



MINISTÈRE DES ARMÉES

Description sommaire de l'état de la connaissance et des caractéristiques physiques de la façade maritime Manche Est – Mer du Nord

Référence – Lot 7

Auteurs : Marie Laurent, Julie Bignon, Méril Mérindol, Loïc Moutoussamy, Edith Leborgne, Yann Le Faou, Thierry Garlan, Laure Avisse, Thierry Philippe, Régis Noël, Stéphanie Desmare, Thibault Delahaye, Claire Fraboul, Laurent Leballeur

Référence : Convention Shom/MTES [DGEC], SHOM n°79/2019, relative à la réalisation des études de reconnaissance environnementale de site en vue des appels d'offres pour l'implantation d'éoliennes en mer au large des côtes françaises.

TABLE DES MATIERES

Introduction	3
1. Terminologies	3
2. Description de la macrozone	5
3. Bathymétrie	7
4. Sédimentologie	8
5. Hydrologie	12
6. Courantologie	14
7. Marée et niveaux extrêmes.....	17
8. États de mer	20
Annexes	22
1. Glossaire	22
2. Cartes houle.....	24

Introduction

En vue de préparer le débat public sur les projets d'Énergies Marines Renouvelables (EMR) de la façade Manche Est – Mer du Nord, la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) relevant du Ministère de la Transition Ecologique (MTE) a chargé le Shom d'évaluer la connaissance actuelle des caractéristiques physiques des différentes façades maritimes du territoire français. En effet, à la suite des modifications législatives issues de la loi ESSOC du 10 août 2018, le public est amené à se prononcer sur les projets éoliens en mer en amont du lancement des procédures de mise en concurrence. La synthèse des connaissances des caractéristiques physiques de la zone d'étude vise à fournir des informations essentielles pour éclairer le grand public et l'ensemble des acteurs impliqués au débat public. Ces données aideront à mieux comprendre les paramètres qui pourraient influencer la sélection de zones privilégiées pour les projets éoliens sur les façades maritimes.

Dans une première partie, les terminologies utilisées dans la présente étude seront présentées (Section 1). Une deuxième partie présentera la façade Manche Est – Mer du Nord dans sa globalité (Section 2). Les sections suivantes présenteront une synthèse des connaissances actuelles des principales caractéristiques physiques de la zone d'étude. Ces caractéristiques comprennent la bathymétrie (Section 3), la sédimentologie (Section 4), l'hydrologie marine (Section 5), les courants (Section 6), la marée et les niveaux extrêmes (Section 7), et la houle et vagues (Section 8).

1. Terminologies

1.1 *La bathymétrie*

La bathymétrie consiste à évaluer les profondeurs et les reliefs du fond marin afin de déterminer la topographie des fonds océaniques. Les mesures bathymétriques modernes sont réalisées au moyen d'instruments acoustiques appelés sondeurs bathymétriques, pouvant être de type mono-faisceau ou multifaisceaux. Toutefois, dans de nombreuses régions à travers le monde, la bathymétrie est principalement basée sur d'anciennes mesures effectuées à l'aide d'un plomb de sonde.

1.2 *La sédimentologie*

En milieu marin, la sédimentologie englobe l'étude des sédiments marins, qui sont formés par des particules solides transportées et déposées par des processus marins tels que les courants, les vagues et les marées. Ces sédiments, composés d'un mélange de particules anciennes et récentes, biologiques et lithiques, terrestres, fluviatiles et marines, s'accumulent au-dessus de substrats rocheux plus anciens constituant les plateformes continentales. Les couvertures sédimentaires varient en fonction de leurs caractéristiques sédimentologiques (i.e., granularité, nature du sédiment), de la quantité de matériel disponible, de la profondeur, de la géomorphologie du substrat rocheux et des variations eustatiques au cours des temps géologiques qui peuvent faire varier l'épaisseur sédimentaire de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Il en résulte des structures sédimentaires de natures variées tels que des paléo-vallées (lits d'anciennes rivières partiellement ou totalement remblayées par des sédiments), des dunes ou des bancs sableux qui créent des reliefs. En fonction de leur orientation et de leur vitesse, les courants marins, qu'ils soient dus aux marées ou à la houle, peuvent mettre en mouvement ces structures sédimentaires.

L'objectif principal d'une étude sédimentologique d'une zone est de déterminer la nature des fonds marins, les processus en jeu dans la dynamique sédimentaire ainsi que l'épaisseur de sédiments concernés.

1.3 *La marée*

Les marées représentent les variations du niveau de la mer dues à l'action gravitationnelle des astres, en particulier la lune et le soleil. L'objectif principal de l'étude des marées est de comprendre la manière dont les océans réagissent à ces forces gravitationnelles afin de prédire avec précision les variations du niveau de la mer sur des échelles de temps allant de quelques jours à plusieurs années.

1.4 Les courants marins

Les courants marins correspondent au déplacement continu d'eau dans une direction spécifique en domaine marin. Deux origines distinctes peuvent être à leur origine :

- Les courants de marée, également connus sous le nom de courants gravitationnels, qui sont engendrés par l'attraction newtonienne qui génère les marées.
- Les courants radiationnels, quant à eux, trouvent leur origine dans le rayonnement solaire, responsable de phénomènes tels que les vents, les saisons, les perturbations météorologiques, ainsi que les variations spatiales de densité des océans qui peuvent entraîner des mouvements au sein des masses d'eau.

1.5 L'hydrologie marine

L'hydrologie marine comprend l'étude des propriétés physiques et chimiques de l'eau de mer, telle que la densité qui est étroitement liée à la salinité et à la température. La température, exprimée en degrés Celsius (°C) joue un rôle essentiel dans la variabilité des cycles biologiques, ce qui en fait une mesure cruciale pour la caractérisation des masses d'eau. De plus, elle permet le calcul d'autres paramètres tels que la salinité, la densité, la vitesse des ondes acoustiques nécessaires à la correction des mesures acoustiques de bathymétrie et la concentration en oxygène dissous. La salinité, exprimée en psu (*practical salinity units*) représente la concentration totale en sels dissous. Sa valeur moyenne est d'environ 35 psu dans les océans contre 0 psu dans l'eau douce. Par son influence sur la densité de l'eau de mer, la mesure de la salinité permet de mieux comprendre la circulation océanique (cf. circulation thermohaline), d'identifier les différentes masses et leurs origines, et de suivre les processus de mélange qui s'y produisent.

1.6 La houle, les vagues et l'état de mer

La **mer de vent** désigne les vagues qui se forment localement en réponse à l'effet du vent. La hauteur des vagues augmente en fonction de l'intensité et de la durée du vent. En revanche, la houle correspond à des vagues générées à distance et qui se propagent. La formation de la houle est influencée par l'étendue de la zone maritime où le vent exerce son action, ce que l'on appelle le *fetch*.

L'**état de mer** résulte de divers facteurs, notamment l'influence du vent, la bathymétrie qui peut altérer la distribution des hauteurs des vagues dans les zones peu profondes, la géomorphologie côtière ainsi que les courants générés par le vent et les marées. Généralement, il comprend les vagues dues à la mer de vent et celles liées à la houle. Les paramètres pour décrire l'état de mer sont les suivants :

- La **hauteur significative**, notée H_s et exprimée en mètres, représente la hauteur moyenne du tiers le plus élevé de toutes les vagues (mer du vent et houle) enregistrées sur une période de temps donnée.
- La **période pic**, notée T_p et exprimée en secondes, correspond à la période des pics d'énergie des vagues.

Les **roses de vagues** fournissent une représentation de la distribution des hauteurs significatives en fonction de la direction de provenance des vagues. Les **corrélogrammes**, quant à eux, fournissent une représentation graphique mettant en évidence la corrélation entre la hauteur significative et la période des vagues pour l'état de mer total, la mer de vent ou la houle.

Sources

[1] Instructions nautiques – D21 – France (Côte Sud) de la frontière espagnole au cap de l'Aigle : www.diffusion.shom.fr

[2] Projet HOMONIM – financement MTE, Shom et Météo-France

[3] Projet national Litto3D Shom-IGN pour la constitution du Référentiel Géographique du Littoral (RGL)

[4] Projet MARC (Ifremer) « Modélisation et Analyse pour la Recherche Côtière »

2. Description de la macrozone

La façade maritime Manche Est – Mer du Nord comprend 1022 km de côtes, de la frontière belge au golfe normand-breton, englobant ainsi la portion de la Zone Économique Exclusive (ZEE) française qui s'étire du Nord à Dunkerque jusqu'au Sud à la baie du Mont-Saint Michel (**Figure 1**). Cette zone côtière s'étend le long des régions Hauts-de-France et Normandie, englobant 7 départements métropolitains et comprenant 252 communes¹. La superficie totale de la façade maritime Manche Est – Mer du Nord est d'environ 70 000 000 km².

Les projets éoliens dans cette façade sont les suivants :

- Courseulles-sur-Mer (450 MW) ;
- Fécamp (500 MW) ;
- Dieppe – Le Tréport (500 MW) ;
- Dunkerque (600 MW) ;
- Centre Manche 1 (1 GW) ;
- Centre Manche 2 (1,5 GW).

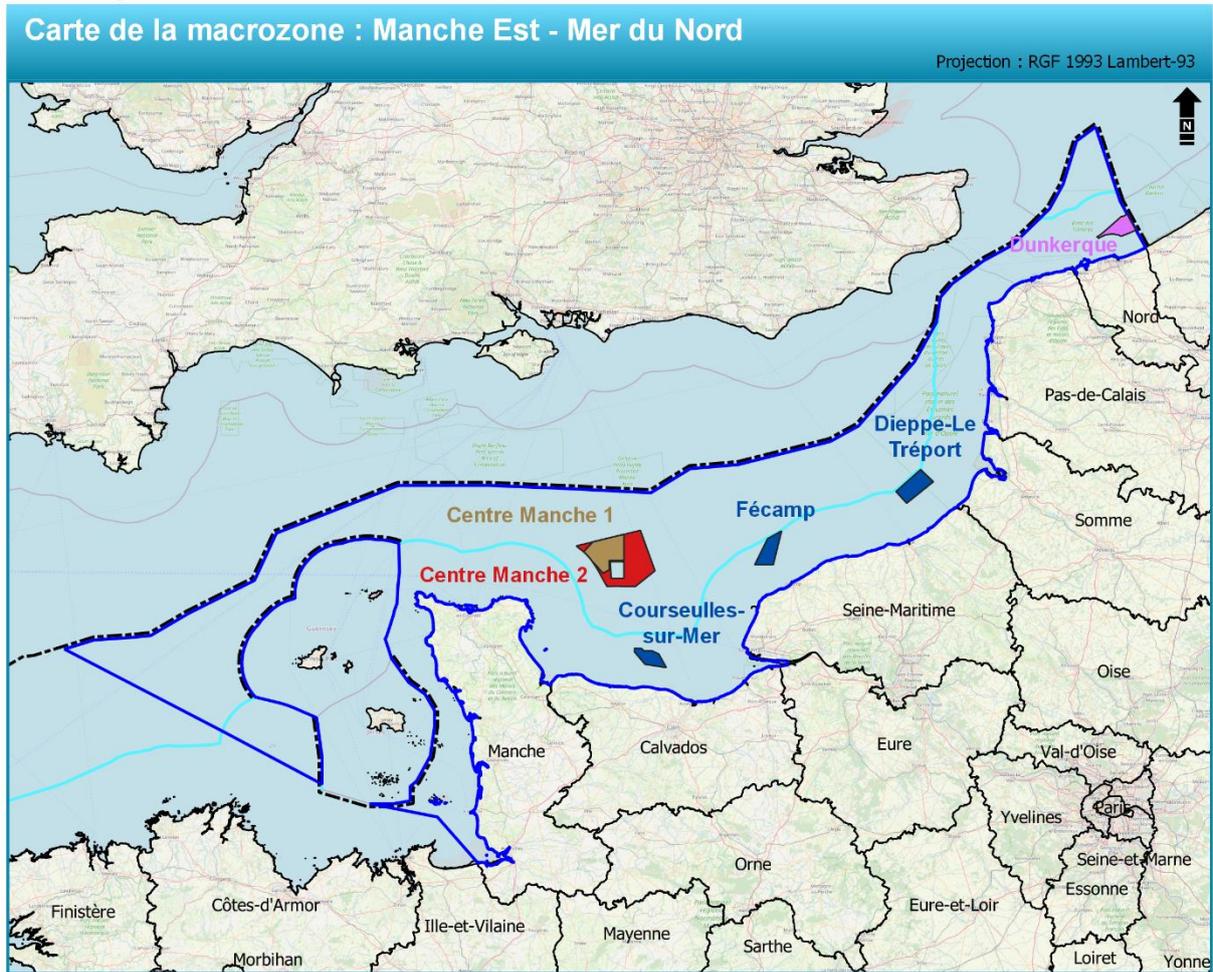
Zone exigüe et ventée, aux forts courants et aux eaux peu profondes, la façade accueille le quart du commerce mondial et les deux tiers du trafic portuaire français¹ notamment grâce à l'attractivité de ses trois grands ports maritimes : Dunkerque, Le Havre et Rouen. Elle présente la plus forte concentration de navires de pêche français¹ et européens et constitue le second bassin conchylicole européen¹. Cette façade abrite plus de la moitié des projets identifiés d'énergies marines renouvelables en France. 30 % de sa zone maritime est couverte par des aires marines protégées¹ comptant plusieurs sites emblématiques comme les deux caps, la Baie de Somme, les plages du débarquement et la Baie du Mont-Saint-Michel. Elle fournit près de 20 % de la production nationale de granulats marins¹. Enfin, la façade est le lieu de bases navales et aéronavales ainsi que de plusieurs sites industriels de défense¹.

Sources

[1] www.eoliennesenmer.fr/facades-maritimes-en-france/facade-manche-mer-du-nord

Débat public éolien en mer 2023

Carte de la macrozone : Manche Est - Mer du Nord



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)

- Eolien posé AO1 et AO2
- Eolien posé AO3
- Eolien posé AO4
- Eolien posé AO8



Sources

MTE : Limites EMR
 Shom : Limites maritimes
 Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)

Réalisation : Shom - Septembre 2023

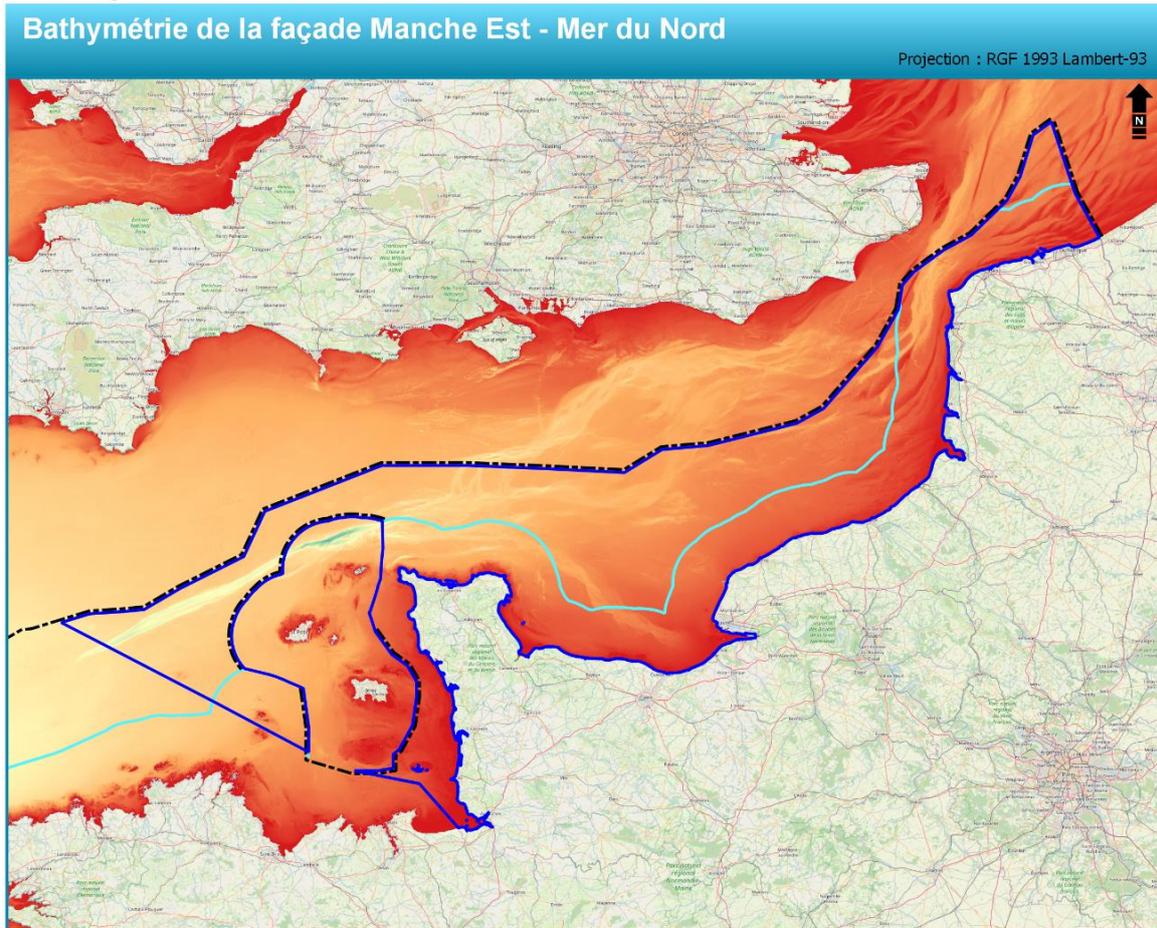
Figure 1. Description de la macrozone de la façade Manche Est – Mer du Nord (Shom, 2023).

3. Bathymétrie

La bathymétrie de la Manche présente une topographie sous-marine diversifiée et complexe. Les profondeurs varient entre 0 et ~200 m. Les paléo-vallées sont des témoins de l'histoire géologique de la région, marquée par des cycles de glaciations et de périodes interglaciaires ayant engendré des variations du niveau de la mer au fil des millénaires. Les paléo-vallées forment des dépressions sous-marines orientées du nord-est vers le sud-ouest (**Figure 2**). En plus des dépressions, on observe également la présence de bancs et de dunes sous-marines qui se traduisent par des reliefs irréguliers (**Figure 2**). Elles résultent de la dynamique complexe des courants marins et de la sédimentation, contribuant ainsi à la morphologie sous-marine en constante évolution de la Manche.

Débat public éolien en mer 2023

Bathymétrie de la façade Manche Est - Mer du Nord



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)

0 25 50 75 km 0 15 30 45 NM

Profondeur par rapport aux plus basses mers astronomiques (m)

- 200
- 150
- 100
- 50
- 0

Sources

MTE : Limites EMR
 Shom : Limites maritimes
 EMODnet : MNT bathymétrie
 Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)

Réalisation : Shom - Septembre 2023

Figure 2. Carte bathymétrique de la façade Manche Est – Mer du Nord (Shom, 2023).

4. Sédimentologie

4.1 Nature des fonds

La synthèse des données préexistantes sur la nature des fonds marins et les prélèvements sédimentaires a été réalisée pour la façade Manche Est – Mer du Nord. Diverses cartes ont été élaborées en utilisant des données historiques antérieures à 1980, ainsi que des données plus récentes issues de cartes produites entre 1980 et 2012, notamment celles du chantier EMR des parcs éoliens offshore de Fécamp (2011) et du Tréport (2012). La compilation de ces données provenant de différents organismes, a permis au Shom de réaliser une carte de nature des fonds en 2021 et présentée en **Figure 3**. Les levés récents ont permis d'affiner cette cartographie et ont validé les tendances sédimentaires majeures qui avaient été observées sur les cartes antérieures.

Sur la carte de nature des fonds réalisée par le Shom en 2021 et présentée en **Figure 3**, les côtes françaises de la Manche sont très détaillées avec une cartographie des dunes réactualisées. Les fonds marins dans la zone d'étude présentent une variabilité de compositions, allant des vases aux cailloutis. Les sédiments les plus grossiers sont d'origine glaciaire¹. Leur granularité s'explique par les forts courants de marée du centre de la Manche qui ont lessivé les particules fines¹. Au nord, des étendues sableuses sont marquées de nombreux bancs étendus tout au long des côtes des Hauts-de-France. A l'exception des côtes rocheuses au niveau du Pas de Calais. Le littoral de Boulogne-sur-Mer présente un gradient de granularité, allant du sable fin au sable, puis aux graviers et enfin aux cailloutis, suivant une progression croissante en se déplaçant du nord au sud. Du Calvados jusqu'au Mont-Saint-Michel, le littoral est ponctué de formations rocheuses, en particulier dans la partie occidentale de la zone d'étude. Les côtes du Cotentin sont similaires avec la présence de roches, de sédiments grossiers hétérogènes et de la vase aux embouchures des cours d'eau. Des champs de dunes composées de sables, graviers et cailloutis y sont répertoriés. La Baie de Seine est quant à elle caractérisée par des sédiments plus fins avec une prédominance de fonds vaseux et des variations locales de sables vaseux et sables. Contrairement à ces zones côtières, les zones maritimes plus au large demeurent moins explorées, ne permettant pas une cartographie détaillée de la nature des fonds. Cependant, il est à noter des fonds de cailloutis dans le centre de la Manche, dus aux forts courants de marée au nord de Cherbourg, avec des gradients de granularité décroissants vers l'est jusqu'à la Baie de Seine et vers l'ouest jusqu'au Mont-Saint-Michel. La présence de plusieurs champs de dunes et de bancs de sable constitués de sédiments grossiers s'observe de part et d'autre du département de la Manche dans les secteurs de décroissance des courants.

En résumé, la zone d'étude est constituée de roches affleurantes sur le littoral et de sédiments grossiers qui s'étendent des côtes jusqu'au large. La présence de vases et sables vaseux est limitée aux zones protégées à plus faible hydrodynamisme.

L'une des particularités de la Manche réside dans la présence de sédiments biogènes composés de plus de 50 % de coquilles, inhabituels en domaine tempéré. Ces sédiments, proviennent de l'accumulations séculaires de coquilles dans un contexte actuel de faibles apports sédimentaires². Les variations locales des faciès sédimentaires et la mobilité des structures sédimentaires sont dues à l'interaction des courants actuels qui mélangent des débris biogéniques avec des sédiments glaciaires. Les débris coquilliers peuvent agir comme des éléments de stabilisation des sédiments : leur présence est associée à des sédiments plus grossiers comparés aux gradients généraux. Ainsi, les dynamiques sédimentaires (envasement et mobilité des dunes) dues aux variabilités saisonnières, pluriannuelles ou séculaires ne peuvent être étudiées qu'à l'échelle locale³.

Par conséquent, il est indispensable de réaliser une étude de nature des fonds à une échelle plus fine afin d'étudier les variations locales des fonds marins et appréhender leurs évolutions futures. Cela nécessite le plus souvent d'acquérir de nouvelles données sédimentaires qui permettront de compléter la connaissance de la zone d'étude¹.

Sources

[1] Garlan T., Marchès E., 2012. Caractéristiques et état écologique – manche Mer du Nord

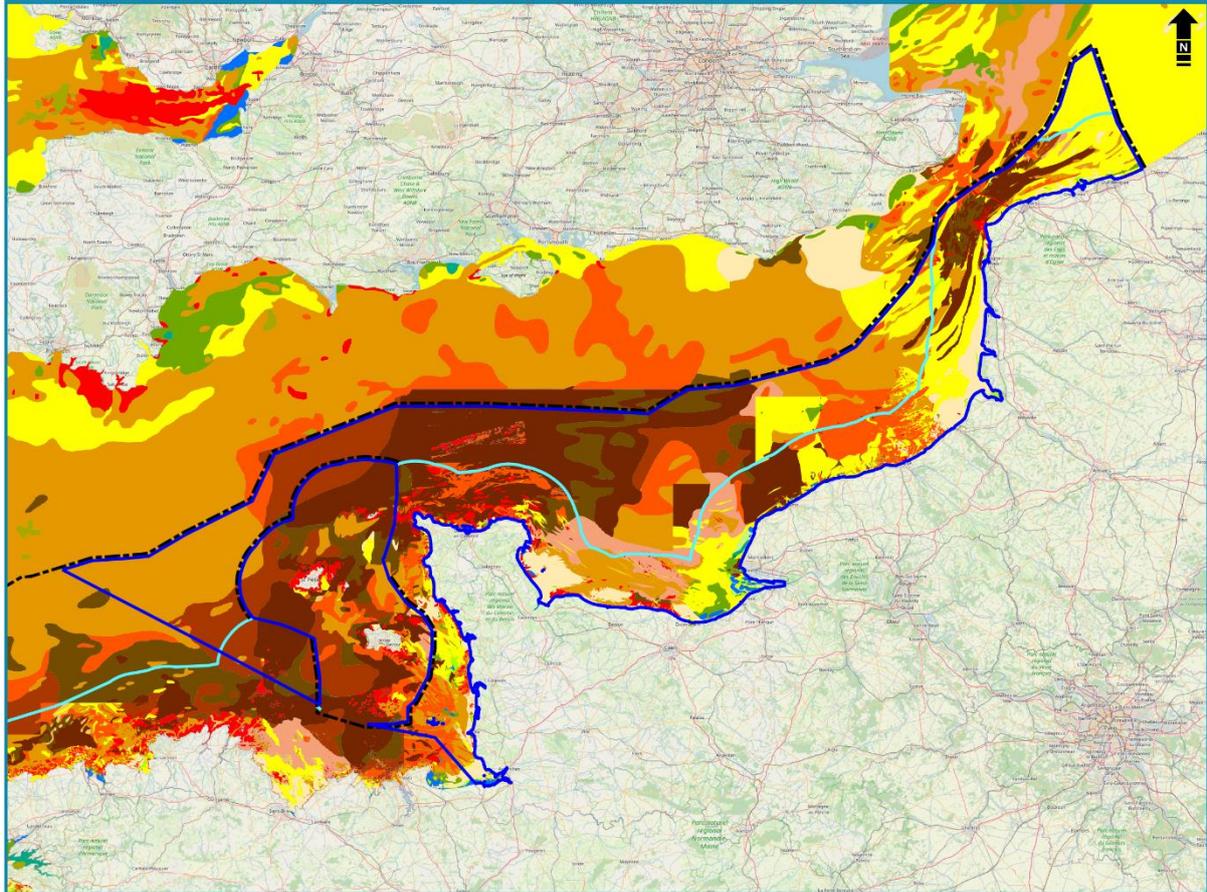
[2] Larsonneur C., Bouysson P. et Auffret J.P., 1982. The surficial sediments of the English Channel and its western approaches. *Sedimentology*, 29 : 851-864.

[3] Garlan T., 2004. Apports de la modélisation dans l'étude de la sédimentation marine récente. Mémoire d'HDR, Université des Sciences et Techniques de Lille : 155 p.

Débat public éolien en mer 2023

Nature des fonds de la façade Manche Est - Mer du Nord

Projection : RGF 1993 Lambert-93



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)

Sources

MTE : Limites EMR
 Shom : Limites maritimes, cartographie des fonds marins
 Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)

Faciès sédimentaires

 Roche	 Gravieres et sables	 Sables et silts	 Vases et graviers
 Cailloutis	 Gravieres et vases	 Sables fins	 Vases et sables
 Cailloutis et graviers	 Sables	 Sables fins et cailloutis	 Vases et sables fins
 Cailloutis et sables	 Sables et cailloutis	 Sables fins et vases	 Silts
 Cailloutis et vases	 Sables et graviers	 Sables fins et silts	 Silts argileux
 Gravieres	 Sables, graviers et vases	 Vases	 Argiles silteuses
 Gravieres et cailloutis	 Sables et vases	 Vases et cailloutis	 Argiles

Réalisation : Shom - Septembre 2023

Figure 3. Carte de nature des fonds de la façade Manche Est – Mer du Nord (Shom, 2023).

4.2 Épaisseur de sédiments de la façade Manche Est – Mer du Nord

La façade Manche Est – Mer du Nord a fait l'objet de travaux scientifiques relatifs à la cartographie du socle géologique, à la répartition des paléo-vallées et des bancs sableux. L'inventaire des ressources en sédiments marins réalisé par l'Ifremer^{1,2} a révélé que la variabilité de l'épaisseur des sédiments dans la Manche Est est principalement due à la présence de bancs et de dunes de sables graveleux, ainsi qu'à l'existence de paléo-vallées qui créent des dépressions³. Ces paléo-vallées forment un vaste réseau qui s'étend sur la majeure partie de la zone d'étude. Ces dépressions, créées lors des périodes glaciaires lorsque le niveau marin était plus bas qu'aujourd'hui, ont fait l'objet d'études scientifiques pour comprendre leur formation, leur évolution au cours des périodes glaciaires et interglaciaires, ainsi qu'à les cartographier^{4, 5, 6, 7, 8}. Au niveau de ce paléo-réseau fluvial, les épaisseurs sédimentaires varient entre 0 à 50 m, les valeurs les plus élevées étant concentrées au sein des dépressions comblées.

Au nord de la façade Manche Est -Mer du Nord, de Dieppe jusqu'aux côtes du Danemark, des dunes et bancs sont présents et peuvent atteindre une quinzaine de mètres d'épaisseur. Plus au sud, ces mêmes structures sédimentaires sont cartographiées à l'est et à l'ouest de la Baie de Seine, proximité des côtes du sud de la Normandie et au large de l'Île de Guernesey.

En 2017, une première carte des épaisseurs sédimentaires a été élaborée à partir de levés sismiques (**Figure 4**). Cette carte révèle une variabilité importante des épaisseurs sédimentaires dans la partie septentrionale de la zone d'étude, avec des valeurs allant de 5 à 30 m. Dans le cadre des travaux EMR en 2021, la carte des épaisseurs sédimentaires a été complétée dans une zone précédemment non-explorée (**Figure 4**), mettant en évidence des épaisseurs sédimentaires plus faibles (0 à 5 m), atteignant par endroit 15 m.

La carte présentée en **Figure 4** a été obtenue par la combinaison de cartes d'épaisseur sédimentaire aux échelles différentes, allant de 1/10 000 à 1 /250 000. Malgré la grande quantité de données géophysiques et sédimentologiques couvrant une grande portion de la zone d'étude, la connaissance des épaisseurs sédimentaires demeure parcellaire, ce qui justifie la réalisation de levés géophysiques supplémentaires en vue d'éclairer les choix des industriels en vue de l'implantation d'éoliennes offshore.

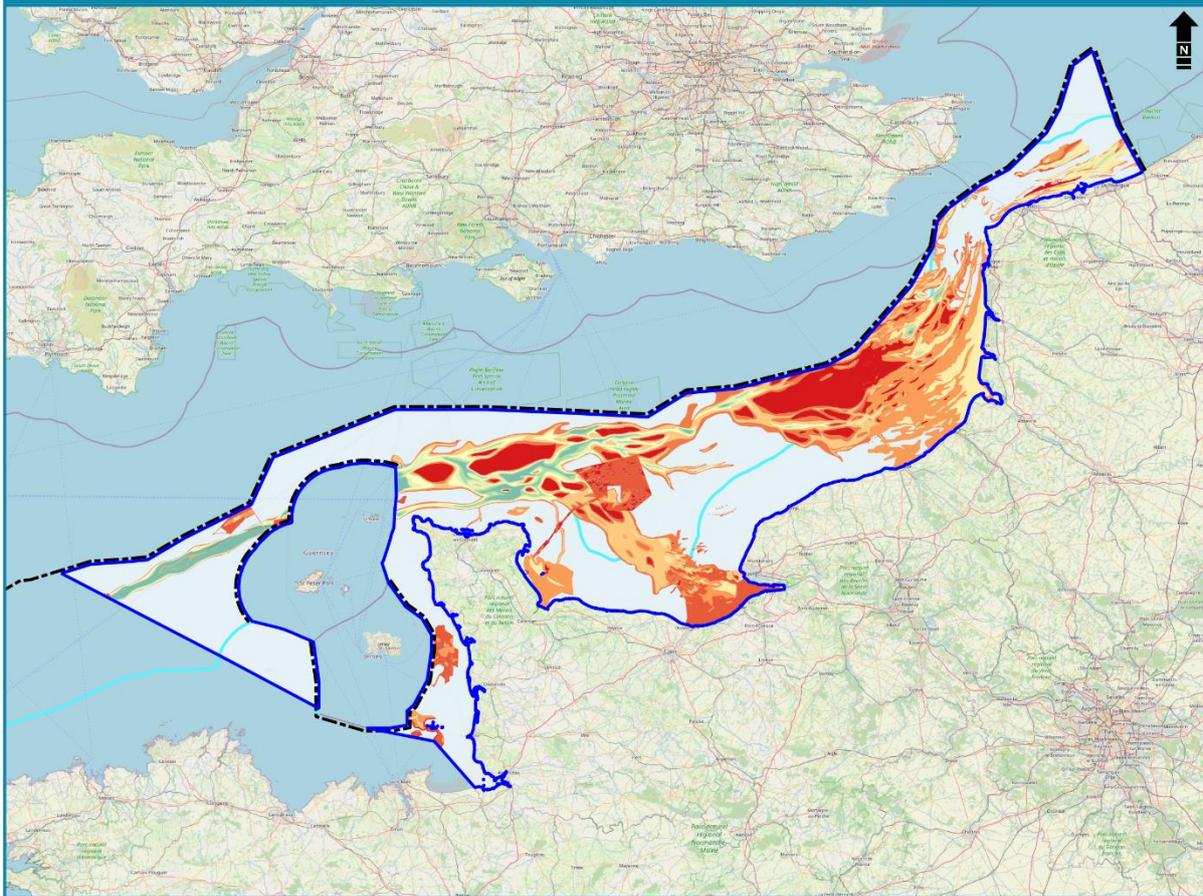
Sources

- [1] Inventaire des ressources en matériaux marins - Façade Manche-Est et Loire-Gironde. Rapport IFREMER. 2006
- [2] Inventaire des ressources en matériaux marins - Façade Bretagne et Sud-Gascogne. Rapport IFREMER. 2012
- [3] Produit numérique "Granulats marins" Ifremer 2013
- [4] Larssonneur, C., Bouysse, P., & AUFFRET, J. P. (1982). The superficial sediments of the English Channel and its western approaches. *Sedimentology*, 29(6), 851-864.
- [5] Quesney, A. (1983). Manche occidentale et Mer Celtique. Etude des paléovallées, des fosses et des formations superficielles (Doctoral dissertation, Université de Caen).
- [6] Lericolais, G., Guennoc, P., Auffret, J. P., Bourillet, J. F., & Berné, S. (1996). Detailed survey of the western end of the Hurd Deep (English Channel): new facts for a tectonic origin. *Geological Society, London, Special Publications*, 117(1), 203-215.
- [7] Lericolais, G., Guennoc, P., Auffret, J. P., Bourillet, J. F., & Berné, S. (1996). Detailed survey of the western end of the Hurd Deep (English Channel): new facts for a tectonic origin. *Geological Society, London, Special Publications*, 117(1), 203-215.
- [8] Benabdellouahed, M. (2011). La Seine fluviale plio-quaternaire en baie de Seine : évolution morphologique et sédimentaire (rôle du substratum géologique et des cycles climato-eustatiques) (Doctoral dissertation, Caen).

Débat public éolien en mer 2023

Epaisseur sédimentaire de la façade Manche Est - Mer du Nord

Projection : RGF 1993 Lambert-93



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)

0 25 50 75 km 0 15 30 45 NM

Epaisseurs sédimentaires

<ul style="list-style-type: none"> 0 - 0,5 m 0,5 - 5 m 5 - 10 m 10 - 15 m 15 - 20 m 	<ul style="list-style-type: none"> 20 - 25 m 25 - 30 m 30 - 40 m 40 - 50 m 50 - 60 m
--	--

Sources

MTE : Limites EMR
 Shom : Limites maritimes, épaisseurs sédimentaires
 Ifremer : Produit numérique "Granulats marins" (2013)
 Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)

Réalisation : Shom - Septembre 2023

Figure 4. Carte des épaisseurs sédimentaires de la zone d'étude EMR (Shom, 2023).

5. Hydrologie

La connaissance de l'hydrologie marine de la région repose sur l'analyse des données de température et de salinité de l'eau de mer, de la surface jusqu'au fond marin, collectées *in situ* par des navires océanographiques. Pour cette étude, les statistiques hydrologiques mondiales du GDEM (*Generalized Digital Environmental Model*) du NAVOCEANO (*Naval Oceanographic Office - USA*), ont été sélectionnées. Ces données font partie de la base de données NSODB V7.0 (NSODB : NATO Standard Oceanographic Data Base), une base de données de l'OTAN. Ces données sont présentées sous la forme de cartes montrant les isolignes de température et/ou de salinité pour les mois de février, mai, août et novembre, qui sont considérés comme représentatifs des saisons d'hiver, de printemps, d'été et d'automne. La carte présentée en **Figure 5**, fournit un exemple des isolignes de température en surface pour le mois de février à partir des données GDEM.

Le tableau ci-dessous (**Tableau 1**) synthétise les gammes de variations de la température et salinité, observées aux immersions caractéristiques 0 et 30 m dans la zone d'étude pour les saisons d'hiver, de printemps, d'été et d'automne.

Tableau 1. Variations saisonnières de la température et de la salinité à la surface et à 30 m de profondeur.

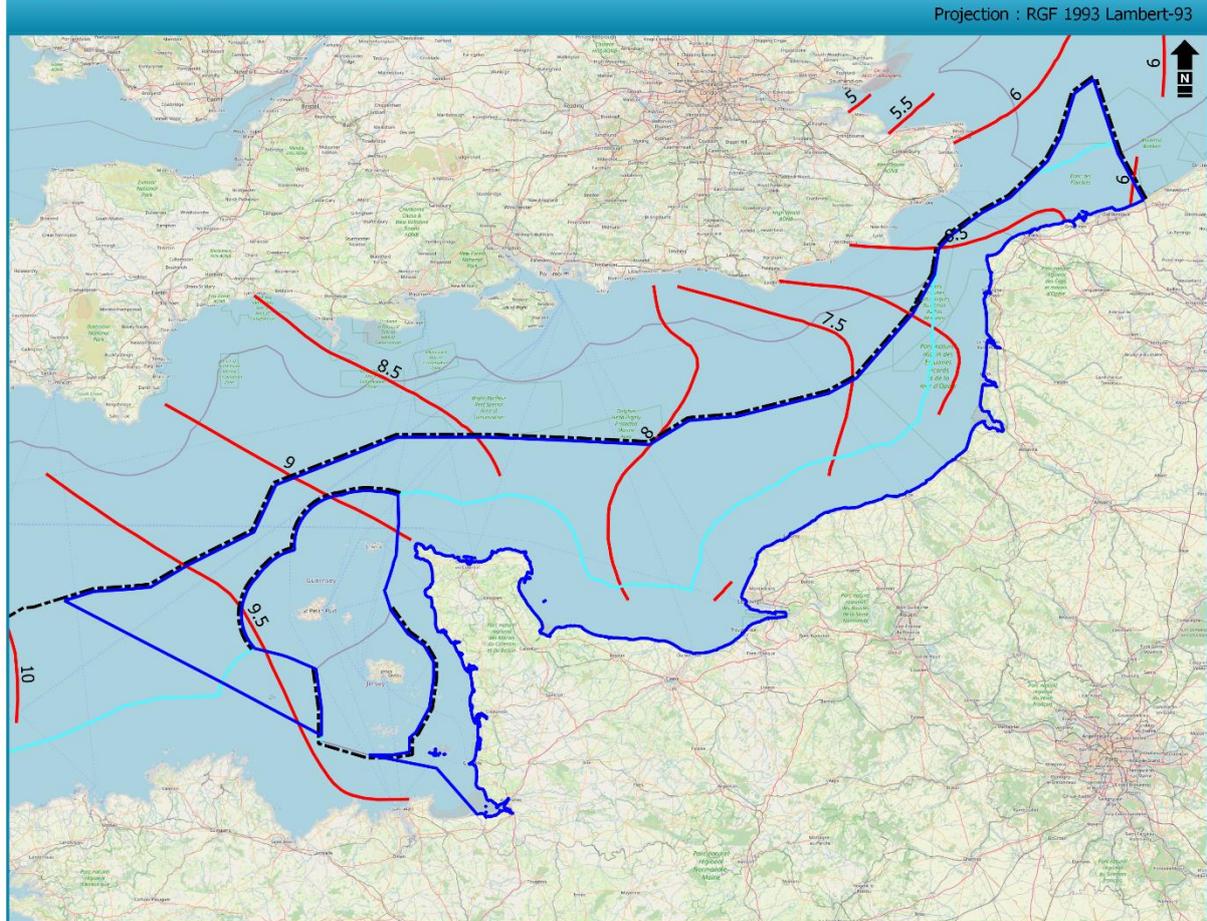
	Hiver - Février -	Printemps - Mai -	Été - Août -	Automne - Novembre -
Température de surface (°C)	6,30 - 9,52	9,49 - 11,74	15,65 - 16,39	11,40 - 13,61
Température à - 30 m (°C)	6,36 - 9,51	9,37 - 10,91	14,76 - 16,37	11,43 - 13,58
Salinité de surface (psu)	34,44 - 35,24	34,42 - 35,12	34,56 - 35,13	34,58 - 35,30
Salinité à - 30 m (psu)	34,55 - 35,25	34,46 - 35,12	34,57 - 35,11	34,60 - 35,30

De manière générale, les températures affichent des variations horizontales dans la zone d'étude, allant de 0,74 à 3,22°C, traduisant une homogénéité sur la colonne d'eau quelle que soit la saison. Toutefois, les températures atteignent leurs valeurs minimales pendant la saison hivernale, avec des niveaux minimums de 6,30 °C en surface, tandis qu'elles atteignent leurs valeurs maximales en été, avec des niveaux maximums de 16,39 °C en surface.

Les salinités suivent les mêmes tendances avec une variabilité horizontale de l'ordre de 0,54 à 0,80 psu, et sont homogènes verticalement, le long de la colonne d'eau. La salinité augmente légèrement pendant la période estivale alors qu'elle enregistre une légère diminution en hiver.

Débat public éolien en mer 2023

Carte de température de surface - Manche Est - Mer du Nord



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)
- Température de surface (°C)

Sources

- MTE : Limites EMR
- Shom : Limites maritimes, isolignes des température des surface
- Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)



Réalisation : Shom - Septembre 2023

Figure 5. Carte des isolignes de température de surface pour le mois de février issues des données GDEM (Shom, 2023).

6. Courantologie

La connaissance de la dynamique océanique peut être appréhendée en première approche par la description des courants marins et par le phénomène de la marée. Les courants de marée constituent la majeure partie des courants instantanés et une composante importante de la circulation générale. Sur le long terme, le courant résiduel de marée s'additionne à la branche locale du Gulf Stream pénétrant dans La Manche.

6.1 Origine des courants

La Manche a un régime de marée semi-diurne caractérisé par les amplitudes de marée les plus élevées et les courants les plus forts de toutes les côtes métropolitaines. Néanmoins, ces courants cycliques ont une composante permanente appelée « courant résiduel de marée » due aux frottements provoqués par la propagation de l'onde de marée, également appelée dérive de Stokes. Ce dernier, bien que plus faible que les courants instantanés, joue un rôle important à long terme puisqu'il constitue un débit permanent (31 % du flux annuel à travers le détroit du Pas-de-Calais). Son intensité est soumise aux variations des cycles de vives et de mortes eaux, sur une période de 14 jours.

La dynamique des courants de l'Atlantique Nord, notamment le Gulf Stream, génère une pente moyenne de la surface libre entre les deux extrémités de la Manche, contribuant ainsi de manière significative aux flux observés du détroit du Pas-de-Calais vers la Mer du Nord.

Les courants sont induits par la circulation à grande échelle et les vents qui peuvent présenter des variations saisonnières. Ainsi, le débit à travers le détroit du Pas-de-Calais peut osciller entre 130 000 m³.s⁻¹ en hiver, 60 000 m³.s⁻¹ au printemps/été, et 40 000 m³.s⁻¹ en automne. L'action du vent en surface est le second processus physique d'importance en Manche. En effet, il peut inverser la circulation moyenne ou modifier les structures tourbillonnaires induites par la marée.

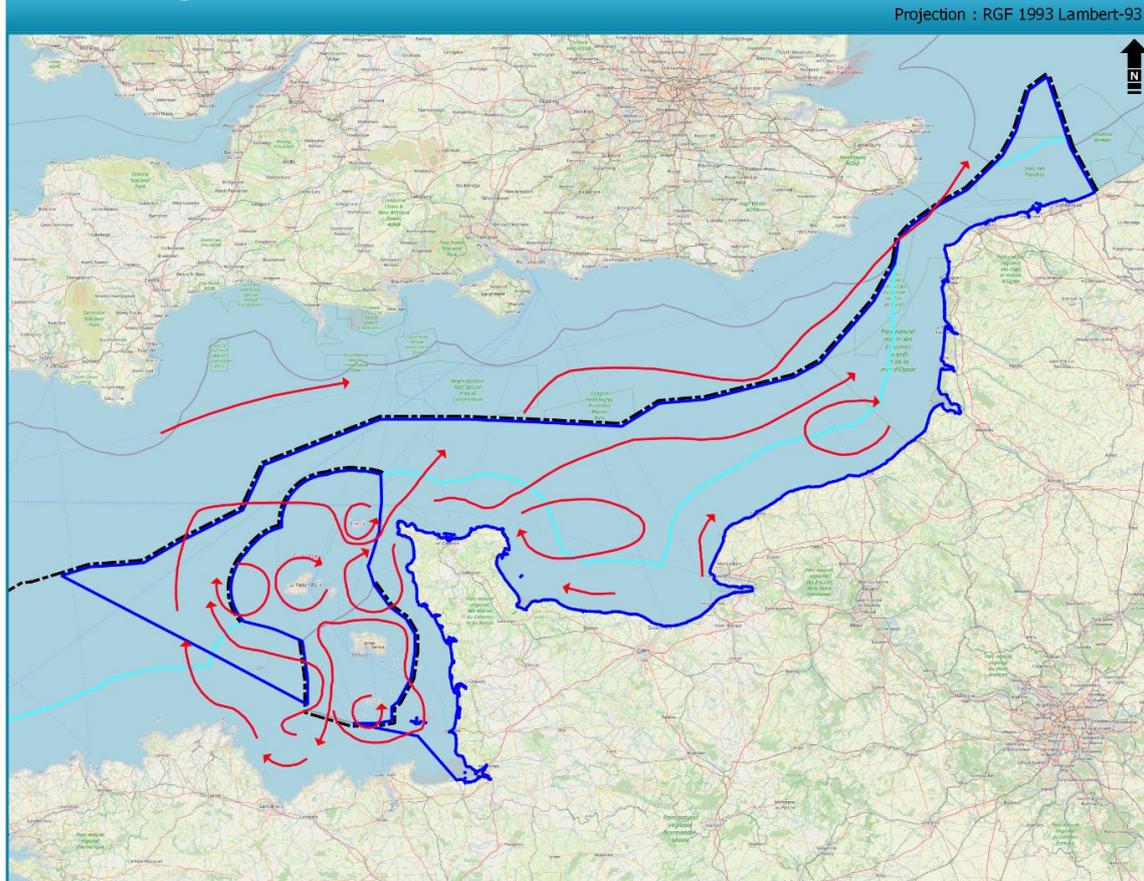
Concernant les perturbations liées aux apports fluviaux, la Seine est le seul fleuve à exercer une influence significative sur la dynamique des courants en Manche Est. Cette influence se manifeste par des variations de vitesse et de direction entre les eaux de surface et celles du fond, ainsi que par un renforcement du courant de jusant. Vous pouvez vous reporter à la **Figure 6** pour plus de détails.

6.2 Description de la courantologie

Les courants résiduels moyens, ainsi que le prolongement de la branche européenne du Gulf Stream sont dirigés de l'Atlantique vers la mer du Nord (**Figure 6**). En pénétrant dans la Manche orientale ils longent la presqu'île du Cotentin et forment un vaste tourbillon anticyclonique dans son sillage, appelé tourbillon de Barfleur (**Figure 6**). Les vitesses sont de l'ordre de 0,05 nœuds en l'absence de vent. A l'ouest de la presqu'île du Cotentin, dans le golfe Normand-Breton, la circulation est marquée par des structures tourbillonnaires autour des îles anglo-normandes, des archipels Chausey et des Minquiers (**Figure 6**), dont les courants résiduels peuvent dépasser 0,2 nœuds (**Figure 7**). Plus à l'Est, l'estuaire externe de la Seine est la région avec les écarts les plus marqués entre les courants de surface et de fond. En surface, les courants sont orientés vers l'aval puis vers le nord, tandis qu'au fond, la circulation est dirigée vers l'amont. La circulation au large des côtes picardes et du Pas-de-Calais s'oriente vers le nord, marquant ainsi la fin du trajet de la circulation générale en provenance de l'Atlantique en direction de la mer du Nord (**Figure 6**). Les courants résiduels présentent des vitesses de l'ordre de 0,1 à 0,2 nœuds. Le schéma de circulation océanique décrit peut être significativement modifié par le vent : un vent sud-ouest augmentera le transit moyen, un vent de nord-ouest à nord-est le réduira, voire l'inversera. Par exemple, un vent du nord soufflant à 5 m.s⁻¹ pendant quelques jours peut renverser le flux sur l'ensemble de la colonne d'eau, en conditions de marée moyenne.

Débat public éolien en mer 2023

Courantologie de la façade Manche Est - Mer du Nord



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)
- Courants de surface



Sources

MTE : Limites EMR
 Shom : Limites maritimes, courants
 Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)

Réalisation : Shom - Septembre 2023

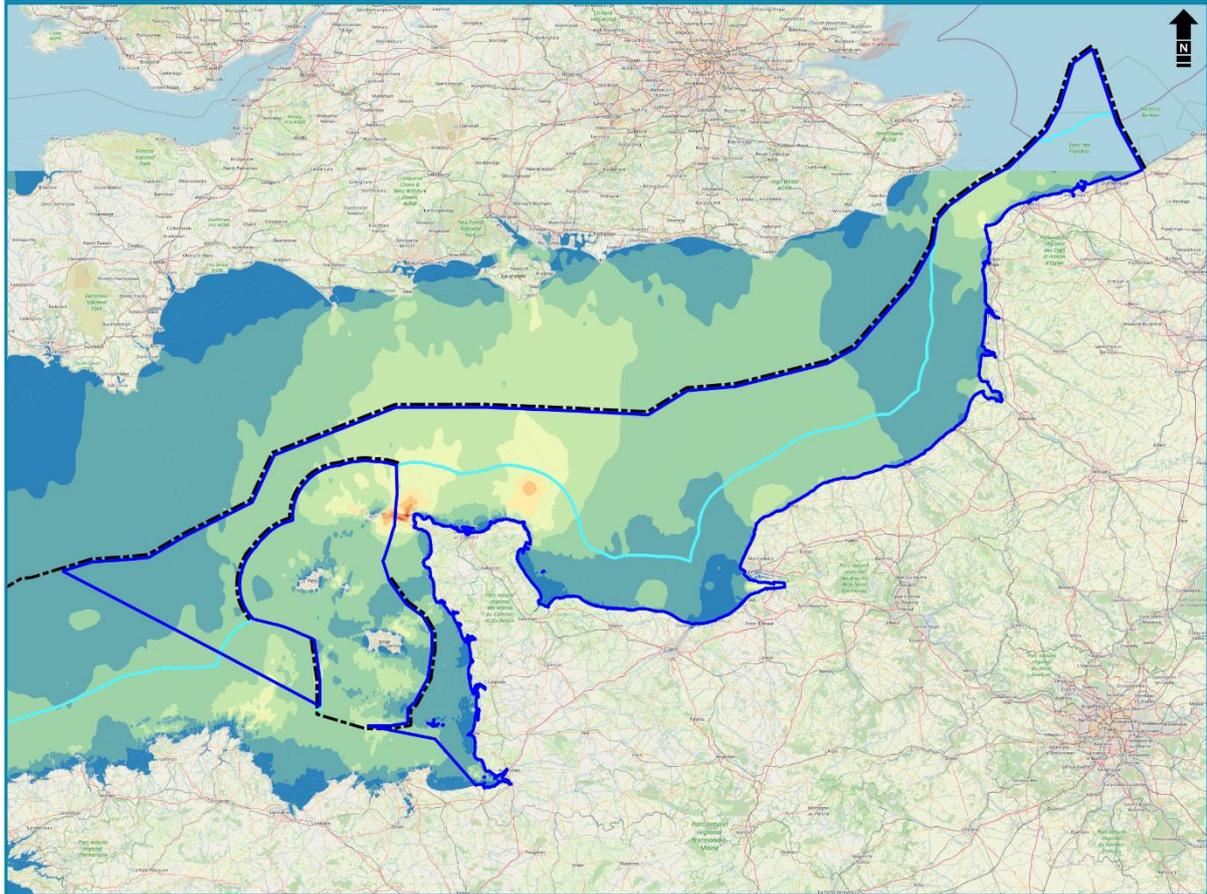
Figure 6. Cartes des courants de surface de la façade Manche Est – Mer du Nord (Shom, 2023).

La variabilité spatiale des courants est fortement influencée par la bathymétrie et la géomorphologie de la côte. En effet, les vitesses sont importantes dans les goulets (**Figure 7**), tels que celui entre la presqu'île du Cotentin et l'île de Wight en Angleterre (>1 nœud), ainsi qu'au niveau des caps (**Figure 7**), notamment le Raz Blanchard (8-10 nœuds), la pointe de Barfleur (5-6 nœuds) et le cap d'Antifer. De plus, des phénomènes de remplissage et de vidange se produisent dans les baies, et une asymétrie tidale notable est observée en milieu estuarien, illustrée par le phénomène de tenue de plein à l'embouchure de la Seine. Les courants de marée varient en intensité et en direction au cours du cycle tidal avec une période d'environ 12h25. En Manche centrale, les courants suivent un régime alternatif, avec le courant de flot se dirigeant vers l'est-nord-est et le jusant vers l'ouest/sud-ouest. En Manche orientale, les courants de flot s'orientent vers le nord-est. Il convient de souligner que les frottements avec le fond marin peuvent réduire l'intensité et modifier la direction des courants, avec une renverse généralement observée une heure plus tôt près du fond qu'en surface. Pour des informations plus détaillées, les atlas n°564,561 et 557 publiés par le Shom contiennent les cartes horaires des courants de marée de surface sur des cycles complets en Manche est et Mer du Nord. La carte présentée en **Figure 7**, est particulièrement utile pour détecter les zones où le courant de marée est le plus fort pendant les marées de vive-eau moyenne (coefficient 95).

Débat public éolien en mer 2023

Carte d'amplitude des courants de marée en condition de vives-eaux moyennes (coef. 95)

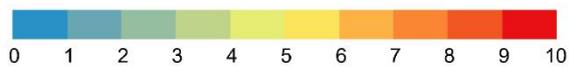
Projection : RGF 1993 Lambert-93



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)

Vitesses maximales (nd)



Sources

MTE : Limites EMR
 Shom : Limites maritimes, courants
 Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)

Réalisation : Shom - Septembre 2023

Figure 7. Carte des vitesses maximales des courants de marée en condition de vives-eaux-moyennes, *i.e.* coefficient de 95 (Shom, 2023).

Les prévisions de courants générées par le modèle HYCOM3D (Hybrid Coordinate Ocean Model), développé par le Shom, sont disponibles quotidiennement via le site www.data.shom.fr.

7. Marée et niveaux extrêmes

La marée est causée par l'attraction gravitationnelle de la lune et du soleil sur les océans. Dans l'Atlantique Nord, elle commence à un point appelé amphidromique, à l'est de Terre-Neuve, et se propage dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Aux abords de l'Europe occidentale, cette onde progresse du Sud vers le Nord. Lorsqu'elle atteint le plateau continental, elle est réfractée et sa direction suit aux isobathes. Les marées sur les côtes françaises sont principalement semi-diurnes, avec deux hautes et deux basses mers par jour, espacées d'environ 6 heures et 13 minutes. Bien que principalement semi-diurnes, elles peuvent parfois présenter de légères variations diurnes, provoquant de petites différences (0,1-0,2 m) de hauteur entre les deux hautes mers et les deux basses mers d'une même journée.

L'onde de marée venue de l'Atlantique, arrive en Mer celtique puis entre dans La Manche sous la forme d'une onde progressive dérivée où elle se combine avec une onde stationnaire de moindre importance liée au fait que la Manche forme un bassin de résonance. La paroi orientale de ce bassin correspond à la côte au sud du Pas de Calais. Lorsque l'onde de marée se propage dans la Manche, elle génère une importante élévation du marnage, atteignant en moyenne 9 m dans la baie du Mont Saint-Michel (jusqu'à 14,5 mètres lors des grandes marées) et 7 mètres à Dieppe. La réduction de la période de montée, l'augmentation de la période de descente ou des événements spécifiques, comme la prolongation du niveau élevé au Havre, déforme la courbe de marée.

Dans la partie sud de la Mer du Nord, le modèle des marées est influencé par un point amphidromique situé à environ 60 miles à l'ouest-nord-ouest d'Ijmuiden. Autour de ce point, l'onde de marée se déplace dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Au niveau du Pas de Calais, les marées résultent de la combinaison entre l'ondulation issue de la Manche et celle de la Mer du Nord, qui trouve son origine dans la marée de l'Atlantique après avoir contourné l'Écosse. Le marnage est décroissant d'ouest en est.

La carte cotidale et d'isomarnage présentée en **Figure 8** présente :

- Les lignes cotidales qui correspondent au décalage en temps de la marée par rapport à l'heure de la pleine mer à Brest (courbe zéro) ;
- Les isomarnages en condition de vives-eaux-moyennes (coefficient de 95).

L'analyse statistique des surcotes et des décotes permet de déterminer les niveaux extrêmes atteints par la mer, en les associant à une période de retour. Pour une période de retour de 100 ans, la **Figure 9** présente les niveaux extrêmes de pleine mer pour la façade Manche Est – Mer du Nord. Elle se base sur des mesures marégraphiques réalisées dans les ports de Dunkerque, Calais, Boulogne-sur-Mer, Dieppe, Le Havre et Cherbourg. Ces données sont issues d'un partenariat Shom/Cerema et sont disponibles en ligne¹. Le Shom met également à disposition du public ses prévisions de surcotes et des décotes modélisées dans le cadre de la vigilance vagues/submersion en partenariat avec Météo-France².

Sources

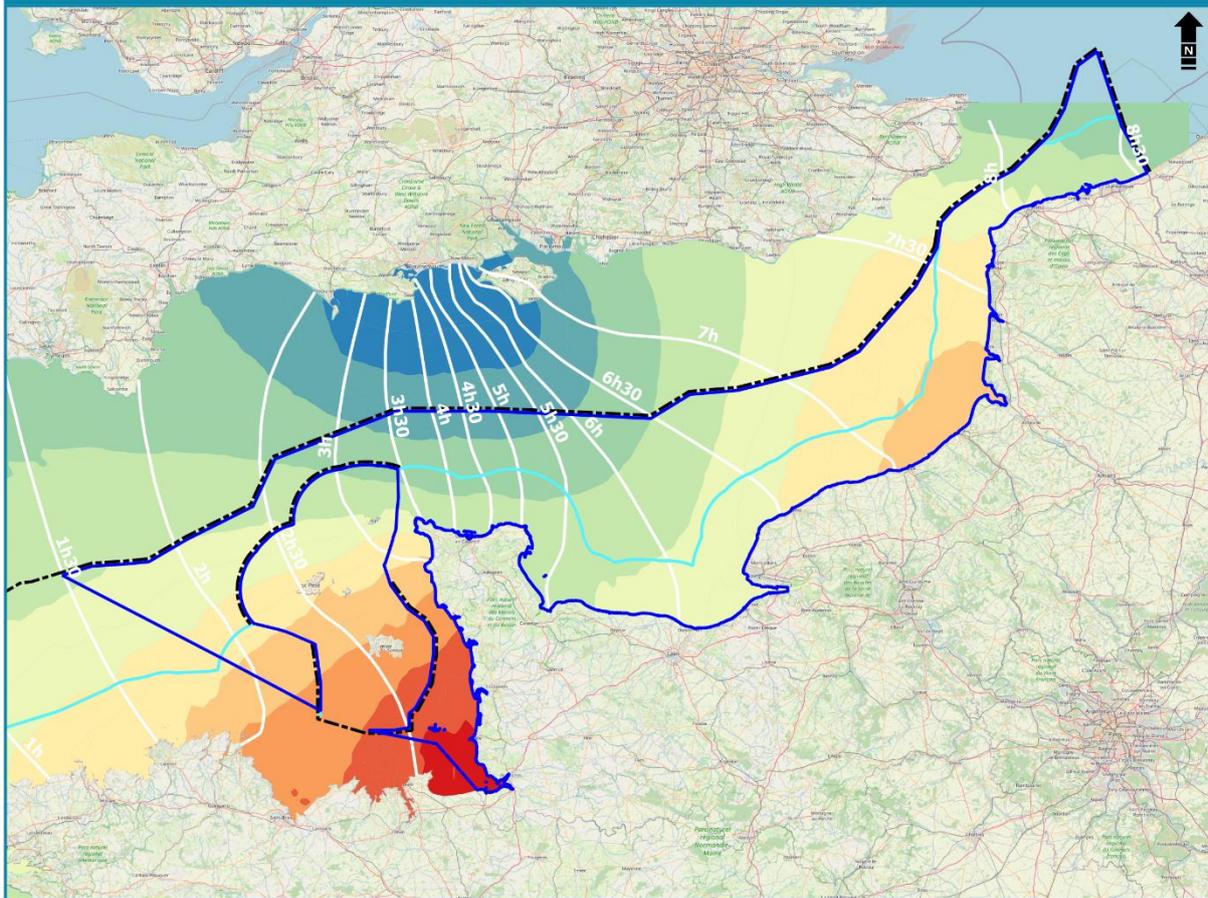
[1] <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/593562/estimation-des-valeurs-extremes-de-niveau-d-eau-littoral-metropolitain> (Shom/Cerema).

[2] www.data.shom.fr – Projet HOMONIM.

Débat public éolien en mer 2023

Carte cotidiale et isomarnage pour un coefficient de 95 Façade Manche Est - Mer du Nord

Projection : RGF 1993 Lambert-93



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)
- Lignes cotidiales

0 25 50 75 km 0 15 30 45 NM

Isomarnage coefficient 95 (m) :

<ul style="list-style-type: none"> 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 - 6 6 - 7 	<ul style="list-style-type: none"> 7 - 8 8 - 9 9 - 10 10 - 11 11 - 12
---	--

Sources

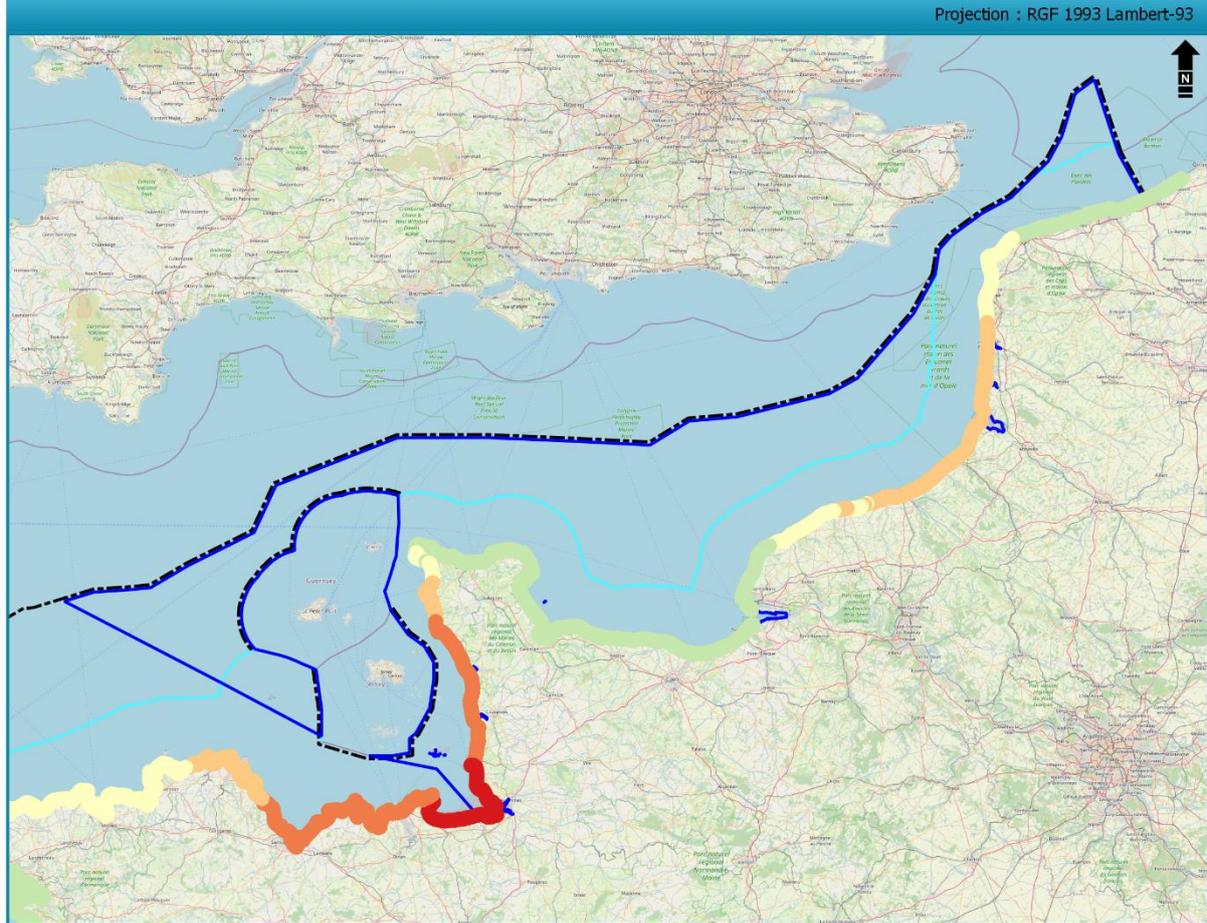
MTE : Limites EMR
Shom : Limites maritimes, marées
Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)

Réalisation : Shom - Septembre 2023

Figure 8. Carte cotidiale et d'isomarnage en condition de vives-eaux-moyennes, i.e. coefficient de 95 (Shom, 2023).

Débat public éolien en mer 2023

Carte de la macrozone : Manche Est - Mer du Nord



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)



Niveau des pleines mers (m) : T = 100 ans

- 2 - 3
- 3 - 4
- 4 - 5
- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9

Sources

MTE : Limites EMR
 Shom : Limites maritimes
 Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)
 Cerema/Shom : Périodes de retour des niveaux de pleine mer

Réalisation : Shom - Septembre 2023

Figure 9. Carte de la variation des niveaux des pleines mers pour une période de retour (T) de 100 ans, le long du littoral (Cerema/Shom, 2023).

8. États de mer

La partie centrale de la zone Manche Est – Mer du Nord est moins exposée aux houles longues en provenance de l'Atlantique et de la Mer du Nord par rapport à la partie occidentale. Réciproquement, la partie orientale est moins affectée par les houles de la mer du Nord. Le vent local joue un rôle majeur sur les états de mer dans cette zone.

Cependant, en raison de la configuration géographique de la Manche, les surfaces sur lesquelles le vent peut faire croître la hauteur des vagues, appelées "fetchs", sont relativement limités dans la plupart des directions. Il en résulte des états de mer potentiellement complexes provoqués par la superposition de plusieurs systèmes de vagues (houle et mer de vent)

Cette étude se limite à l'analyse de la connaissance préalable en utilisant les résultats préexistants d'un modèle numériques issu dans le cadre du projet HOMONIM et du Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) de l'Agglomération de Saint-Malo (Seyfried *et al.*, en préparation). Le jeu d'état de mer couvre une période de 44 ans (1979-2022), avec des résultats horaires. Il repose sur un modèle spectral d'état de la mer : WAVEWATCH III® version 5.16 (Tolman and the WAVEWATCHIII® Development Group, 2017), et utilise une grille de calcul non structurée. Cette grille présente une résolution spatiale qui varie de 10 km aux limites du domaine et s'affine progressivement pour atteindre environ 200 m de résolution près de la côte. Ce modèle, incluant des caractéristiques telles que la bathymétrie, les données de vent, de marée, de courants, ainsi que des paramètres physiques et numériques, a été validé en utilisant des données altimétriques et des bouées houlographes. Les détails complets sont fournis dans les rapports d'étude des Appels d'Offres AO4, AO5 et AO7, en particulier dans le "Dossier de l'état de la connaissance initiale" du Lot 2, référencé T2.H.

Les cartes présentées dans cette section et en **Annexe II** utilisent les données modélisées qui offrent l'avantage de décrire le spectre directionnel des vagues uniformément et sur une période suffisamment longue pour caractériser les conditions maximales, moyennes et saisonnières de l'état de la mer de la façade Manche Est – Mer du Nord.

La **Figure 10** illustre les hauteurs significatives des vagues et leurs directions moyennes sur la période 1979-2022 pour les conditions d'états de mer prises dans leur ensemble. Il apparaît que la hauteur significative moyenne des vagues présente une variabilité spatiale décroissante d'ouest en est et du large vers la côte. De plus, on observe que les vagues proviennent principalement des secteurs ouest lorsque l'on s'éloigne suffisamment de la côte (**Figure 10**).

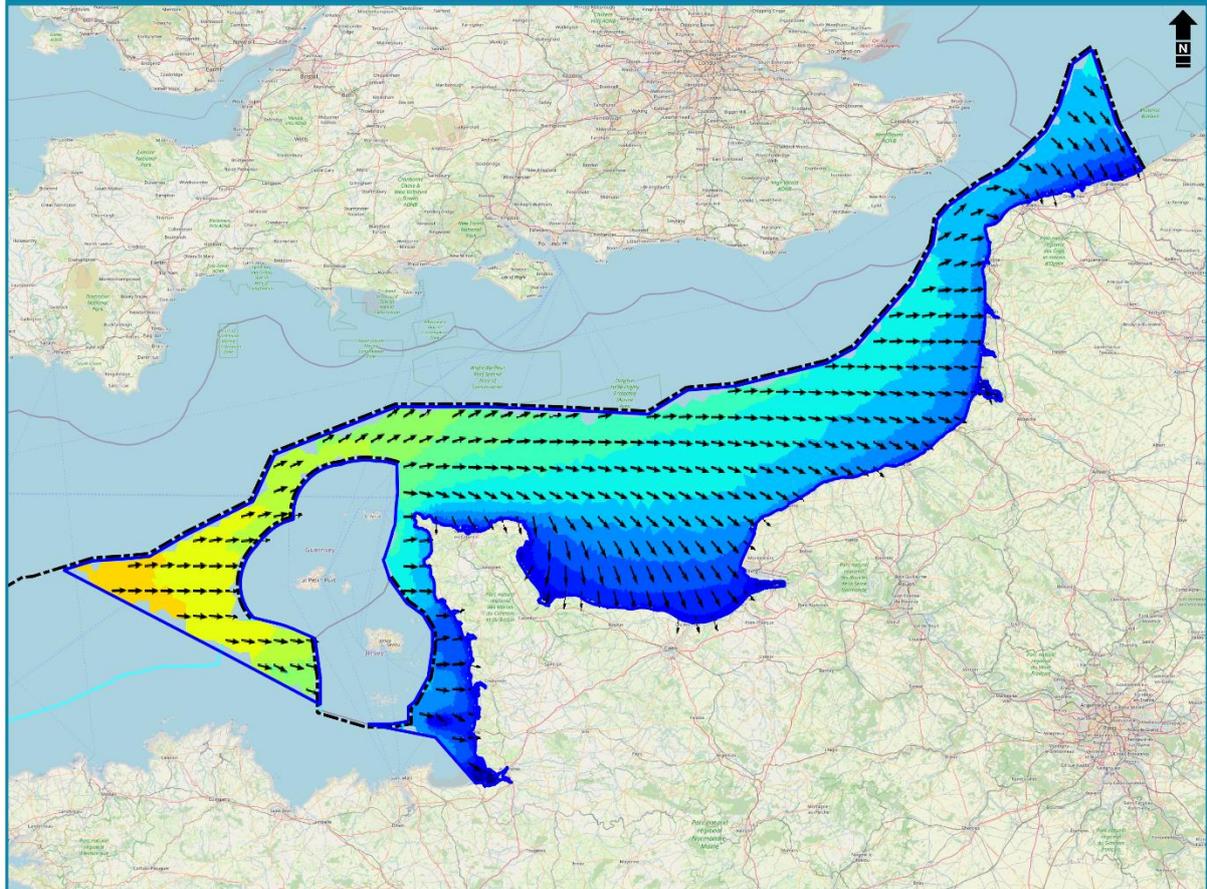
La **Figure 11** présentées en **Annexe II** met en évidence un cycle saisonnier caractérisé par des hauteurs significatives plus faibles pendant l'été et plus élevées en hiver. La **Figure 12 (Annexe II)** montre les hauteurs significatives maximales atteintes entre 1979 et 2022 (~ 11 m).

Dans l'ensemble, la taille des vagues diminue à mesure que la profondeur diminue. Cette diminution est principalement due à la dissipation des vagues par frottement sur le fond et par le déferlement en eau peu profonde. La réfraction bathymétrique constitue également un processus affectant les états de mer en zone côtière pouvant concentrer l'énergie des vagues autour des caps ou la disperser dans les baies. La marée affecte également les états de mer car les variations du niveau d'eau peuvent influencer la hauteur et la période des vagues, tandis que les zones à forts courants de marée peuvent modifier les propriétés des vagues.

Débat public éolien en mer 2023

Hauteurs significatives et directions moyennes des vagues modélisées sur la période 1979 - 2022

Projection : RGF 1993 Lambert-93



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)

Hauteur significative moyenne (m)



0 25 50 75 km 0 15 30 45 NM

Sources

MTE : Limites EMR
 Shom : Limites maritimes, hauteurs significatives et directions des vagues
 Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)

Réalisation : Shom - Septembre 2023

Figure 10. Hauteurs significatives et directions moyennes des vagues modélisées sur la période 1979-2022 (Shom, 2023).

Annexes

1. Glossaire

Amplitude du courant : vitesse maximum au cours d'un cycle de marée.

Circulation thermohaline : appelée aussi circulation océanique profonde, est la circulation océanique engendrée par les différences de densité de l'eau de mer, à l'origine de courants marins de profondeur. Ces différences de densité proviennent des écarts de température et de salinité des masses d'eau. À l'échelle de la planète, la circulation océanique de surface et la circulation océanique profonde forment une immense boucle de circulation que l'on nomme boucle thermohaline à l'origine d'un grand cycle qui brasse les eaux et convoie la chaleur à l'échelle de chaque hémisphère du globe.

Courant de dérive : courant généré par le vent.

Courant de flot ou flot : courant accompagnant la marée montante.

Courant de jusant ou jusant : courant accompagnant la marée descendante.

Courant de marée : composante horizontale de l'action gravitationnelle de la lune et du soleil.

Courant de marée alternatif : le flot a, pendant toute sa durée, une direction à peu près constante qui est à l'opposé du jusant. Dans les zones de courants forts, le courant de marée est majoritairement alternatif, de ce fait le courant le plus fort est celui de la mi-marée.

Courant de marée giratoire : la direction du courant change progressivement tout au long de la marée tout en variant en force.

Courant de pente : courant généré par la pente de la surface libre, hors de l'action de la marée.

Courants radiationnels : (anglicisme) par opposition aux courants gravitationnels, eux sont issus de l'action radiationnelle du soleil.

Cycle de vives eaux/mortes eaux : la morte-eau se dit d'une marée de faible amplitude. Morte-eau s'oppose à vive-eau. Les mortes eaux ont lieu lorsque les positions de la Lune, la Terre et le soleil forment un angle droit (90°). Dans ce cas, les effets de l'attraction gravitationnelle lunaire et solaire est contrecarrée et la marée haute est plus faible en hauteur que d'habitude. La vive-eau est une période d'une marée de forte amplitude. Au cours des vives eaux, après une période de revif, le marnage et les courants de marée sont plus importants. Ce cycle a une période d'environ 14 jours.

Dérive de Stokes : la dérive de Stokes est le mouvement de transport de matière associé à la propagation d'une onde dans un milieu matériel. Point de vue Lagrangien : « une particule d'eau sur la crête d'une vague se déplace un peu plus rapidement et en sens opposé que lorsqu'elle se retrouve dans un creux quelques secondes plus tard. En suivant les particules au cours ce déplacement oscillant, on observe donc un déplacement moyen dans le sens de propagation. »

Dérive Nord Atlantique : courant océanique chaud et puissant qui prolonge le Gulf Stream vers le nord-est. Elle se sépare en deux à l'ouest de l'Irlande. Une des branches (le courant des Canaries) va vers le sud tandis que l'autre continue le long des côtes du nord-ouest de l'Europe où il a une influence considérable sur le climat en le réchauffant. D'autres branches incluent le courant d'Irminger et le courant norvégien. À l'origine, c'est une extension du Gulf Stream qui va encore plus loin vers le nord et se jette dans l'Océan Arctique.

Etale ou renverse : instant durant lequel le courant est nul car la marée s'inverse.

Fetch : étendue de la zone maritime où le vent exerce son action pour générer des vagues.

Gulf Stream : courant océanique chaud de surface qui prend sa source entre la Floride et les Bahamas, le long de la côte est des États-Unis et se disperse dans l'océan Atlantique quelque part au large de la Nouvelle-Écosse et de Terre-Neuve tout en se prolongeant par d'autres courants marins. Il constitue une portion du gyre de l'Atlantique Nord.

Marée semi-diurne : 2 marées haute et 2 marées basses en 24 heures. Il est expliqué par le passage de la Lune au méridien du lieu puis à opposition, les composantes diurnes sont négligeables.

Marnage : différence de hauteur d'eau entre une pleine mer et une basse mer consécutive.

Plomb de sonde : désigne une masse utilisée dans les systèmes de mesure de profondeur en milieu aquatique. Il est souvent attaché à un câble ou à une ligne de mesure et est plongé dans l'eau pour déterminer la profondeur.

Résiduel de marée : composante permanente des courants de marée, liée à la dérive de Stokes provoquée par les frottements sur le fond générés lors de la propagation de l'onde de marée.

Surcote/décote : désigne la différence entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en tenant compte uniquement de la marée astronomique seule (hauteur prédite). Lorsque cet écart est positif, on parle de surcote, tandis que s'il est négatif, on parle de décote.

Upwelling : phénomène océanographique qui se produit lorsque de forts vents marins (généralement des vents saisonniers) poussent l'eau de surface des océans, laissant ainsi un vide où peuvent remonter les eaux de fond et avec elles une quantité importante de nutriments.

2. Cartes houle

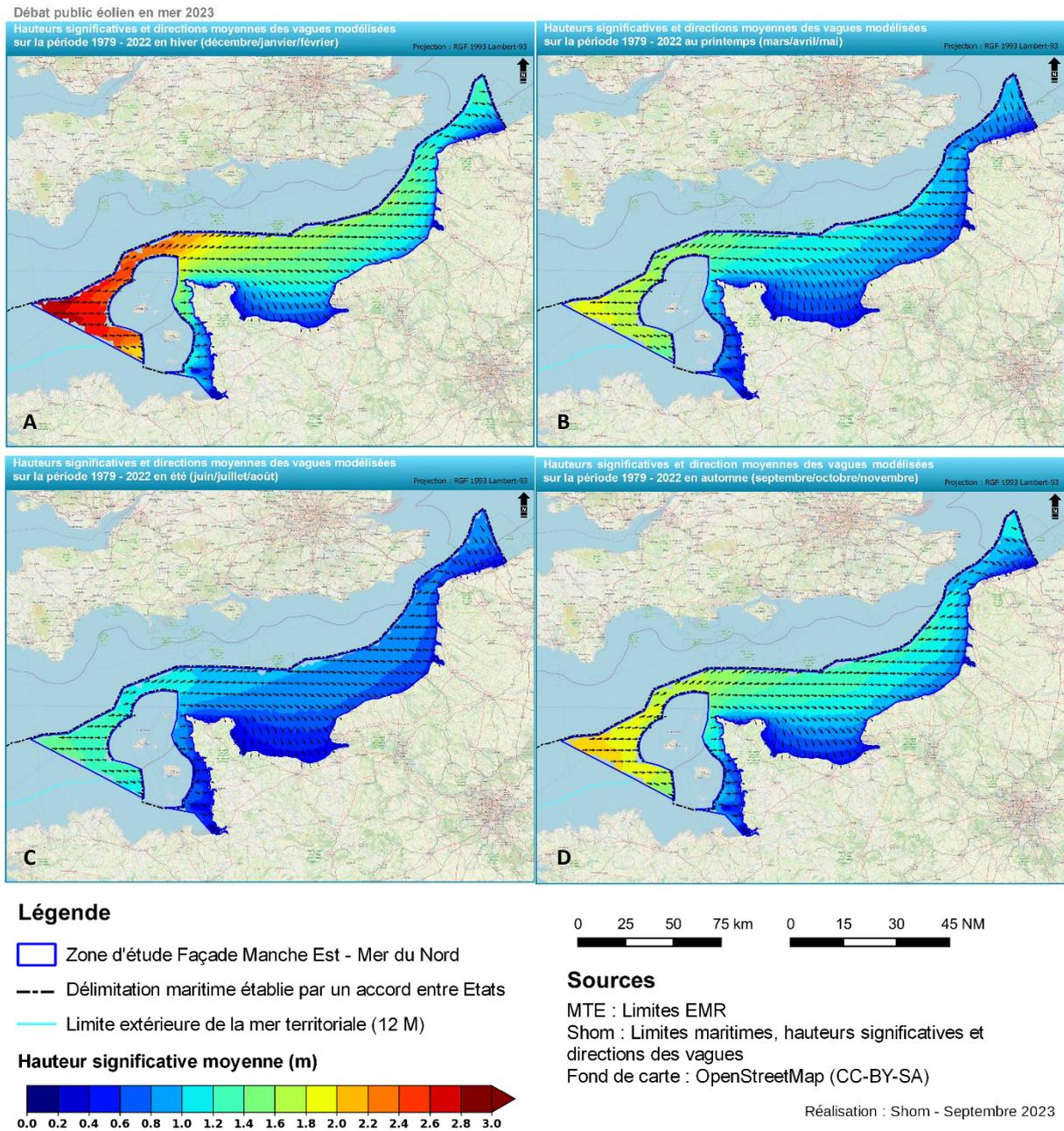
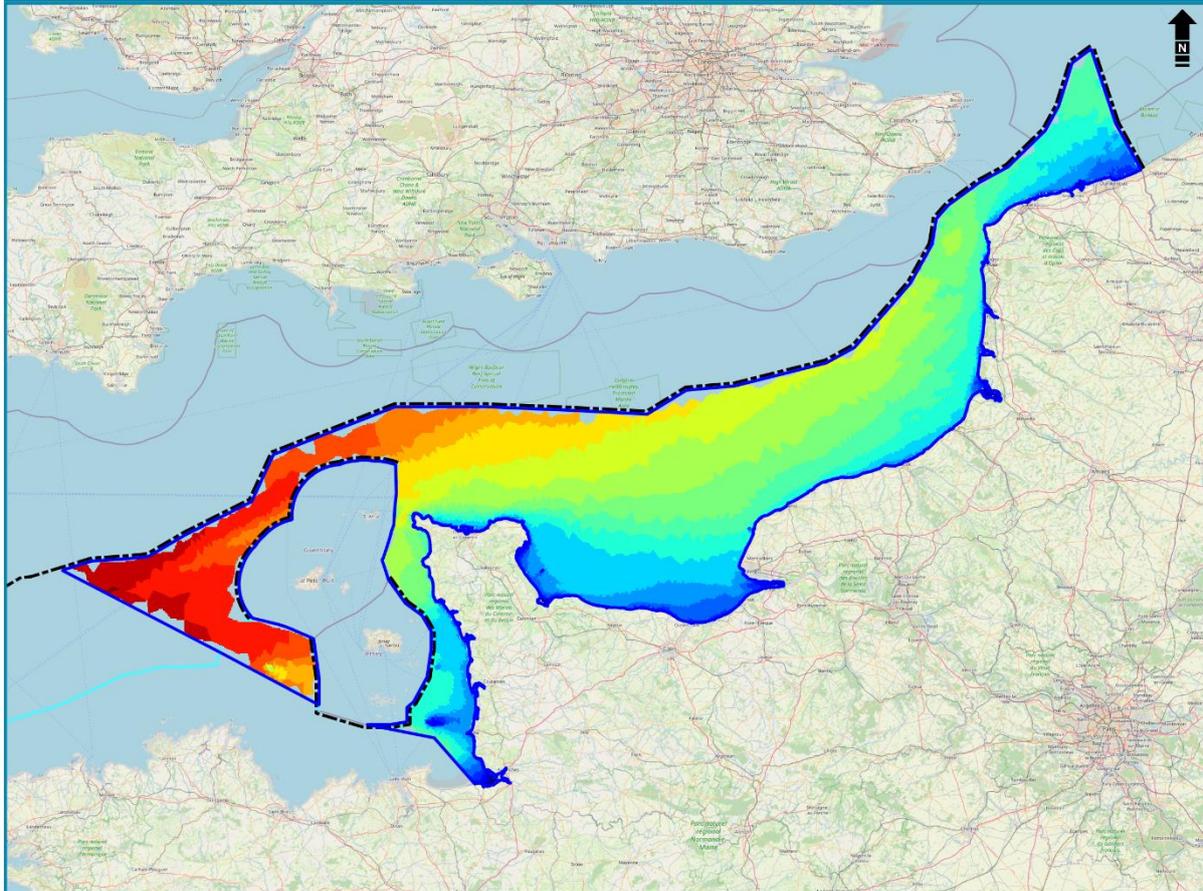


Figure 11. Hauteurs significatives et directions moyennes des vagues modélisées sur la période 1979-2022 en hiver (A), au printemps (B), en été (C) et en automne (D) (Shom, 2023).

Débat public éolien en mer 2023

Hauteurs significatives maximales des vagues modélisées sur la période 1979 - 2022

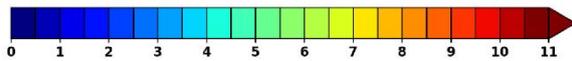
Projection : RGF 1993 Lambert-93



Légende

- Zone d'étude Façade Manche Est - Mer du Nord
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12 M)

Hauteurs significatives maximales (m)



Sources

MTE : Limites EMR
 Shom : Limites maritimes, hauteurs significatives
 Fond de carte : OpenStreetMap (CC-BY-SA)

Réalisation : Shom - Septembre 2023

Figure 12. Hauteurs significatives maximales des vagues modélisées sur la période 1979-2022 (Shom, 2023).