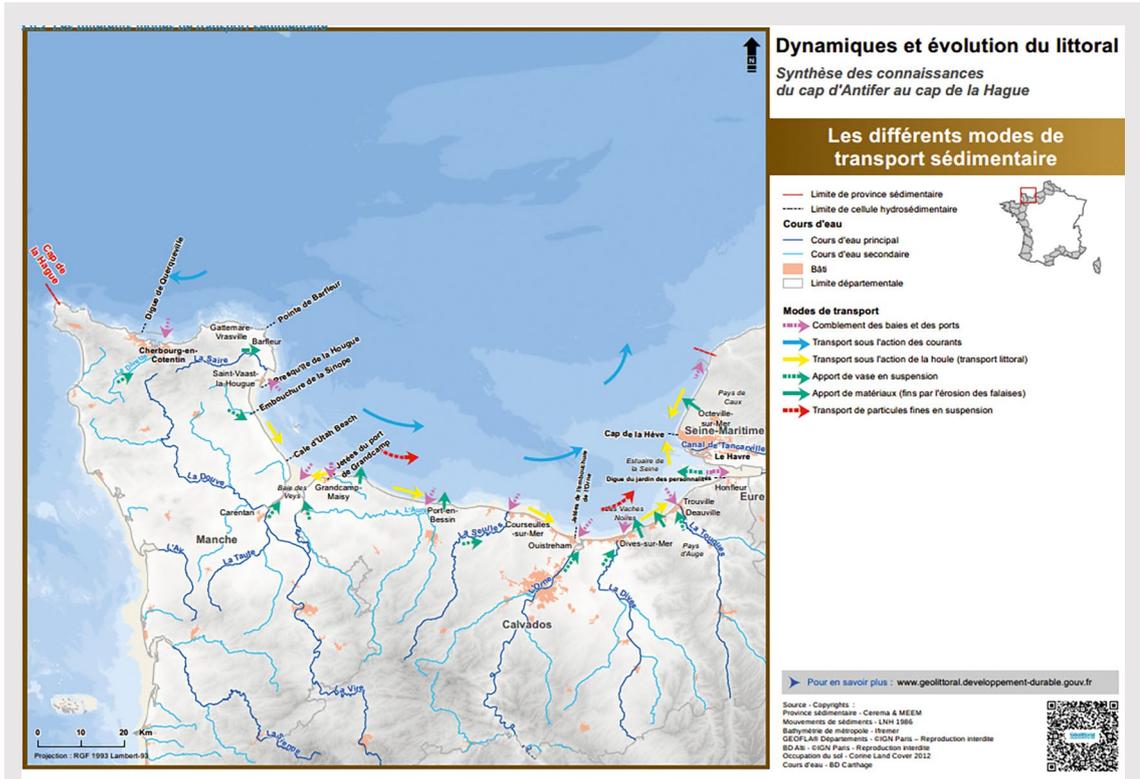


Figure 64 – Les différents modes de transport sédimentaire en baie de Seine (Cerema, 2021)

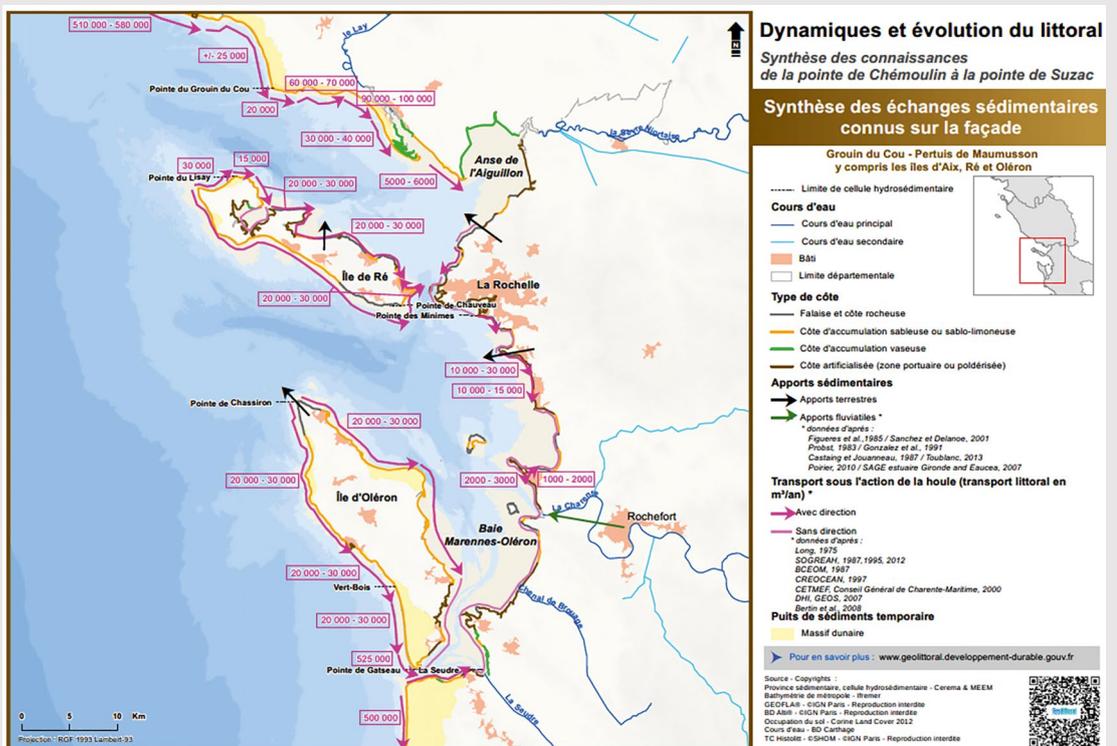


Figure 65 – Quantification du transit littoral le long des côtes charentaises en m<sup>3</sup>/an (Cerema, 2021)

### 9.1.5. Stratégie d'étude

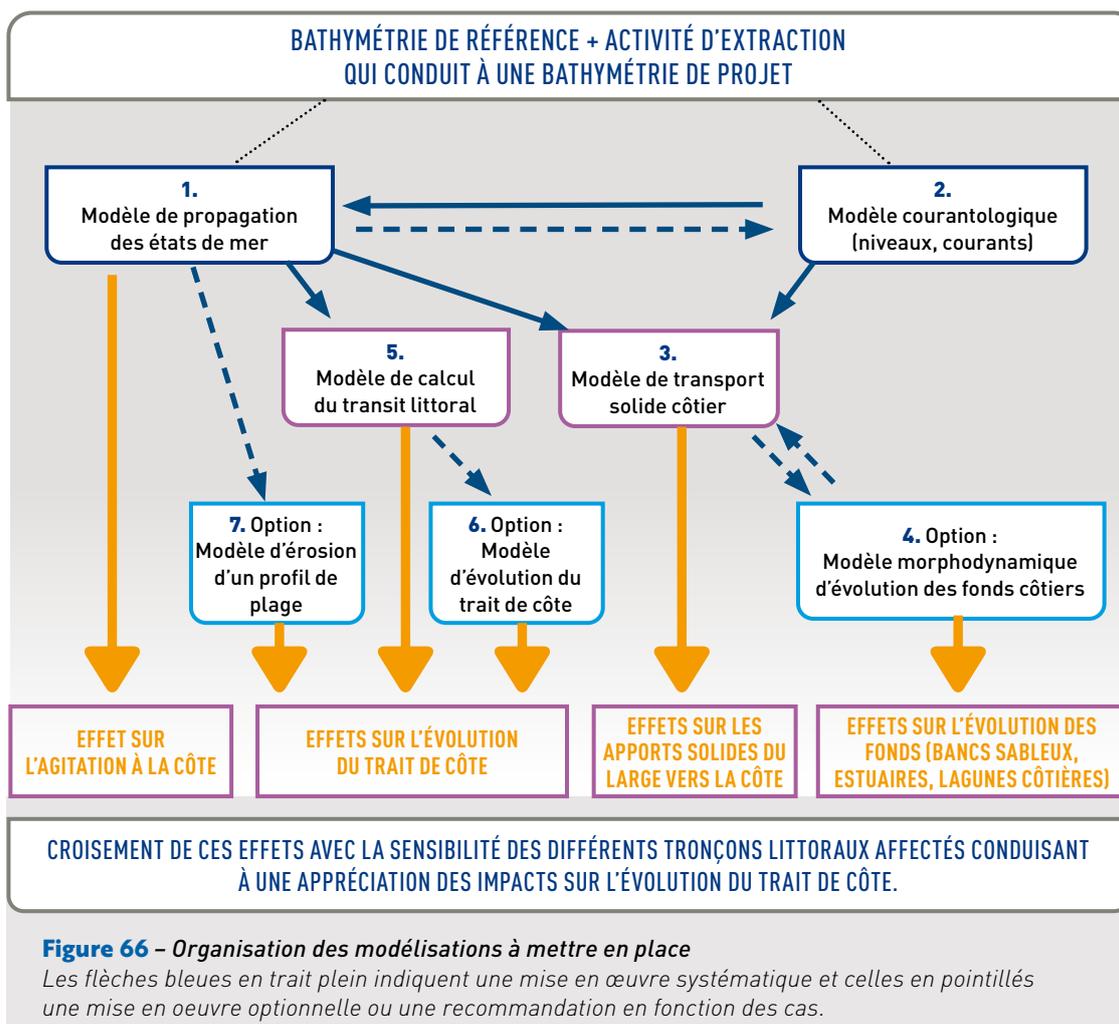
L'étendue spatiale du littoral à étudier ayant été définie (chapitre 9.1.3.) et les processus de transport solide identifiés, il convient ensuite de segmenter ce linéaire en tronçons homogènes selon la typologie décrite au chapitre 1.1. Des recommandations détaillées sur la façon d'effectuer le travail de segmentation et de classification du littoral sont fournis dans la fiche 2.4 du rapport BRGM et Cerema (2022).

Pour chaque tronçon un certain nombre de modélisations sont alors à mettre en place comme cela est décrit au paragraphe suivant.

## 9.2 ORGANISATION DES MODÉLISATIONS À METTRE EN PLACE

### 9.2.1. Organisation générale

L'organisation des modélisations à mettre en place est schématisée sur la Figure 66. Sept types de modèles, que l'on peut décomposer en trois groupes, sont susceptibles d'être mobilisés.



Le premier groupe concerne la modélisation hydrodynamique incluant les modèles de propagation des états de mer et le modèle courantologique :

- 1)** Le modèle de propagation des états de mer (chapitre 4) est à mettre systématiquement en œuvre. Il intègre l'effet de la bathymétrie, des niveaux et des courants marins sur la propagation des vagues (lien avec le modèle suivant comme indiqué par la flèche en trait plein sur la Figure 66). Il permet d'étudier les effets d'un projet sur les caractéristiques des vagues à la côte.
- 2)** Le modèle courantologique (chapitre 5), qui permet d'estimer les niveaux d'eau et la circulation des courants marins induits par la marée et les perturbations météorologiques en zone côtière, est également à mettre systématiquement en œuvre. Ses résultats sont à intégrer dans le modèle de propagation des états de mer. Dans le cas d'un projet susceptible d'avoir des effets sur une embouchure (chapitre 1.1.2.), il est recommandé d'inclure le calcul des courants littoraux dans ce modèle ce qui nécessitera un couplage avec le modèle de propagation des états de mer (voir flèche en pointillé sur la Figure 66).

Le deuxième groupe concerne les modélisations du transport solide côtier et des évolutions morphodynamiques des fonds côtiers. Ces modèles sont en interaction forte avec le modèle hydrodynamique avec qui ils partagent le même maillage de calcul et la même configuration bathymétrique :

- 3)** Le modèle de transport solide côtier (chapitre 6.1.) est à mettre en œuvre pour apprécier les effets du projet sur la remontée des sédiments du large vers la côte. Il nécessite en entrée les résultats de la modélisation hydrodynamique. Ce modèle est décorrélié du modèle de transit littoral car les effets des apports solides du large vers la côte sur l'évolution du trait de côte ne sont perceptibles que sur le temps long (siècle ou plus).
- 4)** Le modèle morphodynamique d'évolution des fonds côtiers (chapitre 7.4) est optionnel. Il est à mettre en œuvre dans le cas d'un projet susceptible d'avoir des effets sur une embouchure ou un banc sableux. Il nécessite un couplage avec le modèle de transport solide côtier.

Ces deux premiers groupes, en interaction forte entre eux, peuvent être réunis sous le nom de modélisation côtière.

Le troisième groupe concerne les modélisations de l'évolution du trait de côte qui concernent les littoraux meubles composés de sables, graviers et/ou galets. Il ne concerne donc pas les côtes rocheuses (falaises, côtes rocheuses basses) :

- 5)** Le modèle de calcul du transit littoral (chapitre 6.2.) est à mettre en œuvre pour apprécier les effets de la modification des caractéristiques des vagues à la côte par le projet. Il utilise les résultats du modèle de propagation des états de mer en entrée et fournit des valeurs de transport sédimentaire parallèle à la côte permettant une première appréciation de l'effet potentiel sur le trait de côte (Figure 67).
- 6)** Le modèle d'évolution du trait de côte (chapitre 7.1.) concerne les littoraux meubles. Il s'appuie sur les résultats du modèle de calcul du transit littoral. Il est optionnel, à mettre en œuvre dans le cas où les effets du projet sur le transit littoral sont notables sur un ou plusieurs tronçons. Le critère de déclenchement de cette option est détaillé ci-après.
- 7)** Le modèle d'érosion d'un profil de plage (chapitre 7.3.) est optionnel. Il est à mettre en œuvre en cas d'augmentation significative des hauteurs de houle en un ou plusieurs points le long de la côte. Il s'appuie sur les résultats du modèle de propagation des états de mer et fournit des évolutions de profils de plage permettant d'estimer l'effet potentiel sur le trait de côte.

Leur mise en œuvre s'effectue dans l'ordre suivant : La modélisation hydrodynamique (premier groupe) est à mettre en œuvre en premier lieu. Les modèles suivants peuvent être menés en parallèle avec, d'un côté, les modélisations du deuxième groupe qui peuvent s'enchaîner facilement avec les précédentes sur le même maillage de calcul, et de l'autre, les modélisations d'évolution du trait de côte qui s'opèrent sur un maillage linéaire qui suit le trait de côte et qui ne couvrent que les tronçons de littoral concernés.

Quatre modèles sont donc à mettre systématiquement en œuvre, à savoir, le modèle de propagation des états de mer, le modèle courantologique, le modèle de transport côtier et le modèle de transit littoral sur les tronçons de littoraux meubles. Leur mise en œuvre constitue une première phase de modélisation qui doit aboutir à une première appréciation des effets du projet sur le trait de côte.

Les trois autres modèles sont optionnels, comme décrit précédemment. Le choix de les mettre en œuvre va dépendre des conclusions de la première phase de modélisation.

La question se pose en particulier sur la mise en œuvre d'un modèle d'évolution du trait de côte en cas d'effet notable sur le transit littoral. Ce sujet étant crucial dans ce guide, un arbre de décision est proposé sur la Figure 67.

Il repose tout d'abord sur un critère de déclenchement de la modélisation qui est formulé de la façon suivante : Une variation de transit littoral inférieure à 1% sur un tronçon homogène de littoral peut être considérée comme non significative et ne conduisant pas à un effet perceptible sur l'évolution du trait de côte. A contrario, une variation supérieure à 5% sur un ou plusieurs tronçons est considérée comme un effet notable impliquant la mise en œuvre d'un modèle d'évolution du trait de côte sur ce ou ces tronçons. Enfin une variation comprise entre ces deux bornes peut ou non donner lieu au déclenchement de la modélisation en relation avec la sensibilité des différents tronçons concernés. Dans ce cas, la décision en revient au pétitionnaire qui pilote en parallèle l'étude d'impact et les différentes modélisations.

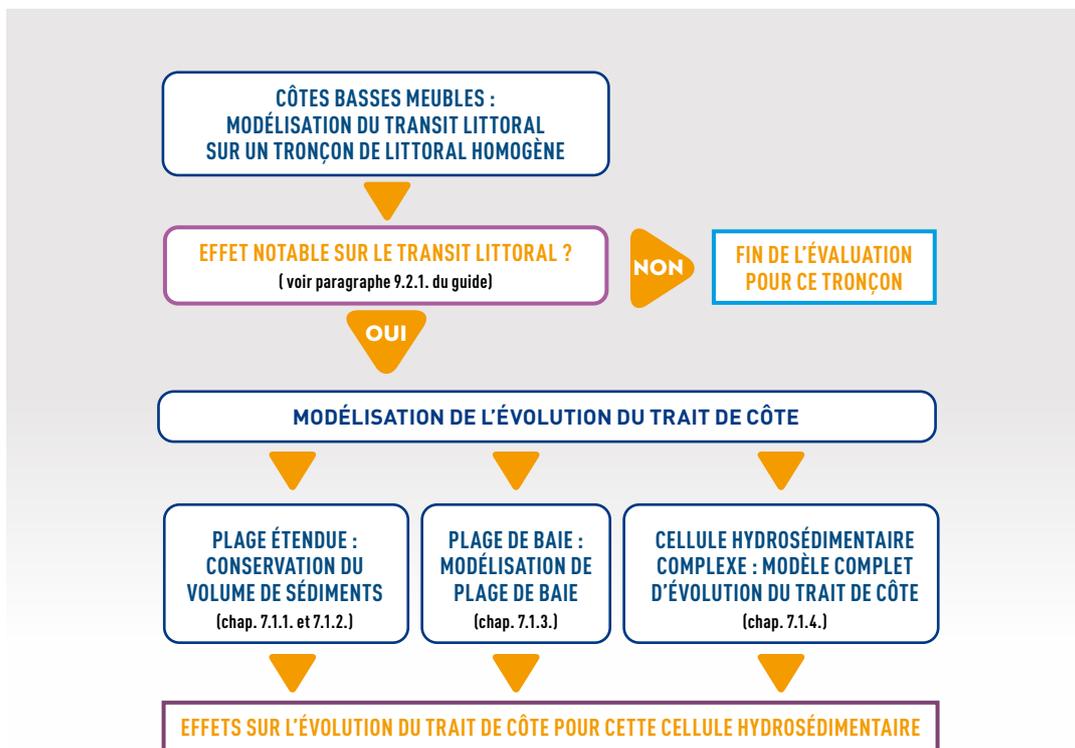


Figure 67 – Arbre de décision concernant la mise en œuvre d'une modélisation du trait de côte

À l'issue de cette phase de choix, des modélisations simplifiées sont proposées pour les plages étendues et les plages de baie. Une modélisation complète est recommandée dans le cas d'un tronçon de littoral complexe. Ce terme correspond à une côte meuble très artificialisée avec notamment la présence combinée de brise-lames, épis et revêtements pour laquelle les deux autres méthodes ne pourraient pas être mises en œuvre.

Ces modèles sont génériques et s'appliquent aussi bien aux littoraux sableux, en graviers ou à galets en introduisant dans les formules de transport solide les indications granulométriques spécifiques. Pour les littoraux à galets, une attention particulière doit, d'autre part, être portée à l'application de la méthode du flux d'énergie pour le calcul du transit littoral comme cela est détaillé au chapitre 6.3.1.

### 9.2.2. Mise en place de la modélisation côtière

Ce chapitre reprend les recommandations de MEEDDM (2010) et Cerema (2018) pour la mise en place d'une modélisation numérique. Le guide des études hydrauliques maritimes du Cerema (2018) à destination des maîtres d'ouvrage intitulé « Études hydrauliques maritimes » détaille notamment ces recommandations pour six types d'études incluant la courantologie, la propagation des états de mer, et l'hydrosédimentaire côtière et estuarienne. Il discute la mise en pratique des principes avec les points de vigilance à vérifier à chaque fois. Nous renvoyons le lecteur vers le guide Cerema (2018) et résumons ci-dessous les points saillants à garder en tête pour le présent guide.

Comme décrit précédemment, le modèle hydrodynamique comprend un modèle de propagation des états de mer et un modèle courantologique. Il met donc en œuvre deux logiciels qui doivent partager la même délimitation géographique, le même maillage de calcul<sup>37</sup> et la même configuration bathymétrique afin de pouvoir calculer leurs interactions. Ces trois éléments seront également partagés par le modèle de transport solide côtier et par le modèle morphodynamique d'évolution des fonds côtiers.

- La construction d'un tel modèle commence en première étape par sa délimitation géographique qui doit couvrir largement la zone d'intérêt située entre le projet de concession et l'enveloppe des cellules hydrosédimentaires littorales identifiées précédemment au 9.1.3. La limite côté large doit être suffisamment éloignée du projet pour pouvoir y appliquer des conditions aux limites qui ne seront pas modifiées par le projet. La validation de ce choix interviendra lors de la phase d'analyse des résultats. Les effets du projet devront, en effet, être nuls aux limites du modèle. Dans le cas contraire, il conviendra d'étendre la couverture géographique du modèle et de refaire tous les calculs. D'autre part, cette emprise inclut généralement un ou plusieurs marégraphes, un houlographe et un point de mesure courantométrique pour la validation (voir chapitre 9.3).
- La deuxième étape consiste en la préparation d'un modèle numérique de terrain (MNT) couvrant l'ensemble du modèle ; cette question est traitée en détail au chapitre 8.1.4.
- La troisième étape est la construction du maillage qui doit suivre la bathymétrie des fonds en prêtant une attention particulière à ses singularités (paléo-vallées, hauts-fonds, fosses, abrupts et la concession) ainsi que le découpage de la côte. L'utilisation d'un maillage déstructuré (triangles de taille variable) permet de représenter au plus près les spécificités locales de la zone d'étude. Pour les modèles à maille régulière, il peut être nécessaire de mettre en place plusieurs modèles emboîtés avec une taille de maille décroissante. Dans tous les cas, il convient d'obtenir une bonne résolution des modèles sur le site de la concession et près de la côte (maille de l'ordre de 40 à 50 mètres). Il est recommandé d'inclure, dès cette phase de construction, le projet de

<sup>37</sup> L'unicité du maillage de calcul est essentielle dans le cas d'un maillage non-structuré. Elle est fortement recommandée dans le cas de maillages structurés en apportant un soin particulier à la (ou les) étape(s) d'interpolation notamment en cas de couplage complet (chapitre 5.4.).

concession afin d'utiliser exactement le même maillage pour les simulations sur l'état de référence et l'état projet (voir chapitre 10.1.2.). Cette unicité de maillage entre deux états morphologiques est le garant d'une comparaison fiable des deux simulations qui est à la base de l'estimation des effets.

- La quatrième étape de validation consiste à simuler un événement passé durant lequel des mesures de terrain ont été réalisées. Cela nécessite d'avoir accès à des mesures existantes (voir chapitre 8) ou à faire effectuer des campagnes spécifiques dans ce but. Le chapitre 9.3. détaille cette étape de manière approfondie. La comparaison de la simulation numérique avec ces mesures permet d'estimer le degré d'agrément du modèle avec le terrain. Durant cette phase, les paramètres réglant les équations de fermeture (rugosité, turbulence) ainsi que les forçages (conditions de vent locales...) peuvent être ajustés afin d'améliorer la comparaison. Une fois réglés, ces paramètres devront rester identiques pour les simulations sur les états de référence et projet (voir chapitre 9.3.).
- La cinquième étape consiste à réaliser les simulations sur l'état de référence puis l'état projet, à les comparer et à analyser l'ensemble de ces résultats pour estimer l'effet du projet (voir chapitre 10).

## 9.3. CALAGE ET VALIDATION DE LA MODÉLISATION CÔTIÈRE PAR REJEUX

### 9.3.1. Les principes

Une étape importante dans la mise en place d'une modélisation numérique est de vérifier que le modèle fonctionne correctement et que l'ensemble des paramètres introduits en entrée conduisent à des résultats réalistes par comparaison avec des mesures de terrain disponibles. Si une première simulation conduit à des écarts trop importants, ceux-ci doivent être analysés et conduire à un recalage de certains paramètres et à une ou plusieurs nouvelles simulations pour améliorer la comparaison. C'est la phase de calage du modèle qui aboutit à sa validation lorsque les écarts constatés sont considérés comme acceptables.

Le travail de calage/ validation peut s'effectuer selon deux modalités :

- La première, décrite dans ce guide, consiste à rejouer un seul jeu de données de terrain pour procéder aux différentes phases de calage des paramètres empiriques du modèle jusqu'à obtenir une validation acceptable. Cette approche est utilisée classiquement pour la modélisation hydrodynamique pour laquelle les paramètres empiriques sont assez constants dans le temps,
- Une seconde modalité consiste à utiliser deux jeux de données terrain : la donnée la plus ancienne est rejouée pour caler le modèle jusqu'à obtenir une première validation. Puis le second jeu de données, plus récent, est rejoué pour vérifier le calage obtenu. Cette seconde approche est plus coûteuse mais donne une plus grande fiabilité au modèle dans sa capacité de prévision. Elle est principalement utilisée dans la modélisation morphodynamique et d'évolution du trait de côte pour lesquelles les paramètres empiriques jouent un rôle très important et peuvent varier localement dans le temps.

Dans le présent guide, l'approche comparative entre la situation de référence et la situation de projet permet d'en rester à la première modalité de mise en œuvre, les écarts de validation étant largement annulés par l'approche différentielle de l'appréciation des effets du projet.

Ce travail de calage/validation doit s'effectuer pour chaque module dans cet ordre : propagation des états de mer et courantologie, transport solide et évolution morphodynamique. Pour cela, il convient de rassembler des mesures de terrain *ad hoc* pour

chaque étape qui constitueront des mesures de référence pour la validation des modèles. Les modèles actuels résolvent les équations de la mécanique des fluides de manière assez précise et celles-ci restent valables sur tout le domaine d'étude. La position du point de mesure de référence n'est donc pas critique, mais ce point doit se situer à des profondeurs comparables et être représentatif de la zone d'étude.

### 9.3.2. Mode de validation

Le mode de validation classique est le suivant :

- La validation graphique consiste à superposer sur un même graphe un paramètre représentatif du processus modélisé obtenu par une mesure de terrain et par modélisation. Cette approche est particulièrement utilisée dans le cas de variables évoluant temporellement (courbe de marée par exemple) ou spatialement (évolution de la position d'un trait de côte ou d'un profil de plage par exemple). Une appréciation qualitative et semi-quantitative (mesure des écarts entre les deux courbes) peut alors être fournie notamment en appréciant visuellement l'écart entre les deux courbes. Ce type de comparaison est indispensable pour apprécier la qualité d'une modélisation sur ce type de variables. Des exemples de validation de ce type sont fournis dans les paragraphes suivants.
- Une approche complémentaire peut être mise en œuvre en quantifiant les écarts entre mesure et modélisation à l'aide de méthodes statistiques telles que le calcul de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error, RMSE) et du biais. Ces paramètres statistiques sont ensuite à comparer avec des valeurs de référence permettant de valider ou non la modélisation. Un exemple d'une telle quantification est fourni au paragraphe 9.3.4. Une difficulté de cette approche est l'absence de valeurs de référence publiées pour la plupart des modélisations présentes dans ce guide.

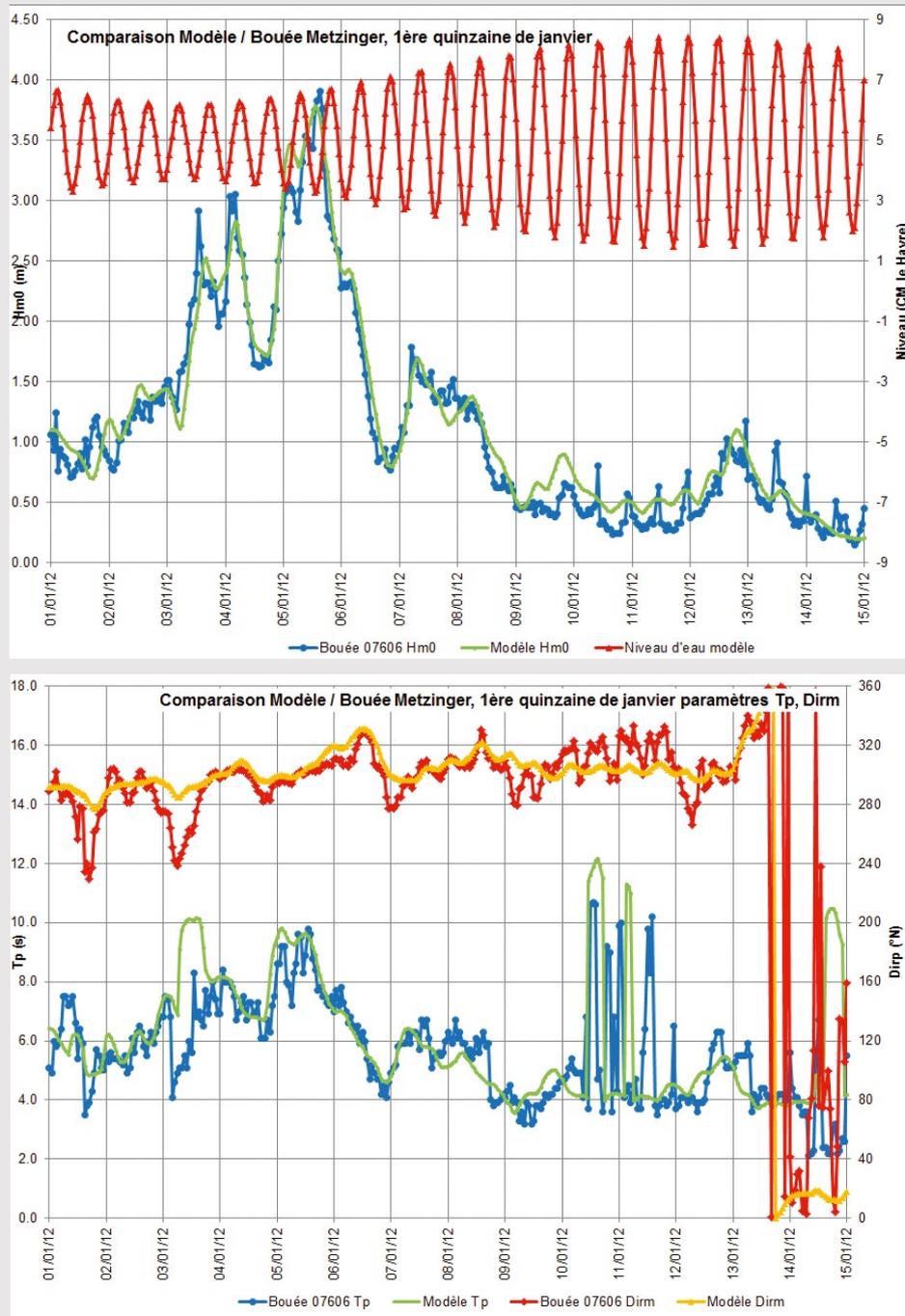
Le Shom a récemment publié un tel exercice détaillé de comparaison graphique et statistique pour un rejeu portant sur la période 1979-2019 concernant les marées, les surcotes et les états de mer dans le cadre d'une étude sur le risque de submersion marine dans la région de Saint-Malo (Seyfried *et al.*, 2021).

### 9.3.3. Calage et validation du modèle de propagation des états de mer

La modélisation de la génération et propagation des états de mer peut faire l'objet d'une validation en simulant une période historique au cours de laquelle des mesures houlographiques ont été réalisées en un point situé dans la région d'étude. Il s'agit alors de comparer la hauteur significative, la période et la direction des vagues à ces mesures. Deux difficultés spécifiques sont à signaler ici du fait du caractère complexe de certains états de mer, c'est-à-dire en cas de superposition de deux systèmes de vagues (état de mer bimodal) voire plus (voir chapitre 2.1.3).

Dans un tel cas, la période de pic n'est représentative que du système dominant et sa quantification peut devenir instable et varier d'une heure à l'autre (voir journées des 10 et 11/01/12 dans l'exemple sur la Figure 68). Sa mesure est alors entachée d'incertitude et sa modélisation également. Il est donc recommandé de compléter la comparaison avec une période plus représentative comme la période moyenne  $T_{02}$  ou la période moyenne énergétique  $T_e$  (désignée également par  $T_{m-10}$ ).

La direction de pic des vagues peut également subir des variations importantes pour les mêmes raisons. La direction moyenne est souvent plus stable mais n'est pas physiquement représentative dans le cas d'états de mer complexes présentant des écarts de direction significatifs entre ses différentes composantes. C'est pourquoi elle n'est généralement pas utilisée (voir chapitre 8.3.1. et Figure 57).



**Figure 68** – Comparaison graphique des résultats validés d'un modèle de propagation des états de mer en baie de Seine à la bouée Le Havre-Metzinger (Artelia, 2015b)

Dans le cas où la comparaison n'est pas satisfaisante, le calage du modèle nécessite d'être amélioré. Pour cela, les paramètres techniques de modélisation pour l'amélioration de la comparaison sont :

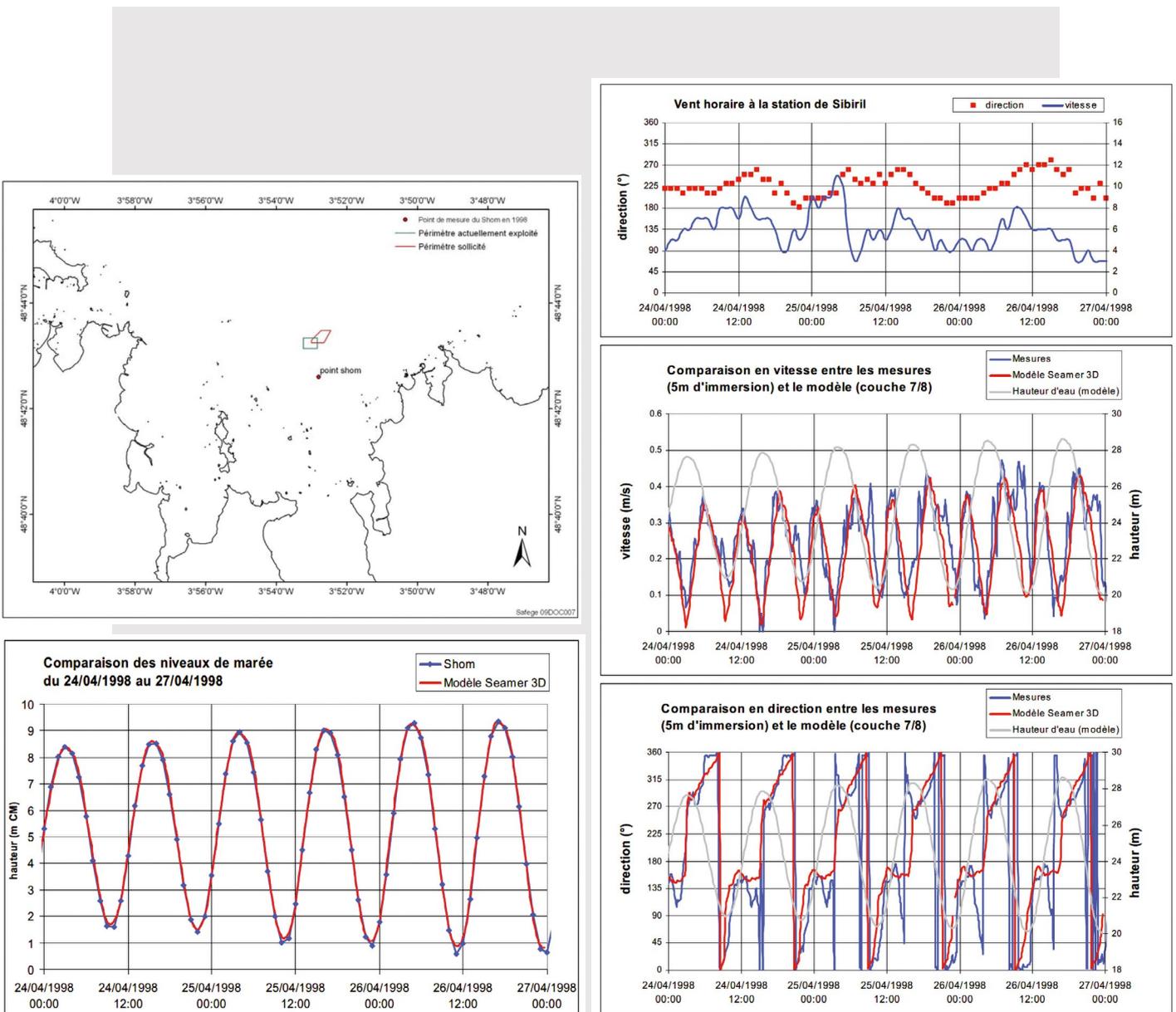
- La prise en compte de la génération des mers de vent locales,
- L'inclusion des effets non-linéaires d'interaction tertiaire (triad interactions) entre composantes de l'état de mer notamment aux embouchures ou aux passages de bancs,
- Un raffinement des conditions aux limites côté large en imposant des densités spectrales complètes au lieu de spectres-type.

Il restera généralement un écart lié aux limitations des équations empiriques incluses dans ces modèles (chapters 4 et 5.4) et aux incertitudes sur les données de forçage.

### 9.3.4. Calage et validation du modèle courantologique

Il convient en premier lieu de vérifier que les niveaux marins sont bien reproduits par le modèle. Une comparaison des courbes de niveau simulées avec des données marégraphiques situées dans la zone d'étude est à réaliser. Dans un second temps, les résultats courantologiques sont à valider de la même façon. Un exemple de comparaison graphique, qui a permis la validation d'un modèle, est fourni sur la Figure 69.

Cette comparaison graphique peut être complétée par des méthodes statistiques. Le Tableau 5 propose une série de 5 indicateurs couramment utilisés incluant 2 indicateurs classiques (RMSE et Écart-type) ainsi que 3 indicateurs introduits par le NOAA's National Ocean Service américain pour les modèles courantologiques (Zhang *et al.*, 2010).



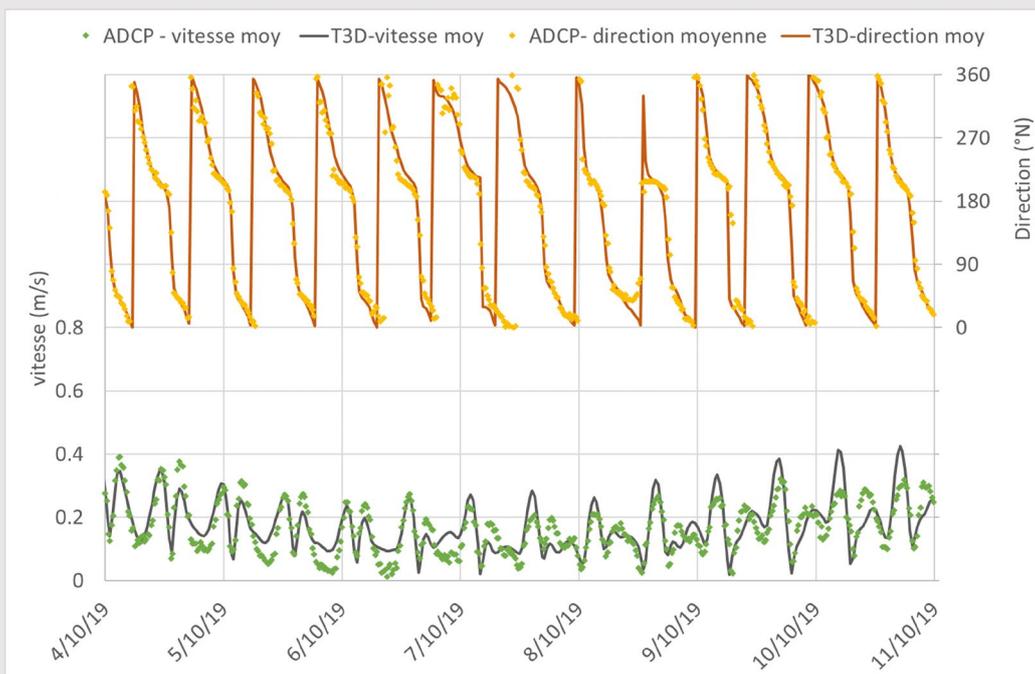
**Figure 69** – Point de mesure SHOM sur le site des Duons et comparaison graphique avec la modélisation courantologique validée (Safège, 2009)

**Tableau 5** – Formules statistiques de comparaison mesures-calcul

Variable	Explication
<b>Erreur e</b>	Différence entre les valeurs obtenues par le modèle <b>r</b> et les données <b>d</b> aux marégraphes. Pour un pas de temps <b>i</b> : $e_i = r_i - d_i$
<b>RMSE</b>	Erreur quadratique moyenne. $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}$
<b>Écart-type</b>	Écart-type (SD). $SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}$
<b>CF(X)</b>	Fraction (pourcentage) d'erreurs compris dans l'intervalle [-X ; X]
<b>POF(X)</b>	Fraction (pourcentage) d'erreurs supérieures à X
<b>NOF(X)</b>	Fraction (pourcentage) d'erreurs inférieures à -X

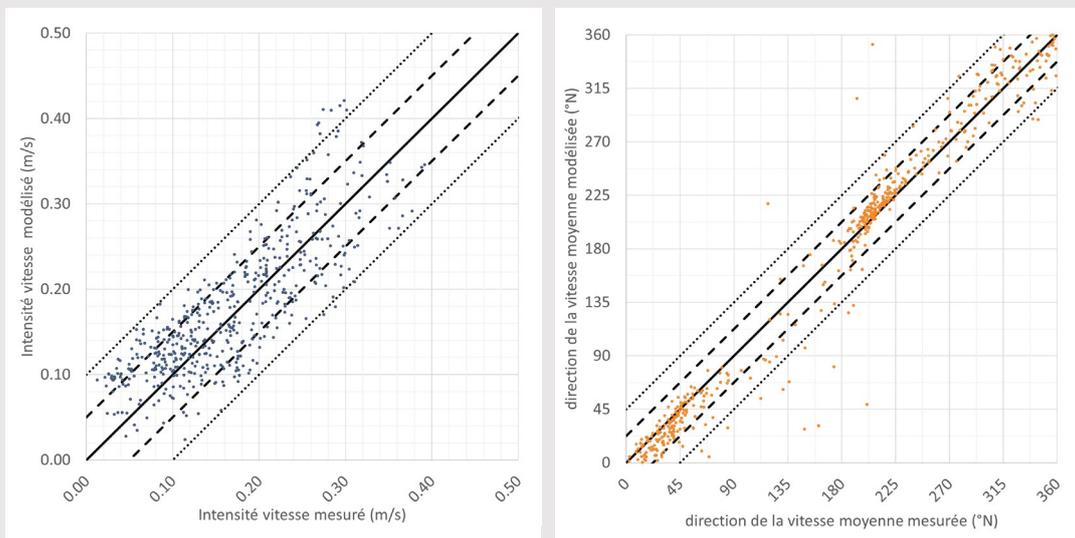
X correspond à une erreur définie par l'utilisateur en fonction de la variable étudiée. 2X correspond à une valeur double de celle de X. Par exemple Zhang *et al.* (2010) utilisent X = 0,15 m pour les niveaux d'eau, 0,26 m/s pour l'intensité des courants et 22,5° pour leur direction. La validation de leurs modèles est obtenue lorsque CF(X) > 90 % et POF (2X) et NOF (-2X) < 1 %. Ces valeurs mises en place sur les côtes américaines ne sont cependant pas universelles et doivent être revues au cas par cas.

La mise en œuvre de cette approche a été réalisée récemment sur le site des Chassiron (Charente-Maritime) sur lequel des mesures ont été effectuées par l'université de la Rochelle sur la période allant du 4/10/2019 au 11/10/2019, grâce à un ADCP qui a été placé aux abords des concessions par environ -21 m CM. La Figure 70 présente la comparaison graphique entre modèle et mesure, le Tableau 6 les indicateurs statistiques et la Figure 71 le diagramme de dispersion (ou nuage de points) comparatif.



**Figure 70** – Comparaison graphique d'une modélisation courantologique validée sur le site des Chassiron (Artelia)

On notera une valeur de la variable  $X=0,05$  m/s (Tableau 6) beaucoup plus exigeante que la valeur préconisée par la NOAA. D'autre part, aucune tolérance temporelle entre mesure et calcul n'est prise en compte dans ces calculs statistiques : le déphasage temporel est donc compris comme une erreur, ce qui est assez pénalisant sur les résultats statistiques des variables basculant assez rapidement comme les vitesses.



**Figure 71** – Diagrammes de dispersion associés à la modélisation courantologique sur le site des Chassiron (Artelia)

**Tableau 6** – Évaluation statistique de la modélisation courantologique sur le site des Chassiron (Artelia)

	Intensité courant (m/s)	Direction du courant (°)
Écart type	0.05	22.18
RMSE	0.05	22.40
Choix du X	0.05	22.5
CF(X)	65.87 %	83.53 %
CF(2X)	97.82 %	96.03 %
POF(X)	21.03 %	4.76 %
NOF(-X)	13.10 %	11.71 %
POF(2X)	1.59 %	0.79 %
NOF(-2X)	0.60 %	3.17 %

Les paramètres de calage à mettre en œuvre pour améliorer la comparaison incluent généralement :

- Une analyse critique des données de terrain qui peuvent présenter différents biais,
- La carte de frottement des fonds qui est une donnée empirique, fonction de la nature du fond marin et des formes de fonds associées qui ne sont pas toujours bien connues,
- La prise en compte des conditions météorologiques régnant lors de la campagne de mesure,
- La condition limite côté large qui est cependant de mieux en mieux connue grâce aux modèles océaniques actuellement assez précis. Il existe plusieurs sources de données océaniques disponibles dont la fiabilité évolue avec le temps. Il est donc possible de tester une autre source si celle retenue au départ ne convient pas.

Des degrés élevés de validation statistique peuvent être obtenus sur les niveaux d'eau. Ces degrés sont moins élevés pour les courants à cause notamment de la limitation des équations de fermeture turbulente des modélisations d'ingénierie (chapitre 5.1. modélisation 3D).

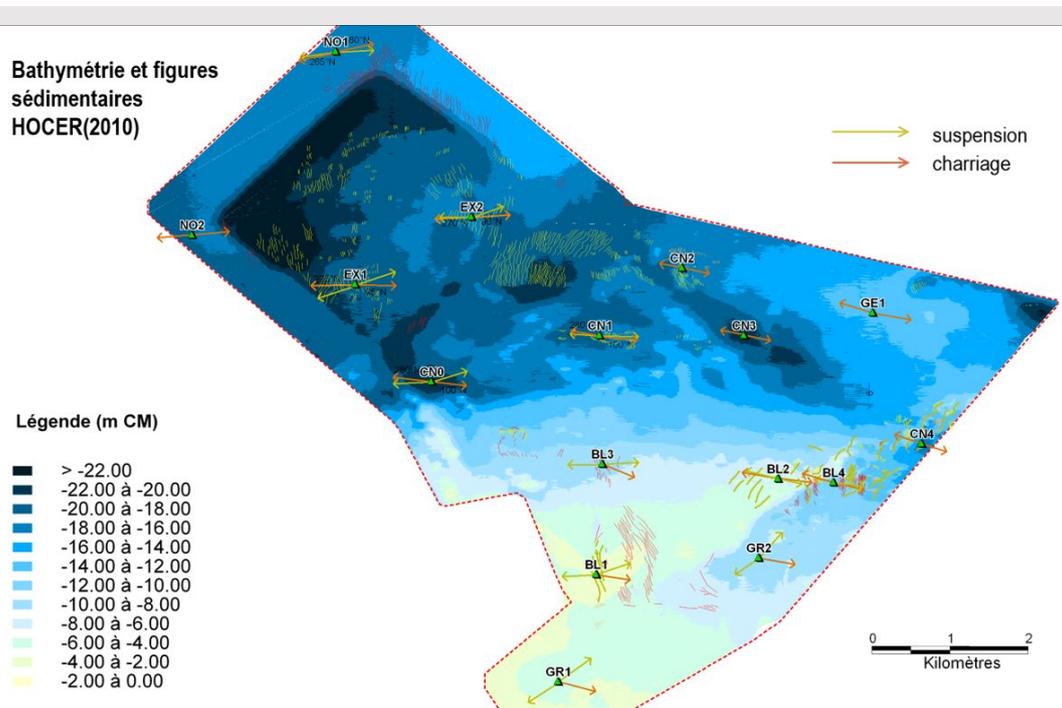
### 9.3.5. Calage et validation du transport sédimentaire côtier

#### Cas général

Comme expliqué au chapitre 6.1., le transport solide en zone côtière est distingué de celui en zone littorale du fait des différences importantes en termes de processus physiques et d'intensité du transport. En effet, le transport solide en zone littorale est lié à des processus complexes et puissants induits par le déferlement des vagues conduisant à une intensité de transport solide d'un ou deux ordres de grandeur plus important qu'en zone côtière située plus au large.

La mesure *in situ* de transport sédimentaire dans la zone côtière reste une opération complexe<sup>38</sup>, du domaine de la recherche, qui est au-delà de l'état de l'art. C'est pourquoi la validation d'un modèle de transport sédimentaire destiné à l'estimation des effets d'un projet d'extraction de granulats marins s'arrête généralement à la courantologie et à l'agitation.

Il peut cependant s'avérer utile d'analyser les résultats des campagnes de terrain morphosédimentaires habituellement réalisées sur et autour des concessions (chapitre 8.1.3.) car elles fournissent des cartes de caractérisation des fonds permettant d'en déduire des directions de transport à partir des figures sédimentaires (voir Figure 72).



**Figure 72** – Comparaison d'une carte de figures sédimentaires avec la direction modélisée du transport sédimentaire côtier sur le site du Pilier (Artelia, 2011)

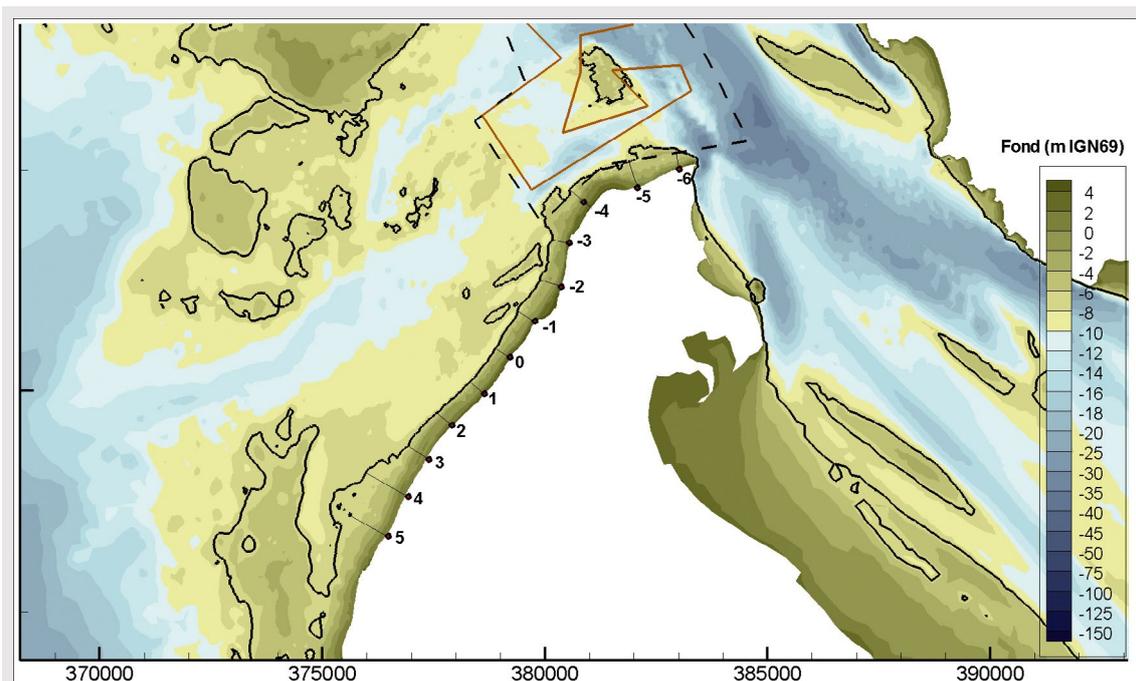
**38** Le transport en suspension se mesure à l'aide de turbidimètres et de courantomètres, notamment les profileurs de courant (ADCP). Ces mesures sont calibrées par des prélèvements sur la colonne d'eau (ex : bouteilles). Le transport par charriage est plus compliqué à mesurer et fait souvent l'objet d'une estimation indirecte : les données d'imagerie permettent d'appréhender la dynamique de la couverture sédimentaire meuble au travers de la présence éventuelle de formes sédimentaires. L'intensité du transport par charriage peut être estimée par la géométrie et la vitesse de déplacement de ces formes. Le comblement de fosses peut également fournir des indications utiles.

Il est également possible, dans certains cas, d'apporter des éléments de comparaison en utilisant des résultats de travaux de recherche portant sur ces questions, quand ils sont disponibles, car des thèses paraissent tous les ans sur ce sujet.

### Cas particulier d'une extension en zone littorale

Paradoxalement, un nombre plus important de données concernant le transport de sédiments en zone littorale est disponible grâce aux différentes estimations du transit littoral publiées. Une voie d'avenir pourrait donc être aussi, pour les cas le nécessitant, d'inclure de manière simplifiée, la zone littorale dans le modèle côtier. Cela présente l'intérêt d'utiliser les estimations de transit littoral disponibles pour caler le modèle de transport sédimentaire côtier.

Une telle extension d'un modèle de transport sédimentaire côtier a été récemment réalisée à l'embouchure de la Gironde dans laquelle aucune donnée de transport sédimentaire côtier n'était disponible. Il a d'abord fallu pour cela revoir l'ensemble de la chaîne de calcul en détaillant le maillage dans la zone littorale (mailles de 10 à 20 m) puis en effectuant un couplage complet entre le modèle de propagation des états de mer et le modèle courantologique 3D (chapitre 5.4.), de façon à générer un courant littoral permettant de calculer le transit littoral. Le transit a été calculé en intégrant le transport résiduel sur différentes sections comprises entre la cote -6,83 m IGN69 (soit -4 m ZH) et la limite terrestre du modèle. Ces sections ont été placées le long de la côte médocaine sur tous les points kilométriques entre les PK-6 et +5 (Figure 73).



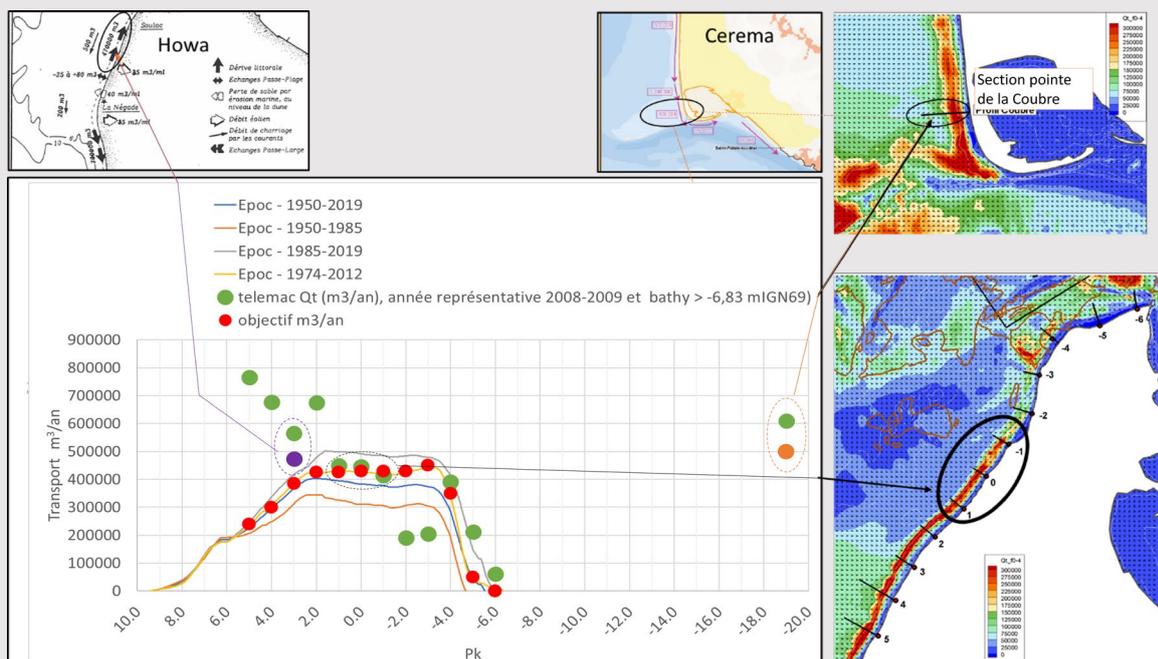
**Figure 73** – Positionnement des profils de calcul du transit littoral le long de la côte médocaine avec indication de la ligne bathymétrique -4mZH en trait noir (Artelia, 2022).

Trois sources de données indépendantes sur l'intensité du transit littoral ont été rassemblées. D'abord la bibliographie a permis d'obtenir une estimation du transit littoral de 500 000 m<sup>3</sup>/an en rive nord à la pointe de la Coubre (estimation Cerema) et une valeur de 470 000 m<sup>3</sup>/an le long de la côte médocaine (Howa, 1987). Ces deux estimations ont été complétées le long de la côte médocaine par une modélisation inverse (chapitre 7.1.1.) effectuée à partir de la série diachronique des relevés de trait de côte fournie par le laboratoire EPOC de l'université de Bordeaux entre 1950 et 2019 (Figure 59).

Cette modélisation inverse a porté sur 4 périodes et conduit à des résultats cohérents entre eux avec une variation du pic de transport comprise entre 340 et 500 000 m<sup>3</sup>/an. La période 1974-2012 a été choisie comme objectif pour la modélisation en cohérence avec le choix de l'année représentative 2008-2009 retenue pour la modélisation hydrodynamique. Le paramètre d'intensité globale du transport solide dans le modèle a ensuite été ajusté de façon à retrouver au plus près cet objectif. Aucun ajustement local n'a été effectué.

Le graphe de la Figure 74 synthétise le résultat de ce travail. La distribution du transit littoral annuel le long de la côte médocaine est indiquée pour les 4 périodes retenues pour la modélisation inverse (traits pleins). Les valeurs d'objectif retenues sont indiquées par des points rouges et les valeurs calculées par des points verts.

On observe un bon accord au pic de transit aux PK +1,0 et -1 ainsi qu'à la diminution du transit au nord (PK -6). Par contre, le transport calculé au droit des PK +2 à + 5 est trop fort par rapport aux estimations. Cela s'explique par le fait que la ligne bathymétrique -6,83 m IGN69 s'écarte trop du littoral à cet endroit : le calcul capte donc également un transport solide côtier qui n'intervient pas directement dans les évolutions du trait de côte. On note également, un transport calculé trop faible sur les PK -2 et -3 lié à la présence d'un banc sous-marin devant ce littoral qui dans le modèle fait déferler les vagues assez loin de la côte. Le calcul fournit à la pointe de la Coubre un transit de 600 000 m<sup>3</sup>/an du même ordre de grandeur que l'estimation du Cerema.



### 9.3.6. Calage et validation de la morphodynamique des bancs et embouchures (optionnel)

Une modélisation morphodynamique de l'évolution des fonds marins peut s'avérer nécessaire dans le cas où le projet de concession affecte directement ou indirectement un banc ou une embouchure d'estuaire ou de lagune côtière (chapitre 3.1.2).

Comme cela a été détaillé au chapitre 74.1., une modélisation morphodynamique se compose d'un ensemble de logiciels de calcul qui s'enchaînent les uns avec les autres à l'intérieur d'une boucle temporelle. Aux trois modèles précédemment décrits dans ce chapitre s'ajoute un module de calcul de l'érosion et la sédimentation du fond marin qui permet de simuler une évolution bathymétrique dans le domaine spatio-temporel. Le calage et la validation d'un tel modèle nécessite une analyse préalable de l'historique bathymétrique du site d'étude (étude diachronique) afin de documenter l'évolution passée.

Dans le cas où des extractions ont déjà été réalisées sur le site, il peut être utile de séparer, si possible, les évolutions naturelles liées aux transits sédimentaires locaux des opérations anthropiques (par exemple extractions déjà réalisées sur le site dans le cas d'un projet de prolongation d'autorisation).

L'analyse de ces données doit permettre de dégager une vision synthétique de l'évolution des fonds sur la zone d'étude et de définir des indicateurs clés qui serviront d'objectif pour le calage et la validation du modèle.

L'analyse historique des concessions sur les côtes Atlantique, Manche et mer du Nord indique que la mise en œuvre d'un tel modèle est restée exceptionnelle jusqu'à présent avec un seul exemple très récent concernant la demande de prolongation de la concession du Platin de Grave. Il s'agit d'un cas particulièrement complexe et singulier qui a nécessité un travail conséquent sur l'historique des extractions en relation avec les évolutions bathymétriques du site.

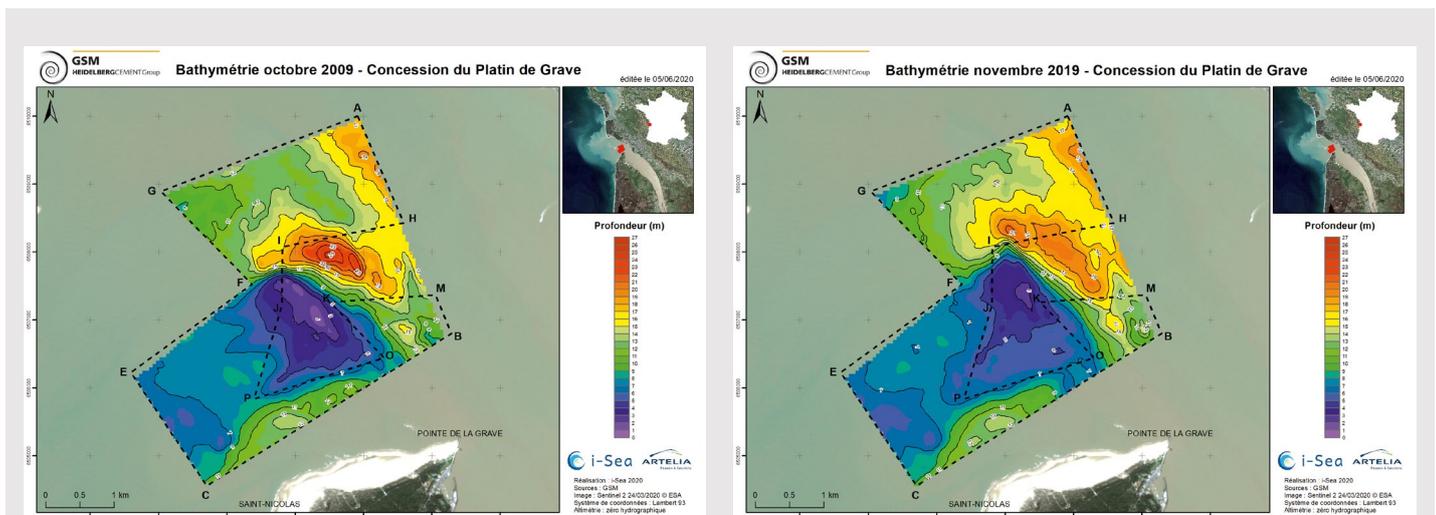


Figure 75 – Bathymétries 2009 (gauche) et 2019 (droite) de la concession du Platin de Grave (i-Sea, 2020)

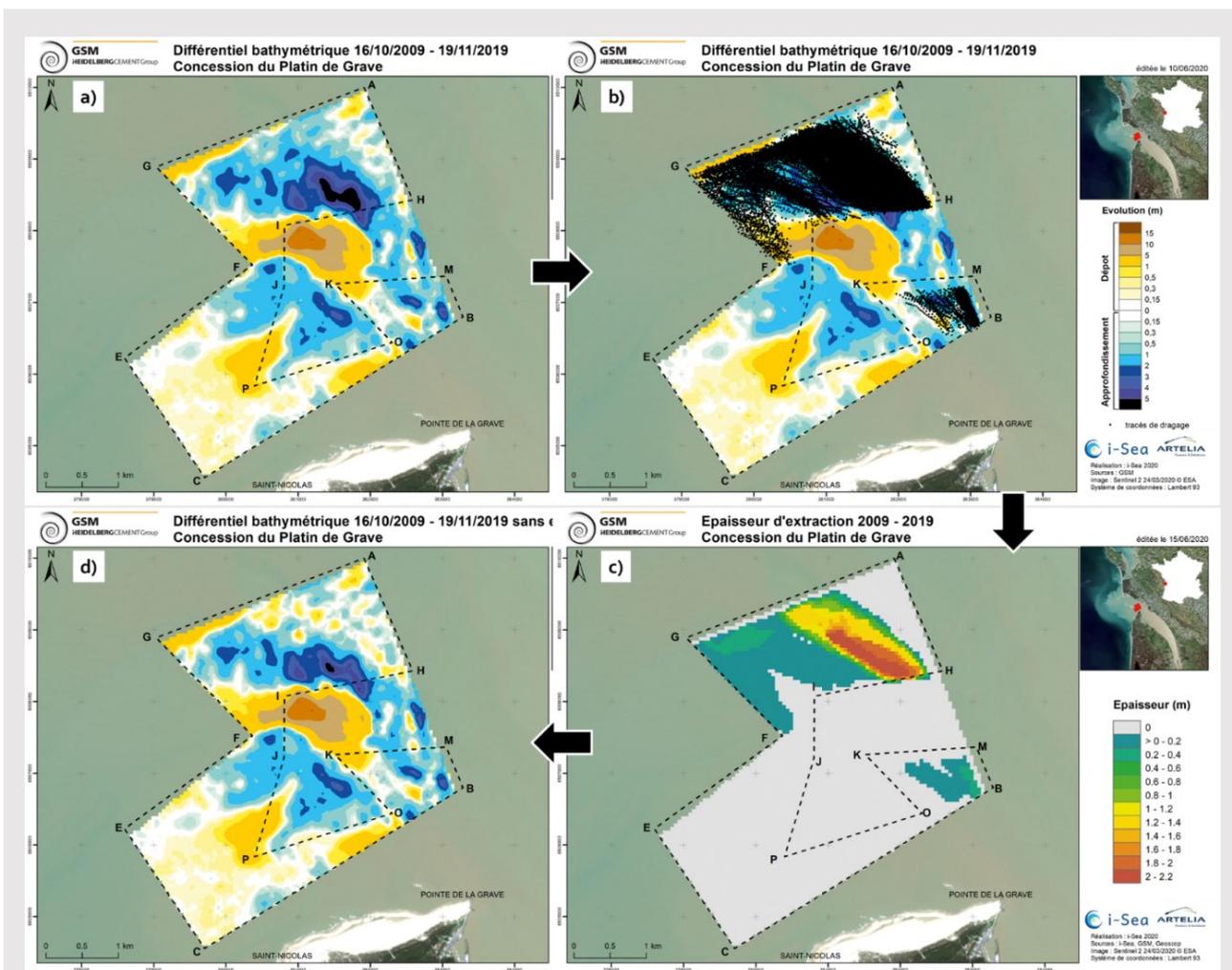
La Figure 75 présente l'exemple de deux levés bathymétriques de suivi de la concession du Platin de Grave, à l'embouchure sud de l'estuaire de la Gironde, réalisés en 2009 et 2019. Sur cette décennie, un différentiel bathymétrique a été construit (Figure 76a) et la part des extractions dans les évolutions observées a pu être analysée complètement grâce au suivi géolocalisé des navires chargés de l'extraction et du suivi des opérations de chargement. Grâce à ces données, les volumes extraits ont été géolocalisés (Figure 76b) et une carte des volumes extraits a pu être établie (Figure 76c). Elle indique que l'essentiel des volumes a été extrait au nord de la concession avec des épaisseurs maximales de prélèvements atteignant 2 à 2,2 mètres. Cette carte a ensuite été soustraite du différentiel d'évolution pour obtenir un différentiel hors extraction (Figure 76d). Puis, un bilan volumétrique a été établi par secteur de la concession.

La modélisation morphodynamique mise en place pour cette concession a été calée et validée pour reproduire les tendances évolutives mesurées sur les cinq dernières années d'exploitation entre 2015 et 2020. Plus précisément, trois indicateurs ont été mis en place pour guider ce travail :

- Stabilité observée du Platin de Grave en termes de cote d'arase,
- Dépôt sédimentaire de 4,6 millions de m<sup>3</sup> estimé par différentiel bathymétrique entre 2015 et 2020 dans la zone de cubature visualisée par un polygone rose sur la Figure 77,
- Migration du pic principal de dépôt du Platin de Grave vers le nord.

Les calculs ont été menés avec un forçage annuel représentatif, une seule classe de sédiments, le modèle de transport IDV de van Rijn (2007) et la prise en compte des nombreux affleurements rocheux de graviers et de cailloutis « inaffouillables » (non érodables) qui parsèment l'embouchure sud de l'estuaire de la Gironde. Au final, cette modélisation a permis de reproduire correctement la dynamique du Platin de Grave au regard des trois indicateurs définis précédemment. L'analyse des résultats (Figure 77) indique en effet que :

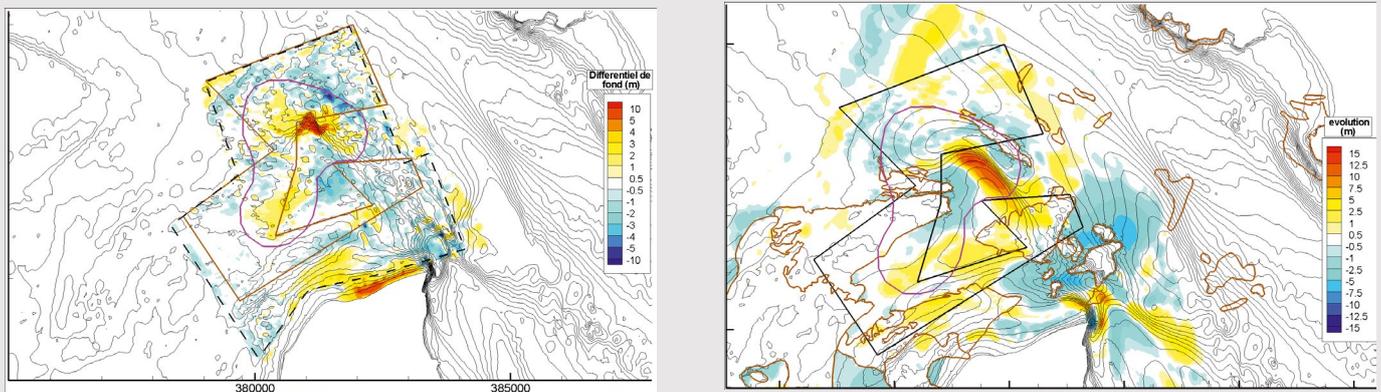
- La stabilité de la cote d'arase du Platin a été conservée sur les 5 années de modélisation,
- Un dépôt de 5 millions de m<sup>3</sup> de sédiments, proche de la valeur estimée de 4,6 millions de m<sup>3</sup>, a été obtenue sur la zone de cubature définie précédemment sans modifier le calage de la formule de transport solide,



**Figure 76** – Platin de Grave : Carte différentielle 2009-2019 a) Différentiel bathymétrique ; b) Localisation des zones d'extractions ; c) Épaisseur des extractions cumulées ; d) Différentiel bathymétrique, sans extraction (I-Sea, 2020)

- La migration du pic de dépôt du Platin a été reproduite mais avec un écart de 45 degrés observé sur la direction moyenne de migration. En effet, le Platin migre en suivant une direction nord-est dans le calcul alors qu'il s'agit d'une direction nord en réalité. Deux facteurs peuvent expliquer cela : le surcreusement de la fosse au droit de la pointe de Grave provoqué par le modèle dépose du sédiment dans la veine qui prolonge la fosse et qui longe le Platin de Grave sur son côté nord-est. Ce dépôt vient certainement diminuer l'influence de cette veine courantologique qui transporte du sédiment du côté nord-est vers le nord au jusant. D'autre part, la propagation de la houle dans le secteur est très complexe avec la génération de houles croisées à l'arrière du plateau de Cordouan qui n'est prise en compte dans le modèle qu'au travers de sa direction moyenne.

Au final, le modèle a été considéré comme suffisamment représentatif de la dynamique du site du Platin de Grave pour être apte à modéliser l'effet de ce projet en morphodynamique.



**Figure 77** – Platin de Grave : Évolution bathymétrique entre 2015 et 2020 : gauche : mesurée et droite : calculée (Artelia, 2022)

## 9.4. CALAGE ET VALIDATION DES MODÈLES D'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

### 9.4.1 Calage et validation du transit littoral

La méthode habituelle de modélisation du transit littoral consiste à utiliser une formule empirique globale (formule du CERC par exemple). Le calage d'une telle formule consiste à choisir un climat annuel d'états de mer représentatif, à le transférer du large vers la côte par le modèle de propagation puis à calculer un transit littoral annuel et à ajuster son coefficient empirique sur des estimations terrain de transit comme cela a été détaillé au chapitre 6.3.1.

Les estimations directes de terrain sont très rares et une méthode indirecte est en général nécessaire pour obtenir une estimation correcte. On utilise pour cela la méthode de conservation du volume de sédiments décrite au chapitre 7.1.1. et au chapitre 7.1.2. pour le cas d'une accumulation contre un épi.

La Figure 78 présente le cas du littoral nord et ouest de l'île de Noirmoutier pour lequel les accumulations de sable le long des jetées des ports de l'Herbaudière sur la côte nord et du Morin sur la côte ouest ont permis de valider les ordres de grandeur du transit littoral estimé ainsi que la représentativité des données de houle utilisées :

- 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. Un transit annuel net de l'ordre de 6 000 à 7 000 m<sup>3</sup>/an portant vers l'est a été évalué sur la base des volumes de dragage d'entretien réalisés. Cette estimation a servi de base pour caler le coefficient empirique de la formule du CERC au point P01. La valeur de référence a été divisée par un facteur 50, ce qui s'explique par la dominance du platier rocheux sur cette côte qui limite le stock de sable disponible,
- Au port du Morin, le sable s'accumule le long de la jetée nord conduisant à un basculement d'orientation du trait de côte passant de N213° à N226° (Figure 78), correspondant à l'obtention d'un nouvel état d'équilibre avec un transit nul induit par le blocage du transit par la jetée. Le calcul du transit littoral au point C05 a permis de retrouver localement une valeur nulle de transit en prenant en compte cette nouvelle orientation comme cela est prédit par l'approche de Pelnard-Considère détaillée au chapitre 7.1.2. Ce résultat a permis de vérifier la bonne représentativité du climat des états de mer utilisé pour le calcul. Cet exemple illustre également l'importance d'une bonne évaluation terrain de l'orientation locale du trait de côte (chapitre 6.3.1).



Photos juin 2013

**Figure 78** – Points de calcul du transit littoral à Noirmoutier (Artelia, 2015)

### 9.4.2 Calage et validation d'un modèle d'évolution du trait de côte (optionnel)

Trois types de modélisation d'évolution du trait de côte sont proposées dans le présent guide :

- 1) Pour les plages étendues : la méthode de conservation du volume des sédiments (chapitres 7.1.1. et 7.1.2.),
- 2) Pour les plages de baie : la méthode de diffraction des vagues (chapitre 7.1.3.),
- 3) Pour les littoraux complexes largement artificialisés : la modélisation complète d'évolution du trait de côte (chapitre 7.1.4.).

Dans le premier cas (plages étendues), des évolutions passées doivent être collectées et analysées pour estimer un taux d'évolution annuel moyen sur lequel le modèle devra être calé. Ce calage peut concerner le coefficient empirique de la formule globale transit littoral utilisé (voir paragraphe précédent). Il peut aussi concerner l'estimation de l'orientation du trait de côte qui conditionne le calcul de l'angle d'incidence des vagues (voir exemple en 9.4.1.).

Dans le deuxième cas (plages de baie), un relevé de la position moyenne du trait de côte est à fournir en donnée d'entrée ainsi que les conditions de houle aux points de diffraction. Il n'y a pas de paramètre empirique de calage d'un tel modèle. On validera cependant sa mise en œuvre en vérifiant qu'il retrouve bien la position moyenne observée du trait de côte.

Pour les littoraux complexes, le calage d'un modèle complet d'évolution du trait de côte va nécessiter au minimum de recueillir deux positions historiques du trait de côte sur une période pluriannuelle assez longue (entre 10 et 30 voire 50 ans) sur laquelle l'ensemble des actions d'artificialisation sont connues (date de construction des ouvrages, date et volume des apports artificiels en sédiments) comme cela est rappelé au chapitre 8.4.6. La phase de calage va consister à reproduire l'évolution du trait de côte sur la période considérée. Le réglage portera sur l'influence des ouvrages ou de la géologie sur le transit littoral (longueur active des épis, perméabilité des ouvrages, présence de platiers rocheux, apports en sédiments) jusqu'à obtenir une évolution calculée suffisamment proche de la mesure terrain. La méthode simple de calage/validation à partir d'un seul jeu de données, décrite au chapitre 9.3.3. est acceptable.

### 9.4.3 Calage et validation d'un modèle d'érosion d'un profil de plage (optionnel)

Un tel modèle nécessite en donnée d'entrée la connaissance de la topo-bathymétrie d'un transect de plage entre le sommet de la dune et la profondeur de fermeture. Le calage peut alors porter dans un premier temps sur la vérification de la stabilité d'un tel profil sous l'action d'un état de mer moyen. La connaissance de levés de ce profil avant et après une tempête peut permettre d'affiner les différents coefficients empiriques du modèle.

## 10. MODÉLISATION DES EFFETS DU PROJET

### 10.1 MÉTHODOLOGIE DE BASE

#### 10.1.1. Les grandes étapes

La méthodologie de base consiste à appliquer la stratégie de modélisation définie au chapitre précédent sur un état bathymétrique de référence puis sur un état bathymétrique de projet afin de comparer les deux résultats entre eux par analyse différentielle pour en déduire les effets du projet.

La simulation de l'état de référence comprend trois grandes étapes :

- Collecte et préparation des données de base (chapitre 8),
- Construction, calage et validation des modèles (chapitre 9),
- Calculs et exploitation des résultats (présent chapitre).

La simulation de l'état projet consiste à insérer la bathymétrie du projet de concession dans les modèles et à refaire les calculs à l'identique. Il est important à ce stade de ne modifier aucun des paramètres et données d'entrée utilisés pour les calculs de l'état de référence. Cela suppose en particulier d'anticiper la prise en compte du projet dans l'établissement du maillage de calcul.

Nous détaillons ci-dessous plusieurs points importants à prendre en compte pour sa mise en pratique incluant le choix des états bathymétriques de référence et de projet, l'éventuelle prise en compte d'autres projets au titre des impacts cumulés et la détermination des conditions océano-météo représentatives.

#### 10.1.2. État bathymétrique de référence

La situation bathymétrique de référence correspond à la bathymétrie réalisée par le pétitionnaire au démarrage de l'étude d'impact qu'il s'agisse d'une étude d'impact pour une nouvelle concession ou d'une étude d'impact pour la prolongation d'une concession existante.

En effet, le code de l'environnement précise pour les études d'impact environnementales dans son article R 122-5 II 3°, les éléments nécessaires relatifs à l'état initial. Un guide technique pour l'élaboration des études d'impact préalables à la recherche et l'exploitation de granulats marins a été publié en février 2023 (MTECT, 2023). Ce guide a statué sur le cas particulier des demandes de prolongation des concessions. Ainsi, la formulation retenue pour les dossiers de prolongation est la suivante : « Pour tous les compartiments (physiques et biologiques), l'état initial sera l'état du compartiment considéré au moment du dépôt de la demande de prolongation ».

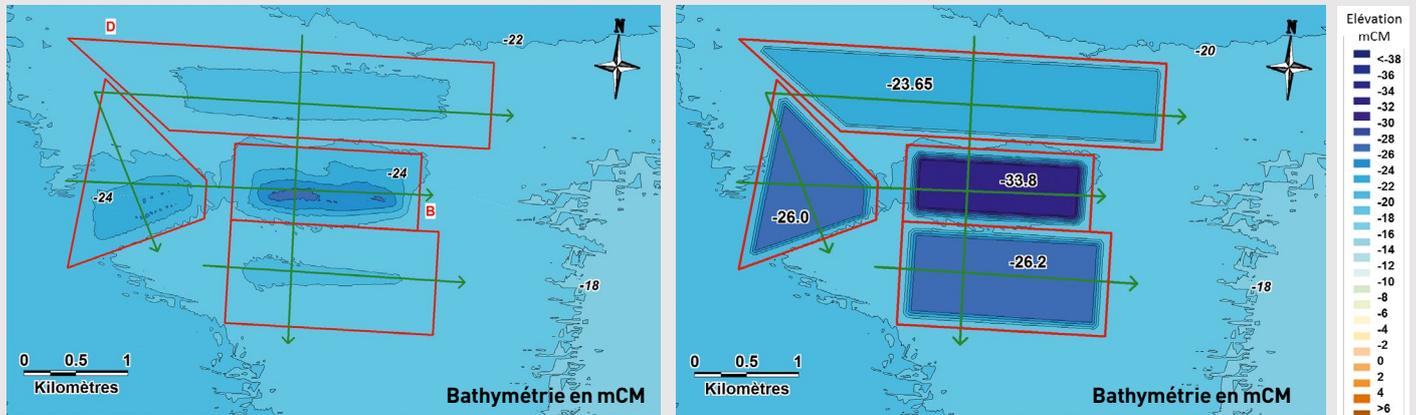
#### 10.1.3. Hypothèses de base du projet

Ces hypothèses de base incluent notamment un état bathymétrique de projet, un mode d'exploitation, une nature des fonds...

L'état bathymétrique de projet, qui est le facteur le plus déterminant pour appréhender de potentiels effets sur le trait de côte, consiste à concevoir une bathymétrie finale du site après extraction de la totalité du volume demandé sur la durée du projet. La forme en plan, les pentes de la fosse et la cote finale du fond doivent être pour cela définis pour application de la séquence ERC (Eviter - Réduire - Compenser).

Ainsi, un premier projet de base est en général conçu et testé. Il peut ensuite faire l'objet de modifications, afin d'en réduire les effets (chapitre 10.3).

Un exemple de ces deux états bathymétriques (référence et projet) est fourni sur la Figure 79.

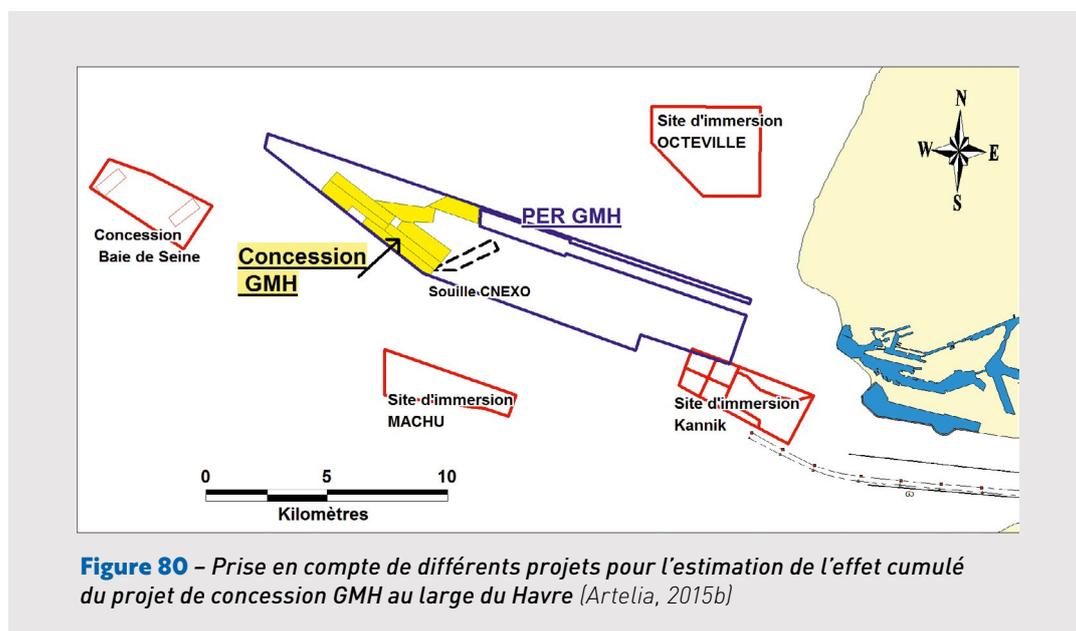


**Figure 79** – Exemple de bathymétrie pour la situation de référence (gauche) et la situation de projet (droite) (Artelia, 2020)

#### 10.1.4. Autres projets susceptibles d'être pris en compte au titre des effets cumulés

D'autres projets en cours ou prévus, tels que des concessions voisines ou des sites d'immersion de sédiments de dragage, doivent être intégrés à la situation de projet afin d'examiner les possibles effets cumulés. La prise en compte des effets cumulés, exigés par la réglementation, nécessite souvent en pratique un échange préalable avec la DREAL. Il est possible dans certains cas d'intégrer tout ou partie de ces projets dans la modélisation discutée dans le présent guide. Cela implique de modifier la bathymétrie de l'état projet discutée précédemment.

La Figure 80 présente l'exemple de l'étude du projet de concession des Granulats Marins Havrais (GMH) pour lequel une concession plus au large et trois sites d'immersion de sédiments de dragages ont été pris en compte.



**Figure 80** – Prise en compte de différents projets pour l'estimation de l'effet cumulé du projet de concession GMH au large du Havre (Artelia, 2015b)

### 10.1.5. Choix des conditions océano-météo représentatives

Les conditions océano-météo sont très changeantes au cours du temps à différentes échelles allant jusqu'à des périodes longues couvrant plusieurs décades. La limitation des moyens de simulation numérique ne permet toujours pas actuellement de couvrir ces longues périodes et des choix de scénarios océano-météo doivent donc être faits pour définir des conditions représentatives à simuler.

Pour la marée, le choix le plus simple est une marée de vive-eau moyenne (de coefficient 95). La montée en puissance des moyens informatique pour la simulation numérique depuis les années 80 permet aujourd'hui de simuler rapidement un cycle de marée de 15 jours autour d'une marée d'équinoxe ce qui permet de couvrir une large gamme de coefficients.

Pour la météorologie, on donnera la priorité au climat des vagues qui forcent le transit littoral. Les bases de données actuelles permettent d'avoir une bonne idée du climat moyen d'agitation au large sur 10, 20 ou 30 ans. Ces bases de données fournissent également des séries temporelles tri-horaires ou horaires détaillées (chapitre 8.3.2.) qui peuvent être utilisées en entrée du modèle de propagation des états de mer pour obtenir des climats locaux d'agitation le long du littoral étudié.

La méthode la plus simple pour définir ces conditions représentatives d'agitation consiste à identifier les secteurs de provenance importants à partir de la rose des houles (Figure 81).

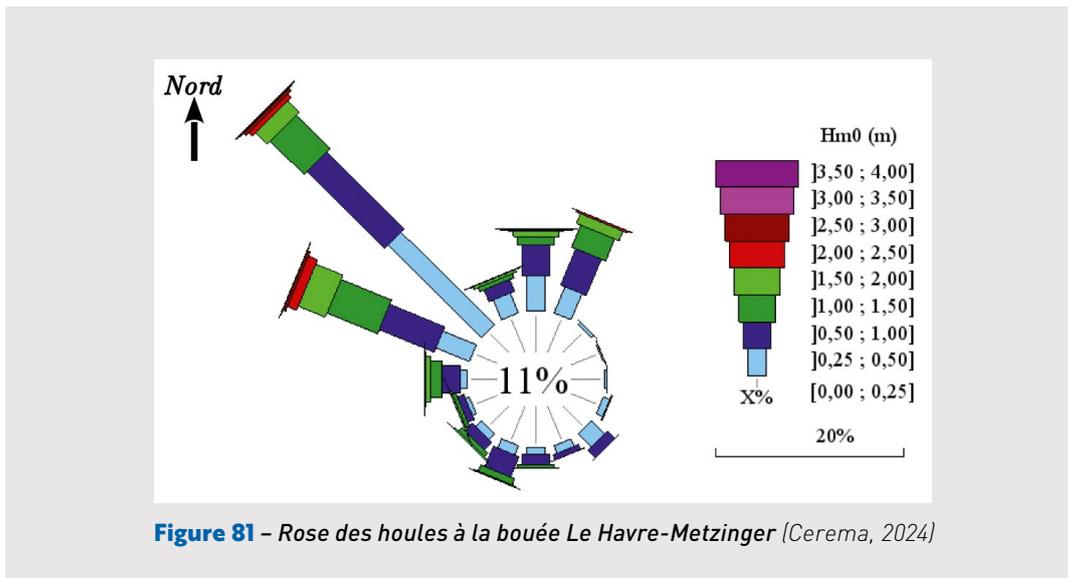


Figure 81 – Rose des houles à la bouée Le Havre-Metzinger (Cerema, 2024)

À l'intérieur de chaque secteur, on choisit ensuite une hauteur significative moyenne avec sa période de pic associée à simuler en conjonction avec un niveau d'eau de basse-mer et de pleine-mer. Ce choix est complété dans le secteur dominant par la simulation d'une tempête annuelle et d'une tempête décennale. On aboutit ainsi à 4 à 6 conditions de houle à simuler qui devront être combinées avec différents niveaux de marée et notamment pleine-mer et basse-mer dans le modèle de propagation des états de mer.

Une méthode plus précise consiste à étendre la durée des simulations à un hiver ou une année représentative. Cette représentativité peut s'apprécier en étudiant la distribution annuelle du flux d'énergie des vagues par direction de provenance. La Figure 82 illustre la méthode sur le cas du site de Cairnstrath. On observe sur ce graphe que c'est l'hiver 2011-2012 qui est le plus représentatif de l'hiver moyen, tant en flux d'énergie qu'en direction. La prédominance du flux d'énergie moyen hivernal sur le flux d'énergie moyen annuel confirme l'intérêt de se focaliser sur la période hivernale.

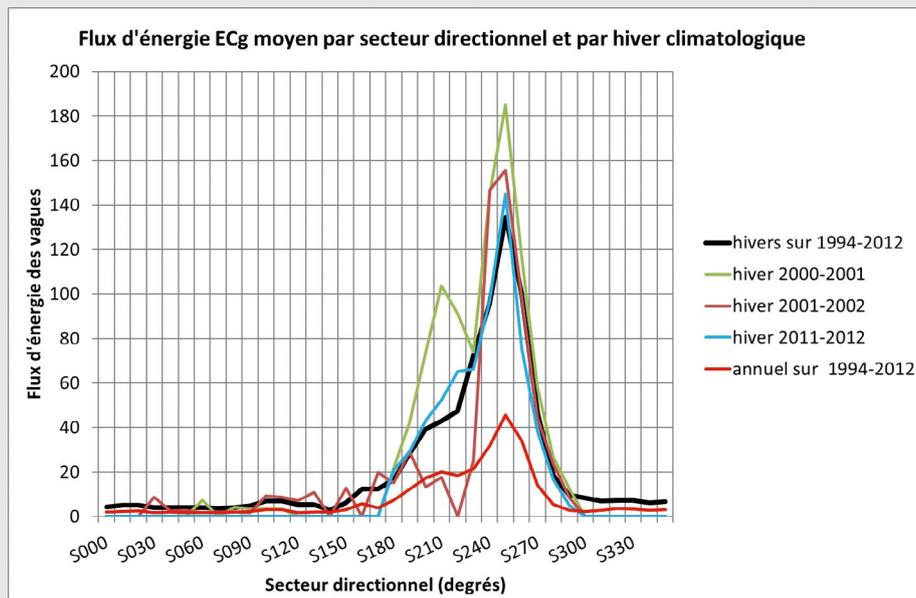


Figure 82 – Flux d'énergie moyen de l'agitation à Cairnstrath (Artelia, 2015a)

Enfin, la méthode la plus complète (et la plus coûteuse en temps calcul et en espace de stockage) consiste à effectuer un transfert complet de la base de données du large.

Ces conditions climatiques doivent être complétées par des conditions de tempêtes représentatives dont les hauteurs significatives ont des périodes de retour annuelles et décennales, complétées par quelques tempêtes historiques ayant provoqué des mouvements sédimentaires remarquables (chapitre 8.3.3.) sans oublier les tempêtes restées bien présentes localement dans les mémoires (comme par exemple Lothar et Martin en 1999 et Xynthia en 2010 en Atlantique et Vivian en 1990 en Manche orientale). Une liste des tempêtes historiques dans chaque province sédimentaire est d'ailleurs fournie dans les fascicules de synthèse des connaissances (Cerema, 2021).

Dans le cas des zones estuariennes, on prendra également en compte l'hydrologie des fleuves pouvant influencer le transport sédimentaire sur la zone d'intérêt en simulant au moins une période de crue et une période d'étiage.

## 10.2. DÉTERMINATION DES EFFETS ET ÉVALUATION

### 10.2.1. Effet sur l'agitation à la côte

L'analyse comparative des résultats des deux simulations (état de référence et état projet, voir paragraphe 10.1.2.) peut être présentée sous forme de tableaux et sous forme de cartes. La Figure 83 (site du Payré) présente un exemple de propagation d'une houle décennale sur la concession du Payré et l'effet de celle-ci sur la hauteur significative. Les zones en rouge sur le différentiel indiquent une augmentation de la hauteur de vagues et les zones en vert une diminution.

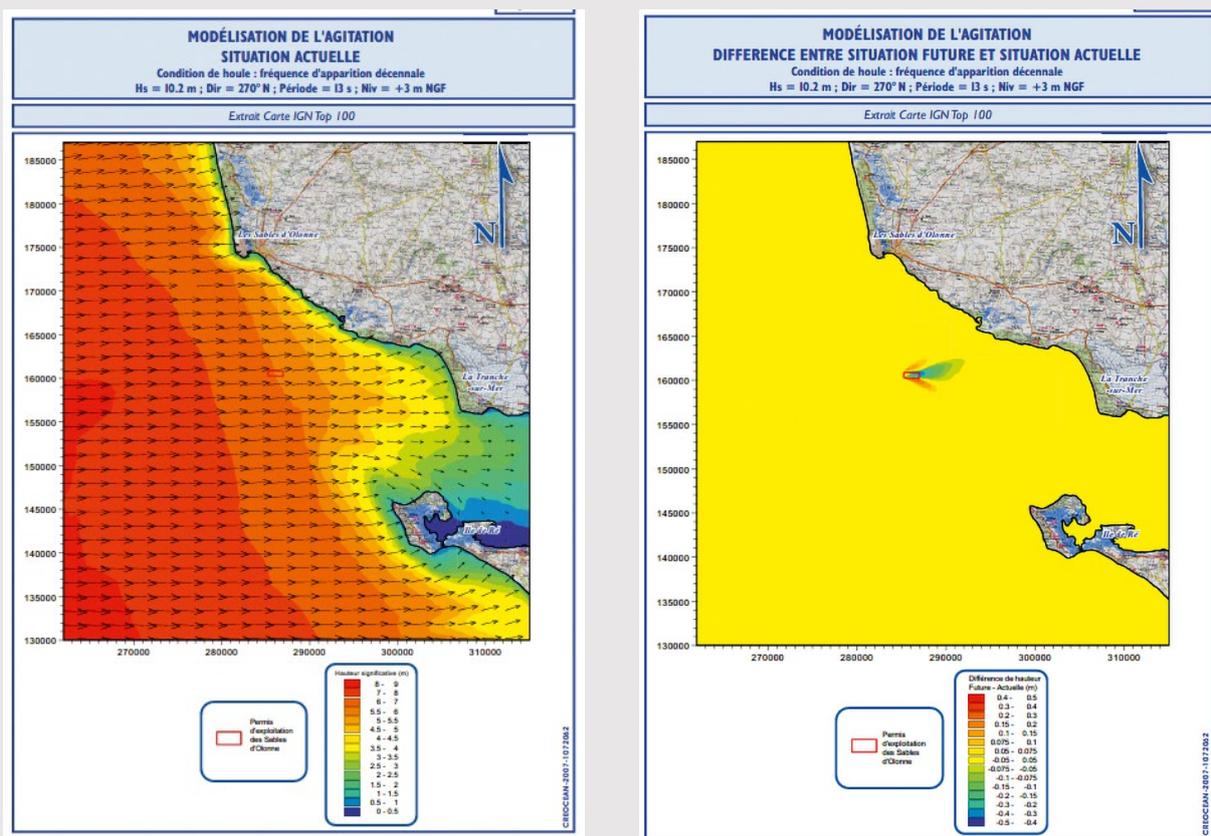
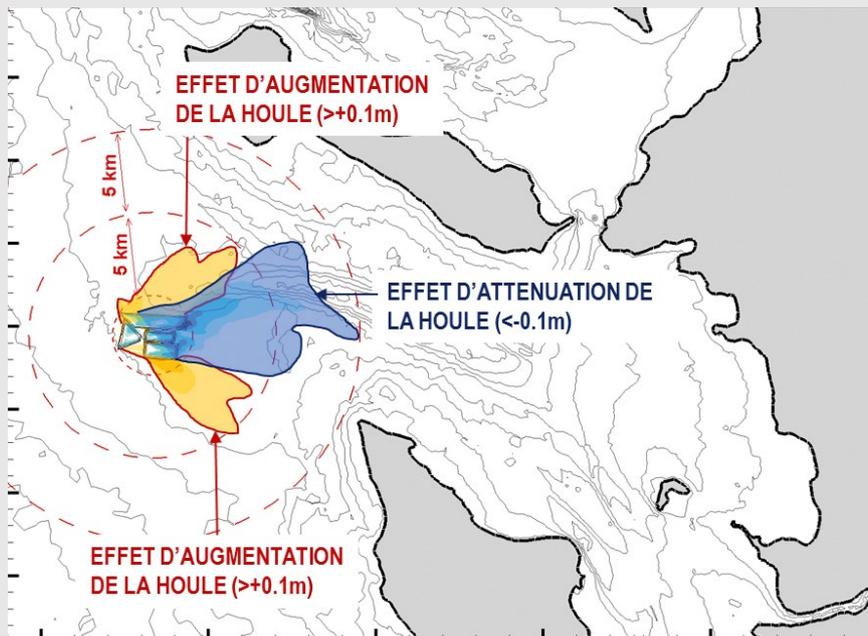


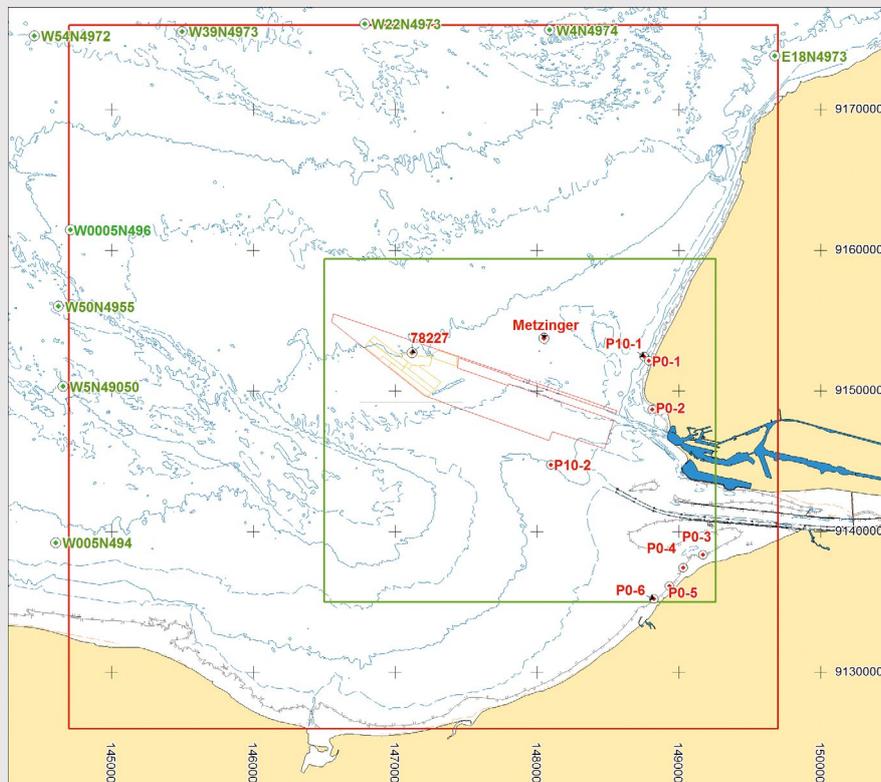
Figure 83 – Exemple d'effet de la concession du Payré sur la propagation d'une houle décennale (Crescoan, 2007)

Il est possible aussi de définir une enveloppe des effets en cumulant les résultats d'une série de conditions de houle incidente comme illustré sur la Figure 84 (site du Chassiron). Cette représentation graphique permet de visualiser de possibles effets du projet sur l'agitation à la côte.

Ensuite, il est recommandé d'analyser les conditions de houle à la côte en un certain nombre de points positionnés devant des sections littorales d'intérêt de l'étude pour comparer les résultats de calcul dans l'état de référence (actuel) et l'état projet. La Figure 85 présente un tel positionnement en baie de Seine. Cette comparaison peut être fournie sous forme de graphes (Figure 86) ou de tableaux (Figure 87) avec des comparaisons en valeur absolue ou relative.

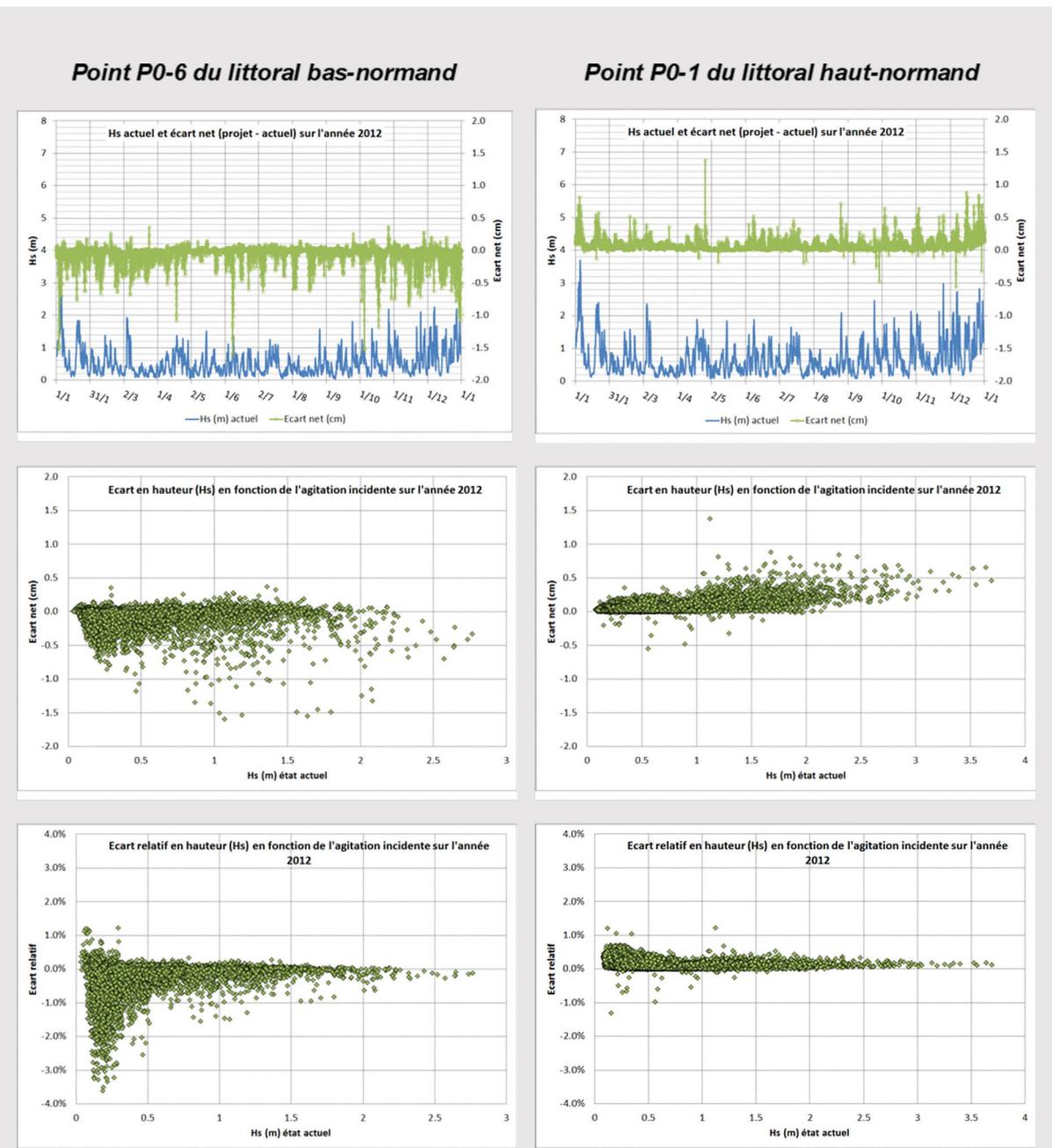


**Figure 84** – Exemple d'enveloppe des effets sur l'agitation pour les concessions de Chassiron (Artelia, 2020)



**Figure 85** – Exemple de placement de points de sortie d'agitation le long du littoral (Artelia, 2015b)

Il est important de signaler qu'une concession modifie non seulement la hauteur significative des vagues mais également leur direction. Ces écarts en direction sont peu importants et n'ont pas d'effet en mer. Par contre, ils ont une importance à la côte en modifiant l'intensité du transit littoral sur les littoraux meubles. C'est pourquoi ce dernier indicateur (transit littoral) est beaucoup plus représentatif que les variations de direction des vagues pour apprécier leur effet.



**Figure 86** – Exemple de comparaison de l'agitation en deux points du littoral pour une année représentative (Artelia, 2015b)



**Modification de l'attaque de la houle moyenne annuelle - Pointe de Chassiron**

	F_1	F_2	F_3	F_4
Hauteur de houle référence (m)	0.97	1.25	1.88	1.51
Hauteur de houle projet (m)	0.96	1.24	1.88	1.52
Différence (m)	-0.01	-0.01	0.00	0.01
Écart relatif (%)	-1.12 %	-1.02 %	0.05 %	0.95 %

**Modification de l'attaque de la tempête annuelle - Pointe de Chassiron**

	F_1	F_2	F_3	F_4
Hauteur de houle référence (m)	3.43	4.33	6.42	5.34
Hauteur de houle projet (m)	3.42	4.28	6.42	5.42
Différence (m)	-0.01	-0.05	0.00	0.07
Écart relatif (%)	-0.3 %	-1.2 %	0.0 %	1.3 %

**Modification de l'attaque de la tempête décennale - Pointe de Chassiron**

	F_1	F_2	F_3	F_4
Hauteur de houle référence (m)	3.96	4.83	6.88	6,16
Hauteur de houle projet (m)	3.90	4.82	6.88	6,18
Différence (m)	-0.06	-0.01	0.00	0.01
Écart relatif (%)	-1.6 %	-0.2 %	0.0 %	0.2 %

**Figure 87** – Exemple de tableaux de comparaison de l'agitation (Artelia, 2020)

### 10.2.2. Effet sur l'érosion du profil de plage

En cas d'augmentation significative des hauteurs de houle en un ou plusieurs points le long de la côte, il conviendra de vérifier localement l'influence de cet effet sur l'érosion du profil de plage en procédant à une modélisation spécifique telle que décrite au chapitre 7.3.

### 10.2.3. Effet sur le transit littoral

L'effet sur le transit littoral va s'analyser de la même façon à partir des conditions de houle à la côte extraites du modèle de propagation des états de mer. Le Tableau 7 fournit un exemple d'une telle comparaison sur les points de référence en baie de Seine (Figure 85).

**Tableau 7** – Exemple de tableau de comparaison du transit littoral annuel (haut) et pour une tempête décennale (bas) (Artelia, 2015)

Point	Transit net état actuel	Transit net état aménagé	Écart net	Écart relatif
P0-1 galet+ sable	-89 672 m <sup>3</sup> /an	-89 379 m <sup>3</sup> /an	293 m <sup>3</sup> /an	-0.33 %
P0-2 galet+ sable	-91 313 m <sup>3</sup> /an	-91 655 m <sup>3</sup> /an	-342 m <sup>3</sup> /an	0.37 %
P-03 sable	63 345 m <sup>3</sup> /an	63 139 m <sup>3</sup> /an	-206 m <sup>3</sup> /an	-0.33 %
P-04 sable	50 580 m <sup>3</sup> /an	50 983 m <sup>3</sup> /an	403 m <sup>3</sup> /an	0.80 %
P-05 sable	70 990 m <sup>3</sup> /an	71 193 m <sup>3</sup> /an	203 m <sup>3</sup> /an	0.29 %
P-06 sable	88 501 m <sup>3</sup> /an	88 316 m <sup>3</sup> /an	-185 m <sup>3</sup> /an	-0.21 %

Point	Transit net état actuel	Transit net état aménagé	Écart net	Écart relatif
P0-1 galet+ sable	-4010 m <sup>3</sup>	-4087 m <sup>3</sup>	-77 m <sup>3</sup>	1.9 %
P0-2 galet+ sable	-3486 m <sup>3</sup>	-3476 m <sup>3</sup>	10 m <sup>3</sup>	-0.3 %
P-03 sable	1479 m <sup>3</sup>	1477 m <sup>3</sup>	-2 m <sup>3</sup>	-0.1 %
P-04 sable	2371 m <sup>3</sup>	2372 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>	0.0 %
P-05 sable	3273 m <sup>3</sup>	3274 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>	0.0 %
P-06 sable	3727 m <sup>3</sup>	3781 m <sup>3</sup>	55 m <sup>3</sup>	1.5 %

### 10.2.4. Effet sur l'évolution du trait de côte

L'application de la stratégie d'étude détaillée au chapitre 9.2.1. peut conduire à la mise en œuvre d'un modèle d'évolution du trait de côte suivant l'arbre de décision fourni sur la Figure 67. Cet arbre permet de choisir le type de modèle le plus adapté au tronçon littoral à étudier.

Nous présentons ici l'exemple du littoral de la Couarde-sur-Mer sur l'île de Ré qui est situé dans la zone d'influence des concessions de Chassiron. Il s'agit ici d'une plage étendue et la méthode recommandée (Figure 67) est de calculer les variations du transit sur des tronçons homogènes par la méthode de conservation du volume des sédiments (voir chapitre 7.1.1.).

Des points de sortie d'agitation sur une année représentative ont été placés sur les zones sensibles (F, G, H) identifiées grâce aux études existantes sur les risques littoraux (Figure 88). Ils ont été complétés par les points F2, G2, H2 et H3 afin d'être en mesure de calculer des gradients de transit sur les différentes plages de cette commune. Le transit littoral calculé dans la situation de référence (réf) et l'état projet le long du littoral de cette commune est fourni dans le Tableau 8 (haut). On observe que l'effet du projet sur le transit est assez variable allant de -5,7 % à l'ouest jusqu'à +1,2 % à l'est.

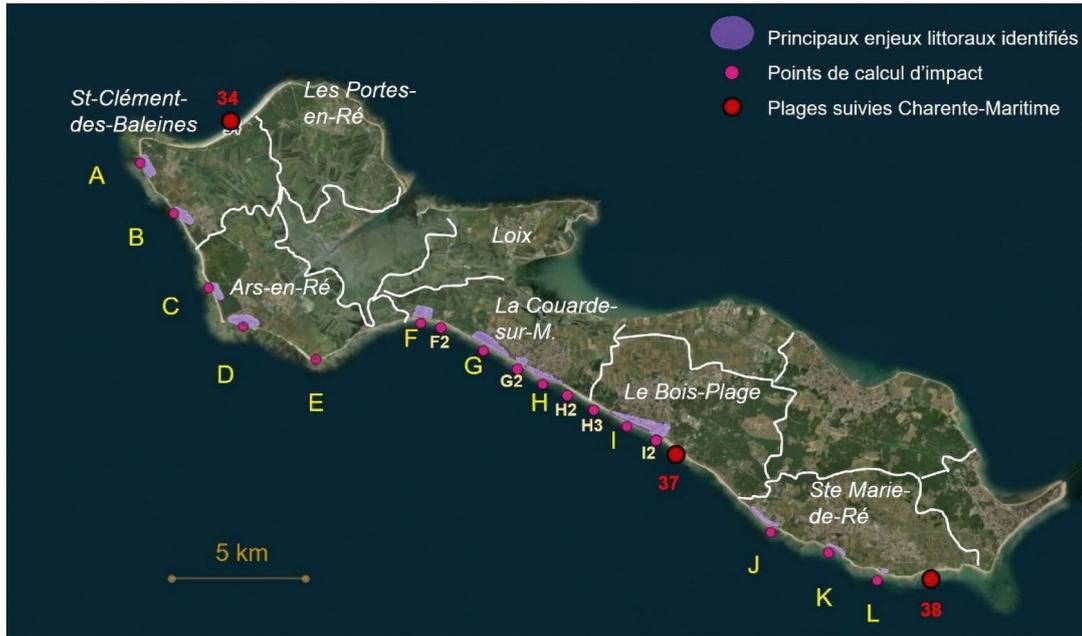


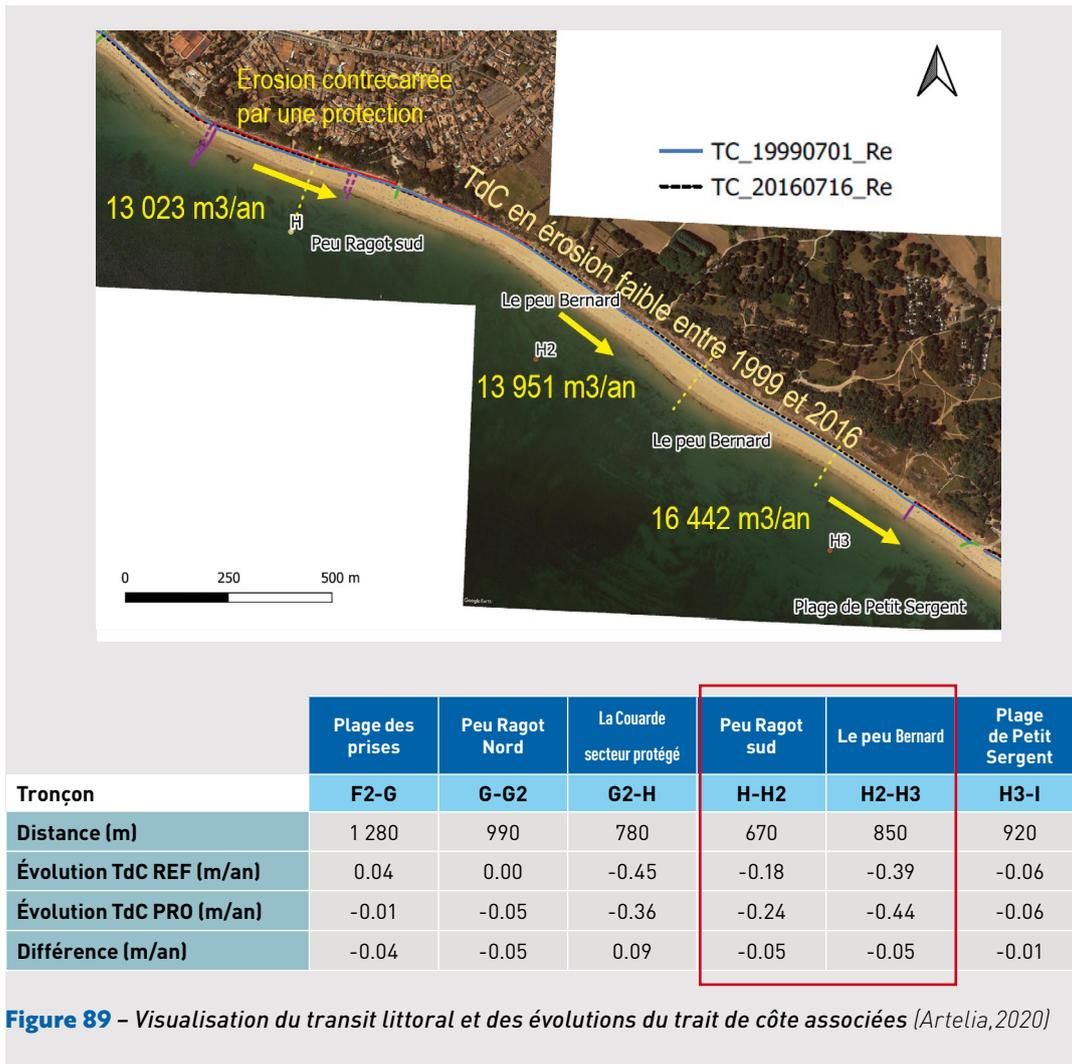
Figure 88 – Implantation de points de sortie d'agitation pour le calcul du transit littoral (Artelia, 2020)

Tableau 8 – Exemple de tableau de comparaison du transit littoral annuel (haut) et des évolutions du trait de côte (bas) (Artelia, 2020)

	La Couarde sur M.					
	F2	G	G2	H	H2	H3
Transit littoral réf.(m³/an)	-10 707	-10 331	-10 363	-13 023	-13 951	-16 442
Transit littoral projet (m³/an)	-10 095	-10 148	-10 526	-12 652	-13 835	-16 644
Différence (m³/an)	612	183	-163	371	116	-202
Écart relatif (%)	-5.7 %	-1.8 %	1.6 %	-2.8 %	-0.8 %	1.2 %

Un calcul d'évolution moyenne du trait de côte a donc été réalisé pour préciser les conséquences de ces variations de transit. Il indique dans l'état de référence une faible érosion chronique pour les plages de La Couarde, Peu Ragot sud et le Peu Bernard. Ces résultats sont corroborés par les observations de terrain sur la période 1999-2016 et la présence d'une protection côtière qui fixe le trait de côte à Peu Ragot sud (Figure 89).

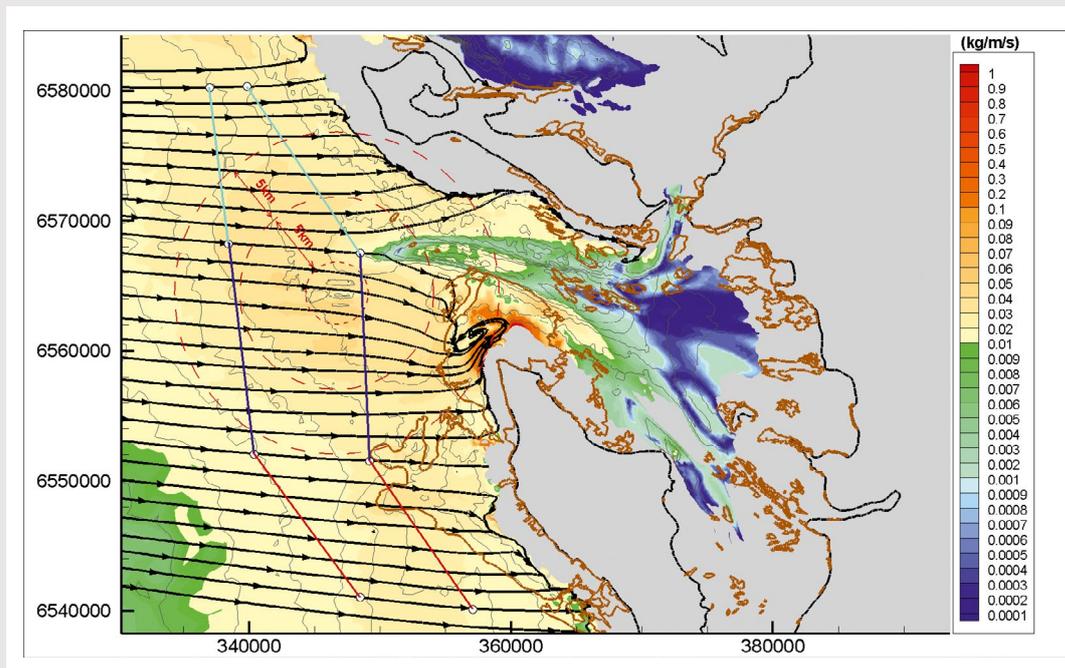
Dans ce cas de figure, les calculs sur l'état projet et leur comparaison avec l'état de référence mettent en évidence une légère évolution du trait de côte sur ces trois plages (Figure 89), trop faible pour être observable annuellement.



### 10.2.5. Effet sur le transport solide du large vers la côte

Les calculs de transport solide résiduel peuvent être analysés par exemple en traçant des lignes de courant permettant ensuite de définir des sections de contrôle des flux de sédiments délimités par la zone d'influence sur le littoral du projet de concession. La Figure 90 illustre une telle démarche : deux sections ont été tracées à l'amont et à l'aval du projet sur une étendue permettant de couvrir la zone d'influence. Chacune d'elles a été subdivisée en trois tronçons (nord, centre et sud) correspondant à 3 secteurs littoraux bien distincts. La quantification des flux dans les deux simulations permet ensuite d'estimer l'effet du projet comme illustré par le Tableau 9. L'effet calculé est quantitativement très faible, de - 0,26 % au maximum sur le tronçon aval centre, induit par la réduction de l'agitation.

Il est recommandé de bien commenter les résultats et les valeurs obtenues, d'autant plus dans le cas où ils sont contre-intuitifs. Ainsi, dans cet exemple, on observe un effet du projet de concession sur la section amont (-0,13 % sur le tronçon nord et 0,14 % sur le tronçon centre) qui s'explique par la légère modification des courants de jusant orientés côte/large (même si non majoritaire par rapport aux courants orientés du large vers la côte). D'autre part, on observe sur les trois tronçons une tendance à l'érosion entre l'amont et l'aval car l'intensité du transport sur les sections aval est plus importante que sur les sections amont. Cette tendance n'est pas modifiée par le projet.



**Figure 90** – Exemple de lignes de courant matérialisant la direction et le sens du le transport solide résiduel annuel et position des sections de calcul des flux (Artelia, 2020)

**Tableau 9** – Exemple de tableau de comparaison des flux de transport solide résiduel annuel (Artelia, 2020)

Tronçon	Section amont			Section aval		
	Nord	Centre	Sud	Nord	Centre	Sud
Distance (m)	6204	7861	3408	7038	9933	5285
Évolution TdC REF (m/an)	6196	7872	3408	7055	9908	5286
Évolution TdC PRO (m/an)	-8	11	0	17	-25	1
Différence (m/an)	-0.13 %	0.14 %	0.01 %	0.24 %	-0.26 %	0.02 %

### 10.3. ÉTUDE DES RÉDUCTIONS POSSIBLES DES EFFETS

Les effets sur le littoral, liés aux projets de concession, sont fonction du site retenu mais aussi de la forme géométrique en plan de la concession et de la profondeur d'excavation. La position du site est en général choisie pour des raisons géologiques (gisements) et de faisabilité d'extraction. Elle est donc relativement bien fixée. Par contre, une certaine latitude existe sur sa délimitation en plan et les profondeurs d'extraction. Des études de sensibilité par simulation numérique peuvent donc être réalisées sur différents scénarios d'exploitation pour éviter ou réduire l'effet sur le trait de côte lorsque celui-ci pourrait être jugé trop pénalisant sur le projet de base.

## 10.4. INCERTITUDES ET LIMITES DE VALIDITÉ DES RÉSULTATS

Les méthodologies présentées ici reposent sur des concepts physiques et des modélisations robustes qui présentent un large éventail de complexité et de coût de mise en œuvre. D'autre part, ces modélisations, même les plus avancées, restent des schématisations de la réalité et sont forcées par des données d'entrée sur lesquelles existent également des marges d'incertitude qui peuvent évoluer dans le futur.

La réduction des incertitudes présentée dans ce guide repose d'une part sur la validation des modélisations numériques utilisées avec des données de terrain (voir chapitre 9.3.) et d'autre part sur l'approche comparative entre deux situations : état de référence et projet. En effet, les approximations effectuées par la modélisation (connaissance imparfaite et schématisation des données naturelles, méthodologie d'étude, imperfections des équations et des méthodes numériques) restent les mêmes dans la modélisation des deux situations si bien que l'effet calculé par différence les annule.

L'analyse des résultats est une étape essentielle qui permet d'apprécier la validité et la marge d'incertitude des résultats, à partir des conditions d'étalonnage, de la connaissance et de la représentativité des conditions naturelles. La discussion sur les hypothèses admises au départ de la modélisation est également une étape nécessaire qui repose fortement sur la capacité d'expertise du modélisateur (Latteux, 2008).

Néanmoins les résultats obtenus doivent être analysés et interprétés strictement dans le cadre de l'objet de l'étude et ne pas être utilisés à d'autres fins sans une analyse approfondie des données utilisées et des hypothèses de calcul mises en place.

## 11. CRITÈRES D'ABSENCE D'EFFET SIGNIFICATIF

Les modélisations numériques présentées dans ce guide permettent de quantifier l'effet (en unités physiques et en pourcentage), d'un projet de concession sur l'évolution du trait de côte. Parallèlement, les études d'impact environnemental utilisant ces résultats doivent fournir une appréciation qualitative sur l'impact selon une échelle : nul ou négligeable, faible, moyen ou fort. La relation entre les résultats quantitatifs et l'appréciation qualitative n'est pas actuellement formalisée. Nous fournirons ici des indications pouvant guider la motivation des appréciations émises en ce qui concerne le trait de côte.

### 11.1. CAS DES CÔTES BASSES MEUBLES

Dans le cas des littoraux meubles, il faut considérer les risques d'érosion qui peuvent résulter de deux types d'effet :

- Le premier concerne la possible augmentation des hauteurs significatives en tempête, susceptible d'aggraver les érosions de dune et du profil de plage par les transports transversaux. La méthodologie proposée ici (chapitres 9.1.5. et 9.4.3.) recommande la mise en œuvre d'un modèle d'érosion du profil de plage au droit de la zone où cette augmentation a été constatée qui fournira une quantification du niveau d'érosion dans la situation de référence et dans l'état projet. L'écart entre les résultats devra être confronté aux données relatives à la sensibilité de ce tronçon de littoral pour évaluer l'impact.
- Le second effet concerne les variations de transit littoral. Une fourchette de variation de plus ou moins 1 à 5 % du transit annuel peut être considérée comme négligeable ou non significative selon la sensibilité du littoral (chapitre 9.2.1.). Le dépassement de cette variation doit conduire à la mise en œuvre d'un modèle d'évolution du trait de côte (Figure 67) sur la situation de référence et l'état projet. Là encore, l'écart entre les résultats devra être confronté aux données relatives à la sensibilité de ce tronçon de littoral pour évaluer l'impact.

## 11.2. CAS DES CÔTES ROCHEUSES

L'analyse préalable de la dynamique des côtes à falaises potentiellement affectées par une concession, doit se concentrer sur l'influence des vagues sur cette dynamique et repérer notamment si elle est dominante ou marginale. Les enjeux liés à ces côtes rocheuses et leur sensibilité à l'action des vagues doivent être correctement appréhendés.

MEEDDM (2010) note également le fait que la dangerosité des vagues dépend des caractéristiques morphologiques et sédimentaires de l'avant-côte. Ainsi, de larges plateformes d'érosion marine et de forts apports sédimentaires au pied des abrupts contribuent à réduire l'action des vagues. L'effet des vagues sur ces plateformes est alors à quantifier.

Les résultats du modèle de propagation des états de mer doivent être analysés en ce sens. Le critère sera celui de la hauteur significative des vagues au pied des falaises qui ne doit pas augmenter de plus de quelques pourcents. Le degré d'érodabilité de la falaise et de son éventuelle plateforme sédimentaire ou de la côte basse rocheuse constitue également un critère d'appréciation à prendre en compte.

## 11.3. CAS DES EMBOUCHURES

Le cas des estuaires et des lagunes côtières est le plus délicat et il conviendra d'analyser en complément des points précédents, l'effet sur les évolutions morphodynamiques du système afin de vérifier que le projet ne modifie pas sensiblement son équilibre dynamique. En effet, en l'absence d'étude complémentaire, une extraction mal dimensionnée pourrait conduire à rompre un équilibre d'ensemble du système intéressant une vaste emprise incluant le trait de côte et la morphologie de l'embouchure dans son ensemble.

Une bonne compréhension de la dynamique sédimentaire et morphodynamique (évolution des bathymétries) passée et présente est ici nécessaire pour analyser les résultats. Latteux (2008) cite deux éléments à considérer plus spécialement :

- Comment se situent les caractéristiques de l'extraction envisagée (volume, localisation) par rapport aux évolutions naturelles du secteur concerné ?
- Si des extractions ont déjà été effectuées par le passé, quel en est le retour d'expérience ?

## 12. PRESCRIPTIONS RÉGLEMENTAIRES ET SUIVIS ENVIRONNEMENTAUX SUR LA DURÉE DES TRAVAUX

### 12.1. PRESCRIPTIONS RÉGLEMENTAIRES

Afin de s'assurer que les niveaux d'impacts constatés restent cohérents avec les prédictions de l'étude d'impact, les travaux d'exploitation de granulats marins sont régis par des arrêtés préfectoraux d'autorisation d'ouverture des travaux qui prescrivent les limites d'exploitation à respecter (emprise, volume annuel, profondeur, pente des talus) ainsi que les modalités de suivi de l'exploitation.

En ce qui concerne notamment le volet sédimentaire, à l'heure actuelle, ces arrêtés prescrivent un suivi de l'activité des navires (respect du périmètre, pression d'activité) et un suivi bathymétrique régulier, *a minima* tous les 5 ans (bilan quinquennal) accompagné, à la même fréquence, d'un suivi sédimentologique (levé au sonar à balayage latéral, prélèvements sédimentaires et analyses granulométriques).

Le préfet peut prescrire des suivis morpho-bathymétriques sur un périmètre d'étude étendu si les enjeux environnementaux le justifient.

De plus, conformément aux articles L.181-14 et R.181-46 du code de l'environnement, toute modification notable apportée aux travaux autorisés, à leurs modalités d'exploitation ou de mise en œuvre doit être portée à la connaissance du préfet, avant sa réalisation, par le bénéficiaire de l'autorisation avec tous les éléments d'appréciation. Par exemple, une modification des conditions d'exploitation qui serait de nature à changer les hypothèses de base du projet (chapitre 10.1.3.) utilisées pour la modélisation réalisée lors de l'étude d'impact doit être portée à la connaissance du préfet, accompagnée des éléments permettant d'en apprécier la nature et l'ampleur (par exemple, modélisation actualisée avec les nouvelles hypothèses).

Le préfet peut fixer des prescriptions complémentaires ou adapter l'autorisation environnementale, voire solliciter une nouvelle autorisation environnementale si la modification est jugée substantielle.

## 12.2. COMPLÉMENT ET RÉVISION DES PRESCRIPTIONS

Enfin, dans certains cas particuliers, les suivis réglementaires peuvent nécessiter d'être révisés par le préfet, afin de s'assurer que les niveaux d'impacts constatés restent cohérents avec l'étude d'impact. Il s'agit des cas spécifiques suivants :

- 1°/ Étude hydrosédimentaire de l'étude d'impact montrant à la fois un effet notable sur le transit littoral (Figure 67, chapitre 9.2.) et un impact potentiel non négligeable mais acceptable sur l'évolution du trait de côte au regard de sa sensibilité,
- 2°/ Si les suivis montrent des évolutions non prévues<sup>39</sup> dans l'étude d'impact et de nature à faire évoluer de façon significative les effets sur la zone littorale,
- 3°/ Tout autre cas, soulevé par des tiers demandeurs, ayant fait l'objet d'un argumentaire étayé justifiant sa prise en compte.

Pour ces différents cas, voici les éléments qui pourraient notamment être demandés au détenteur de la concession :

- Dans les cas 1°/ et 3°/ Utiliser les données publiques existantes en particulier celles des observatoires du trait de côte pour une expertise (bilan des évolutions depuis la mise en exploitation en prenant notamment en compte les actions anthropiques et les événements extrêmes...) et présenter cette expertise lors des comités de suivi lorsqu'ils existent et en fonction de ses résultats lancer au besoin un rejeu du modèle,
- Dans le cas 2°/ Lancer une expertise pour comprendre l'origine des évolutions non prévues ainsi que l'expertise du modèle initial et de ses données d'entrée et le cas échéant lancer un rejeu.

<sup>39</sup> Evolutions non prévues : changements drastiques morpho-bathymétriques en périmètre d'étude étendu ...

## CONCLUSIONS

Ce guide méthodologique s'inscrit dans le cadre de l'élaboration de l'étude d'impact requise par l'article R.122-5 du code de l'environnement. Celui-ci impose une description des incidences notables que le projet est susceptible d'avoir sur l'environnement résultant, entre autres du fait de « *l'utilisation des ressources naturelles, en particulier les terres, le sol, l'eau et la biodiversité, en tenant compte, dans la mesure du possible, de la disponibilité durable de ces ressources* ».

Il s'organise autour d'une stratégie d'étude pour la réalisation d'une modélisation numérique hydrosédimentaire fiable des effets potentiels de l'exploitation de granulats marins sur l'évolution du trait de côte. Celle-ci est décrite en détail au chapitre 9.2. du guide qui inclut un schéma d'organisation des différentes modélisations pouvant être mises en place ainsi qu'un arbre de décision concernant la mise en œuvre d'un modèle d'évolution du trait de côte, prenant en compte le principe de proportionnalité aux enjeux, édicté par le code de l'environnement.

La bonne application de cette stratégie nécessite deux prérequis qui sont :

- Une bonne compréhension théorique des facteurs d'évolution du trait de côte (y compris les actions anthropiques) et des facteurs physiques et processus mis en jeu (hydrodynamique, transport des sédiments, dynamique des littoraux) qui sont décrits dans la partie A du guide (chapitres 1 à 3),
- La connaissance des différents types de modélisation numérique susceptibles d'être mis en œuvre. La partie B du guide (chapitres 4 à 7) en dresse un panorama synthétique en distinguant les modélisations bien établies et celles relevant encore du domaine de la recherche mais susceptibles d'être utilisées en ingénierie dans les prochaines années.

Les grandes étapes de sa mise en œuvre pratique sont ensuite détaillées dans la partie C du guide (chapitres 8 à 12).

- Cela comprend tout d'abord la collecte des données d'entrée et la mise en place des différentes modélisations nécessaires, à savoir :
  1. La définition du périmètre géographique de la modélisation qui doit s'appuyer sur l'enveloppe des cellules sédimentaires potentiellement affectées par le projet (chapitre 9.1.). Cette première collecte de données de terrain doit permettre d'établir un descriptif du schéma régional de la dynamique hydrosédimentaire à partir duquel une stratégie de modélisation pourra être définie comme cela est détaillé au chapitre 9.2.,
  2. L'acquisition et l'analyse des données de terrain sur ce périmètre permettant de définir tous les facteurs pertinents en cohérence avec la stratégie retenue. Des indications précises sont fournies au chapitre 8, sur les types de données nécessaires ainsi que sur les outils et bases de données disponibles,
  3. La construction des différentes modélisations (chapitres 9.3. et 9.4.) avec un accent mis sur leur validation dans l'état de référence du site d'étude par comparaison avec des données de terrain ou similaires (bases de données numériques validées).
- La seconde étape consiste à mettre en évidence des possibles effets du projet. Ce projet est défini par le pétitionnaire qui s'appuie pour cela sur la séquence ERC (Eviter-Réduire-Compenser) (chapitre 10.3.). Des hypothèses de base sont établies, incluant notamment des états bathymétriques de référence et de projet ainsi que des conditions océano-météo représentatives (chapitre 10.1.). Les effets potentiels sont ensuite mis en évidence en comparant des simulations effectuées dans les mêmes conditions sur l'état de référence puis sur l'état projet (analyse différentielle).

Le chapitre 10.2. fournit de nombreux exemples pratiques issus de dossiers existants pour illustrer les différents effets potentiels sur l'agitation et les courants, le transport de sédiments et les évolutions du trait de côte.

- Ces résultats seront ensuite intégrés avec d'autres éléments dans l'étude d'impact du projet. Le chapitre 11 fournit, à cet effet, des éléments de critère d'absence d'effet significatif sur le trait de côte.

Au final, ce guide doit permettre :

- D'une part, de faire un point sur les connaissances scientifiques de base concernant un sujet complexe et mal connu en dehors du cercle des spécialistes,
- Et d'autre part, de fournir une méthodologie, cohérente avec le guide technique pour l'élaboration des études d'impact préalables à la recherche et l'exploitation des granulats marins (MTECT, 2023), permettant d'obtenir une évaluation robuste des effets potentiels d'une exploitation de granulats marins.

Enfin, l'ensemble des résultats de modélisation produits selon les recommandations de ce guide pourront améliorer la compréhension des facteurs naturels et anthropiques qui guident l'évolution actuelle du littoral.

## RÉFÉRENCES

- AIRH/ AIPCN, 1986. Paramètres des états de mer. Bulletin de l'association internationale permanente des congrès de navigation, supplément au bulletin n° 52, 49 p.
- Ardhuin, Fabrice, Justin E. Stopa, Bertrand Chapron, Fabrice Collard, Romain Husson, Robert E. Jensen, Johnny Johannessen, Alexis Mouche, Marcello Passaro, Graham D. Quartly, Val Swail and Ian Young, 2019. Observing sea states. *Front. Mar. Sci.* 6:124, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00124>
- Artelia, Cerema et UNPG, 2021. Évolution du trait de côte et extraction de granulats marins. Rapport d'étude de juin 2021, 114 p.
- Ashley, G.M. *et al.* (19 co-auteurs), 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of sedimentary petrology*, 60 (1), 160-172
- Astérie, 2007. Étude d'impact de l'exploitation du gisement de sables calcaires des Duons, Baie de Morlaix, Finistère. Dossier constitué pour le compte de la compagnie Armoricaïne de Navigation (CAN). Novembre 2007, 323 p.
- Astérie, 2010. Demande d'autorisation d'ouverture de travaux d'exploitation. Gisement de la Horaine. Etude d'impact. Dossier constitué pour le compte de la compagnie Armoricaïne de Navigation (CAN). Août 2010, 430 p.
- Ayache B., Nicolas Lerma A., Ulvoas B., 2018. Évolution géomorphologique de la côte sableuse en Gironde et dans les Landes entre 2011 et 2017, à partir de l'exploitation du Lidar. Rapport final. BRGM/RP-67187-FR, 49 p., 18 Ill., 8 tb., 4 ann.
- Barrineau, Patrick, Rens Janmaat, Tim Kana, 2021. Empirical depths of closure along the US East coast, *Coastal Engineering*, Vol.170, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104009>.
- Bayram, A., Magnus Larson, Herman C. Miller, Nicholas C. Kraus, 2001. Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements. *Coastal Engineering*, 44 (2), 79-99, [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00023-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00023-0)
- Bennis, A.C. 2017. Modélisation de la dynamique de l'environnement côtier. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Caen-Normandie, 130 p.
- Bertin, X., E. Prouteau et C. Letretel, 2013. A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change*, vol. 106, 77-83, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.03.009>
- Bertin, X.; Mengual, B.; de Bakker, A.; Guérin, T.; Martins, K.; Pezerat, M., and Lavaud, L., 2020. Recent advances in tidal inlet morphodynamics modelling. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020*. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 95, pp. 1016–1020. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- BMAPA et The Crown Estate, 2013. Marine aggregate dredging and the coastline: a guidance note. 27 p.
- Boudière E., Maisondieu C., Ardhuin F., Accensi M., Pineau-Guillou L., Lepesqueur J., 2013. A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 3-4, e40-e5, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.010>. Open Access version : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00164/27524/>
- BRGM et Cerema, 2022. Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte. Co-édition BRGM et Cerema, août 2022, 95 p., ISBN : 978-2-7159-2791-9 et 978-2-37180-566-8
- 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., Nicoale Lerma A., Nahon A., Millescamps B., 2014. Evaluation 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., 138 fig., 8 tab., 2 ann., <http://infoterre.brgm.fr/rapports/BRGM/RP-63797-FR.pdf>
- Bulteau T., A. Nicolae Lerma et S. Lecacheux, 2013. Projet climats de houle – phase 2 : analyse des valeurs extrêmes de vagues le long de la côte Atlantique et en Manche. Rapport final BRGM/RP-62730-FR, 49p., 26fig., 2ann., <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62730-FR.pdf>
- Castelle, B., V. Marieu, S. Bujan, S. Ferreira, J.-P. Parisot, S. Capo, N. Sénéchal, T. Chouzenoux, 2014. Equilibrium shoreline modelling of a high-energy meso-macrotidal multiple-barred beach. *Marine Geology*, Vol. 347, 85-94, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.003>
- 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, 212-223
- Castelle, B., G. Dodet, G. Masselink et T. Scott, 2018. Un indice climatique contrôlant les conditions de vagues en hiver le long de la côte atlantique européenne : WEPA (West Europe Pressure Anomaly). C.R. XVèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil La Rochelle, 29 au 31 mai 2018 doi:10.5150/jngcgc.2018.086, Editions Paralia CFL
- 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
- Cerema, 2015. Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral – cahier technique

Cerema, 2017. Spécification technique de l'indicateur national de l'érosion côtière. En ligne sur le site internet Géolittoral [http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/strategie-nationale-de-gestion-integree-du-trait-r434.html].

Cerema, 2018. Etudes hydrauliques maritimes : Guide à destination des maîtres d'ouvrage, 154 p.

Cerema, 2019. Connaissance du trait de côte - Élaboration de la cartographie des ouvrages et aménagements littoraux. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-411-1 (numérique)

Cerema, 2024. Fiches synthétiques de mesure des états de mer du réseau CANDHIS. Tome 1 - Mer du Nord, Manche et Atlantique - Janvier 2021, 274 p.

Cerema, 2021. Dynamiques et évolution du littoral. Synthèse des connaissances Actualisation du Catalogue Sédimentologique des côtes françaises. 17 fascicules et atlas associés, <https://www.cerema.fr/fr/actualites/dynamiques-evolutions-du-littoral-synthese-connaissances-0>

Chamley, H., 1987. Sédimentologie. Ed. Dunod, Paris, 175 p.

Charles E., Idier D., Thiébot J., Le Cozannet G., Pedreras R., Arduin F. and Planton S., 2012. Wave climate variability and trends in the Bay of Biscay from 1958 to 2001, Journal of Climate. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00086.1

Chataigner, T., M.L. Yates, N. Le Dantec, M.D. Harley, K.D. Splinter, N. Goutal, 2022. Sensitivity of a one-line longshore shoreline change model to the mean wave direction, Coastal Engineering, Volume 172, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104025>.

Chauchat, J., G.L. Richard, C. Bonamy, K. Nguyen et H. Shafiei, 2020. Intercomparaison de modèles morphodynamiques sur la plage du Truc Vert – campagne ECORS'2008. XVIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Le Havre, 2020, DOI:10.5150/jngcgc.2020.022

Chaumillon, E. et A. Bigot, 2016. Etude des évolutions morphologiques interannuelles et séculaires de 37 plages de Charente-Maritime. Rapport n°15, Université de La Rochelle.

Clark, S., F. Schroeder et B. Baschek, 2014. The influence of large offshore wind farms on the North Sea and Baltic Sea – a comprehensive literature review. HZG REPORT 2014-6 /Helmholtz-Zentrum Geesthacht/ ISSN 2191-7833

Cooper, N.J., P. C. Barber, M. J. Bray and D. J. Carter, 2002. Shoreline management plans: A national review and engineering perspective. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water & Maritime Engineering, 154 (3), 221-228

Dean, R.G., 1991. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. J. of Coastal Research, 7 (1), 53-84

Debese, Nathalie, Jean-José Jacq, Thierry Garlan, 2016. Extraction of sandy bedforms features through geodesic morphometry. Geomorphology, 268, Elsevier, pp.82-97

Delinares M., R. Walther et L. Hamm, 2015. Development of an hydro-sedimentary 3D model in sand-mud mixture, calibration and validation on 6 years evolution in the Seine Estuary, Proc. Int. Conf. INTERCOH 2015 – Leuven-Belgique, 09/2015

Desmare S., A. Nicolle (2012). Hydrodynamique côtière : modélisation des courants de marée au SHOM, JNGCCG, Edition 12, Cherbourg, pp. 31-40.

Elshinnawy, A.I., Raúl Medina, Mauricio González, 2017. On the relation between the direction of the wave energy flux and the orientation of equilibrium beaches. Coastal Engineering, Vol. 127, 20-36, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.06.009>.

Feddersen, F., R. T. Guza, S. Elgar, and T. H. C. Herbers, 1998. Alongshore momentum balances in the nearshore. J. Geophys. Res., 103, 15 667–15 676.

Fischereit J, Larsén XG and Hahmann AN, 2022. Climatic Impacts of Wind-Wave-Wake Interactions in Offshore Wind Farms. Front. Energy Res. 10:881459. doi: 10.3389/fenrg.2022.881459

Gangloff A., Le Bot S., Nexer M., Bary M., Quillien N., Bacha M., Robert A., Amara R., Blanpain O., Caille C., Desroy N., Parent B., Ferret Y. et Garlan T., 2023. Les dunes sous-marines et leur écosystème sous contraintes anthropiques. Tome 1. Synthèse des connaissances. France Energies Marines Editions, Plouzané, France, 77 p.

GIMeL, 2021. Recommandations d'usage concernant les limites entre la terre et la mer. Version 1.0 (octobre 2021). 13 pages. [http://cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2021/10/texte\\_recommandation\\_LimTM\\_gimel\\_v1.pdf](http://cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2021/10/texte_recommandation_LimTM_gimel_v1.pdf)

GIS SIEGMA, 2012. Suivi des impacts de l'extraction de granulats marins. Synthèse des connaissances 2012. Robert Lafite et Michel Desprez (dir.), Presses universitaires de Rouen et du Havre, DOI : 10.4000/books.purh.809, 44 p.

Goda, Y., 2006. Examination of the influence of several factors on longshore current computation with random waves. Coastal Engineering, 53 (2-3), 157-170

Goda, Y. et N. Watanabe, 1991. A Longshore Current Formula for Random Breaking Waves, Coastal Engineering in Japan, 34:2, 159-175, DOI: 10.1080/05785634.1991.11924547

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

Hamm L et Gorjux B. (2005) "The role of swell and atmospheric stability in wind wave prediction : A practical application in the bay of Seine (France)" Proc. 5th Int. Symposium WAVES 2005, 3-7 July 2005, Madrid, Spain, paper 144

Hervouet, J.M., 2007. Hydrodynamics of free-surface flows. Wiley, 360 pages

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

Howa, H., 1987. Le littoral du nord Médoc (Gironde) : évolution d'une côte sableuse en érosion. Thèse doctorale de l'Université de Bordeaux I

Hsu, J., R.-C., M.-J. Tu, F.-C. Lee et L. Benedet, 2009. Static bay beach concept for scientists and engineers : A review. Coastal Engineering,

Idier, D., Bertin, X., Thompson, P. et al., 2019. Interactions Between Mean Sea Level, Tide, Surge, Waves and Flooding: Mechanisms and Contributions to Sea Level Variations at the Coast. Surv Geophys 40, 1603–1630. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09549-5>

Ifremer - Augris, C. Hamon, D. (coord.) et al., 1996 - Atlas thématique de l'environnement marin en baie de Saint-Brieuc (Côtes d'Armor), 72pages, 20 cartes échelles 1/100 000. Ed. Ifremer.

Ifremer, 2021. Protocoles conseillés pour la description de l'état initial et le suivi environnemental des sites d'extraction de granulats marins. Livrable 2 de l'action 6.4 de la convention 2018 n°2102427980 établie entre le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire – Direction de l'Eau et de la Biodiversité et l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

Kergadallan, X., 2013. Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes - Environnements maritime et estuariens. Edition CETMEF, Compiègne

Kpogo-Nuwoklo, A. K., Pierre Ailliot, Michel Ollagnon, Zakoua Guédé, Sabine Arnault, 2015. Improvement ocean wave spectra estimation using the temporal structure of wave systems, Coastal Engineering, Vol. 96, 81-91

Kristensen, S.E., Dronen, N., Deigaard, R., Fredsoe, J., 2016. Impact of groyne fields on the littoral drift: A hybrid morphological modeling study. Coastal Engineering III (2016) 13-22

Kuriyama, Y. et H. Sakamoto, 2014. Cross-shore distribution of long-term averaged longshore sediment transport rate on a sandy beach exposed to waves with various directionalities; coastal Engineering, 86, 27-35

Larson, M., et N.C. Kraus, 1989. SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change. Report 1 : Empirical Foundation and Model Development, Report 2 : Numerical Formulation and Model Tests. Technical Report CERC- 89-9, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss

Larson, M., H. Hanson et N.C. Kraus, 1997. Analytical solutions of one-line model for shoreline change near coastal structures. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean engineering, ASCE, vol. 123 (4), 180-191

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

Lazure P, Dumas F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Adv. Water Resour, 31 (2008), pp. 233–250

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)

Le Hir, P. 2008. Aide mémoire de dynamique sédimentaire, 7<sup>e</sup> édition. Département DYNECO Ifremer, novembre 2008, 74p.

Maisondieu, C., M. Accensi, J.F. Leroux et E. Boudière, 2017. Manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE. Mise à jour 2017 du jeu de données de hindcast. Rapport Ifremer, RDT/LCSM 17-281, 50 p.

Mariou, V., B. Castelle et S. Bujan, 2014. Application d'un modèle d'équilibre dynamique du trait de côte à une plage méso-tidale soumise aux houles très énergétiques. Actes journées Nationales Génie Côtier – Génie civil, Dunkerque. DOI:10.5150/jngcgc.2014.050

Mason, T. et Dhoop, T., 2018. Occurrence of Bimodal Seas around the English Coastline Technical report TN02. Channel Coastal Observatory, National Oceanography Centre, European Way, Southampton (UK). <https://www.coastalmonitoring.org/ccoresources/bimodalseas/>

MEDD, 2001. L'étude d'impact sur l'environnement. 157p. <https://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/guide-de-l-etude-d-impact-sur-l-environnement-a617.html>

MEDDE, 2015. Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle, Volume 5. Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. 71 p.

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

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

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

MEEM, 2017. Guide d'évaluation des impacts sur l'environnement des parcs éoliens en mer. Édition 2017, 201 p.

Mengual B., \*, Cayocca F., Le Hir P., Draye R., Laffargue P., Vincent B., Carlan T., 2016. Influence of bottom trawling on sediment resuspension in the 'Grande-Vasière' area (Bay of Biscay, France). *Ocean Dynamics*, 66, 1181-1207, <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-016-0974-7>, <http://archimer.ifremer.fr/doc/00353/46428/>

Migniot, C. et J. Viguier, 1980. Influence de l'extraction des granulats en mer sur l'équilibre du littoral. *La Houille Blanche*, n°3, 177-194.

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1051/lhb/1980018>

Montaño J., Coco G., Antolínez J.A.A., Beuzen T., Bryan K.R., Cagigal R., Castelle B., Davidson M.A., Goldstein E.B., Ibaceta R., Idier D., Ludka B.C., Masoud-Ansari S., Méndez F.J., Murray B., Plant N.G., Ratliff K.M., Robinet A., Rueda A., Sénéchal N., Simmons J.A., Splinter K.D., Stephens S., Townend I., Vitousek S., Vos K., (2020). Blind testing of shoreline evolution models. *Sci Rep* 10, 2137. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59018-y>.

MTECT, 2023. Guide technique pour l'élaboration des études d'impact préalables à la recherche et l'exploitation des granulats marins. Recommandations relatives à la prise en compte des milieux physiques et biologiques. 48p.

[https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2023-07/Guide%20Etudes%20d%27impact%20Granulats%20Marins\\_2023.pdf](https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2023-07/Guide%20Etudes%20d%27impact%20Granulats%20Marins_2023.pdf)

Nichols, M. et Allen, G., 1981. Sedimentary processes in coastal lagoons. *Coastal lagoon research, present and future. Unesco technical papers Marine science*, 33:27-80.

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.

Oudart, T.; Walther, R.; Le-Dissez, A. (2021): Innovative 3D hydrosedimentary modelling of migrating inlets. In: Breugem, W. Alexander; Frederickx, Lesley; Koutrouveli, Theofano; Chu, Kai; Kulkarni, Rohit; Decrop, Boudewijn (Hg.): Proceedings of the papers submitted to the 2020 TELEMAR-MASCARET User Conference October 2021. Antwerp: International Marine and Dredging Consultants (IMDC). S. 41-48

Pelnaud-Considère, R., 1956. Essai de théorie de l'évolution des formes de rivages en plages de sable et de galets. 4èmes journées de l'hydraulique. Les énergies de la mer, question III, rapport n°1, 289-298

Peters, S.E. et D. P. Loss, 2012. Storm and fair-weather wave base: A relevant distinction ? *Geology*; 40 (6): 511-514. doi: <https://doi.org/10.1130/G32791.1>

Pinot, J.P., 1998. La gestion du littoral. 2 tomes. Editions de l'Institut Océanographique, Paris, 760 p.

Poirier, C., B. Tessier, E. Chaumillon, X. Bertin, M. Fruergaard, D. Mouazé, S. Noël, P. Weill, G. Woppelmann, 2021. Decadal changes in North Atlantic atmospheric circulation patterns recorded by sand spits since 1800 AD. Preprint submitted to *Geomorphology* October 4, 2021

Portilla, J., F. J. Ocampo-Torres, and J. Monbaliu, 2009: Spectral Partitioning and Identification of Wind Sea and Swell, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 26, Issue 1

Raoult, C., A. Joly, M. Andreevsky et A. Joly-Laugel, 2018. ANEMOC-3 : amélioration de la base de données ANEMOC-2 par la prise en compte des effets de la marée. 16èmes journées de l'hydrodynamique, Marseille

Rankey, E.C. et C. M. Appendini, 2022. Unfathomable: The shifting sand of wave base. *Journal of Sedimentary Research*; 92 (2): 95-111. doi: <https://doi.org/10.2110/jsr.2021.077>

Reniers, A.J.H.M. et J.A. Battjes, 1997. A laboratory study of longshore currents over barred and non-barred beaches. *Coastal Engineering* 30, 1-22

Rivier, A., A. Bennis, G. Pinon, V. Magar, M. Gross, 2016. Parameterization of wind turbine impacts on hydrodynamics and sediment transport. *Ocean Dynamics*, 66, 1285-1299, <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0983-6>

Robinet A., Idier D., Castelle B., Marieu V., 2018. A reduced-complexity shoreline change model combining longshore and cross-shore processes: The LX-Shore model, *Environmental Modelling & Software*, 109, 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.010>

Robinet A., B. Castelle, D. Idier, V. Marieu, 2020. Controls of local geology and cross-shore/longshore processes on embayed beach shoreline variability. *Marine Geology*, 42, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106118>

Roelvink D, Reniers A, van Dongeren A. et al., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56:1133-1152. doi: 10.1016/j.coastaleng.2009.08.006

Sabatier, F., M.J.F. Stive et F. Pons, 2004. Longshore variation of depth of closure on a micro-tidal wave-dominated coast. *Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Engineering*, Lisbon, ASCE

Sabatier, F., 2008. Modélisation de l'impact du changement climatique sur l'érosion des dunes. Application à la Camargue. *La Houille Blanche* 94(1). DOI: 10.1051/lhb:2008004

Saha S. et al., 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol 91, 1015-1057

SCOR-WG89, 1991. The response of beaches to sea-level changes: A review of predictive models. *J. Coastal Research*, 7(3), 895-921

Seyfried, L., H. Michaud et C. Vrignaud, 2021. Réanalyse et modélisation des surcotes et états de mer. *Projet PAPI Saint-Malo - Axe 2, Action 2.1, Livrable 4.*

- Shom, 2015. MNT bathymétrie de façade. Descriptif de contenu du produit externe, novembre 2015, 3 p.
- Shom et Cerema, 2022. Estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau – Littoral métropolitain. Rapport d'étude de décembre 2022. <https://diffusion.shom.fr/niveaux-extremes-edition-2022.html>
- Simon B. (2007). La Marée - La marée océanique et côtière. Edition Institut océanographique, 434pp.
- Soulsby, R., 1997. Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications. Telford
- Stive, M.J.F., Roelvink, D.J.A. and de Vriend, H.J., 1990. Large-scale coastal evolution concept. Proceedings of the 22nd Int. Conf. on Coastal Engineering, Delft, ASCE, New York, 1962-1974
- Stive M.J.F., Aarninkhof, S.G.J., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K.M., Nichols, R.J., Capobianco, M., 2002. Variability of shore and shoreline evolution. Coastal engineering, 47(2), 211-235.
- Suastika, I. K. [2004] Wave blocking. Ph.D. thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands
- Thom, B. G.; Eliot, I G; Eliot, M; Harvey, N.; Rissik, D.; Sharples, C.; Short, A. D.; and Woodroffe, C. D., 2018. National sediment compartment framework for Australian coastal management. Faculty of Science, Medicine and Health - Papers: part A. 5215. <https://ro.uow.edu.au/smhpapers/5215>
- Thomas, R.C. et A.E. Frey, 2013. Shoreline change modeling using one-line models: General model comparison and literature review. ERDC/CHL CHETN-II-55, décembre 2013
- Thornton, E. et R.T. Guza, 1986. Surf-zone longshore currents and random waves: field data and models. J. of Phys. Oceanog., 16, 1165-1178
- Townsend, K.E., R.C. Thomas et A.E. Frey, 2014. Shoreline change modeling using one-line models: Application and comparison of GenCade, Unibest and Litpack. ERDC/CHL CHETN-IV-102, septembre 2014
- USACE (U.S. Army Corps of Engineers), 2002. Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes). Avec mises à jour en 2006, 2008 et 2011
- Van Dijk, T.A.G.P., Lindenberg, R.C., Egberts, P.J.P., 2008. Separating bathymetric data representing multiscale rhythmic bed forms: A geostatistical and spectral method compared. J. Geophys. Res. Earth Surf. 113, F04017. doi:10.1029/2007JF000950
- Van Rijn, L.C., 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: initiation of motion, bed roughness and bed-load transport; II: suspended transport and III: graded beds. J. of Hydraulic Engineering, vol. 133, n°6, 649-689 et 7,761-775
- Varing, A., J.F. Filipot, M. Delpy, G. Guitton, F. Collard, P. Platzer, V. Roeber, D. Morichon, 2021. Spatial distribution of wave energy over complex coastal bathymetries: Development of methodologies for comparing modeled wave fields with satellite observations, Coastal Engineering, Vol. 169, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103793>
- 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. [https://www.persee.fr/doc/jhydr\\_0000-0001\\_1984\\_act\\_18\\_3\\_4903](https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1984_act_18_3_4903)
- Vos, K., M.D. Harley, K.D. Splinter, J.A. Simmons et I.L. Turner, 2019. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. Coastal Engineering 150 (2019) 160–174
- Walther, R., J. Schaguene, L. Hamm, E. David, 2012. Coupled 3D modeling of turbidity maximum dynamics in the Loire Estuary, France. Proc. 33rd Int. Conf. on Coastal Engineering (ICCE 2012), Santander, 1-6 juillet 2012, sediment.22.
- Warner, J.C., C.R. Sherwood, R.P. Signel, C.K. Harris, H.G. Arango, 2008. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. Computers & Geosciences, Vol. 34(10), pp 1284–1306. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.02.012>
- Wise, R.A., S.J. Smith et M. Larson, 1996. SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change. Report 4: Cross-shore transport under random waves and model validation with SUPERTANK and field data. Technical Report CERC- 89-9, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss
- Yates, M.L., Guza, R.T., O'Reilly, W.C., Hansen, J.E., Barnard, P.L., 2011. Equilibrium shoreline response of a high wave energy beach. J. Geophys. Res. 116. <https://doi.org/10.1029/2010JC006681>
- Zarifsanayei, A. R., Etemad-Shahidi, A., Cartwright, N., & Strauss, D., 2020. Long-term prediction of longshore sediment transport in the context of climate change. Coastal Engineering Proceedings, (36v), papers.15. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.papers.15>
- Zhang A, Hess KW, Aikman F., 2010. User-based skill assessment techniques for operational hydrodynamic forecast systems. J Oper Oceanogr. 3(2):11–24.
- Zhang, Y.E., F. Ye, E.V. Stanev, S. Grashorn, 2016. Seamless cross-scale modelling with SCHISM. Ocean modelling, 102, 64-81

## LISTE DES ÉTUDES CITÉES DANS LE GUIDE PAR CONCESSION

### Granulats Marins Havrais (GMH)

Artelia, 2015a. Exploitation de granulats en baie de Seine. Etude 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 : Etude des impacts hydrosédimentaires sur le transport des matières en suspension,
- R2 : Etude des impacts sur l'agitation et le littoral

### La Horaine

Astérie, 2010. Demande d'autorisation d'ouverture de travaux d'exploitation. Gisement de La Horaine. Etude d'impact. Rapport d'août 2020 établi pour le compte de la compagnie Armoricaine de Navigation (CAN).

iXblue, 2017. Suivi environnemental du gisement de sable coquillier de La Horaine. Inspection Geophysique - Rapport d'interprétation établi pour le compte de la CAN.

### Les Duons

Astérie, 2007. Étude d'impact de l'exploitation du gisement de sables calcaires des Duons. Mise à jour en juin 2007, complétée en novembre 2007 pour le compte de la CAN.

Safège, 2009. Etude hydrosédimentaire sur le site des Duons. Rapport d'étude du 10 juin 2009 établi pour le compte d'Astérie

### Le Pilier

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.

### Cairnstrath A et SN2

Artelia, 2015b. Projet Cairnstrath. Etudes hydrosédimentaires complémentaires. Rapports n°871 3539 de juin 2015 établis pour le groupement Cairnstrath SN2 et les Sablières de l'Atlantique.

- R1 : Etude de l'agitation et de son impact sur le trait de côte,
- R2 : Courantologie et transport sédimentaire
- Creoccean, 2015. Expertise morpho-sédimentaire du gisement de granulats marins « Cairnstrath ». Dossier 140653\_RA\_GEO\_V00 du 13/05/2015 établi pour le compte de Dragages Transports et Travaux Maritimes (DTM), Sablières de l'Atlantique, CETRA et Société des Dragages d'Ancenis

### Le Payré

Creoccean, 2007. Suivi environnemental du gisement des Sables d'Olonne. Modélisation numérique des conditions hydrodynamiques et du transport sédimentaire. Dossier 1072062 de décembre 2007 établi pour le compte de Dragages-Transport & Travaux Maritimes (DTM) et Lafarge Granulats Ouest (LGO).

### Chassiron B et D

Creoccean, 2019. Concessions de Chassiron B et D. Demande de prolongation de titre minier et de reconduction de l'autorisation domaniale et de l'autorisation d'ouverture de travaux. Expertise préalable morpho-sédimentaire. Rapport 190332C du 22/10/2019 établi pour le compte de GSM - HeidelbergCement Group

Artelia, 2020. Concessions Chassiron B et D. Rapports d'étude n° 8 71 6098 R1 à R6 de janvier 2020 établis pour le compte de GSM Ouest Pays de Loire

- R2 : Impact des extractions sur l'hydrodynamisme local,
- R3 : Impact des extractions sur le transport sédimentaire des sables,
- R6 : Impact des extractions sur le littoral.

### Platin de Grave

i-Sea, 2020. Concession Platin de Grave. Bilan hydro-sédimentaire et morphodynamique. Rapports d'étude du 31/07/2020 établis pour le compte d'Artelia et de GSM - HeidelbergCement Group.

- Phase 1 : Analyse des évolutions du trait de côte,
- Phase 2 : Analyse des levés bathymétriques.

Artelia, 2022. Concession du Platin de Grave. Modélisations hydrosédimentaires. Rapport n° 871 6192 v5 de mars 2022 établi pour le compte de Granulats Ouest - HeidelbergCement Group

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> – Typologie des ouvrages et aménagements littoraux relevés par le Cerema , 2019	<b>27</b>
<b>Tableau 2</b> – Les composantes du niveau marin (hors agitation)	<b>37</b>
<b>Tableau 3</b> – Exemple de calcul du ratio de Kelley et al. (2004) pour une plage du sud de la Bretagne (Artelia)	<b>70</b>
<b>Tableau 4</b> – Classification internationale des dunes hydrauliques (Ashley et al., 1990)	<b>85</b>
<b>Tableau 5</b> – Formules statistiques de comparaison mesures-calcul	<b>113</b>
<b>Tableau 6</b> – Evaluation statistique de la modélisation courantologique sur le site des Chassiron (Artelia)	<b>113</b>
<b>Tableau 7</b> – Exemple de tableau de comparaison du transit littoral annuel (haut) et pour une tempête décennale (bas) (Artelia, 2015)	<b>131</b>
<b>Tableau 8</b> – Exemple de tableau de comparaison du transit littoral annuel (haut) et des évolutions du trait de côte (bas) (Artelia, 2020)	<b>132</b>
<b>Tableau 9</b> – Exemple de tableau de comparaison des flux de transport solide résiduel annuel (Artelia, 2020)	<b>134</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> – Schéma conceptuel de la chaîne d'impact, reliant l'ensemble des notions clés indispensables à l'étude des interactions	<b>14</b>
<b>Figure 2</b> – Organisation des modélisations à mettre en place	<b>18</b>
<b>Figure 3</b> – Différentes composantes morphologiques d'un littoral	<b>23</b>
<b>Figure 4</b> – Lagunes, estuaires et deltas © Agence française pour la biodiversité. Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau, 2018)	<b>25</b>
<b>Figure 5</b> – Exemple de détermination empirique de la profondeur de fermeture (DOC)	<b>28</b>
<b>Figure 6</b> – Les principaux éléments d'un profil littoral (Artelia)	<b>29</b>
<b>Figure 7</b> – Profil représentatif du littoral de Pakiri (Hilton et Heps, 1996)	<b>30</b>
<b>Figure 8</b> – Echanges sédimentaires en zone côtière et littorale (d'après MEEM, 2015)	<b>32</b>
<b>Figure 9</b> – Découpage du littoral métropolitain en unités morphosédimentaires (MEEM, 2015)	<b>35</b>
<b>Figure 10</b> – Exemple de découpage en unités morphosédimentaires (MEEM, 2015)	<b>36</b>
<b>Figure 11</b> – Cartes de vitesses maximales de courants de marée, en haut : Manche Est – Mer du Nord, en bas : Atlantique (data.shom.fr)	<b>39</b>
<b>Figure 12</b> – Exemple d'analyse vague à vague (Cerema, 2024)	<b>40</b>
<b>Figure 13</b> – Exemple d'analyse spectrale d'un état de mer complexe : gauche : signal mesuré ; droite : spectre en fréquence, en bas : spectre directionnel (Cerema, 2024)	<b>41</b>
<b>Figure 14</b> – Processus physiques observables dans la zone de déferlement (Artelia)	<b>43</b>
<b>Figure 15</b> – Transport solide sur le fond (1), par saltation (2) et en suspension (3) sous l'effet d'une contrainte de cisaillement (4) (Wikipedia)	<b>44</b>
<b>Figure 16</b> – Contraintes de cisaillement et transport solide (Soulsby, 1997)	<b>45</b>
<b>Figure 17</b> – Contrainte de cisaillement critique de mise en mouvement (Soulsby, 1997)	<b>46</b>
<b>Figure 18</b> – Exemple d'effet d'une souille d'extraction sur l'agitation : en haut : différentiel sur les hauteurs significatives ; en bas : différentiel sur les directions – logiciel SWAN 41.01 (Artelia 2015a)	<b>51</b>
<b>Figure 19</b> – Effet de l'arasement d'un banc de sable sur le déferlement (Cayocca et du Gardin, 2003)	<b>51</b>
<b>Figure 20</b> – Interception directe du transit littoral dans la zone de déferlement (d'après Cayocca et du Gardin, 2003)	<b>53</b>

<b>Figure 21</b> – Erosion régressive des petits fonds et de la plage (d'après Cayocca et du Gardin, 2003)	<b>53</b>
<b>Figure 22</b> – Exemple d'épure de réfraction pour une houle N260, Hm0 = 4m, Tp=12s – logiciel SWAN 41.01 (Artelia, 2015a)	<b>57</b>
<b>Figure 24</b> – Maillage vertical du modèle de l'estuaire de la Loire et de son embouchure (Walther et al., 2012)	<b>59</b>
<b>Figure 23</b> – Exemple d'un maillage non-structuré en 3 dimensions de l'estuaire de la Loire et de son embouchure (Walther et al., 2012)	<b>59</b>
<b>Figure 25</b> – Exemple de calcul avec une modélisation 1D (Artelia)	<b>61</b>
<b>Figure 26</b> – Exemple de calcul de transport solide résiduel annuel : partie charriage (Artelia, 2020)	<b>64</b>
<b>Figure 27</b> – Exemple de calcul de transport solide résiduel annuel : partie suspension (Artelia, 2020)	<b>64</b>
<b>Figure 28</b> – Exemple de répartition du transit littoral le long d'un profil de plage (d'après Migniot, 1977)	<b>66</b>
<b>Figure 29</b> – Estimation du coefficient empirique K de la formule du CERC par régression linéaire (USACE, 2002)	<b>67</b>
<b>Figure 30</b> – Variation du coefficient empirique K de la formule du CERC avec le diamètre du sédiment (USACE, 2002)	<b>68</b>
<b>Figure 31</b> – Exemple de variabilité temporelle du transit littoral sur une plage du sud de la Bretagne (Artelia)	<b>70</b>
<b>Figure 32</b> – Schéma de principe de la relation entre la variation du transit et l'évolution du trait de côte (Artelia)	<b>72</b>
<b>Figure 33</b> – Relevés du trait de côte entre 1950 et 2017 le long du littoral nord-est de l'île d'Oléron et position des profils (Artelia)	<b>73</b>
<b>Figure 34</b> – Estimation du transit littoral le long du littoral nord-est de l'île d'Oléron sur deux périodes (Artelia)	<b>74</b>
<b>Figure 35</b> – Positions du rivage à l'est du port Pothuau (Var): Modèle vs Mesure (Artelia)	<b>75</b>
<b>Figure 36</b> – Exemple d'application du modèle parabolique de Hsu et Evans sur les conches de la commune de Meschers-sur-Gironde (Artelia, 2022)	<b>76</b>
<b>Figure 38</b> – Exemple de l'érosion d'un profil de plage simulé par SBEACH32 (Artelia, 1998)	<b>79</b>
<b>Figure 39</b> – Schématisation du déroulement des modélisations hydrosédimentaires numériques 3D (Cerema, 2018)	<b>80</b>
<b>Figure 40</b> – Exemple de rendu du modèle numérique de terrain bathymétrique de façade Atlantique (Shom, 2015)	<b>83</b>
<b>Figure 41</b> – Exemple de MNT topo-bathymétriques côtiers : gauche : détroit du Pas-de-Calais et droite : pertuis charentais (Shom)	<b>84</b>
<b>Figure 42</b> – Exemple de levé multifaisceaux mettant en évidence la présence de dunes sur un banc de sable sur le site de La Horaine (isobathe tous les 0,5 m ; IXBlue, 2017)	<b>85</b>
<b>Figure 44</b> – Mesure par imagerie acoustique de sillons d'extraction sur le site de Dieppe (GIS SIEGMA, 2012)	<b>86</b>
<b>Figure 45</b> – Sillons d'extraction récents (moins d'un an) en Baie de Seine. Topographie transversale du fond avant (courbe verte) et après extraction (courbe rouge) ; exagération de l'échelle verticale x 25 (GIS SIEGMA, 2012)	<b>86</b>
<b>Figure 43</b> – Classification des figures sédimentaires en fonction de la taille des grains et de la puissance d'écoulement sur le fond (Chamley, 1987)	<b>86</b>
<b>Figure 46</b> – Caractérisation des fonds sur le site de Cairnstrath (Creocean, 2015)	<b>87</b>
<b>Figure 47</b> – Carte de synthèse de la caractérisation des fonds sur le site de Cairnstrath (Creocean, 2015)	<b>87</b>
<b>Figure 48</b> – Détails sur la caractérisation des fonds sur le site de Cairnstrath (Creocean, 2015)	<b>88</b>
<b>Figure 49</b> – Exemples d'analyses granulométriques sur le site de Cairnstrath (Creocean, 2015)	<b>88</b>

<b>Figure 50</b> – MNT sur une maille de 1 m issu du levé bathymétrique de 2019 réalisé à l'aide d'un sondeur multi-faisceaux des concessions du Chassiron (Creocean, 2019)	89
<b>Figure 51</b> – MNT lissé du levé 2019 des concessions du Chassiron pour la modélisation sur une maille de 80m (Artelia, 2020)	90
<b>Figure 52</b> – Niveaux marins caractéristiques fournis par les RAM (document Shom)	91
<b>Figure 53</b> – Niveaux marins centennaux de pleine-mer (document Shom)	91
<b>Figure 54</b> – Exemple de mouillage d'un courantomètre (Créocean)	92
<b>Figure 55</b> – Exemple d'archivage de mesures d'un houlographe dans CANDHIS (Cerema, 2024)	93
<b>Figure 56</b> – Exemple de fiche de climatologie CANDHIS (Cerema, 2024)	94
<b>Figure 57</b> – Exemple de fiche de synthèse CANDHIS sur un évènement de tempête (Cerema, 2024)	95
<b>Figure 59</b> – Historique du trait de côte au Verdon-sur-mer en Gironde entre 1965 et 2019 sur orthophoto 2013 (iSea, 2020, données EPOC)	98
<b>Figure 60</b> – Suivi d'un profil à Bois-plage – ile de Ré par l'université de La Rochelle (Chaumillon et Bigot, 2016)	99
<b>Figure 61</b> – Localisation du gisement des Duons (bleu : ancien périmètre ; rouge : nouveau périmètre, (Asterie, 2007)	101
<b>Figure 62</b> – Typologie des côtes en baie de Seine (Cerema, 2021)	102
<b>Figure 63</b> – Carte de positionnement des concessions du Chassiron sur la carte des cellules hydrosédimentaires avec indication de la rose des houles (d'après Cerema, 2021)	103
<b>Figure 64</b> – Les différents modes de transport sédimentaire en baie de Seine (Cerema, 2021)	104
<b>Figure 65</b> – Quantification du transit littoral le long des côtes charentaises en m <sup>3</sup> /an (Cerema, 2021)	104
<b>Figure 66</b> – Organisation des modélisations à mettre en place.	105
<b>Figure 67</b> – Arbre de décision concernant la mise en œuvre d'une modélisation du trait de côte	107
<b>Figure 68</b> – Comparaison graphique des résultats validés d'un modèle de propagation des états de mer en baie de Seine à la bouée Le Havre-Metzinger (Artelia, 2015b)	111
<b>Figure 69</b> – Point de mesure SHOM sur le site des Duons et comparaison graphique avec la modélisation courantologique validée (Safège, 2009)	112
<b>Figure 70</b> – Comparaison graphique d'une modélisation courantologique validée sur le site des Chassiron (Artelia)	113
<b>Figure 71</b> – Diagrammes de dispersion associés à la modélisation courantologique sur le site des Chassiron (Artelia)	114
<b>Figure 72</b> – Comparaison d'une carte de figures sédimentaires avec la direction modélisée du transport sédimentaire côtier sur le site du Pilier (Artelia, 2011)	115
<b>Figure 73</b> – Positionnement des profils de calcul du transit littoral le long de la côte médocaine avec indication de la ligne bathymétrique -4mZH en trait noir (Artelia, 2022).	116
<b>Figure 74</b> – Comparaison graphique des résultats validés d'un modèle de transport sédimentaire côtier à l'embouchure de la Gironde (Artelia, 2022)2022).	117
<b>Figure 75</b> – Bathymétries 2009 (gauche) et 2019 (droite) de la concession du Platin de Grave (I-Sea, 2020)	118
<b>Figure 76</b> – Platin de Grave : Carte différentielle 2009-2019 a) Différentiel bathymétrique; b) Localisation des zones d'extractions; c) Épaisseur des extractions cumulées ; d) Différentiel bathymétrique, sans extraction (I-Sea,2020)	119
<b>Figure 77</b> – Platin de Grave : Évolution bathymétrique entre 2015 et 2020 : gauche : mesurée et droite : calculée (Artelia, 2022)	120
<b>Figure 78</b> – Points de calcul du transit littoral à Noirmoutier (Artelia, 2015)	121
<b>Figure 79</b> – Exemple de bathymétrie pour la situation de référence (gauche) et la situation de projet (droite) (Artelia, 2020)	124
<b>Figure 80</b> – Prise en compte de différents projets pour l'estimation de l'effet cumulé du projet de concession GMH au large du Havre (Artelia, 2015b)	124

<b>Figure 81</b> – <i>Rose des houles à la bouée Le Havre-Metzinger (Cerema, 2024)</i>	<b>125</b>
<b>Figure 82</b> – <i>Flux d'énergie moyen de l'agitation à Cairnstrath (Artelia, 2015a)</i>	<b>126</b>
<b>Figure 83</b> – <i>Exemple d'effet de la concession du Payré sur la propagation d'une houle décennale (Creocean, 2007)</i>	<b>127</b>
<b>Figure 84</b> – <i>Exemple d'enveloppe des effets sur l'agitation pour les concessions de Chassiron (Artelia, 2020)</i>	<b>128</b>
<b>Figure 85</b> – <i>Exemple de placement de points de sortie d'agitation le long du littoral (Artelia, 2015b)</i>	<b>128</b>
<b>Figure 86</b> – <i>Exemple de comparaison de l'agitation en deux points du littoral pour une année représentative (Artelia, 2015b)</i>	<b>129</b>
<b>Figure 87</b> – <i>Exemple de tableaux de comparaison de l'agitation (Artelia, 2020)</i>	<b>130</b>
<b>Figure 88</b> – <i>Implantation de points de sortie d'agitation pour le calcul du transit littoral (Artelia,2020)</i>	<b>132</b>
<b>Figure 89</b> – <i>Visualisation du transit littoral et des évolutions du trait de côte associées (Artelia,2020)</i>	<b>133</b>
<b>Figure 90</b> – <i>Exemple de lignes de courant matérialisant la direction et le sens du le transport solide résiduel annuel et position des sections de calcul des flux.(Artelia, 2020)</i>	<b>134</b>



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE,  
DE LA BIODIVERSITÉ,  
DE LA FORÊT, DE LA MER  
ET DE LA PÊCHE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**DOCUMENT PILOTÉ PAR  
LA DIRECTION GÉNÉRALE DE L'AMÉNAGEMENT,  
DU LOGEMENT ET DE LA NATURE (DGALN) ET  
RÉALISÉ PAR LE BUREAU D'ÉTUDES ARTELIA**



Artelia est un groupe international multidisciplinaire de conseil, d'ingénierie et de management de projet dans les secteurs de la mobilité, de l'eau, de l'énergie, du bâtiment et de l'industrie. Fort de 9 700 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](http://www.arteliagroup.com)



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](http://www.unpg.fr)



Service géologique national, le BRGM est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol dans une perspective de développement durable. Partenaire de nombreux acteurs publics et privés, son action est orientée vers la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques et la coopération internationale.

**Pour en savoir plus :** [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



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](http://www.cerema.fr)



L'Ifremer est l'institut français de recherche entièrement dédié à la connaissance de l'océan. Par ses recherches scientifiques et technologiques, ses innovations et ses expertises, l'Ifremer contribue à protéger et restaurer l'océan, à gérer durablement les ressources et milieux marins, et à partager des données et informations marines. L'Ifremer s'engage dans des initiatives et programmes scientifiques de portée nationale, européenne et internationale.

**Pour en savoir plus :** [www.ifremer.fr](http://www.ifremer.fr)



300 ans d'hydrographie

Le Shom 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.shom.fr](http://www.shom.fr)