



**Description de l'état de la connaissance  
et des caractéristiques physiques  
de la macrozone éolien en mer située en Méditerranée  
(Occitanie et Sud PACA)**

Approbateur	mda@shom.fr
Date	Le 14/01/2021

Shom  
DSD/DAF  
CS 92803  
29228 BREST CEDEX 2

## TABLE DES MATIERES

Généralités .....	3
Bathymétrie.....	8
Sédimentologie.....	10
Hydrologie .....	12
Marée et courants.....	14
Houle, vagues et état de mer .....	19

## Introduction

Dans le cadre de la préparation du débat public sur les projets éoliens en mer Méditerranée, la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) du Ministère de la Transition Ecologique (MTE) 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 en Méditerranée, au large de l'Occitanie et au sud de la région PACA.

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 – D21 – France (Côte Sud) de la frontière espagnole au cap de l'Aigle sous [www.diffusion.shom.fr](http://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 »

### 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 multi-faisceau), 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 ancien. 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 (paléo-vallées), 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 la 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.
- ❖ **GLOSSAIRE marées/courants** :
  - ✓ 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.
  - ✓ Surcote/décote : Cette notion désigne la différence entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en présence de la marée astronomique seule (hauteur prédite). Lorsque cette différence est positive, on parle de surcote ; lorsqu'elle est négative, de décote.
  - ✓ Période de retour<sup>1</sup> : La période de retour correspond à l'intervalle moyen de temps qui sépare deux événements rares présentant des niveaux de mer supérieurs à un certain seuil.
- 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, d'identifier les masses d'eau d'origine différente et de 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. Le « **fetch** » correspond à la distance sur laquelle souffle un vent donné sur un plan d'eau sans rencontrer d'obstacles. La hauteur des vagues croît avec le fetch, l'intensité du vent et la durée de son action.

---

<sup>1</sup> Concerne également la thématique « houle et vagues »

- La **houle** correspond à des vagues générées ailleurs et qui se sont propagées.
- **L'état de la mer** représente les conditions d'agitation locale de la mer, due à la mer de vent et/ou à la houle.
- La **hauteur significative** ( $H_s$ ) correspond ici à la hauteur spectrale  $H_{m0}$ , définie comme quatre fois l'écart type de l'élévation de surface. La **période pic** ( $T_p$ ) est la période correspondant au pic 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** 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.

## 1. Description de la macrozone

La macrozone identifiée pour l'implantation de futurs sites éoliens en mer flottants comprend quatre zones situées dans le Golfe du Lion (zones A, B, C, D), réparties au large de la côte entre Saint-Cyprien et Fos-sur-Mer (voir figure 1).

Les zones A, B, C et D couvrent les superficies suivantes :

Zones	Surfaces
A	669 km <sup>2</sup>
B	1 398 km <sup>2</sup>
C	652 km <sup>2</sup>
D	635 km <sup>2</sup>

Un certain nombre d'informations nautiques relatives à cette portion des eaux françaises sont disponibles dans l'instruction nautique en référence.

La dynamique océanique qui préside dans cette région est essentiellement le fait de courants permanents et de courants de dérive dans un contexte de courants de marée faibles, du relief côtier, et des phénomènes météorologiques.

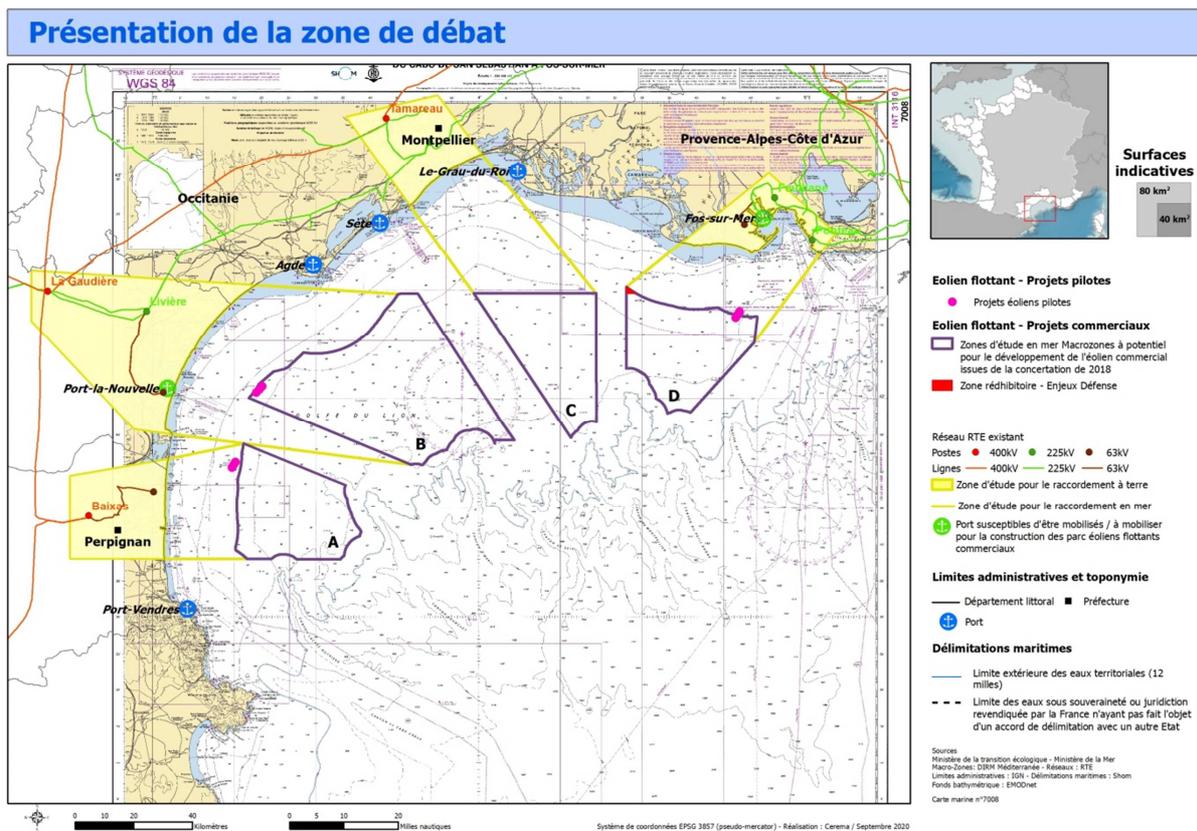


Figure 1 : Description de la macrozone EMR Méditerranée (Source : Shom 2020)

## **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 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 13 levés datant de la période 1937 à 2018 au 20 novembre 2020 (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. La majeure partie de la zone est bien couverte mais par des levés anciens.

Concernant les aspects relatifs à l'atterrage des câbles d'une future ferme EMR, les données traditionnelles bathymétriques précitées sont généralement insuffisantes. Pour cela nous disposons sur la zone de données topo-bathymétriques de type lidar aéroporté : produits Litto3D Languedoc Roussillon et PACA de 2009 à 2015 accessibles sur l'Espace de diffusion du Shom ([www.diffusion.shom.fr](http://www.diffusion.shom.fr)).

La connaissance bathymétrique peut être par ailleurs décrite par un modèle numérique de terrain (MNT) de façade du Golfe du Lion - Côte d'Azur, 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 [1] en 2015). Des levés postérieurs existent mais ne sont pas inclus dans ce MNT. S'ils permettent une meilleure connaissance de la zone (partielle du fait de leur emprise limitée), ils n'apportent en effet pas d'éléments substantiels dans la description morphologique de la zone. La macrozone se situe sur le plateau continental. Elle se caractérise par une morphologie assez stable avec une pente douce (0,2% environ) orientée nord-sud s'accroissant légèrement (0,5% environ) à l'approche de la marge méditerranéenne. Les profondeurs sont comprises entre 60 à 130 m.

# Bathymétrie

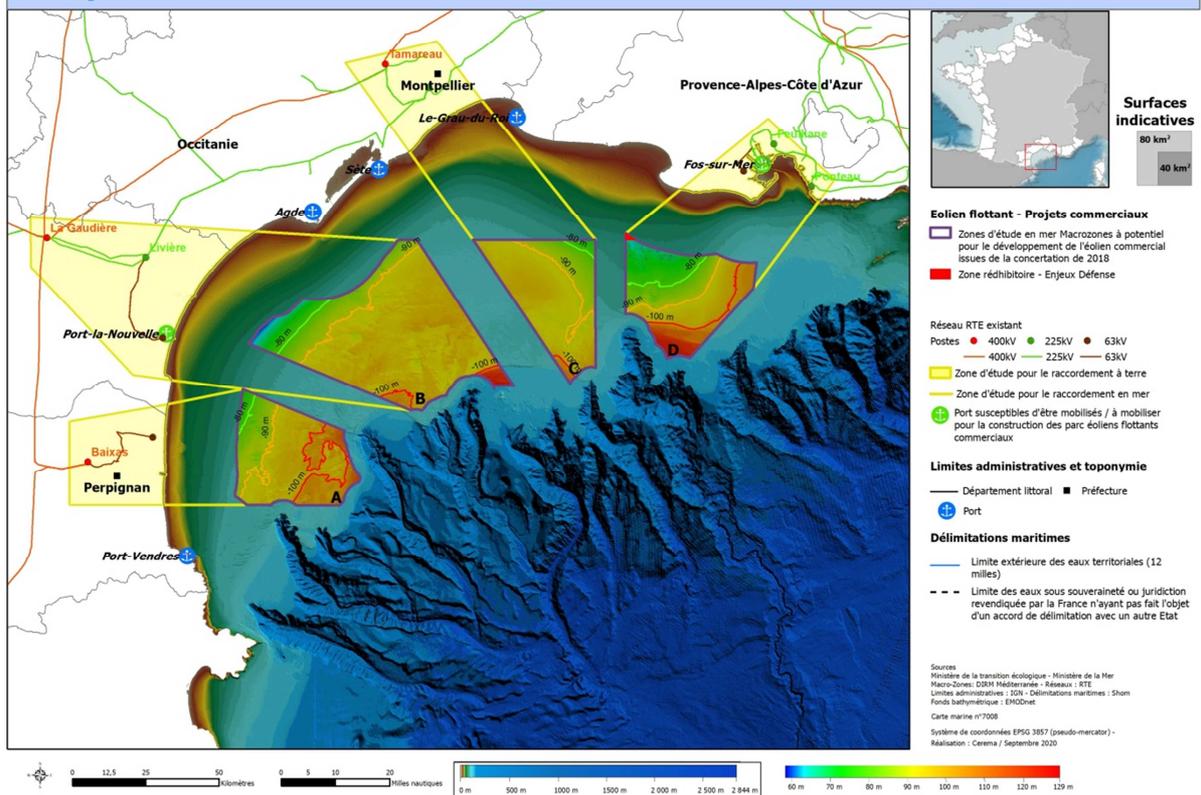


Figure 2 : Couverture bathymétrique générale de la zone EMR Méditerranée (Source : Shom 2020)

# Sédimentologie

## Nature des fonds

La carte sédimentaire produite sur la zone d'étude repose sur les prélèvements réalisés et les données d'imagerie acoustique acquises au cours des dernières décennies. Les cartes de ce secteur à 1/50 000 et 1/500 000, ont été publiées de 1970 à 2010. Le projet européen EMODnet a édité en 2019 une carte de substrat sédimentaire en s'appuyant notamment sur les données du Shom et de l'Ifremer. Les modèles sédimentaires de la zone sont issus des travaux de synthèse d'Aloïsi (1986), de Monaco et Aloïsi (2000), de Durrieu de Madron (2004). La carte de nature des fonds présentée ici (figure 3) constitue une synthèse de ces travaux. La région est caractérisée par la présence de posidonies près de la côte, derrière lesquelles se forment des bancs de sédiments mixtes et de sable fin puis graveleux jusqu'à 50 kilomètres des côtes. Cette zone sablo-graveleuse présente des profondeurs de 40m à 100m et des processus de dynamique sédimentaire. Plus au large, la vase (sédiments argileux comportant plus de 20% de particules inférieures à 0.05mm) alterne avec des sables vaseux (sables comportant de 5% à 20% de vases). A la limite externe de la plateforme continentale, d'anciens récifs rocheux bordent le talus vaseux et découpé de canyons qui se prolonge jusqu'à plusieurs milliers de mètres de profondeur, au-delà du Golfe du Lion.

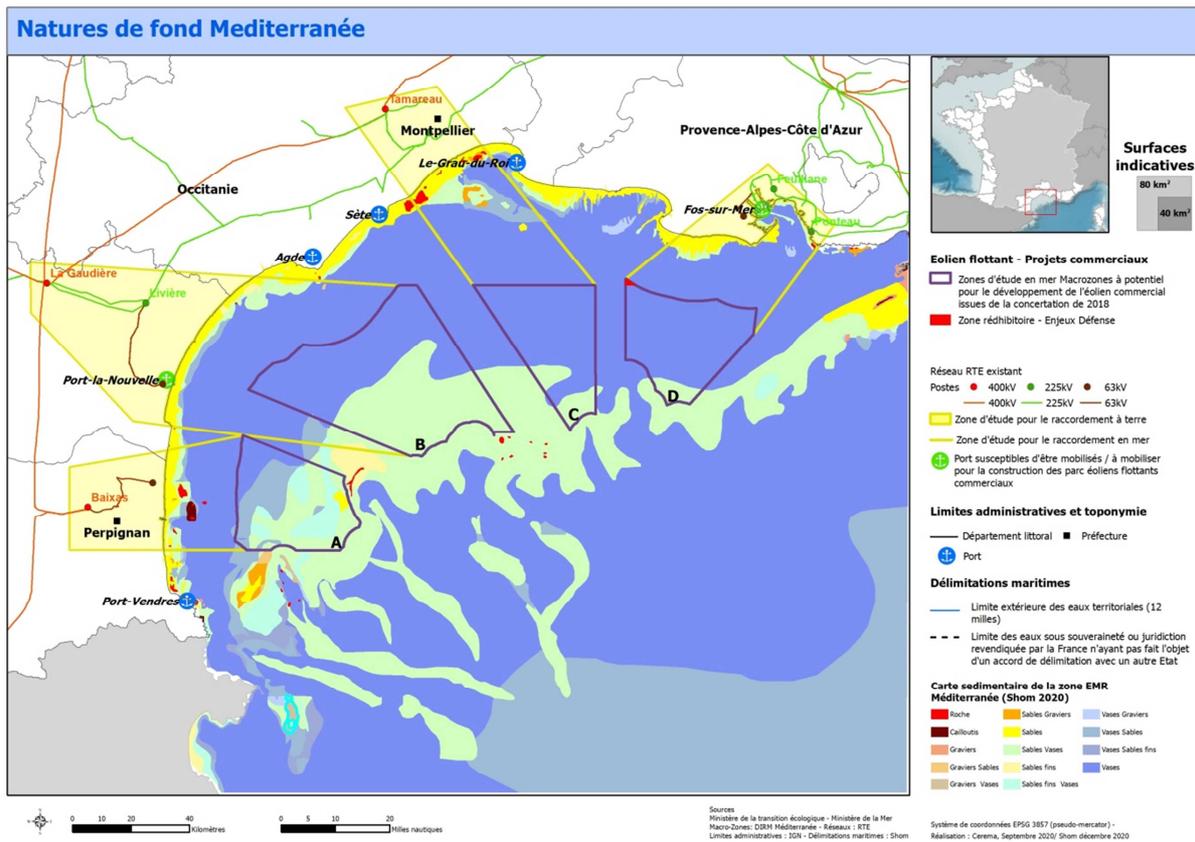


Figure 3 : Carte des natures de fond de la zone EMR Méditerranée (Source : Shom 2020)

## Épaisseur de sédiments de la zone EMR Méditerranée

Les sédiments du golfe du Lion s'organisent en une succession de dépôts superposés. Les dépôts les plus anciens datent de l'époque pré-messinienne, c'est-à-dire il y a environ 6 millions d'années. Cette organisation entraîne des épaisseurs de plusieurs centaines de mètres dans toutes les macro-zones. Contrairement aux sédiments récents qui sont meubles, les dépôts plus anciens sont généralement indurés. Ainsi, il est probable que les épaisseurs sédimentaires post-messinien de la figure 4 comprennent des sédiments indurés.

La zone A présente une épaisseur sédimentaire comprise entre 750 et 1000 m et est caractérisée par la plus forte présence de paléo-chenaux.

La zone B présente également des épaisseurs sédimentaires comprises entre 750 et 1000 m. La répartition des épaisseurs est assez hétérogène sur toute cette zone qui présente également plusieurs paléo-chenaux.

La zone C présente quant à elle des épaisseurs sédimentaires plus importantes pouvant atteindre jusqu'à 1300 m. La répartition des sédiments est homogène, avec les épaisseurs les plus faibles à la côte et un épaissement vers le large. Cette macro-zone est traversée par le paléo-chenal du Rhône.

Enfin, la zone D constitue la région caractérisée par les plus fortes variations d'épaisseur sédimentaire. En effet, celle-ci peut varier de 300 à 1650 m. Un gradient d'épaisseur s'affine du nord-est vers le sud-ouest de la macro-zone. Un ancien paléo-chenal du Rhône traverse également le sud-ouest de cette région.

Des levés géophysiques complémentaires permettront une analyse plus fine des dépôts sédimentaires au sein des macro-zones, avec une caractérisation des structures internes et du litage des dépôts.

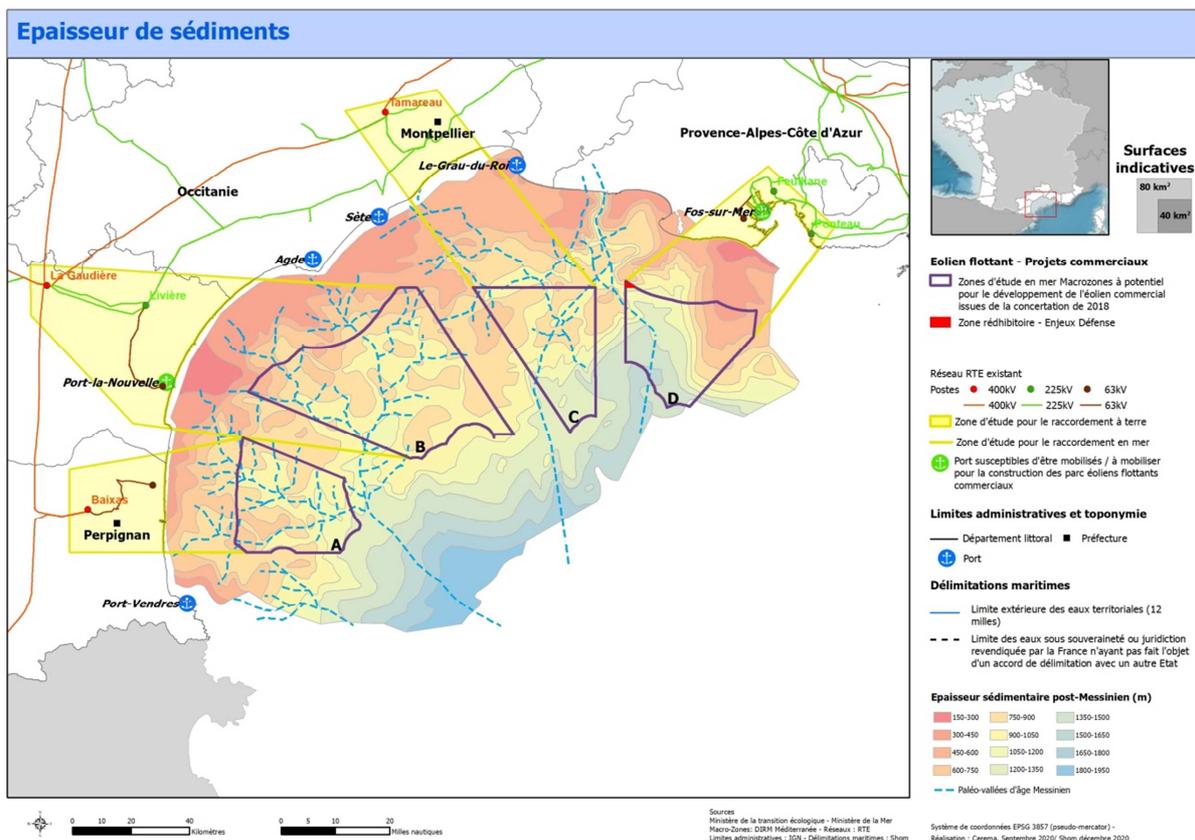


Figure 4 : Carte des épaisseurs sédimentaires de la zone d'étude Méditerranée (Source : Shom 2020)

## 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).

Ces statistiques 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.

A titre d'exemple, l'illustration de la figure 5 représente les isolignes de température en surface pour le mois de février issues des données GDEM.

Le tableau ci-dessous fournit quant à lui, pour les paramètres « température » et « salinité », les gammes de variation observées sur l'ensemble de la zone d'étude (au-delà des macrozones A, B, C et D) aux immersions caractéristiques 0, 20 et 80 m pour les mois de février, mai, août et novembre.

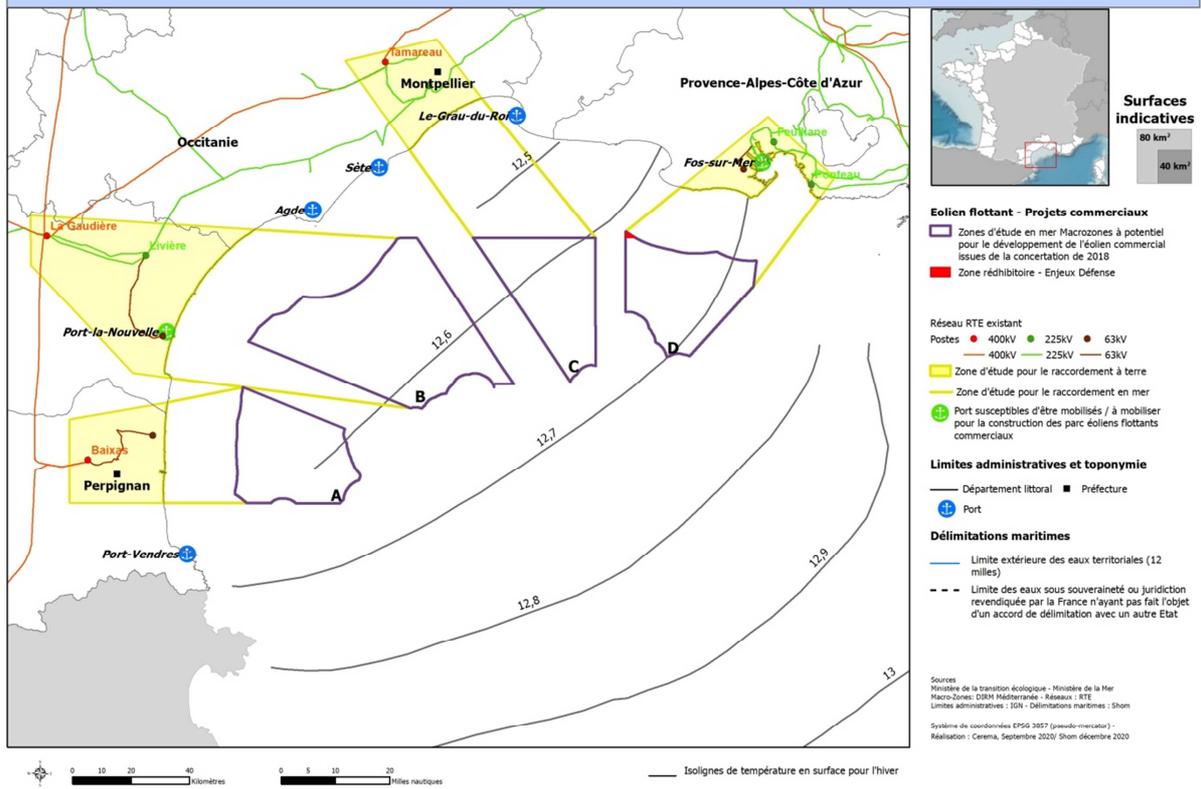
	Hiver (février)	Printemps (mai)	Été (août)	Automne (novembre)
Température en surface (en degrés Celsius)	12.52 à 12.76	15.48 à 16.21	20.58 à 20.96	16.39 à 16.83
Température à 20 m (en degrés Celsius)	12.57 à 12.78	14.44 à 14.95	17.71 à 18.83	16.29 à 16.77
Température à 80 m (en degrés Celsius)	12.83 à 12.91	13.18 à 13.22	13.58 à 13.71	14.14 à 14.34
Salinité en surface (en psu*)	38.01 à 38.12	37.72 à 37.87	37.68 à 37.73	37.99 à 38.01
Salinité à 20 m (en psu*)	38.02 à 38.14	37.94 à 38	37.96 à 38	38.01 à 38.03
Salinité à 80 m (en psu*)	38.15 à 38.24	38.15 à 38.24	38.21 à 38.23	38.15 à 38.19

\* : practical salinity unit (unité de salinité pratique)

En général, les températures varient assez peu horizontalement sur la zone d'étude, de l'ordre de 0.04 à 1.12°C. Si elles sont plutôt homogènes sur la colonne d'eau en hiver, des amplitudes de température assez importantes peuvent être observées sous l'effet du réchauffement de la couche de surface, particulièrement en été (variation de 7°C entre la surface et l'immersion 80 m) et dans une moindre mesure en automne et au printemps (3°C).

Les salinités suivent les mêmes tendances avec une variabilité horizontale de l'ordre de 0.02 à 0.15 psu. Sur la verticale, les variations observées vont d'environ 0.2 psu en automne-hiver à 0.5 psu en printemps-été.

## Température de surface en hiver



**Figure 5 :** Carte des isolignes de température de surface (pas de 0.1°C) en hiver dans le golfe du Lion (Source : Shom 2020)

## 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.

### *Les marées*

En Méditerranée, la marée astronomique de caractère semi-diurne à inégalité diurne est faible. Le marnage ne dépasse pas 0,3 m.

Les effets de la marée météorologique sont plus importants au point de masquer la marée astronomique, en particulier en situation de morte-eau. À la côte, la mer monte par vent de SE et descend par vent de NW, surtout lorsque le plateau continental est large. Par violente tempête de SE, l'élévation des eaux au-dessus du niveau moyen peut dépasser 1 m, très exceptionnellement 2 m, et noyer les quais des ports. L'abaissement des eaux par vent de nord-ouest atteint au maximum 0,5 m au-dessous du niveau moyen.

À Toulon, les plus hautes eaux ont atteint la cote 1,10 m au-dessus du zéro hydrographique. À Monaco, le marnage est de 17 cm, et les différences extrêmes de niveau sont de l'ordre de 1 m.

### *Les surcotes / décotes*

Une surcote/décote a principalement une origine météorologique : elle est générée lors du passage d'une dépression ou d'un anticyclone, par les variations de pression atmosphérique et par les vents. Elle peut également avoir d'autres origines : vagues, seiches, tsunamis... Le Shom met à disposition du public sur le site [www.data.shom.fr](http://www.data.shom.fr) ses prévisions de surcotes modélisées dans le cadre de la vigilance vagues-submersion en partenariat avec Météo-France (projet HOMONIM).

L'étude statistique des surcotes/décotes permet d'établir des niveaux extrêmes atteints par la mer associés à des périodes de retour. Le Cerema a produit en décembre 2017, un ouvrage relatif aux niveaux marins extrêmes pour les ports de Métropole (Niveaux marins extrêmes – Ports de Métropole – CEREMA – Collection Données, disponible sur [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)).

Les mesures marégraphiques effectuées ont ainsi permis d'effectuer une estimation statistique des niveaux marins extrêmes aux points de mesure.

Dans cet ouvrage, pour la Méditerranée, deux estimations ont été établies, respectivement par ajustement statistique d'une distribution de Pareto (Generalized Pareto Distribution - GPD) et d'une loi exponentielle sur les pics de tempête. Les résultats sont présentés, ci-après, pour quelques ports significatifs de la zone d'étude.

### **Port-Vendres**

*Niveaux extrêmes de pleine mer, référencés à l'IGN 69, système légal d'altitude (source Cerema)*

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70%	Int. Conf. 95%		Int. Conf. 70%	Int. Conf. 95%
5 ans	0,72 m	0,69 m à 0,73 m	0,67 m à 0,75 m	0,73 m	0,71 m à 0,75 m	0,69 m à 0,77 m
10 ans	0,76 m	0,72 m à 0,78 m	0,70 m à 0,80 m	0,78 m	0,75 m à 0,80 m	0,73 m à 0,83 m
20 ans	0,80 m	0,75 m à 0,83 m	0,72 m à 0,86 m	0,83 m	0,80 m à 0,86 m	0,78 m à 0,88 m
50 ans	0,85 m	0,79 m à 0,89 m	0,75 m à 0,95 m	0,90 m	0,86 m à 0,93 m	0,83 m à 0,96 m
100 ans	0,89 m	0,81 m à 0,94 m	0,76 m à 1,02 m	0,95 m	0,91 m à 0,98 m	0,88 m à 1,02 m
200 ans	0,92 m	0,83 m à 0,99 m	0,77 m à 1,09 m	1,00 m	0,96 m à 1,04 m	0,92 m à 1,08 m
500 ans	0,97 m	0,85 m à 1,05 m	0,79 m à 1,19 m	1,06 m	1,02 m à 1,11 m	0,98 m à 1,16 m
1 000 ans	1,00 m	0,87 m à 1,10 m	0,80 m à 1,26 m	1,12 m	1,07 m à 1,16 m	1,02 m à 1,21 m

## Sète

Niveaux extrêmes de pleine mer, référencés à l'IGN 69, système légal d'altitude (source Cerema)

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70%	Int. Conf. 95%		Int. Conf. 70%	Int. Conf. 95%
5 ans	0,85 m	0,83 m à 0,87 m	0,81 m à 0,90 m	0,85 m	0,83 m à 0,87 m	0,81 m à 0,89 m
10 ans	0,91 m	0,87 m à 0,94 m	0,84 m à 0,98 m	0,90 m	0,88 m à 0,93 m	0,86 m à 0,95 m
20 ans	0,97 m	0,92 m à 1,02 m	0,87 m à 1,07 m	0,96 m	0,93 m à 0,99 m	0,90 m à 1,01 m
50 ans	1,06 m	0,97 m à 1,14 m	0,91 m à 1,22 m	1,03 m	0,99 m à 1,06 m	0,96 m à 1,10 m
100 ans	1,12 m	1,01 m à 1,23 m	0,94 m à 1,37 m	1,08 m	1,04 m à 1,12 m	1,01 m à 1,16 m
200 ans	1,19 m	1,04 m à 1,33 m	0,96 m à 1,52 m	1,14 m	1,09 m à 1,18 m	1,06 m à 1,22 m
500 ans	1,28 m	1,09 m à 1,48 m	0,98 m à 1,76 m	1,21 m	1,16 m à 1,26 m	1,12 m à 1,31 m
1 000 ans	1,36 m	1,12 m à 1,60 m	1,00 m à 1,98 m	1,26 m	1,20 m à 1,32 m	1,16 m à 1,37 m

## Marseille

Niveaux extrêmes de pleine mer, référencés à l'IGN 69, système légal d'altitude (source Cerema)

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70%	Int. Conf. 95%		Int. Conf. 70%	Int. Conf. 95%
5 ans	0,97 m	0,92 m à 1,01 m	0,88 m à 1,06 m	0,96 m	0,93 m à 1,00 m	0,90 m à 1,03 m
10 ans	1,05 m	0,98 m à 1,11 m	0,93 m à 1,19 m	1,04 m	1,00 m à 1,08 m	0,97 m à 1,12 m
20 ans	1,14 m	1,04 m à 1,21 m	0,97 m à 1,33 m	1,12 m	1,07 m à 1,16 m	1,04 m à 1,21 m
50 ans	1,25 m	1,11 m à 1,37 m	1,02 m à 1,53 m	1,22 m	1,17 m à 1,27 m	1,12 m à 1,32 m
100 ans	1,33 m	1,16 m à 1,49 m	1,06 m à 1,72 m	1,29 m	1,24 m à 1,36 m	1,19 m à 1,41 m
200 ans	1,42 m	1,21 m à 1,61 m	1,09 m à 1,93 m	1,37 m	1,31 m à 1,44 m	1,25 m à 1,50 m
500 ans	1,53 m	1,27 m à 1,80 m	1,13 m à 2,24 m	1,47 m	1,40 m à 1,55 m	1,34 m à 1,62 m
1 000 ans	1,62 m	1,31 m à 1,95 m	1,15 m à 2,51 m	1,55 m	1,47 m à 1,63 m	1,41 m à 1,70 m

## Toulon

Niveaux extrêmes de pleine mer, référencés à l'IGN 69, système légal d'altitude (source Cerema)

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70%	Int. Conf. 95%		Int. Conf. 70%	Int. Conf. 95%
5 ans	0,67 m	0,66 m à 0,68 m	0,66 m à 0,69 m	0,68 m	0,66 m à 0,69 m	0,65 m à 0,70 m
10 ans	0,69 m	0,68 m à 0,70 m	0,67 m à 0,71 m	0,70 m	0,69 m à 0,72 m	0,67 m à 0,73 m
20 ans	0,71 m	0,69 m à 0,71 m	0,68 m à 0,73 m	0,73 m	0,71 m à 0,75 m	0,69 m à 0,77 m
50 ans	0,72 m	0,70 m à 0,73 m	0,69 m à 0,75 m	0,76 m	0,74 m à 0,79 m	0,72 m à 0,81 m
100 ans	0,73 m	0,71 m à 0,74 m	0,70 m à 0,76 m	0,79 m	0,76 m à 0,82 m	0,74 m à 0,85 m
200 ans	0,74 m	0,71 m à 0,75 m	0,70 m à 0,77 m	0,82 m	0,79 m à 0,85 m	0,76 m à 0,88 m
500 ans	0,75 m	0,72 m à 0,76 m	0,70 m à 0,79 m	0,85 m	0,82 m à 0,89 m	0,79 m à 0,93 m
1 000 ans	0,75 m	0,72 m à 0,77 m	0,71 m à 0,80 m	0,88 m	0,84 m à 0,92 m	0,81 m à 0,96 m

Niveaux extrêmes de pleine mer pour quelques ports de référence, référencés à l'IGN 69, système légal d'altitude (source Cerema)

Les marégraphes étant généralement situés dans les ports, ils n'enregistrent pas l'ensemble des phénomènes côtiers qui peuvent survenir en dehors de ces points de mesure spécifiques. Aussi, les analyses menées ne permettent qu'une estimation des niveaux marins extrêmes sans prise en compte de l'ensemble des effets, notamment ceux liés aux vagues.

## *Les courants*

En Méditerranée nord-occidentale, les courants sont de différentes natures car ils sont générés par des processus physiques variés. Ils sont issus de la combinaison des influences de la marée, du vent, des différences de densité de l'eau de mer et de la circulation océanique à grande échelle. Ils sont également contraints par les variations de bathymétrie.

### *Courants de marée*

Les courants liés à la marée astronomique sont faibles et négligeables par rapport aux courants de dérive créés par le vent. Généralement peu ressentis près des côtes dans les zones largement ouvertes, ils peuvent être rapides dans certains passages resserrés (détroits, canaux) et dans certaines zones peu profondes. C'est le cas à Sète où des courants de marée générés dans l'Étang de Thau peuvent atteindre 0.5 à 2 m/s. L'amplification des courants se retrouve localement dans d'autres canaux (Canal de Caronte, entre l'étang de Berre et le golfe de Fos) ou dans les chenaux d'accès avec des courants atteignant 1.5m/s.

### *Courants permanents*

La circulation générale est caractérisée par le **Courant Nord (CN)** d'une épaisseur de 200 à 400m à la côte. Ce Courant Nord, formé en mer de Ligure, est plus intense, étroit et profond en hiver, avec une intensité maximum de 0.8 m/s (0.5 m/s en été) pour environ 30 km de large (50 km en été). Fortement guidé par la bathymétrie, le Courant Nord longe le talus continental du golfe du Lion du nord-est au sud-ouest. Des intrusions sur le plateau sont parfois observées.

### *Courants de dérive*

Les échanges avec l'atmosphère constituent un forçage prépondérant des courants dans la zone. En effet, les côtes méditerranéennes sont soumises à des vents intenses (Mistral, Tramontane, vent de Sud-est) qui se renforcent en hiver.

Ces vents induisent des processus de déplacements horizontaux et verticaux des masses d'eau, notamment des upwellings (qui ramènent les eaux froides et riches du fond vers la surface par vent de Nord-Ouest), des downwellings (par vent de Sud-Est), des jets côtiers et des structures tourbillonnaires.

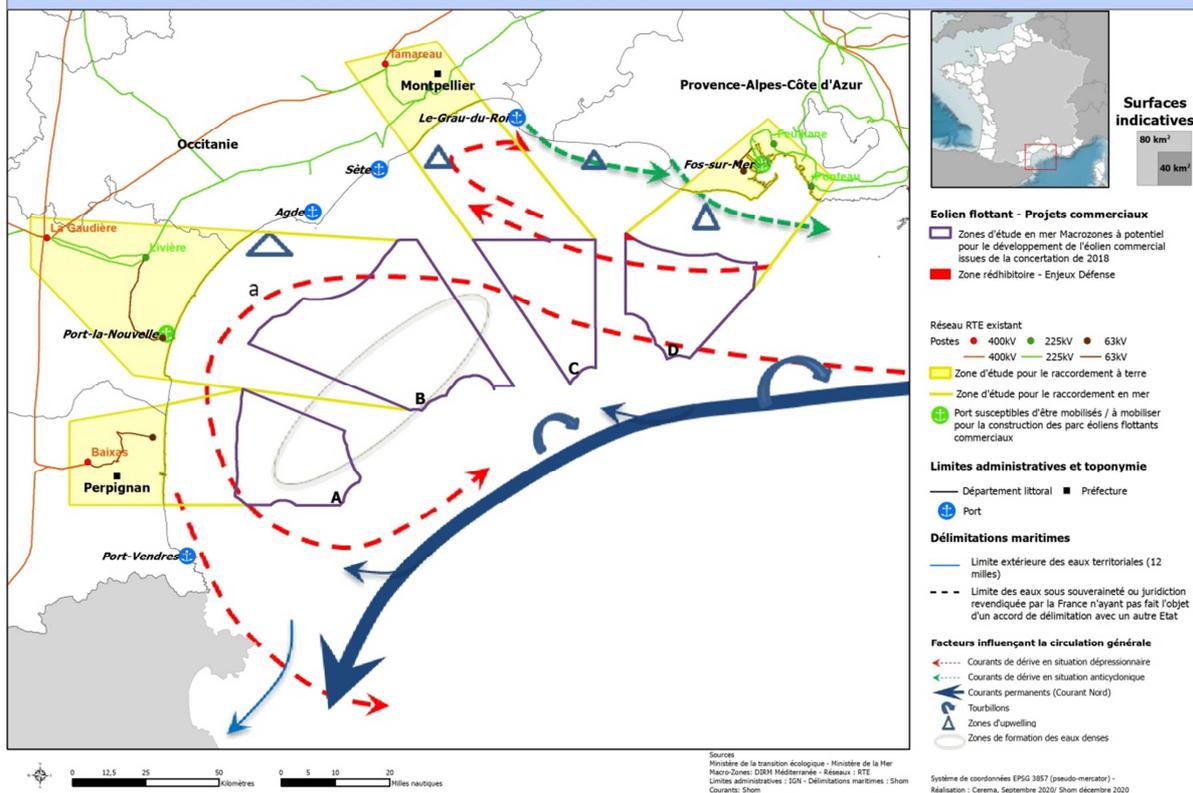
### *Courants de densité*

Les variations des caractéristiques hydrologiques (température et salinité) sont aussi un facteur de circulation verticale avec la plongée des eaux plus denses sur le plateau du golfe du Lion. La circulation côtière est contrainte par les apports en eau douce des fleuves, notamment avec le déversement du Rhône dont le débit très important peut générer un écoulement d'eau douce en surface et créer un front de densité entre le plateau et la pente au-dessus de laquelle s'écoule le Courant Nord.

Les courants marins de la région Méditerranée occidentale sont connus au travers des modèles de prévisions océanographiques accessibles chaque jour sous [www.data.shom.fr](http://www.data.shom.fr).

La connaissance est basée sur l'existence de mesures in situ réalisées dans la région. Ces données ponctuelles apportent une description de la dynamique locale pour une période de temps limitée. Elles permettent la qualification des modèles de prévision et des produits dérivés (ouvrages orientés pour la sécurité de la navigation).

### Circulation générale des eaux de surface dans le Golfe du Lion



**Figure 9 :** Circulation générale des eaux de surface dans le Golfe du Lion  
 (Données : Ministère de la Transition Ecologique, Ministère de la Mer, Macro-zones (DIRM Méditerranée), Réseaux (RTE), Limites administratives (IGN), Délimitations maritimes (Shom))

## Houle, vagues et état de mer

La zone d'étude est située en Méditerranée, dans le golfe du Lion. La topographie inégale et particulière de la partie occidentale de la Méditerranée Française conduit à la production fréquente (environ 2/3 du temps) d'accélération intenses et localisées de vents de terre (Tramontane (Nord-Ouest) et Mistral(Nord-Est)) pouvant atteindre de grandes intensités (jusqu'à des rafales de 60 m/s). Ceux-ci permettent le développement de mers de vents énergétiques en provenance des secteurs Ouest à Nord et relativement jeunes en raison d'un fetch court. La zone est également exposée à de plus rares (moins de 12 % du temps) mais violentes tempêtes, en provenance du large (du Sud à l'Est) pendant la période hivernale accompagnées de fortes vagues. Enfin, de par sa localisation, la zone est soumise à de faibles houles d'Est à Sud-Ouest provenant de la Méditerranée. Les états de mer sur les macro-zones sont donc principalement dus au vent local.

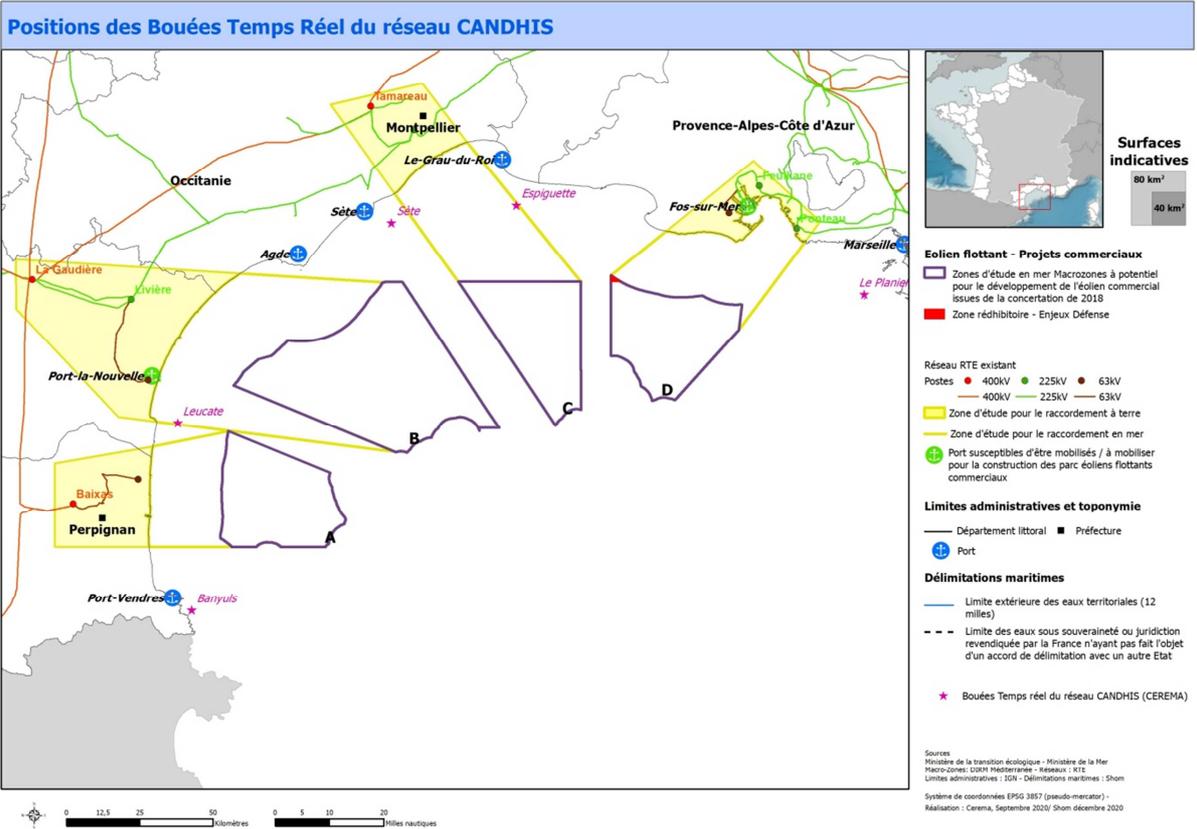
Dans cette étude limitée à l'analyse de la connaissance préalable, nous nous appuyons sur les résultats existants, obtenus dans le cadre du projet MARC (Modélisation et Analyse pour la Recherche Côtière, de l'Ifremer), sur la base du modèle spectral d'état de mer WaveWatchIII<sup>®</sup> implémenté sur la grille de calcul MENOR, avec une résolution spatiale de 3 kilomètres. Le modèle est forcé par les spectres de vagues au large ainsi que les champs de vent du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Le modèle a été rejoué sur la période 2012-2019 et a été validé par comparaison aux observations des satellites altimétriques et des bouées du réseau CANDHIS<sup>2</sup>. Comme indiqué sur la figure 10, plusieurs houlographes de ce réseau sont installés le long de la côte (Banyuls, Leucate, Sète, Espiguette, Le Planier). Les mesures collectées permettent d'évaluer les performances du modèle numérique sur la zone, par comparaison de ses résultats pendant les périodes communes d'acquisition de chaque bouée. Les scores du modèle aux positions de ces bouées pour la hauteur significative ont été calculés sur leur période commune. Le coefficient de corrélation obtenu pour chaque position est respectivement de 0.92, 0.93, 0.94, 0.93, 0.94, le biais de -6, 3, 5, 2, 4 cm, l'erreur quadratique moyenne de 0.24, 0.20, 0.19, 0.20, 0.23 m et l'indice de dispersion de 32.7, 30.2, 31.5, 28.6, 25.5 % (toutes conditions confondues). Les comparaisons des périodes (moyennes et pics) et directions moyennes ont également été effectuées et confortent un bon comportement du modèle par rapport aux observations des houlographes côtiers avec toutefois une légère tendance à la sous-estimation du modèle pour les périodes moyennes d'environ 0,5 à 1s. Malgré une résolution spatiale du modèle insuffisante à la côte, ces statistiques indiquent des performances satisfaisantes du modèle, ce qui permet d'utiliser ses résultats pour l'analyse des états de mer sur les zones d'étude avec un bon niveau de confiance. Toutefois, la période couverte étant relativement courte (2012-2019), elle ne permet pas de décrire de manière suffisante les conditions maximales d'énergie, qui ne sont donc pas décrites ici. Ce point fera l'objet d'une étude dédiée, menée par le Shom, pour laquelle un rejeu spécifique d'états de mer sera construit avec une résolution spatiale adaptée, validé sur des tempêtes significatives et mis en œuvre sur une période plus longue. De plus, ce rejeu bénéficiera de forçages météorologiques homogènes et d'un paramétrage approprié à la caractérisation des événements extrêmes.

L'analyse proposée ci-après s'appuie sur les données modélisées qui ont l'avantage de décrire le spectre directionnel des vagues de façon homogène et sur une période permettant d'identifier les conditions moyennes d'états de mer sur les macro-zones.

Dans un premier temps, une analyse spatialisée de la zone a été réalisée.

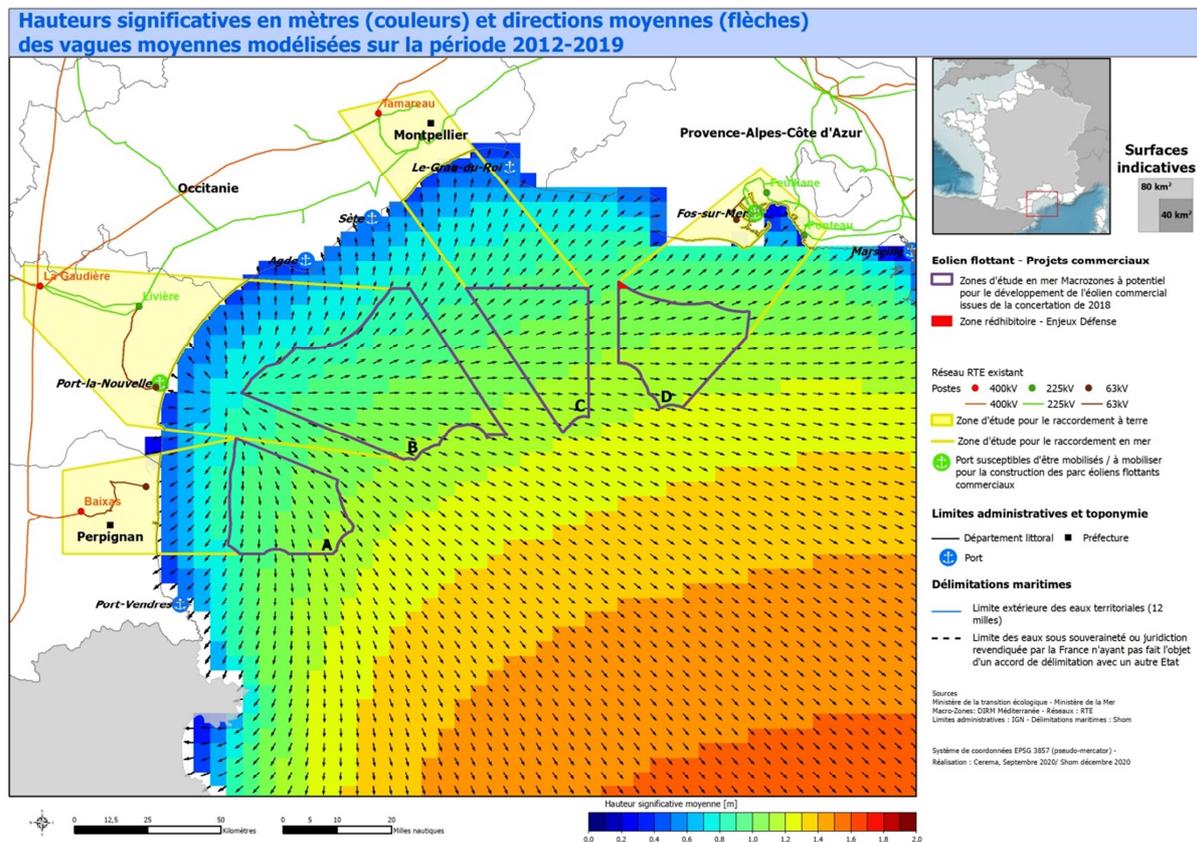
---

<sup>2</sup> <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>



**Figure 10 :** Positions des bouées houlographes « temps réel » du réseau CANDHIS utilisées pour comparaison avec le modèle de vagues

La figure 11 montre les hauteurs significatives des vagues et leur direction en moyenne<sup>3</sup> (direction de propagation (vers)) sur l'ensemble de la période rejouée pour les conditions d'états de mer prises dans leur ensemble. La hauteur significative moyenne des vagues présente une variabilité spatiale prononcée sur les 4 zones d'étude, comprise entre 0.8 et 1.3 m de la côte vers le large, avec des vagues venant préférentiellement du Nord pour la zone A et de l'Ouest pour les zones B, C et D.

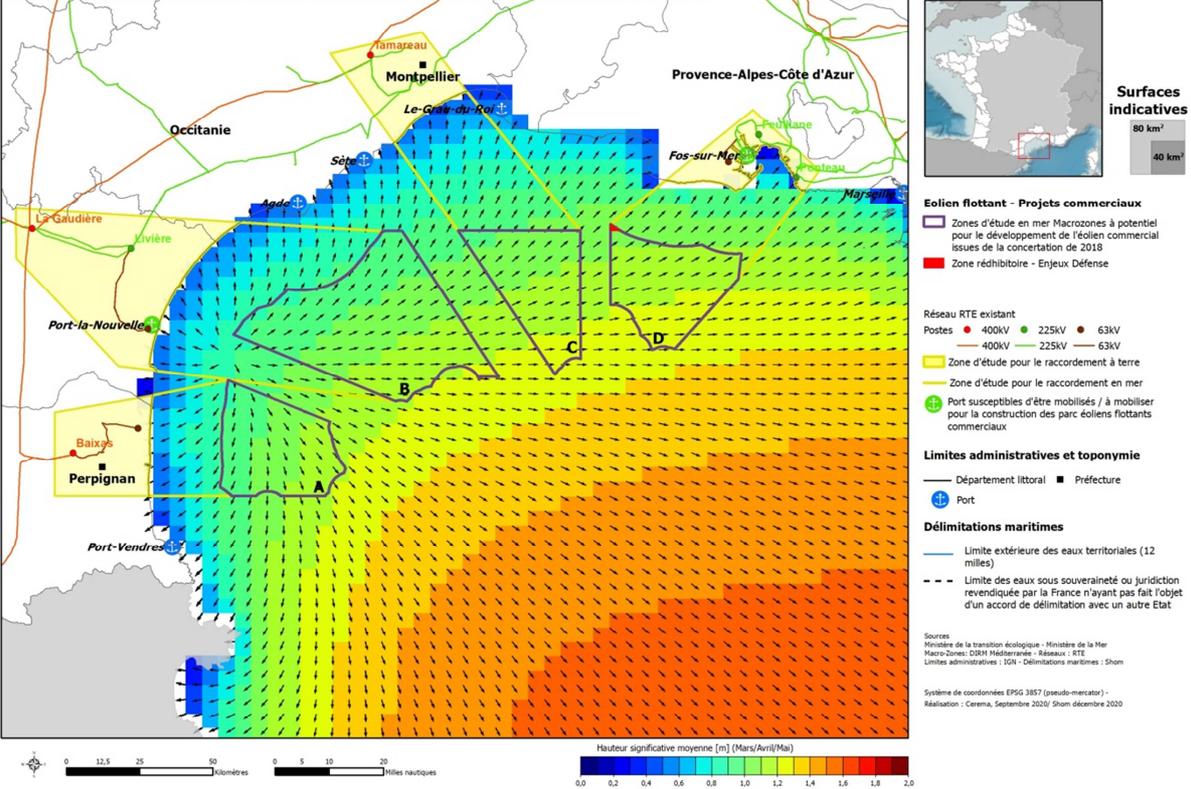


**Figure 11** : Carte des hauteurs significatives (couleurs) et directions moyennes (flèches) modélisées en moyenne sur la période 2012-2019 avec le modèle MENOR

<sup>3</sup> Les directions moyennes ont été obtenues en considérant une moyenne vectorielle des résultantes cartésiennes des états de mer ( $U_x = H_s \times \cos(\text{direction})$ ,  $U_y = H_s \times \sin(\text{direction})$ ).

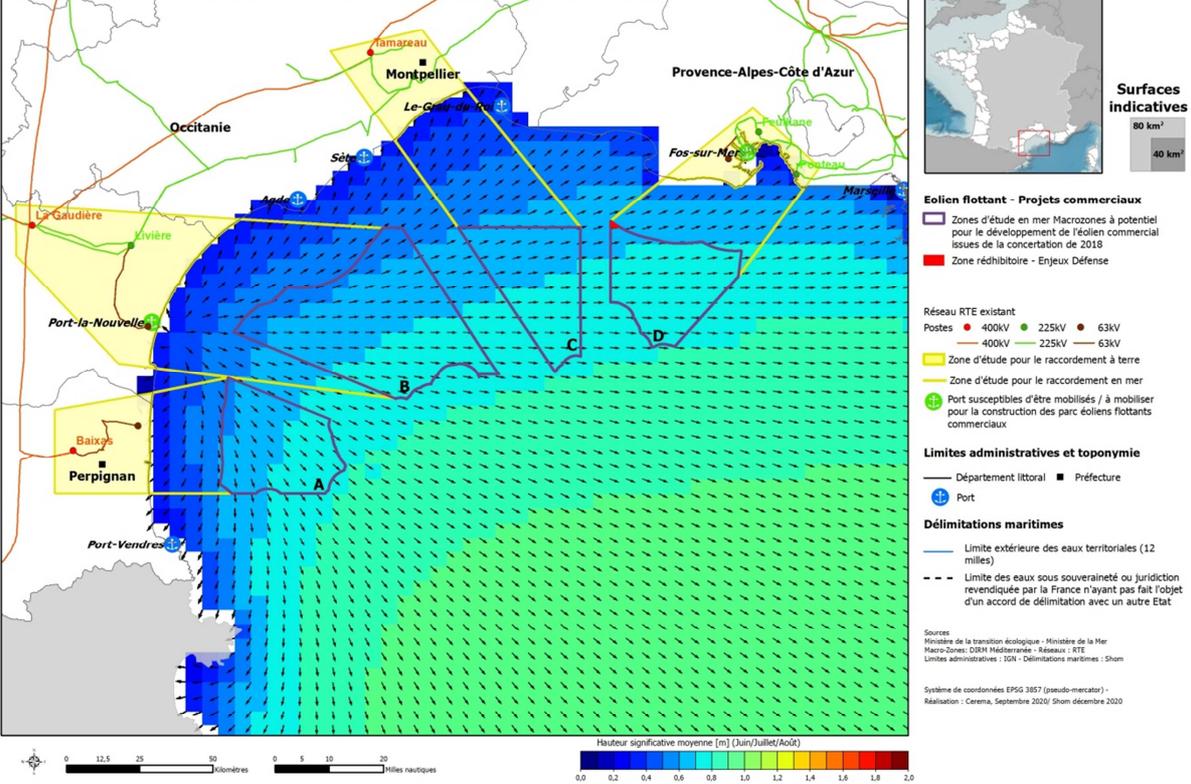


**Hauteurs significatives en mètres (couleurs) et directions moyennes (flèches) des vagues modélisées sur la période 2012-2019 au printemps (Mars/Avril/Mai)**



**Figure 13 :** Carte des hauteurs significatives (couleurs) et directions moyennes (flèches) modélisées en moyenne sur la période 2012-2019 avec le modèle MENOR au printemps

**Hauteurs significatives en mètres (couleurs) et directions moyennes (flèches) des vagues modélisées sur la période 2012-2019 en été (Juin/Juillet/Août)**



**Figure 14 :** Carte des hauteurs significatives (couleurs) et directions moyennes (flèches) modélisées en moyenne sur la période 2012-2019 avec le modèle MENOR en été

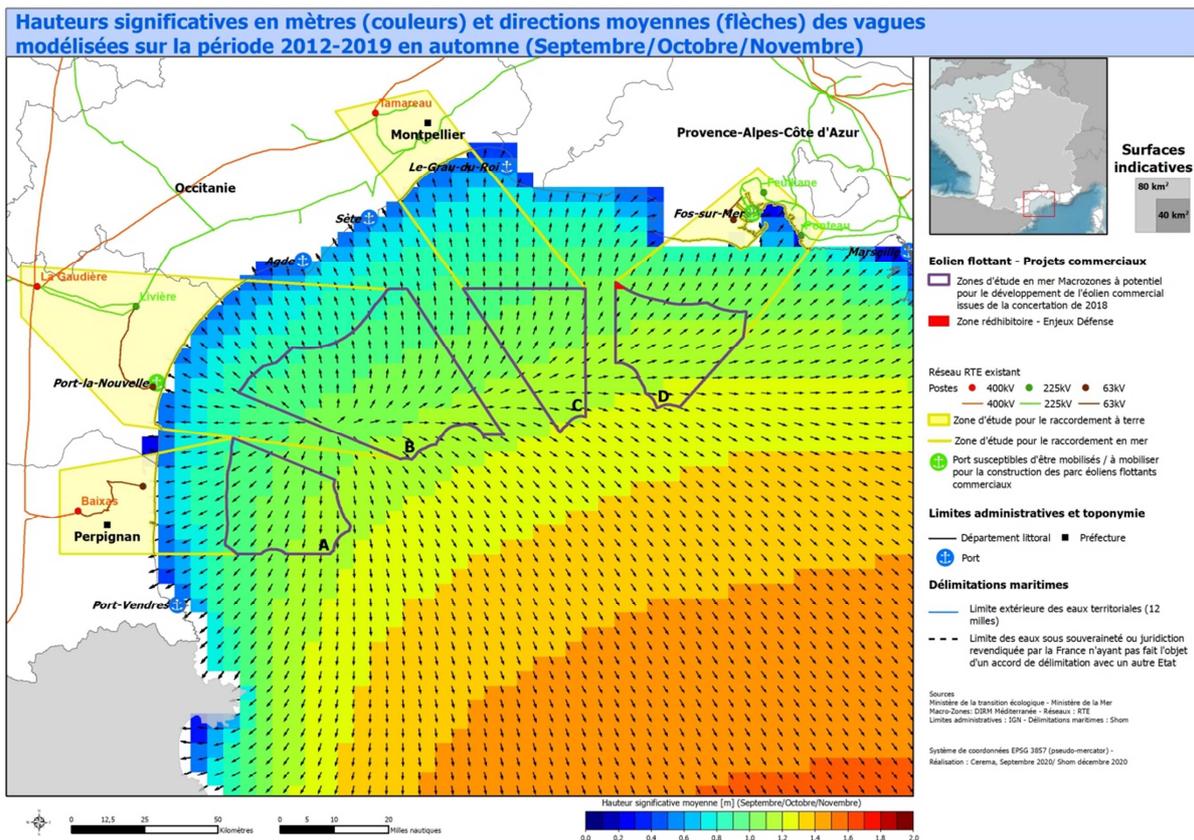


Figure 15 : Carte des hauteurs significatives (couleurs) et directions moyennes (flèches) modélisées en moyenne sur la période 2012-2019 avec le modèle MENOR en automne

Quatre points du modèle ont ensuite été choisis pour poursuivre plus finement l'analyse sur les 4 zones : un point au centre de chacune des 4 macro-zones. Ces points sont représentés sur la figure 16.

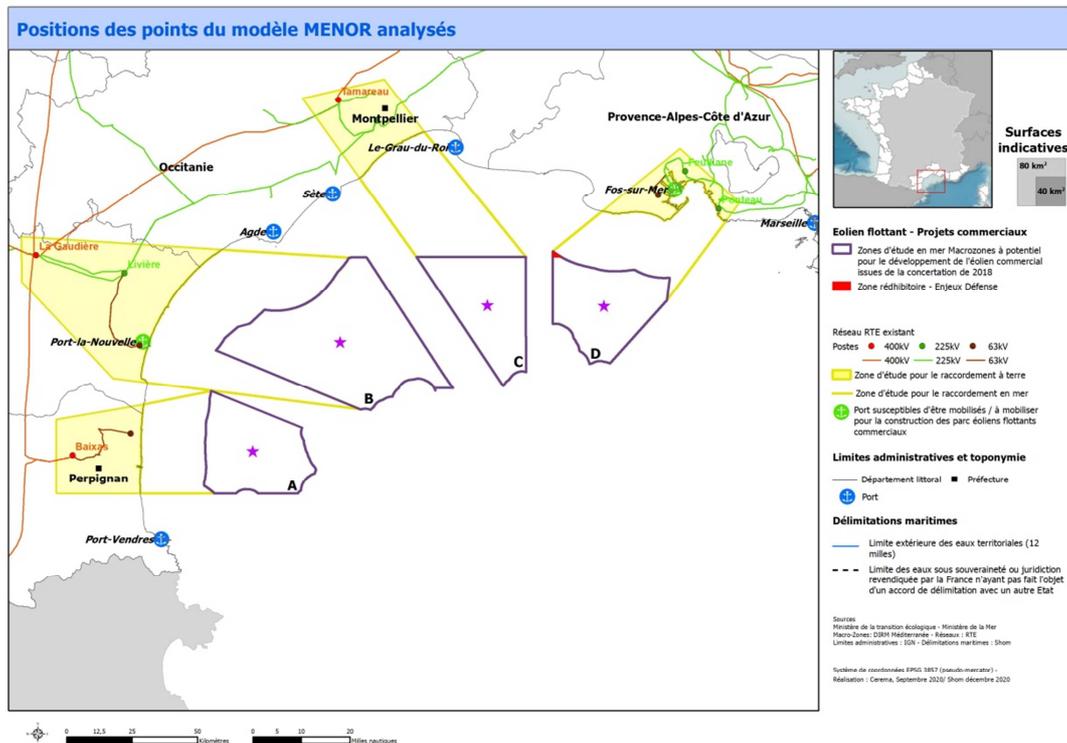


Figure 16 : Positions des points du modèle MENOR analysés pour cette étude

La figure 17 montre, pour chacun de ces 4 points, les corrélogrammes 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 vent seulement et la colonne de droite pour la houle principale.

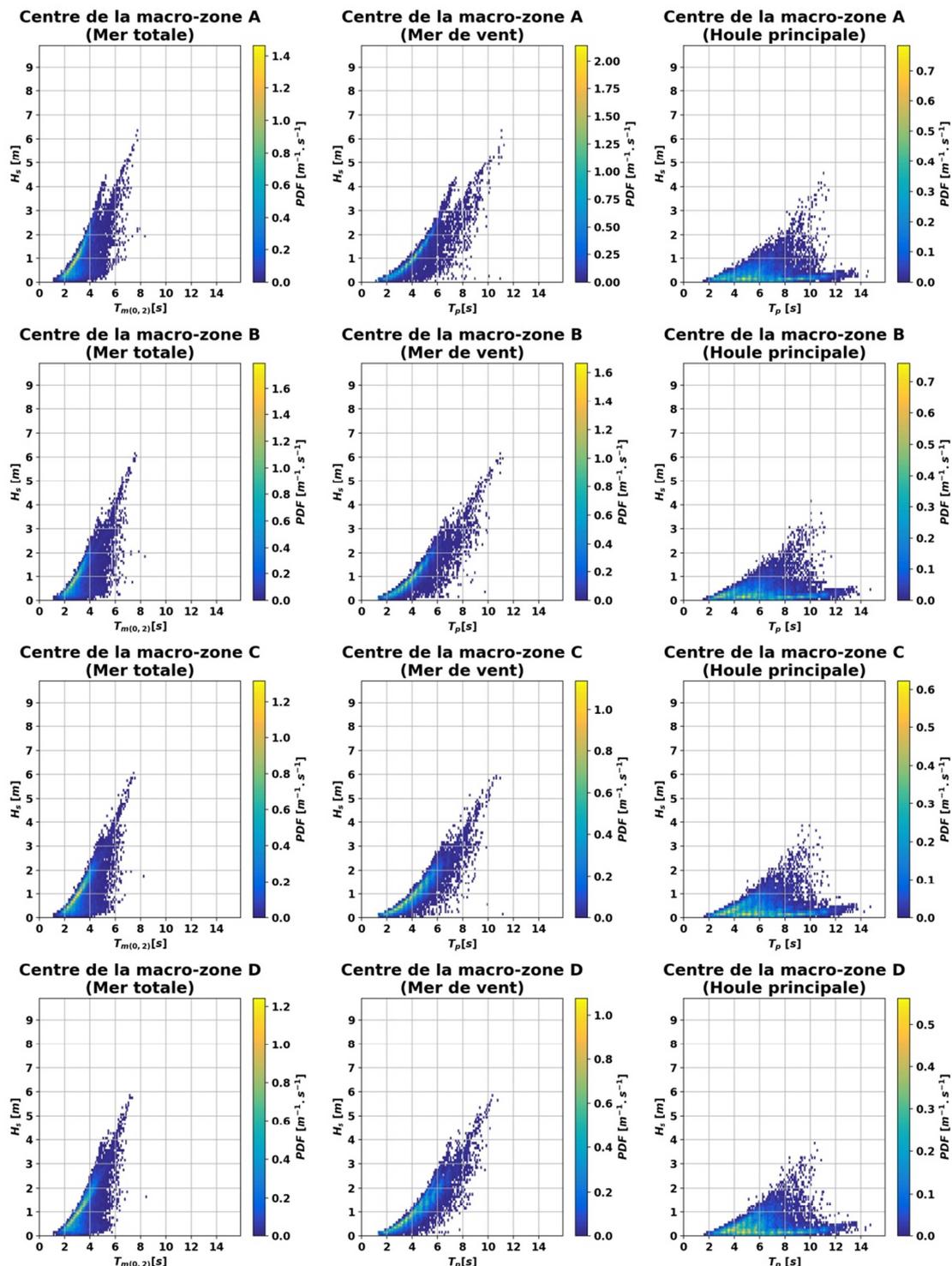


Figure 17 :

Corrélogrammes hauteurs significatives / périodes moyennes des vagues pour l'état de mer total (col. 1) ;

Corrélogrammes hauteurs significatives / périodes pics pour la mer de vent (col. 2) ;

Corrélogrammes hauteurs significatives / périodes pics pour la houle principale (col. 3).

Les 4 lignes représentent les 4 points du modèle MENOR analysés, dont les positions sont données sur la carte en figure 16.

La figure 18 représente quant à elle les roses de vagues (direction de provenance) en ces mêmes quatre 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). Les conditions d'état de mer sont ici considérées dans leur ensemble et les conditions d'états de mer les plus forts ne sont pas décrits.

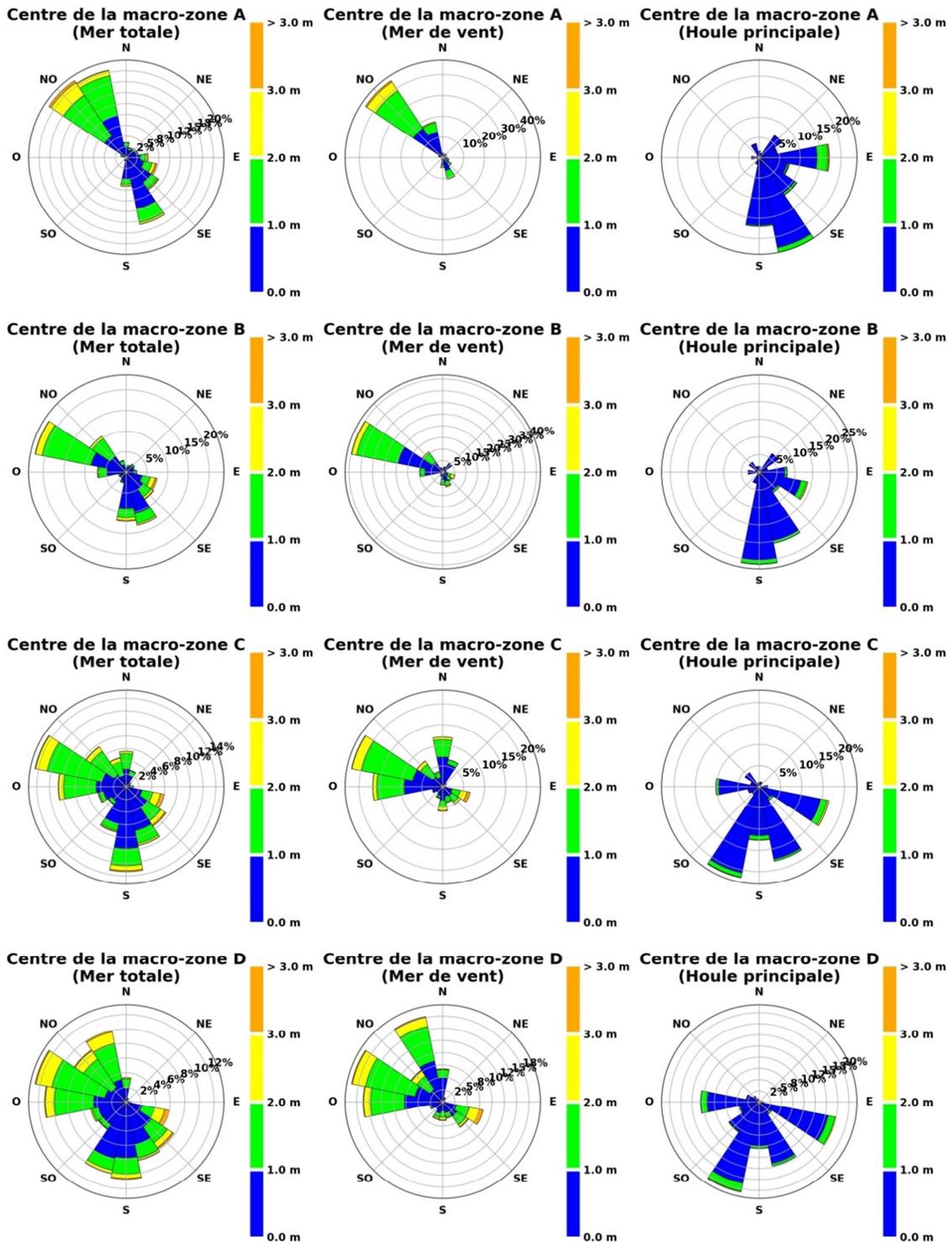


Figure 18 :

Rose de vagues (hauteur significative / direction moyenne) pour l'état de mer total (col. 1), pour la mer de vent (col. 2) et pour la houle principale (col. 3).

Les 4 lignes représentent les 4 points du modèle MENOR analysés, dont les positions sont données sur la carte en figure 16.

Comme attendu, l'état de mer sur les 4 macro-zones est principalement constitué d'une mer de vent de secteur Nord-Ouest avec une période des vagues faible, généralement autour de 4-5 secondes, et des hauteurs significatives relativement faibles. Lors de coups de vent forts, cette mer de vent peut cependant être assez énergétique, avec des vagues pouvant dépasser les 6 mètres de hauteur significative. Ces événements restent cependant statistiquement assez rares, mais potentiellement sous-estimés en raison de la période relativement courte couverte par le jeu de données. Une faible houle de Sud-Est à Sud vient généralement s'ajouter à cette mer de vent. Les corrélogrammes montrent que cette houle présente généralement une période pic de 5 à 10 secondes. Il peut s'agir de la houle résiduelle des mers de vents développée dans les macro-zones (ou à proximité) les jours précédents et qui ont des hauteurs significatives faibles, généralement de l'ordre de quelques dizaines de centimètres et pouvant atteindre environ 1 mètre dans de rares cas. Les houles avec des périodes pic autour de 10 secondes sont quant à elles issues de vagues générées plus loin en Méditerranée et qui se sont propagées jusque dans le golfe du Lion. Ces houles ont généralement des hauteurs significatives de l'ordre de quelques dizaines de centimètres mais peuvent atteindre 2 à 3 mètres dans de rares cas de tempêtes hivernales.

D'une manière générale, les états de mer ont des caractéristiques relativement similaires dans les 4 macro-zones considérées, et se différencient légèrement par leur provenance en fonction de la localisation de la macro-zone. En revanche, à l'intérieur de celles-ci, on note des disparités importantes en lien avec la distance à la côte.