



**Description de l'état de la connaissance
et des caractéristiques physiques
de la macrozone éolien en mer de Normandie**

Approbateur	mda@shom.fr
Date	Le 25/09/2019

Shom
DSD/DAF
CS 92803
29228 BREST CEDEX 2

TABLE DES MATIERES

Généralités	3
Bathymétrie.....	5
Sédimentologie.....	7
Hydrologie	11
Marée et courants	12
Houle, vagues et état de mer	17

Introduction

Dans le cadre de la préparation du débat public sur les projets éoliens en mer au large de la Normandie, la Direction générale de l'énergie et du climat (DGE) du Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) a commandé au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (Shom) une étude d'état de la connaissance des caractéristiques physiques de la macrozone soumise au débat public.

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 connaissance des caractéristiques physiques de la zone doit donc permettre d'éclairer le public, et l'ensemble des acteurs qui prendront part au débat public, sur les paramètres pouvant influencer le choix de zones préférentielles pour des projets éoliens en mer au large de Normandie.

La présente étude porte sur la bathymétrie, la sédimentologie, les marées et les courants, l'hydrologie, la houle, les vagues et états de mer.

Généralités

Références :

1. Instructions nautiques – C21 – France (Côte Nord) de la frontière belge au cap de la Hague – disponible sous www.diffusion.shom.fr
2. Projet HOMONIM – financement MTES, Shom et Météo-France
3. Projet national Litto3D Shom-IGN pour la constitution du Référentiel Géographique du Littoral (RGL)

Quelques définitions :

- **Bathymétrie** : La bathymétrie est la mesure des profondeurs et du relief de l'océan pour déterminer la topographie du sol des océans. Les mesures bathymétriques modernes sont réalisées à l'aide d'appareils acoustiques, appelés sondeurs bathymétriques (mono ou multifaisceau), mais de nombreuses régions de par le monde ne sont connues que par les anciennes mesures avec un plomb de sonde déroulé au bout d'une corde.
- **Sédimentologie** : Les sédiments des plateformes continentales sont un mélange de particules reliques et récentes reposant sur un socle rocheux plus anciens. Leurs caractéristiques sont liées à la granulométrie et à la quantité de matériel disponible, avec une influence de la morphologie du substrat et des variations à long terme du niveau marin. Les structures sédimentaires vont des dépressions partiellement comblées des anciennes rivières (paléovallées), aux reliefs créés par les dunes et bancs sableux. Les courants tidaux et les houles ont la capacité de mettre en mouvement ces sédiments et ces structures. La sédimentologie comprend ainsi la caractérisation de la nature des fonds et l'étude de la dynamique sédimentaire, cette dernière reposant sur la nature et granularité des sédiments, sur l'hydrodynamique et sur la profondeur.
- **Marée** : la marée est la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle des astres (dont les principaux sont la lune et le soleil), dont les mouvements peuvent être calculés avec précision sur des périodes de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'années. L'un des buts principaux de l'étude des marées est la recherche des relations existant entre le mouvement

des astres et la réponse des océans à l'action de ces forces gravitationnelles afin d'établir des formules de prédiction.

- courants marins : les courants marins ont deux origines bien distinctes :
 - les courants de marée que l'on appellera "gravitationnels" : leur origine est la force génératrice des marées dont la cause première est l'attraction newtonienne,
 - les courants que l'on appellera "radiationnels" : leur origine plus ou moins lointaine est le rayonnement solaire, responsable de phénomènes tels que le régime des vents, le cycle des saisons, les perturbations météorologiques, ou les variations spatiales de densité des océans pouvant générer des mouvements au sein des masses d'eau.
- Hydrologie marine : les deux grandeurs physiques essentielles et principales de l'eau de mer sont la température et la salinité. La température est fondamentale pour l'évaluation des caractéristiques des masses d'eaux car elle joue un rôle important dans la variabilité des cycles biologiques. Sa mesure est indispensable pour l'interprétation ou le calcul d'autres grandeurs (salinité, densité, célérité du son, oxygène dissous...). Par son influence sur la densité de l'eau de mer, la salinité permet de connaître la circulation océanique, identifier les masses d'eau d'origine différente et suivre leurs mélanges. Elle représente la masse de sels dissous contenue dans un kilogramme d'eau de mer. Elle est un rapport entre deux grandeurs de mêmes unités, donc sans unité. Elle a une valeur proche de 35 dans les océans, ou 0 pour les eaux douces.
- houle et vagues, état de la mer : la **mer de vent** correspond aux vagues générées localement sous l'effet de l'action du vent, et la hauteur des vagues croît avec l'intensité du vent et la durée de son action. La **houle** correspond à des vagues générées ailleurs et qui se sont propagées. Elle dépend du « fetch » (taille de l'aire maritime sur laquelle souffle le vent). **L'état de la mer** est le résultat de plusieurs facteurs : action du vent sur la mer, bathymétrie (en zones de petits fonds, elle modifie la répartition spatiale des hauteurs de vagues), relief côtier, courants dûs au vent, à la marée... En général, il se compose des vagues liées à la mer de vent et celles liées à la houle.

1. Description de la macrozone

La macrozone identifiée pour l'implantation de futurs sites éolien en mer posé se situe en Manche Est, entre le nord du Cotentin et le nord ouest du Tréport.

Un certain nombre d'informations nautiques relatives à cette portion des eaux françaises sont données dans les instructions nautiques en référence. La zone concernée par cette étude se situe au large de la région Normandie, caractérisée notamment par la présence du large estuaire de la Seine et de la baie de Seine.

La dynamique océanique qui préside dans cette région est essentiellement le fait des courants de marée, générés par l'onde de marée issue de l'océan Atlantique (voir la section « courants et marée »), du relief côtier, et des phénomènes météorologiques.

2. Caractéristiques physiques

Les sections de ce dossier présentent les principales caractéristiques physiques de cette région et un état très synthétique de la connaissance actuelle. Elles concernent les thématiques techniques suivantes :

- Bathymétrie
- Sédimentologie marine
- Hydrologie marine
- Courants et marée
- Houle et vagues

Bathymétrie

Références :

- [1] Projet national Litto3D Shom-IGN pour la constitution du Référentiel Géographique du Littoral (RGL)
- [2] Projet HOMONIM – financement MTES, Shom et Météo-France

La bathymétrie générale de la région est connue au travers d'un certain nombre de données et produits édités par le Shom, qui agit en tant que service hydrographique national compétent pour toutes les eaux françaises notamment. La connaissance est basée sur l'existence de données issues de levés bathymétriques réalisés dans cette région à bord de navires hydrographiques. Ces données permettent aussi l'élaboration de produits tels que les cartes marines (usage orienté pour la sécurité de la navigation), ou des modèles numériques de terrain (MNT).

Le Shom dispose à ce jour, dans la macrozone, de 633 levés datant de la période 1833 jusqu'au 14 mars 2019 (date de l'interrogation de la base de données ; hors restriction sur la protection militaire, sans restriction sur la protection commerciale). Ces levés proviennent essentiellement de sondages acoustiques (au moyen de sondeurs monofaisceaux et multifaisceaux), mais aussi de mesures au plomb de sondes, et de cotations directes à la perche ou par un plongeur.

Concernant les aspects relatifs à l'atterrissage des câbles d'une future ferme EMR, les données traditionnelles bathymétriques précitées sont généralement insuffisantes. Elles pourront alors être de préférence évaluées à l'aide des données topo-bathymétriques qui ont été acquises au moyen d'un lidar aéroporté [1]. Une partie des données lidar reste actuellement en cours de traitement à proximité du Havre et dans la partie Est de la zone d'intérêt (au large de Dieppe). Elles devraient être disponibles au dernier trimestre 2019 sur le site www.data.shom.fr.

La connaissance bathymétrique peut être par ailleurs décrite par un modèle numérique de terrain (MNT) de la façade Manche-Atlantique, produit élaboré à partir de multiples producteurs de données sur la région. Ce produit offre une maille régulière de 100 mètres de résolution horizontale (MNT réalisé au travers du projet HOMONIM [2]).

Dans les grandes lignes, on peut caractériser la macrozone par trois traits morphologiques dominants. La zone centrale est marquée par la présence d'affleurements rocheux particulièrement visibles au-delà de 30 m de profondeurs. La zone Est, quant à elle, présente une dynamique sédimentaire forte, avec la présence de dunes. Finalement, la zone située complètement à l'Ouest est marquée par l'extrémité de l'embouchure de la Seine, ainsi que par le résultat de l'incision de la Vire dans des fonds potentiellement meubles (type vase).

Globalement, les fonds concernant les secteurs d'intérêt EMR ne dépassent guère les 80 mètres de profondeurs.

Bathymétrie

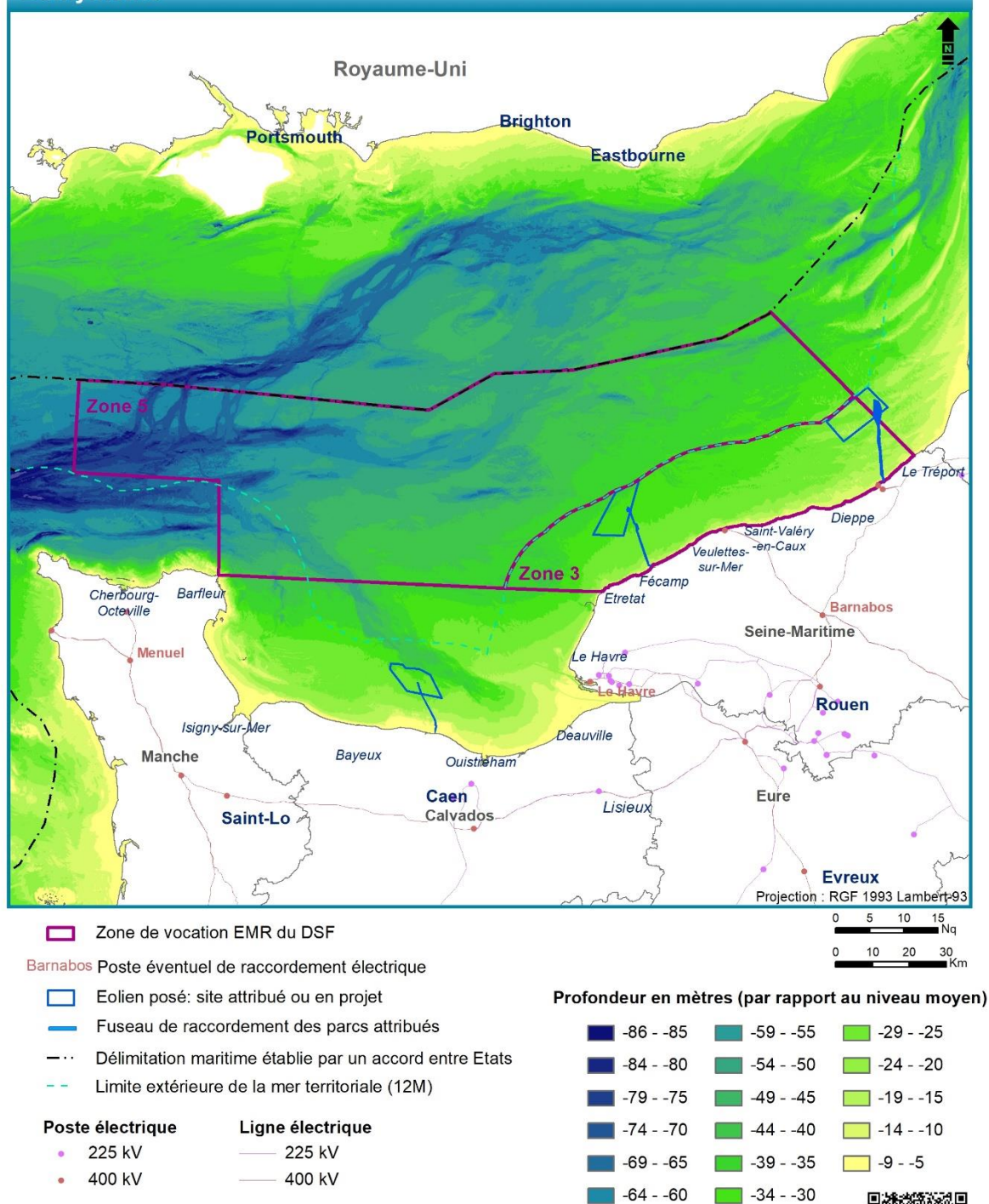


Figure 1 : Couverture bathymétrique générale de la macrozone (Données : Shom 2019)

Sédimentologie

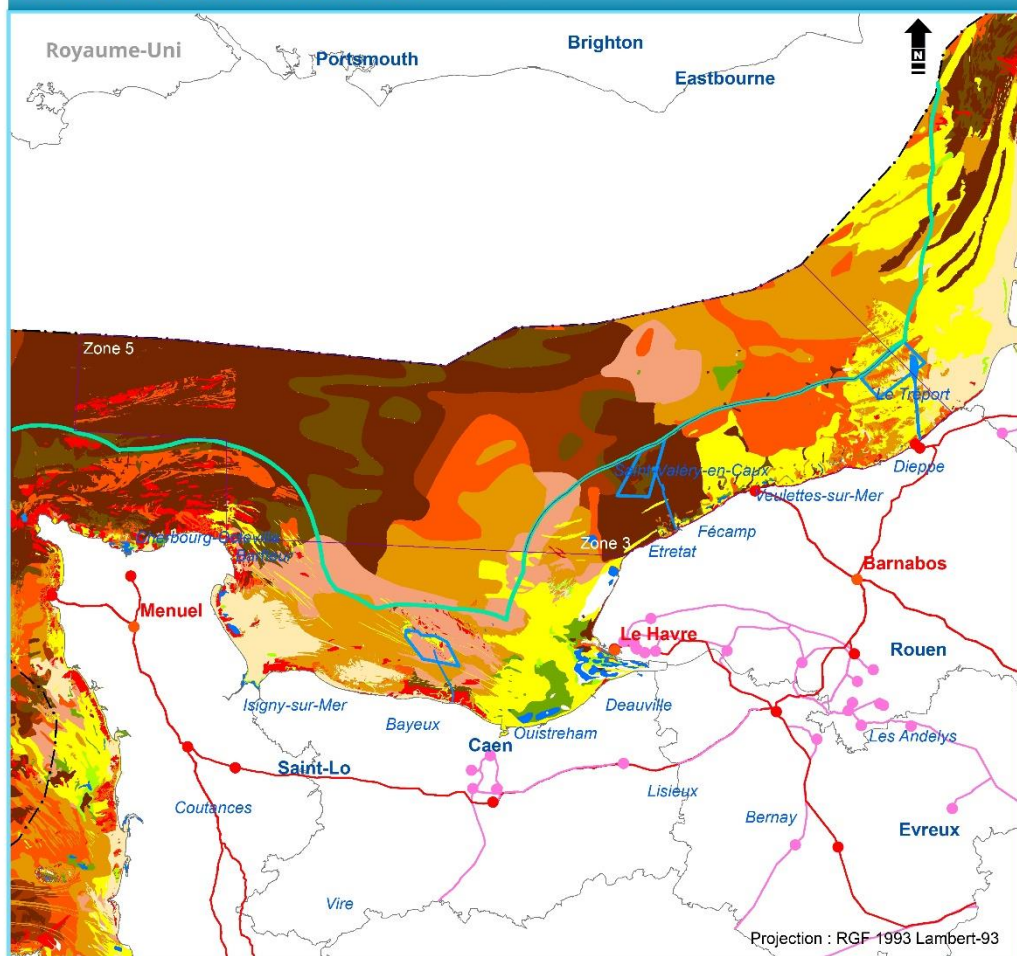
Nature des fonds

La carte sédimentaire de la région repose essentiellement sur des prélèvements anciens et très anciens, réalisés entre 1820 et les années 1980. Quelques données plus récentes ont tout de même permis d'actualiser la carte originale de Vaslet, Larsonneur et Auffret (1981), mais ces données restent rares à une distance supérieure à 10 milles nautiques de la côte. Seuls les futurs parcs éolien en mer de Fécamp et du Tréport reposent sur des données récentes (Shom, 2011 et 2012). Il est à noter que ces levés récents ont permis d'affiner la cartographie sans réellement remettre en cause les grandes tendances qui avaient été reportées sur la carte de 1981.

Aux abords du Cotentin, les sédiments sont grossiers, avec une prédominance des cailloutis et de mélanges de cailloutis et graviers et, sur la limite sud, un affinement des sédiments due à la diminution des courants de marée sur le fond se traduisant par quelques rares secteurs de graviers et de sables graveleux. La partie centrale présente une plus grande importance des graviers aux dépens des cailloutis, et montre également ce gradient méridien d'affinement vers le sud. A l'est de Fécamp les sédiments s'affinent, avec une frange littorale de 20 km de large où s'observent des sables et sables fins. Le domaine du large est plus grossier avec une part importante de graviers mélangés ou non avec des sables (Figure 2).

Débat public éolien en mer 2019

Natures de Fond Manche Est



Zones de vocation énergies marines renouvelables (EMR) du Document Stratégique de Façade (DSF):

- Zone de vocation EMR du DSF
- Zone 3: Côte d'Albâtre et ses ouverts
- Zone 5: Large baie de Seine
- Barnabos** Poste éventuel de raccordement électrique
- Eolien posé : site attribué ou en projet
- Fuseau de raccordement des parcs attribués
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12M)

- | Poste électrique | Ligne électrique |
|---|---|
| ● 225 kV | — 225 kV |
| ● 400 kV | — 400 kV |

Sources:

MTES: Limites EMR
 Shom: Limites maritimes, sédimentologie
 RTE: lignes, postes RTE, zones de raccordement
 EEA: contours pays étrangers
 IGN: Limites administratives terrestres

Carte sédimentaire de la zone EMR Manche Est (Shom 2019)

- | | |
|---|---|
| Roche | Sables - Gravier |
| Cailloutis | Sables |
| Cailloutis - Gravier | Sables fins |
| Cailloutis - Sables | Sables fins vaseux |
| Gravier - Cailloutis | Sables vaseux |
| Gravier | Vases |
| Gravier - Sables | |

0 2.5 5 11 16.5 22
 Milles nautiques
 0 5 10 20 30 40
 Kilomètres



Pour en savoir plus :

www.gelittoral.developpement-durable.gouv.fr

Figure 2 : Carte sédimentaire de la macrozone (Données : Shom 2019)

Épaisseur de sédiments de la zone EMR Manche Est

Les structures sédimentaires engendrant une variabilité de l'épaisseur sédimentaire de la Manche Est sont soit des bancs et dunes de sables graveleux, pouvant atteindre une quinzaine de mètres de hauteur, soit des paléovallées en dépression, pouvant être plus ou moins remplies de couches sédimentaires atteignant localement 140 mètres d'épaisseur (Figure 3). Les dunes et bancs apparaissent au niveau du Tréport pour se poursuivre jusque sur les côtes du Danemark. Ils demeurent ici limités à une frange côtière de 20 km de la partie à l'extrême est de la macrozone.

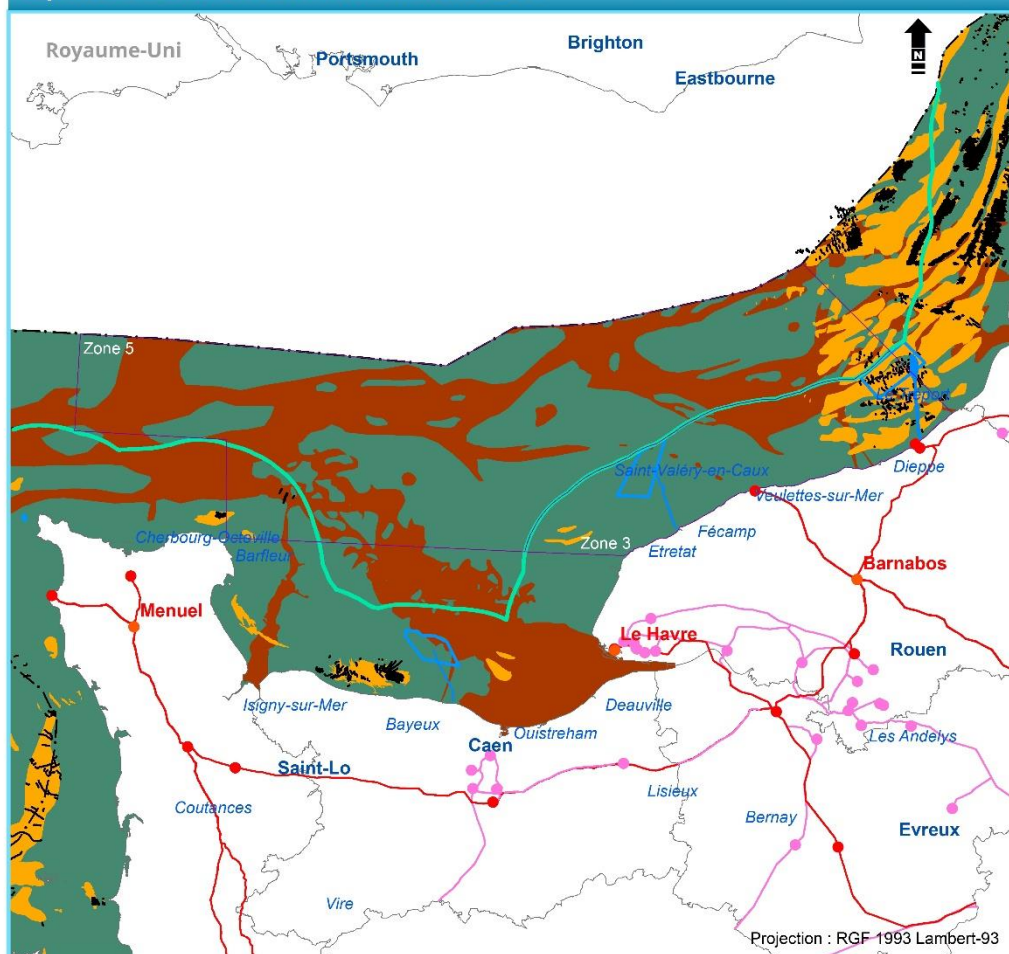
Le phénomène important du reste de cette zone est lié aux paléovallées. Ces dépressions glaciaires font l'objet d'études depuis les travaux de Graindor (1964) et se sont poursuivies par les travaux de Larssonneur (1971), Auffret et al (1980), Quesney (1983), jusqu'à la thèse Benabdellouahed (2012) qui ont progressivement permis de bien les circonscrire. Des études sur leur évolution au cours des périodes glaciaires et interglaciaires ont également été menées mais n'apportent pas d'éléments complémentaires pour la question de l'installation des éoliennes.

La profondeur et le contenu de ces paléovallées varient d'un secteur à l'autre et pourraient entraîner des variations importantes de l'épaisseur de sédiments.

Néanmoins, cette connaissance est très parcellaire et qualitative, elle nécessite d'être quantifiée par des levés sédimentologiques ciblés pour éclairer les choix industriels d'implantation d'éoliennes offshore.

Débat public éolien en mer 2019

Epaisseurs de Sédiments Manche Est



Zones de vocation énergies marines renouvelables (EMR) du Document Stratégique de Façade (DSF):

- Zone de vocation EMR du DSF
- Zone 3: Côte d'Albâtre et ses ouverts
- Zone 5: Large baie de Seine
- Barnabos** Poste éventuel de raccordement électrique
- Eolien posé : site attribué ou en projet
- Fuseau de raccordement des parcs attribués
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- Limite extérieure de la mer territoriale (12M)

- | Poste électrique | Ligne électrique |
|---|---|
| ● 225 kV | — 225 kV |
| ● 400 kV | — 400 kV |

Sources:

MTES: Limites EMR
 Shom: Limite maritimes, sédimentologie
 RTE: lignes, postes RTE, zones de raccordement
 EEA: contours pays étrangers
 IGN: Limites administratives terrestres

Légende de la carte sédimentologique générale de la zone EMR Manche Est (Shom 2019)

- Fonds sédimentaires
- Paléovallées
- Bancs
- Crêtes de Dunes sous-marines

02.75.5 11 16.5 22
 0 5 10 20 30 40
 Milles nautiques
 Kilomètres



Pour en savoir plus :

www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Figure 3 : Carte de la structure sédimentaire de la macrozone (Données : Shom 2019)

Hydrologie

La connaissance de l'hydrologie marine de la région concerne la température et la salinité de l'eau de mer, de la surface jusqu'au fond. Elle se base sur l'exploitation statistique de données in situ collectées par des navires océanographiques. Il a été choisi de se baser sur les statistiques hydrologiques mondiales représentatives, celles du GDEM (Generalized Digital Environmental Model), produites par le NAVOCEANO (Naval Oceanographic Office – USA). C'est l'une des bases de données OTAN de la NSODB V7.0 (NSODB : NATO Standard Oceanographic data Base).

Elles se présentent sous forme de planches horizontales montrant les isolignes de température ou salinité, choisies pour les mois de février, mai, août et novembre, considérés comme représentatifs des saisons, hiver, printemps, été et automne.

	Hiver (février)	Printemps (mai)	Eté (août)	Automne (novembre)
Température surface (en degrés Celcius)	07 à 08.5	09 à 11	16 à 16.5	11.5 à 13.5
Température 20 m (en degrés Celcius)	07.5 à 08.5	09 à 10.5	16 à 16.5	11.5 à 13
Salinité surface (en psu)	34 à 35	34.2 à 34.8	34.2 à 35	34.6 à 35.2
Salinité 20 m (en psu)	34.2 à 35	34.2 à 34.8	34.6 à 35	34.6 à 35.2

En général, les températures varient peu horizontalement sur le domaine, de l'ordre de 1 à 2°C, et elles sont plutôt homogènes sur la colonne d'eau, quelle que soit la saison.

Les salinités suivent les mêmes tendances (en unité de salinité pratique ou practical salinity unit - psu) : variabilité horizontale de l'ordre de 0.5 à 1, et sur la verticale elle est très homogène.

Marée et courants

La connaissance de la dynamique océanique peut être appréhendée en première approche par la description des courants marins, ainsi que par le phénomène de la marée qui affecte fortement cette région du fait de sa configuration (forme de la Manche, profondeurs, proximité de l'Atlantique).

GLOSSAIRE :

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

Marée semi-diurne : type de marée pour laquelle les composantes diurnes sont négligeables devant les composantes semi-diurnes. Il y a alors deux pleines mers et deux basses mers d'importances sensiblement égales par jour. Ce type de marée est prépondérant en Atlantique.

Courant de flot : On appelle le courant de flot, le courant portant entre une basse mer et une pleine mer successive, lors du montant des eaux.

Courant de jusant : On appelle le courant de jusant, le courant portant entre une pleine mer et une basse mer successive, lors du perdant des eaux.

Courant alternatif : En régime alternatif, le courant a une direction à peu près invariable pendant une demi-marée et la direction opposée pendant l'autre demi-marée.

Courant giratoire : Un courant giratoire porte, au cours d'une marée, successivement dans toutes les directions.

Les courants

Les courants généraux de La Manche, de la partie méridionale de la Mer du Nord et du Golfe de Gascogne appartiennent au système Nord-atlantique du Gulf Stream. Une branche du Gulf Stream pénètre directement dans La Manche, avec une direction Est-Nord-Est, et de là dans la Mer du Nord.

Les marées

Au large du plateau continental, l'océan est soumis au régime des marées de l'Atlantique Nord, l'onde de marée vient de l'océan Atlantique et poursuit un mouvement du Sud vers le Nord (figure 4). En Manche Est, la marée est de type essentiellement semi-diurne, où les ondes M2 (influence lunaire de période 12h24) et S2 (influence solaire de période 12h) sont prédominantes. La marée sur les côtes de France présente ainsi chaque jour deux pleines mers et deux basses mers se succédant avec un intervalle moyen de 6 heures 13 minutes. La propagation de l'onde de marée, dans La Manche, est accompagnée d'une forte augmentation du marnage qui atteint en moyenne 9 mètres dans la Baie du Mont Saint-Michel, et 7 mètres à Dieppe.

La carte cotidale et d'isomarnage (voir figure 4 ci-dessous) montre :

- heure par heure, les lignes (de couleur blanche) d'égal décalage en temps par rapport à l'heure de la pleine mer à Brest (courbe zéro),
- des plages de couleurs représentant les marnages (en cm), pour une marée de vive-eau moyenne (coefficient 95), les labels d'isomarnage étant indiqués par des traits noirs.

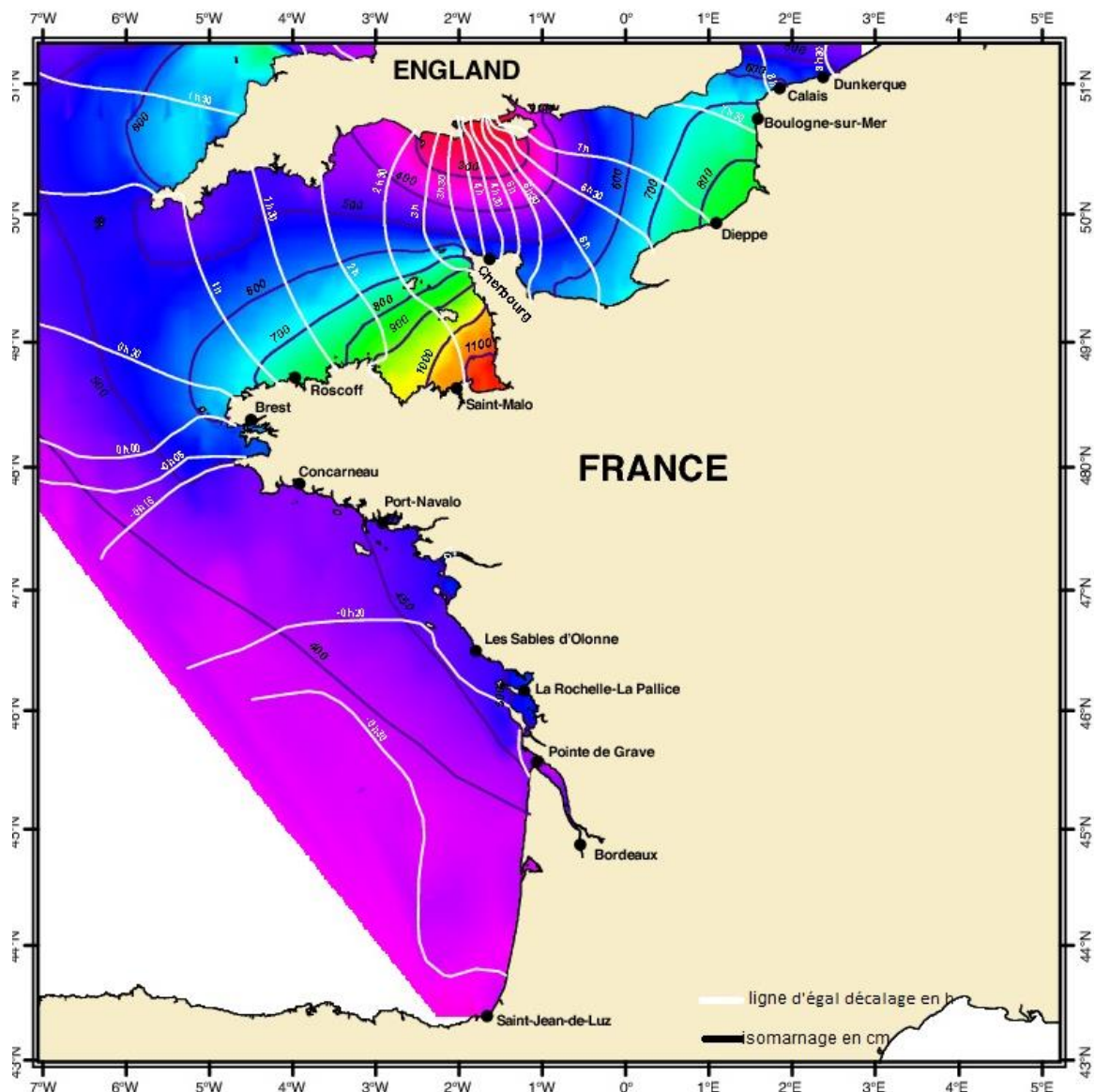


Figure 4 : Carte cotidiale et isomarnage coefficient 95 (source SHOM).

Les courants de marée

Les oscillations horizontales des particules d'eau sous l'effet unique de la marée sont appelées courants de marée.

En un point donné, les courants de surface peuvent différer des courants au fond. Les courants de marée sont responsables du mélange sur la verticale des masses d'eau et permettent d'expliquer la quasi-homogénéité verticale observée en Manche, à l'exception du nord de la Manche occidentale. Les effets de frottement sur le fond peuvent affecter l'intensité et la direction des courants au fond, on note en général une avance d'environ une heure des renverses des courants près du fond par rapport à la surface.

La variabilité spatiale des courants est fortement influencée par la bathymétrie et certaines configurations morphologiques de la côte sont à l'origine de phénomènes particuliers :

l'augmentation de la vitesse des courants dans les goulets et au niveau des caps, les phénomènes de remplissage et vidage des baies, l'asymétrie du flot et du jusant à l'embouchure des estuaires. Les apports fluviaux sont susceptibles de perturber ponctuellement les courants.

Il existe dans toute La Manche orientale de forts courants de marée. Le flot porte au Nord-Est, et le jusant au Sud-Ouest ; au milieu, la force du courant varie entre 1,5 et 4 nœuds. Les maximums de courant se font sentir souvent (mais pas toujours !) lors des pleines mers et des basses mers. En maints endroits, le courant perd son caractère alternatif, prend un caractère giratoire, portant successivement dans toutes les directions.

Des atlas de courants de marée décrivant cette dynamique existent et sont disponibles sous www.diffusion.shom.fr. La production des atlas de courant de marée utiles aux navigateurs est issue de la modélisation des courants de marée (vitesse et direction) en zone côtière, modélisation ne prenant en compte que le phénomène de la marée (attraction gravitationnelle). Les atlas des courants de marée couvrant la zone d'étude sont le n°561 (Baie de Seine de Cherbourg à Fécamp) et le n°557 (Pas de calais- Baie de Somme de Fécamp à Dunkerque). Ces atlas permettent de visualiser les champs de courant de marée en surface à chaque heure de marée, en vive-eau (VE - coefficient 95) et morte-eau moyennes (ME - coefficient 45). Pour chaque secteur de l'atlas, douze cartes des courants de surface montrent, à des intervalles d'une heure, un cycle typique de la marée semi-diurne. Les cartes sont en projection Mercator. Des cartes de courants maximum en VE sont également présentées ci-après (figure 5).

Les courants marins réels

Les modèles de courants de marée ne prennent en compte que l'action de la marée sur le milieu, mais n'intègrent pas en particulier les effets météorologiques (vents, pressions, échanges air/mer) ou hydrologiques (apports continentaux, précipitations...). La connaissance de la dynamique et de la circulation océanique réelle, en tout point du domaine et à chaque instant, est aujourd'hui impossible, comme il est impossible de connaître avec exactitude en tout point et à chaque instant les conditions météorologiques, compte tenu de leur variabilité spatio-temporelle forte et permanente. L'analogie avec la prévision météorologique peut être faite pour ce qui est de la prévision océanographique, même si les échelles de temps sont un peu différentes.

Aussi, les prévisionnistes du domaine océanique ont-ils développé des modèles océanographiques de prévision des conditions du milieu, en courants, température, salinité, hauteurs d'eau, etc...

Modèles de prévision

C'est ainsi qu'il existe des modèles de prévision des courants, intégrant différents forçages en entrée du modèle numérique (météo, modèle global océanographique, débits fluviaux, marée). Les prévisions du modèle HYCOM3D, développé par le Shom, sont accessibles chaque jour sous www.data.shom.fr.

Ces prévisions océanographiques sont fournies sur ce site sous 2 formes :

- les cartes « hydrodynamique 3D moyenne journalière » représentent l'évolution de la situation en température, salinité, vitesse et direction des courants, sur 50 immersions (dont la surface) et moyennées sur la journée.

- Les données « Hydrodynamique surface horaire » représentent l'évolution de la situation en surface et à haute fréquence temporelle (horaire).

Les mesures de courants

Enfin, il existe un certain nombre de mesures in situ de courants, dédiées à divers besoins de connaissance du milieu (validation des modèles de courants de marée ou des modèles de prévision océanographiques, études d'impact, etc). L'inconvénient de ces mesures est qu'elles sont ponctuelles (à une position géographique donnée) et ne reflètent que la connaissance très locale pour une période de temps très limitée.

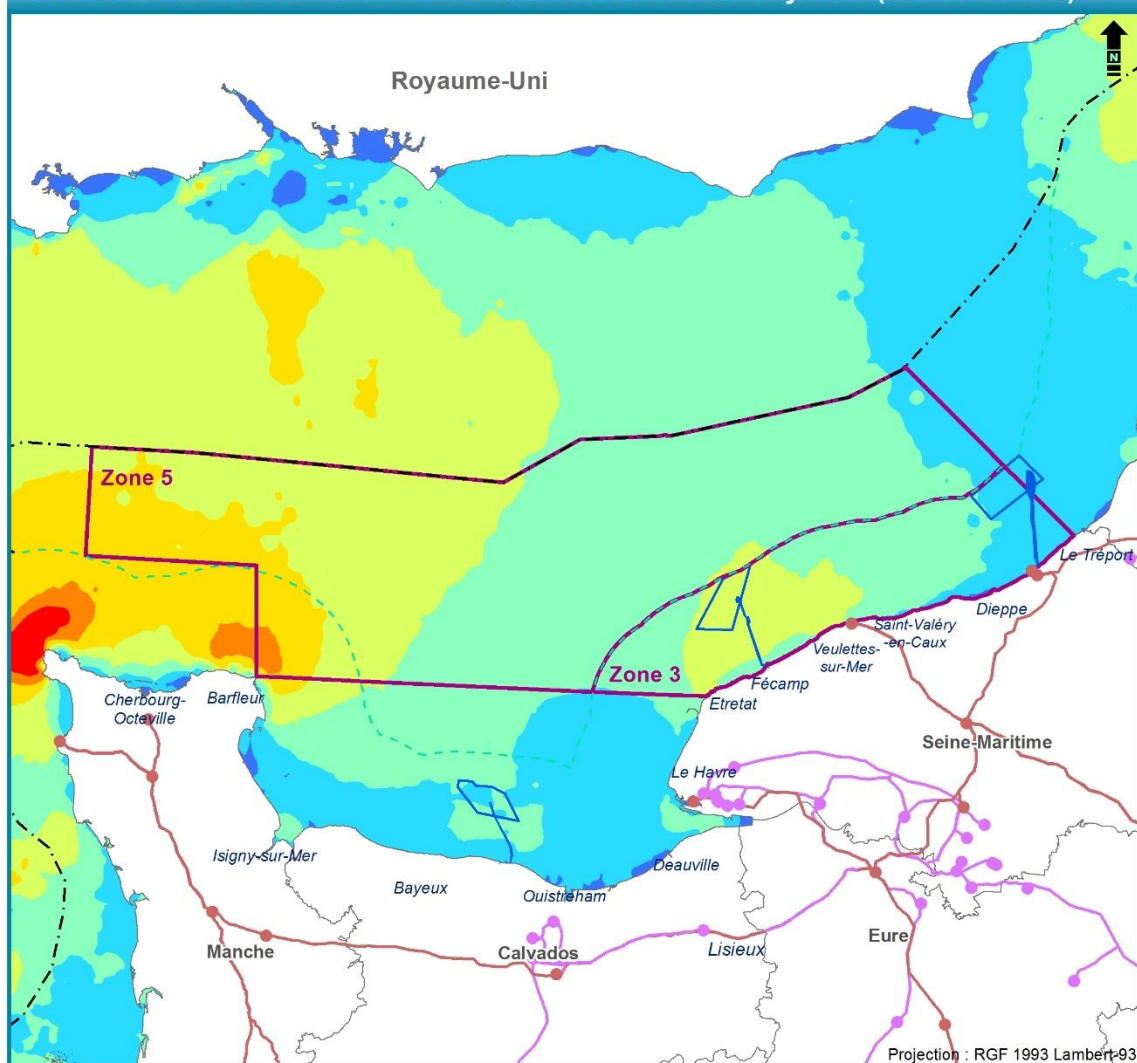
Les mesures par profileur ADCP (en rouge sur la carte) sont relativement récentes et permettent une description de la dynamique sur la colonne d'eau située au-dessus de l'appareil. Les mesures ponctuelles (en bleu), fournissent des informations monocouche de courant au niveau du capteur. D'une manière générale, les mouillages équipant ces instruments sont posés sur le fond et orientés vers la surface.

Remarque : Les périodes effectives de mesures ne sont pas toutes les mêmes. En effet, ces mesures de courant sont effectuées si possible sur des durées de 15 jours minimum (contrainte imposée pour exploiter les informations de marée nécessaires pour les ouvrages nautiques). Cependant, selon les conditions de mise à l'eau et les périodes de travaux sur zone, ces durées d'acquisition peuvent varier.

Les sites de mesures disponibles au Shom sont issus de campagnes de mesures en mer effectuées entre 1980 et 2016.

Conclusion

La connaissance fine à chaque instant et en tout point des conditions de courant est rendue impossible du fait de la forte variabilité du milieu océanique et de la complexité de la région. Aussi, les approches multiples combinant des mesures, des modèles statistiques simplistes (courants de marée) et des systèmes de prévision plus élaborés permet-elle d'approcher une certaine connaissance du milieu, certes imparfaite et incomplète. On retiendra néanmoins que s'agissant de la région de la Manche, le phénomène de la marée y est le principal moteur des courants qui s'y produisent, et les atlas de courants de marée en donnent donc une assez bonne représentation.



Zones de vocation énergies marines renouvelables (EMR) du Document Stratégique de Façade (DSF):

- Zone 3: Côte d'Albâtre et ses ouverts
- Zone 5: Large baie de Seine

Barnabos Poste éventuel de raccordement électrique

- Eolien posé: site attribué ou en projet
- Fuseau de raccordement des parcs attribués

--- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats

- - - Limite extérieure de la mer territoriale (12M)

Poste électrique

- 225 kV
- 400 kV

Ligne électrique

- 225 kV
- 400 kV

Vitesses maximales de courant de marée en VE (95)

- 0 1 2 3 4 5 6 7 noeuds

Sources:

MTES: Limites EMR
Shom: Limites maritimes, courants de marée
RTE: lignes, postes RTE, zones de raccordement
EEA: Contours pays étrangers
IGN: Limites administratives terrestres

Pour en savoir plus :

www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Réalisation: Shom- Septembre 2019

Figure 5 : Carte d'intensité maximum du courant de marée en vive-eau moyenne (coefficient 95)

(Données : Shom 2019 à partir des atlas des courants de marée des côtes de France Baie de Seine (en cours de réédition) et Pas de Calais - Baie de Somme (2014) ; issus du modèle numérique Telemac 3D et dont seule la couche de surface est présentée ci-dessus)

Houle, vagues et état de mer

De par sa localisation, la macrozone est protégée des importantes houles provenant de l'Atlantique, ainsi que des houles provenant de la mer du Nord. Les états de mer sur la macrozone sont donc principalement dus au vent local. Les fetchs (distance sur laquelle le vent est susceptible de faire croître les vagues) sont relativement courts dans l'ensemble des directions. La côte française empêche le développement de vagues importantes provenant du sud, du sud-ouest et du sud-est, même en cas de fort coup de vent provenant de ces directions. Seuls les vents d'ouest-nord-ouest, de nord et de nord-est permettent le développement d'état de mer relativement énergétiques.

Peu d'observations de vagues sont disponibles sur la macrozone. Seuls trois points de mesures au large du Havre sont disponibles grâce au réseau d'observation CANDHIS¹. Ces mesures sont assez anciennes et leur localisation proche de la côte ne permet pas une analyse de la macrozone. Dans cette étude, nous nous appuyons donc sur les résultats du modèle spectral d'état de mer WaveWatchIII implémenté sur la grille de calcul MANGAS². Le modèle est forcé par les spectres de vagues au large ainsi que les champs de vent de la réanalyse ERA5 réalisée par le Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT). Le modèle prend en compte l'effet de la marée avec des courants et hauteurs d'eau variables au cours du temps, issus de prédictions harmoniques. Le modèle a été rejoué sur la période 2000-2017 et a été validé à l'aide des observations des satellites altimétriques, ainsi que les observations des bouées du réseau CANDHIS. L'ensemble de l'analyse proposée par la suite s'appuie sur ces données modélisées.

Une analyse spatialisée de la macrozone a d'abord été réalisée. La *figure 7* montre les hauteurs significatives des vagues et leur direction moyenne en moyenne sur l'ensemble de la période rejouée et la *figure 8* montre les hauteurs significatives maximales sur cette même période avec la direction moyenne des vagues correspondante. La hauteur significative moyenne des vagues est inférieure à 2 mètres sur l'ensemble de la macrozone, avec des vagues venant préférentiellement de l'ouest à l'ouest-nord-ouest. Les hauteurs significatives maximales modélisées sur la macrozone dépassent les 6 mètres pour la partie de la macrozone la plus au large. Le cycle saisonnier est très marqué sur la macrozone avec des hauteurs significatives moindres durant l'été, inférieures à 1 mètre en moyenne (voir *figure 11*), et plus importantes en hiver, pouvant atteindre 1,8 mètres en moyenne sur les mois de Décembre à Février (voir *figure 9*). En général, on observe une décroissance de la taille des vagues avec la diminution de la profondeur, liée principalement à la dissipation des vagues par frottement sur le fond, puis par déferlement en eau très peu profonde.

Cinq points du modèle ont ensuite été choisis pour poursuivre plus finement l'analyse de la macrozone (cf. *figure 6*). Le *tableau 1* donne les statistiques de hauteur significative et de période moyenne des vagues. La *figure 13* montre les corrélogrammes pour chacun de ces 5 points entre la hauteur significative des vagues et leur période, la colonne de gauche représente les corrélogrammes pour l'état de mer total, la colonne du milieu pour la mer de vent³ seulement et la colonne de droite pour la houle⁴ principale. La *figure 14* représente les roses de vagues (hauteurs significatives en

¹<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>

²La grille non-structurée MANGAS couvre l'ensemble des côtes françaises de la Mer du Nord au Golfe de Gascogne, avec une résolution de 10 km au large (au-delà du talus continental et en Mer du Nord) pour se raffiner à une résolution de 200m au niveau des côtes. Il s'agit de la grille de calcul opéré par Météo-France pour la Vigilance Vague-Submersion.

³La mer de vent correspond aux vagues en cours de développement sous l'effet du vent local.

⁴La houle correspond à des vagues créées ailleurs et qui se sont propagées.

fonction de la direction) à ces mêmes cinq points pour l'état de mer total (colonne de gauche), pour la mer de vent (colonne du milieu) et pour la houle principale (colonne de droite). Comme attendu, l'état de mer sur la macrozone est principalement constitué d'une mer de vent avec une période moyenne des vagues faible, généralement autour de 5 secondes, et des hauteurs significatives relativement faibles. Lors des coups de vent forts, cette mer de vent peut cependant être assez énergétique, avec des vagues pouvant dépasser les 5 mètres de hauteur significative. Ces événements restent cependant statistiquement assez rares. Une faible houle d'ouest vient généralement s'ajouter à cette mer de vent. Les corrélogrammes montrent que cette houle a préférentiellement une période pic⁵ autour de 5 ou 10 secondes. Dans le premier cas, il s'agit de la houle résiduelle des mers de vents développée dans la macrozone (ou proche) les jours précédents et qui ont des hauteurs significatives faibles, généralement de l'ordre de quelques centimètres et pouvant atteindre environ 1 mètre dans de rares cas. Les houles avec des périodes pic autour de 10 secondes sont quant à elle issues de vagues générées plus loin et qui se sont propagées jusqu'en baie de Seine. Ces houles ont généralement des hauteurs significatives de l'ordre de quelques dizaines de centimètres mais peuvent atteindre 2,5 mètres dans de rares cas.

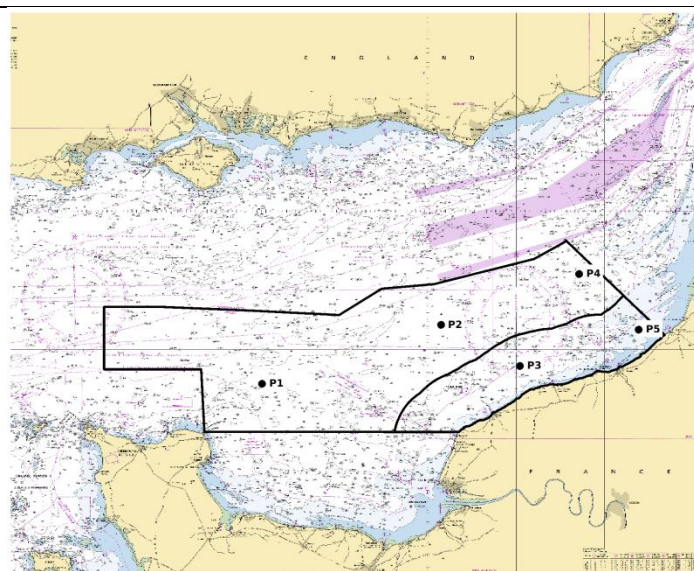


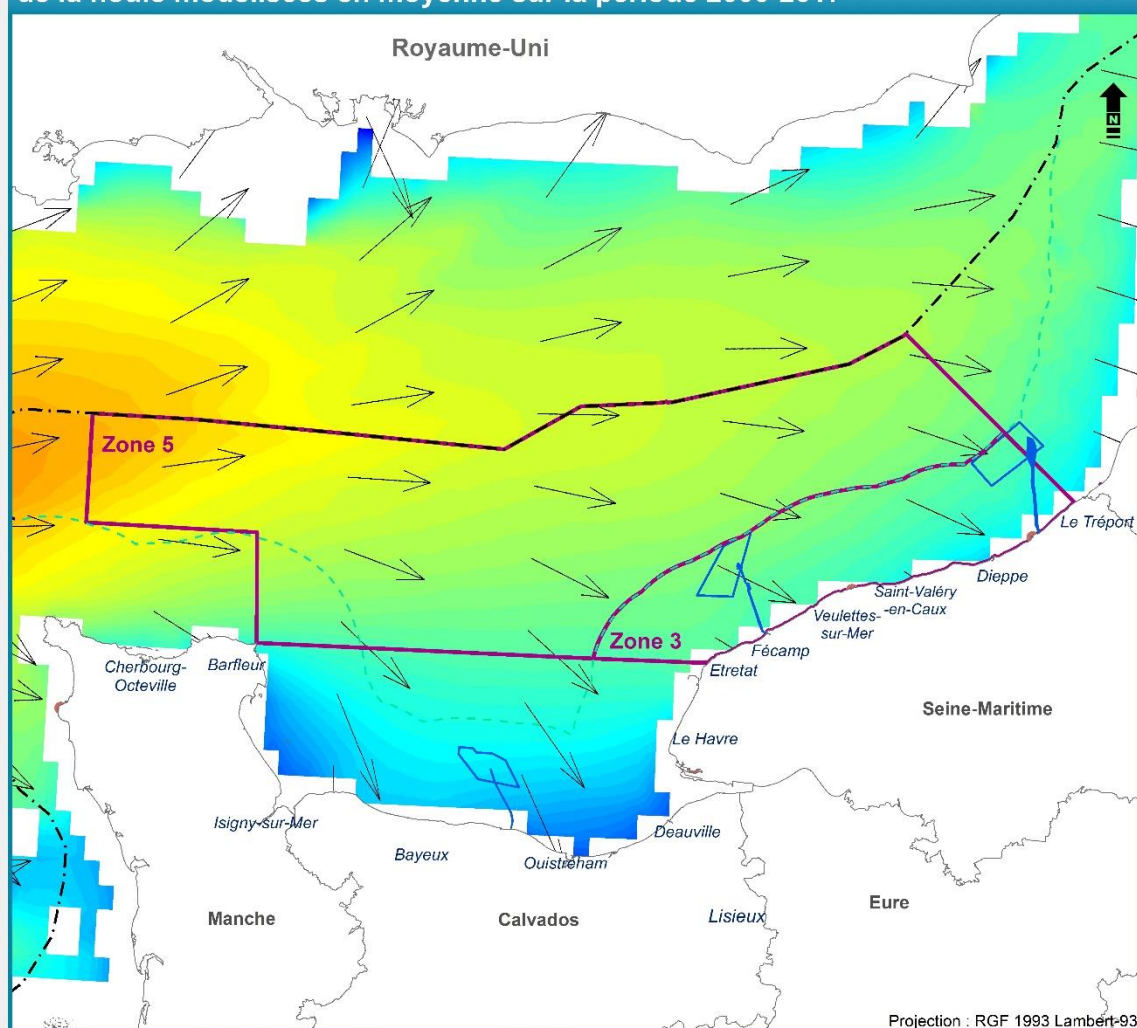
Fig 6 : Carte présentant la position des cinq points choisis pour l'analyse fine des états de mer

Mesh	H_s [m]					$T_{m,(0,-1)}$ [s]				
Node	max	mean	median	90 ^e perc.	99 ^e perc.	max	mean	median	90 ^e perc.	99 ^e perc.
P1	5.48	1.19	1.02	2.19	3.41	10.86	5.62	5.47	7.12	8.77
P2	5.73	1.25	1.05	2.31	3.60	11.92	5.75	5.60	7.34	9.15
P3	4.81	1.05	0.88	1.97	3.05	11.64	5.39	5.25	6.67	8.42
P4	5.60	1.17	0.98	2.21	3.46	11.48	5.72	5.57	7.25	9.08
P5	4.43	0.92	0.77	1.73	2.67	12.21	5.56	5.38	7.05	9.19

Tableau 1 : Statistiques de hauteurs significatives (à gauche) et de période moyenne des vagues (à droite) modélisées sur la période 2000-2017 pour les 5 points de modèle analysés.

⁵ La période pic correspond à la période du pic d'énergie des vagues.

Hauteurs significatives en mètres (couleurs) et directions moyennes (flèches) de la houle modélisées en moyenne sur la période 2000-2017



Zones de vocation énergies marines renouvelables (EMR) du Document Stratégique de Façade (DSF):

- Zone 3: Côte d'Albâtre et ses ouverts
- Zone 5: Large baie de Seine

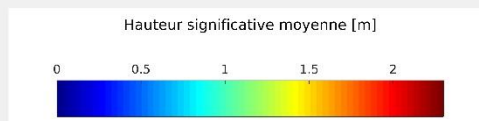
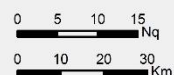
Barnabos Poste éventuel de raccordement électrique

- Eolien posé: site attribué ou en projet
- Fuseau de raccordement des parcs attribués
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- - - Limite extérieure de la mer territoriale (12M)

Poste électrique	Ligne électrique
● 225 kV	— 225 kV
● 400 kV	— 400 kV

Sources:

MTES: Limites EMR
Shom: Limites maritimes, Houle: Modèle MANGAS
RTE: lignes, postes RTE, zones de raccordement
EEA: Contours pays étrangers
IGN: Limites administratives terrestres



Pour en savoir plus :

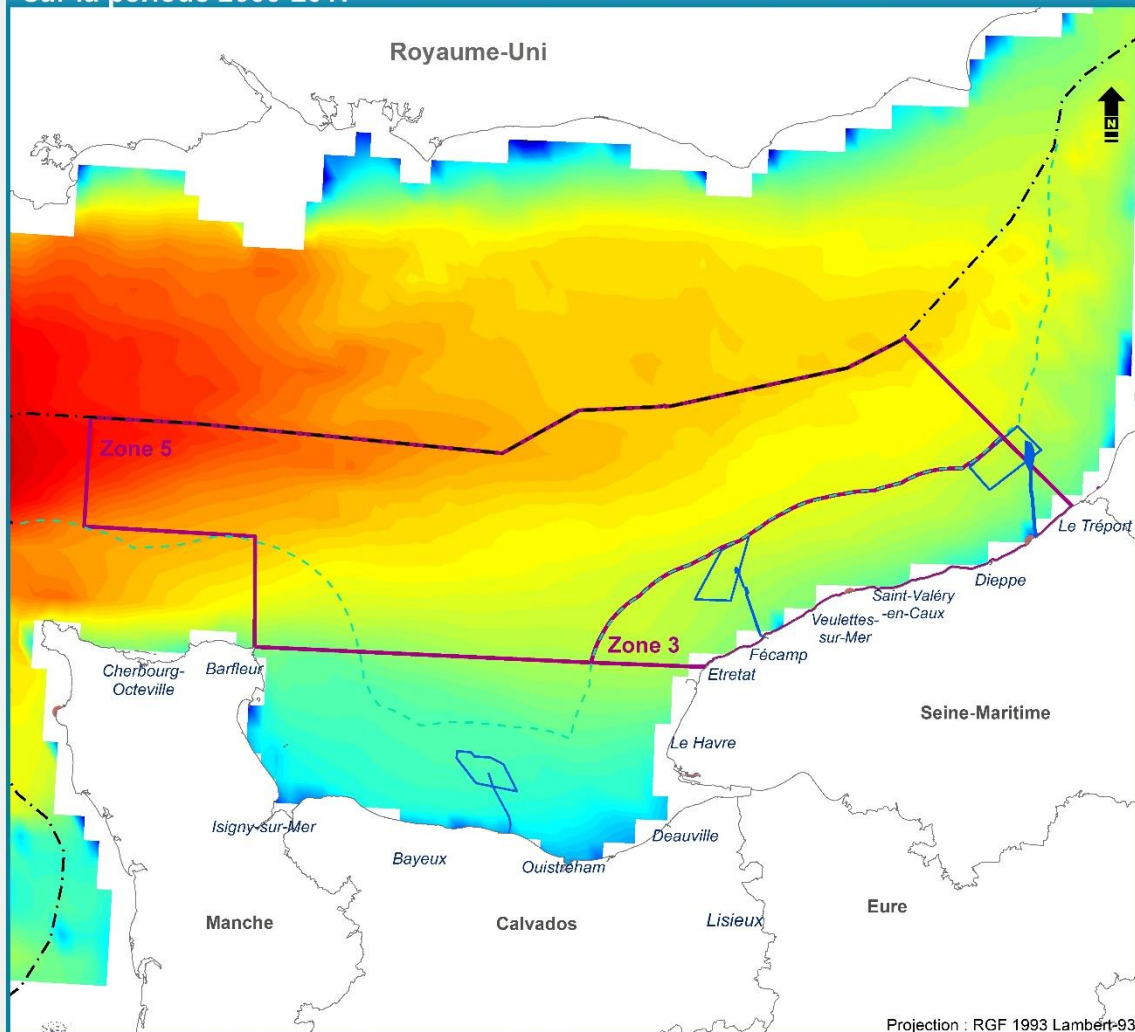
www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Réalisation: Cerema - Mai 2019
Shom - Septembre 2019

Figure 7 : Carte des hauteurs significatives (couleurs) et directions moyennes (flèches) modélisées en moyenne sur la période 2000-2017 avec le modèle MANGAS

Débat public éolien en mer 2019

Hauteurs significatives en mètres (couleurs) de la houle maximale modélisées sur la période 2000-2017



Zones de vocation énergies marines renouvelables (EMR) du Document Stratégique de Façade (DSF):

- Zone 3: Côte d'Albâtre et ses ouverts
- Zone 5: Large baie de Seine

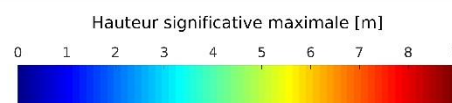
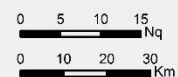
Barnabos Poste éventuel de raccordement électrique

- Eolien posé: site attribué ou en projet
- Fuseau de raccordement des parcs attribués
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- - - Limite extérieure de la mer territoriale (12M)

Poste électrique	Ligne électrique
● 225 kV	— 225 kV
● 400 kV	— 400 kV

Sources:

MTES: Limites EMR
Shom: Limites maritimes, Houle: Modèle MANGAS
RTE: lignes, postes RTE, zones de raccordement
EEA: Contours pays étrangers
IGN: Limites administratives terrestres



Pour en savoir plus :

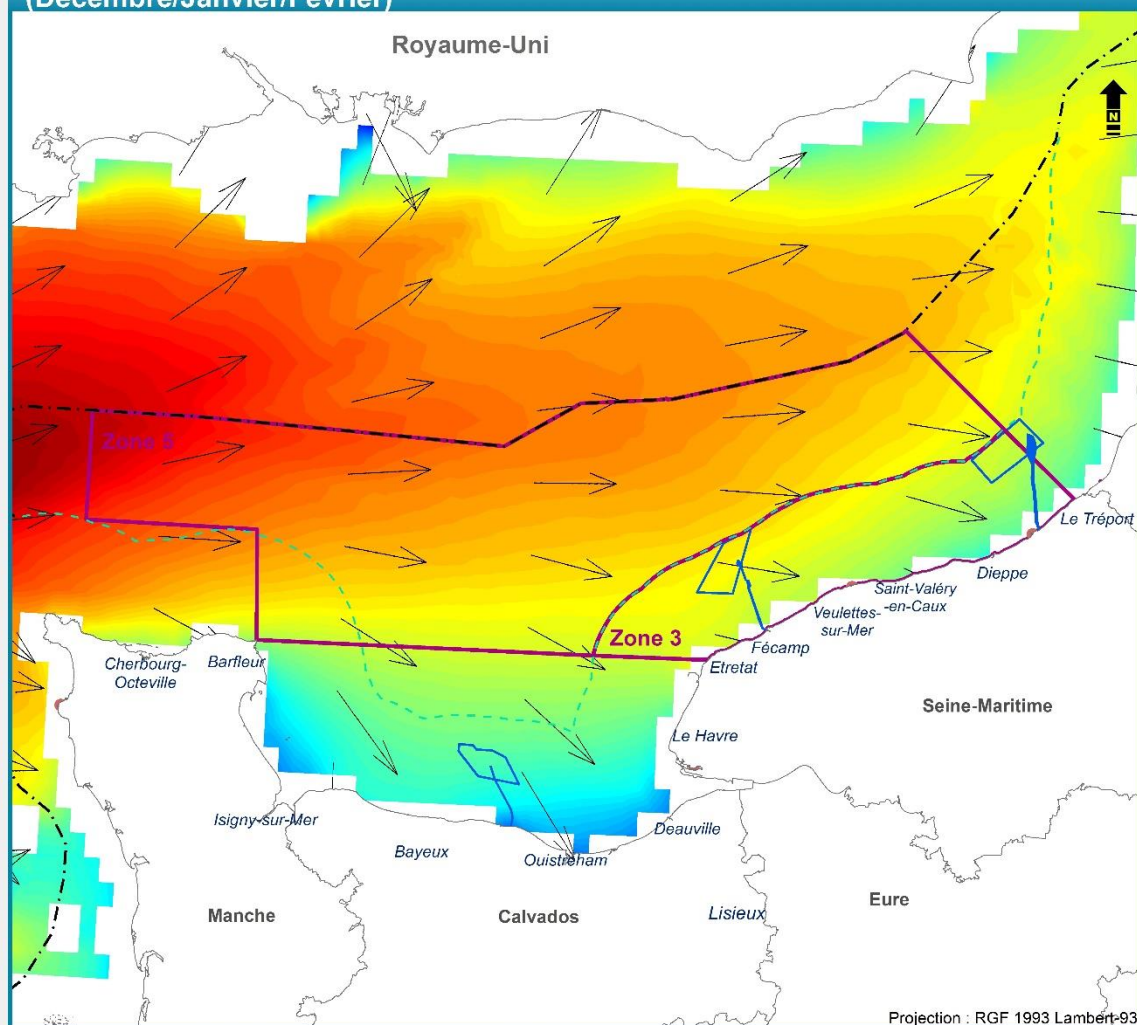
www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Réalisation: Cerema - Mai 2019
Shom - Septembre 2019

Figure 8 : Carte des hauteurs significatives maximales (couleurs) et directions moyennes correspondantes (flèches) modélisées sur la période 2000-2017 avec le modèle MANGAS

Débat public éolien en mer 2019

Hauteurs significatives en mètres (couleurs) et directions moyennes (flèches) de la houle modélisées sur la période 2000-2017 en hiver (Décembre/Janvier/Février)



Zones de vocation énergies marines renouvelables (EMR) du Document Stratégique de Façade (DSF):

- Zone 3: Côte d'Albâtre et ses ouverts
- Zone 5: Large baie de Seine

Barnabos Poste éventuel de raccordement électrique

- Eolien posé: site attribué ou en projet
- Fuseau de raccordement des parcs attribués
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- - - Limite extérieure de la mer territoriale (12M)

Poste électrique

- 225 kV
- 400 kV

Ligne électrique

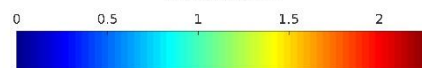
- 225 kV
- 400 kV

Sources:

MTES: Limites EMR
Shom: Limites maritimes, Houle: Modèle MANGAS
RTE: lignes, postes RTE, zones de raccordement
EEA: Contours pays étrangers
IGN: Limites administratives terrestres

0 5 10 15 Nq
0 10 20 30 Km

Hauteur significative moyenne [m]
(Dec./Jan./Fev.)



Pour en savoir plus :

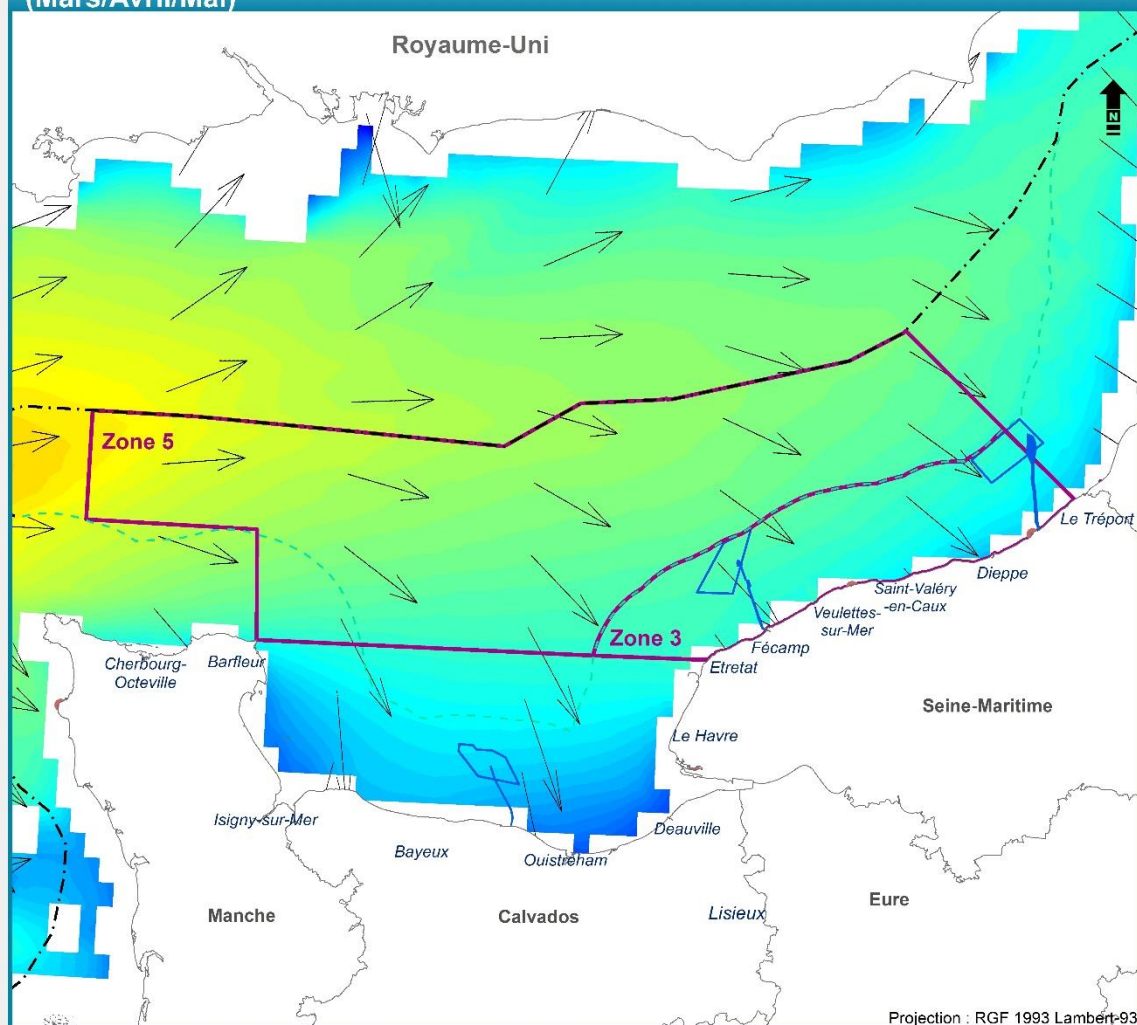
www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Réalisation: Cerema - Mai 2019
Shom - Septembre 2019

Figure 9 : Carte des hauteurs significatives (couleurs) et directions moyennes (flèches) modélisées en moyenne sur la période 2000-2017 avec le modèle MANGAS en hiver

Débat public éolien en mer 2019

Hauteurs significatives en mètres (couleurs) et directions moyennes (flèches) de la houle modélisées sur la période 2000-2017 au printemps (Mars/Avril/Mai)



Zones de vocation énergies marines renouvelables (EMR) du Document Stratégique de Façade (DSF):

- Zone 3: Côte d'Albâtre et ses ouverts
- Zone 5: Large baie de Seine

Barnabos Poste éventuel de raccordement électrique

- Eolien posé: site attribué ou en projet
- Fuseau de raccordement des parcs attribués
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- - - Limite extérieure de la mer territoriale (12M)

Poste électrique

- 225 kV
- 400 kV

Ligne électrique

- 225 kV
- 400 kV

Sources:

MTES: Limites EMR
Shom: Limites maritimes, Houle: Modèle MANGAS
RTE: lignes, postes RTE, zones de raccordement
EEA: Contours pays étrangers
IGN: Limites administratives terrestres

Hauteur significative moyenne [m]
(Mar./Avr./Mai)



Pour en savoir plus :

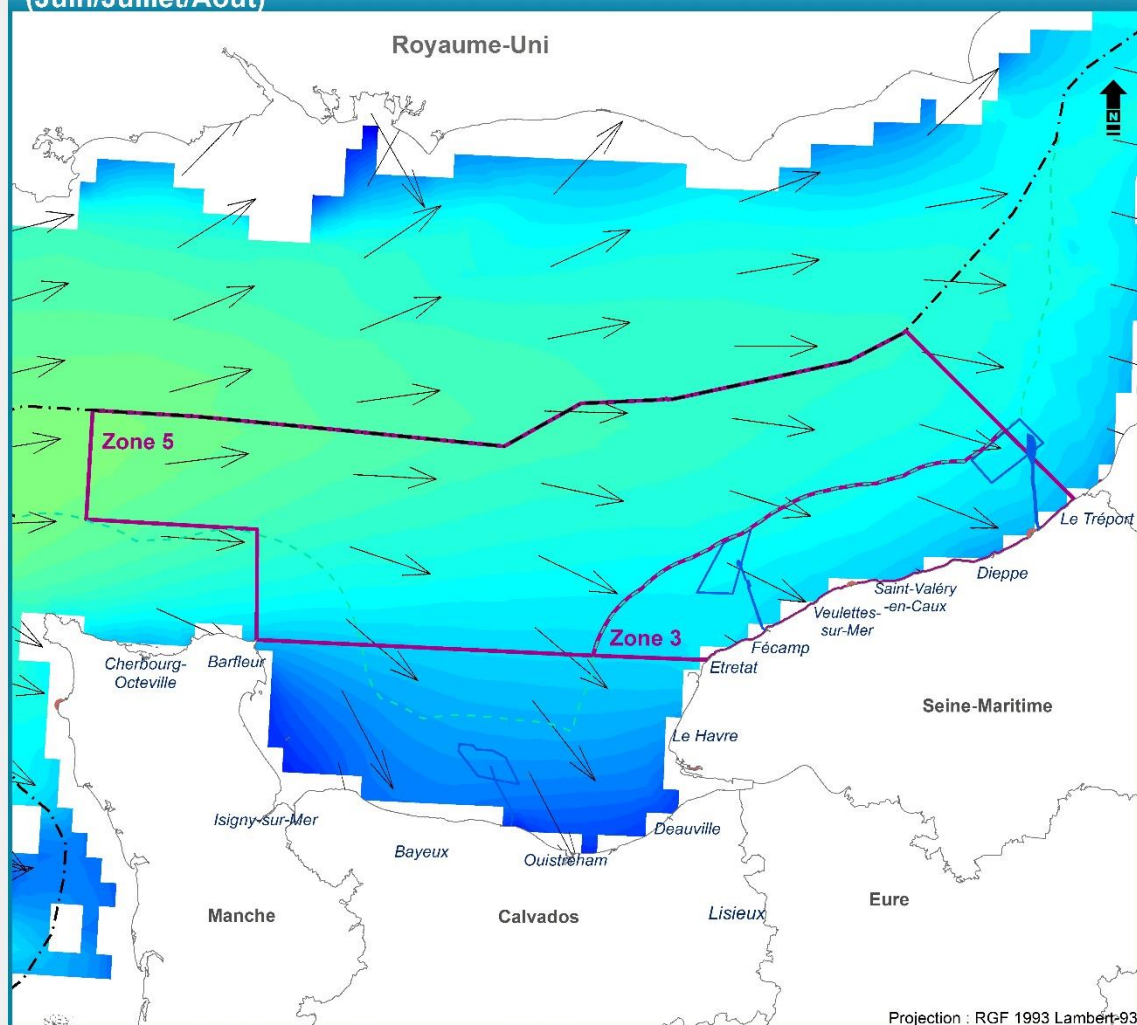
www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Réalisation: Cerema - Mai 2019
Shom - Septembre 2019

Figure 10 : Carte des hauteurs significatives (couleurs) et directions moyennes (flèches) modélisées en moyenne sur la période 2000-2017 avec le modèle MANGAS au printemps

Débat public éolien en mer 2019

Hauteurs significatives en mètres (couleurs) et directions moyennes (flèches) de la houle modélisées sur la période 2000-2017 en été (Juin/Juillet/Août)



Zones de vocation énergies marines renouvelables (EMR) du Document Stratégique de Façade (DSF):

- Zone 3: Côte d'Albâtre et ses ouverts
- Zone 5: Large baie de Seine

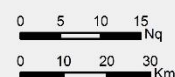
Barnabos Poste éventuel de raccordement électrique

- Eolien posé: site attribué ou en projet
- Fuseau de raccordement des parcs attribués
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- - - Limite extérieure de la mer territoriale (12M)

Poste électrique	Ligne électrique
● 225 kV	— 225 kV
● 400 kV	— 400 kV

Sources:

MTES: Limites EMR
Shom: Limites maritimes, Houle: Modèle MANGAS
RTE: lignes, postes RTE, zones de raccordement
EEA: Contours pays étrangers
IGN: Limites administratives terrestres



Hauteur significative moyenne [m]
(Juin/Juil./Août)



Pour en savoir plus :

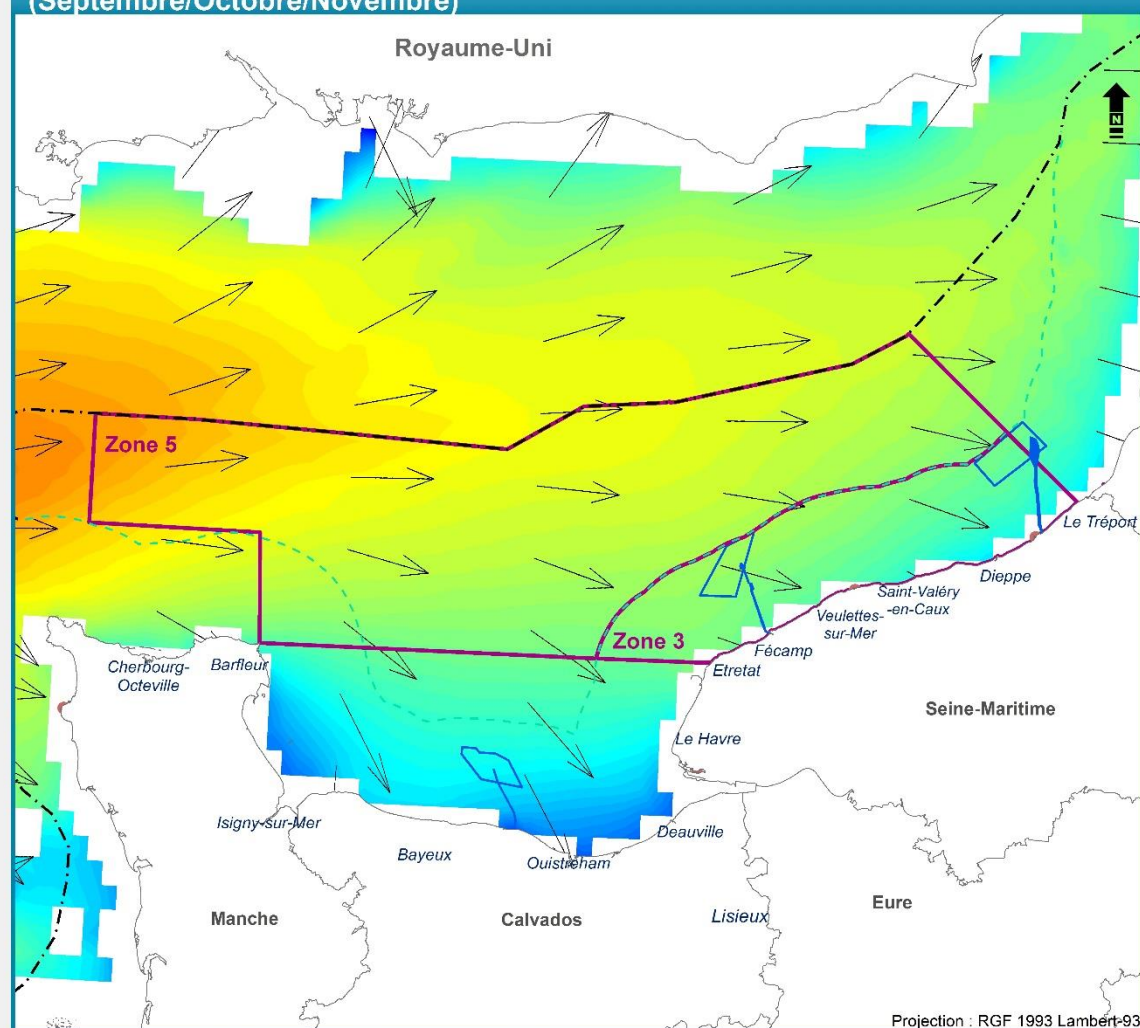
www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Réalisation: Cerema - Mai 2019
Shom - Septembre 2019

Figure 11 : Carte des hauteurs significatives (couleurs) et directions moyennes (flèches) modélisées en moyenne sur la période 2000-2017 avec le modèle MANGAS en été

Débat public éolien en mer 2019

Hauteurs significatives en mètres (couleurs) et directions moyennes (flèches) de la houle modélisées sur la période 2000-2017 en automne (Septembre/Octobre/Novembre)



Zones de vocation énergies marines renouvelables (EMR) du Document Stratégique de Façade (DSF):

- Zone 3: Côte d'Albâtre et ses ouverts
- Zone 5: Large baie de Seine

Barnabos Poste éventuel de raccordement électrique

- Eolien posé: site attribué ou en projet
- Fuseau de raccordement des parcs attribués
- Délimitation maritime établie par un accord entre Etats
- - - Limite extérieure de la mer territoriale (12M)

Poste électrique

- 225 kV
- 400 kV

Ligne électrique

- 225 kV
- 400 kV

Sources:

MTES: Limites EMR
Shom: Limites maritimes, Houle: Modèle MANGAS
RTE: lignes, postes RTE, zones de raccordement
EEA: Contours pays étrangers
IGN: Limites administratives terrestres

0 5 10 15 Nq
0 10 20 30 Km

Hauteur significative moyenne [m]
(Sep./Oct./Nov.)

0 0.5 1 1.5 2

Pour en savoir plus :

www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Réalisation: Cerema - Mai 2019
Shom - Septembre 2019



Figure 12 : Carte des hauteurs significatives (couleurs) et directions moyennes (flèches) modélisées en moyenne sur la période 2000-2017 avec le modèle MANGAS en automne

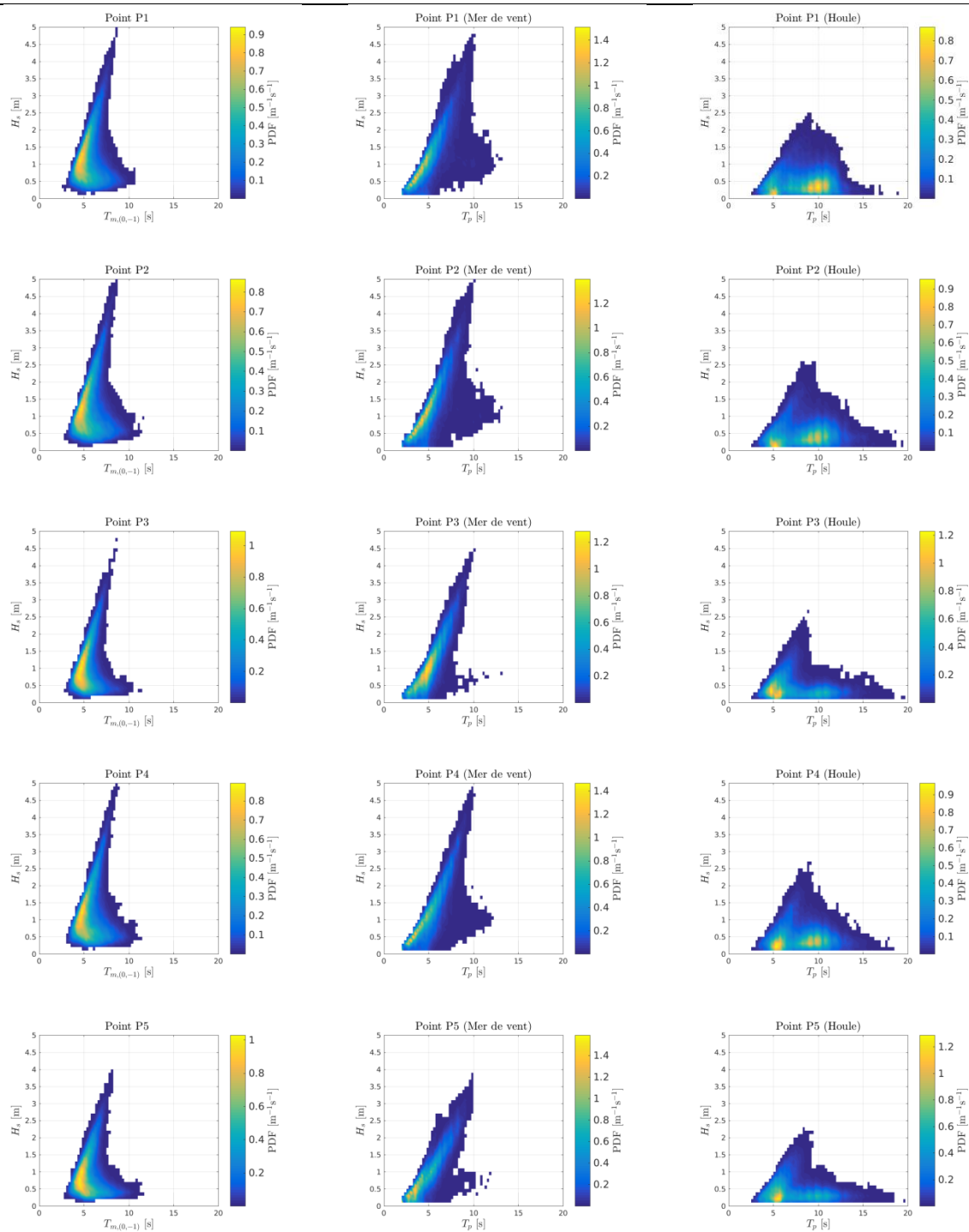


Figure 13 : Corrélogramme hauteurs significatives / périodes moyennes des vagues pour l'état de mer total (col. 1) ; Corrélogramme hauteurs significatives / périodes pics pour la mer de vent (col. 2) ; Corrélogramme hauteurs significatives / périodes pics pour la houle principale (col. 3). Les 5 lignes représentent les 5 points du modèle MANGAS analysés figurant au tableau 1.

