

Département DYNamiques de l'Environnement Côtier  
Service Applications Géomatiques

Anouar HAMDJ  
Mickaël VASQUEZ  
Jacques POPULUS

Décembre 2010

DYNECO/AG/10-26/JP

**ifremer**

# Cartographie des habitats physiques Eunis – Côtes de France

Convention n° 09/12177764/FY



Agence des  
aires marines protégées



## Résumé

La présente étude se fonde sur les résultats de projets européens récents tels que que MESH en Atlantique NW (Mesh 2008) et Balance en mer Baltique (Al-Hamdani 2007), qui on tous deux montré la voie de la cartographie prédictive d'habitats basée sur l'association de caractères abiotiques en relation avec la biologie du fond de la mer.

La typologie Eunis sert de socle à cette cartographie, réalisée par combinaison de couches harmonisées de paramètres d'environnement caractérisant les habitats benthiques. Chaque paramètre est classé en catégories dont les bornes sont fixées par l'étude statistique de données biologiques de prélèvements et d'observations sur le terrain confortée par dires d'experts.

Les couches de données sont compilées à deux résolutions différentes, l'une plus globale de 250m s'étendant le plus possible sur le plateau (dans la limite de l'existence des données), l'autre de 100m restant confinée à la zone côtière, permettant la restitution aux échelles respectives du 1/1Mème et du 1/300000ème.

Le modèle est construit de manière à être facilement relancé au fur et à mesure de l'amélioration des couches de base. Pour mettre en garde les utilisateurs sur les limites d'utilisation des cartes, il est rendu compte de la fiabilité des cartes par deux méthodes différentes.

Les cartes sont produites en version numérique pour chargement sur le serveur Sextant de l'Ifremer et mise à disposition des utilisateurs par des services WMS, ainsi qu'en version papier sur 8 cartes couvrant les côtes de France à l'échelle du 1/300000ème.

Enfin, des indications sont données sur la faisabilité d'étendre une telle cartographie aux départements d'outre-mer ainsi que sur les perspectives ouvertes par ce travail.

## Remerciements

Nous tenons à remercier ici tous les producteurs de données sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Il s'agit en premier lieu du SHOM dont la bathymétrie fine et les MNT qui en sont dérivés interviennent à plusieurs stades de l'étude. Le SHOM, en la personne de Thierry Garlan, nous a aussi autorisés à utiliser ses cartes de nature des fonds dites "cartes G", une composante majeure du modèle détaillé. Concernant les autres données de nature du substrat marin, plusieurs auteurs nous ont aidés à compiler leurs données historiques et nous ont conseillés pour leur généralisation. Il s'agit de Pol Guénoc et Fabien Paquet du BRGM, de Jean-Claude Aloïsi et François Bourrin de l'Université de Perpignan, d'Hervé Gillet de l'Université de Bordeaux, de Gérard Pergent de l'Université de Corse. Le projet a aussi utilisé les données du CIESM, de GEBCO, de l'IOC-IBCM, de l'Agence spatiale européenne.

Pour les données de biocénoses de Méditerranée, rien n'aurait pu être fait sans le soutien du Medbenth et de l'Agence de l'eau RMC en la personne de Pierre Boissery et du GIS Posidonie. Les contributeurs en cartographie de posidonies sont tous cités en annexe 2 de ce rapport. Qu'ils soient ici vivement remerciés. Enfin, à l'Ifremer nous avons reçu l'aide précieuse de Stéphane Sartoretto, Benoît Loubrieu, Corinne Tomasino, Catherine Satra Le Bris, Claude Augris, Eric Moussat, Francis Gohin et Gilles Trut.

# Table des matières

<b>1. Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1. Contexte .....	1
1.2. Objectifs .....	2
<b>2. Historique de la modélisation de carte d'habitats en Europe</b> .....	<b>3</b>
2.1. Généralités .....	3
2.2. Les paysages marins .....	3
2.3. La typologie Eunis d'habitats marins.....	4
2.4. Programmes internationaux de modélisation des habitats.....	5
2.5. Programmes nationaux de modélisation des habitats.....	8
<b>3. Méthodologie</b> .....	<b>12</b>
3.1. Application de la typologie EUNIS.....	12
3.2. Définition de seuils caractérisant les habitats .....	13
3.3. Cas particulier de la Méditerranée .....	13
3.4. Nature du substrat.....	14
3.5. Zones biologiques .....	17
3.6. Agitation au niveau du fond.....	20
3.7. Autres facteurs .....	22
<b>4. Préparation des couches de base du modèle</b> .....	<b>23</b>
4.1. Bathymétrie .....	24
4.2. Substrat .....	27
4.3. Énergie hydrodynamique au fond de la mer .....	29
4.4. Salinité.....	29
4.5. Cas particulier des zones intertidales.....	29
<b>5. Modélisation</b> .....	<b>31</b>
5.1. Principes généraux.....	31
5.2. Les deux résolutions du projet .....	32
5.3. Projection et conversion en mode maillé.....	33
5.4. Reproductibilité.....	33
<b>6. Évaluation de la fiabilité des cartes résultant du modèle</b> .....	<b>35</b>
6.1. Évaluation des données sources .....	35
6.2. Évaluation quantitative des classes d'habitat par des données externes .....	36
6.3. Évaluation globale .....	37
<b>7. Les produits : rendu cartographique et mise à disposition interactive sur Sextant</b> .....	<b>38</b>
7.1. Production de cartes sur papier .....	38
7.2. Rendu cartographique.....	38
7.3. Filtrage des habitats de petite taille.....	39
7.4. Mise à disposition sur le serveur Sextant.....	40

<b>8.</b>	<b>Application à l’Outre-mer .....</b>	<b>41</b>
8.1.	Département de La Réunion .....	42
8.2.	Départements de Martinique et de Guadeloupe .....	42
8.3.	Département de la Guyane .....	42
<b>9.</b>	<b>Perspectives futures .....</b>	<b>43</b>
9.1.	Amélioration des données sources .....	43
9.2.	Amélioration de la résolution et intégration de biologie.....	44
<b>10.</b>	<b>Références.....</b>	<b>45</b>
 <b>Annexes .....</b>		 <b>47</b>
 <b>Annexe 1 : Habitats EUNIS - Mer Méditerranée.....</b>		 <b>47</b>
 <b>Annexe 2 : Données sources .....</b>		 <b>50</b>
 <b>Annexe 3 : Définition des zones bathymétriques en fonction de la pénétration de la lumière dans la mer .....</b>		 <b>62</b>
 <b>Annexe 4 : Energie hydrodynamique au fond de la mer en relation avec les habitats benthiques. Cas de la Méditerranée occidentale .....</b>		 <b>73</b>
 <b>Annexe 5 : Technique de modélisation.....</b>		 <b>84</b>
 <b>Annexe 6 : Evaluation de la fiabilité de la carte modélisée.....</b>		 <b>91</b>
 <b>Annexe 7 : Rendu cartographique.....</b>		 <b>104</b>



# 1. Introduction

## 1.1. Contexte

L'enjeu que représente la connaissance de nos fonds marins est vraiment apparu il y a seulement quelques années. Cette connaissance est essentielle tant pour le développement raisonné d'activités de plus en plus nombreuses, ceci incluant l'évaluation de leur impact et la nécessaire protection du milieu marin qui en résulte. Les politiques et les actions de gestion, aujourd'hui regroupées sous le vocable « planification stratégique marine » (Marine spatial planning) doivent s'appuyer sur les informations environnementales les plus fiables si on veut mettre en place un développement durable à long terme.

La réalisation des cartes d'habitats des fonds marins passe habituellement par des campagnes d'acquisition d'un ensemble de données tant biotiques qu'abiotiques qui sont ensuite interprétées pour produire les cartes. Pour produire les meilleures cartes il est nécessaire d'avoir la connaissance : a) de la bathymétrie et des formes du fond, b) de la nature du substrat (faciès), c) enfin d'observations ou de prélèvements biologiques ponctuels permettant de décrire finement la nature du sédiment, la faune et la flore. La réalisation de la carte passe habituellement par une première phase à caractère « géologique » aboutissant à une carte morpho-sédimentaire, laquelle est ensuite remodelée en une carte d'habitats par adjonction de l'information biologique. Ce principe est universellement admis et prévaut plus encore en domaine subtidal qu'en domaine intertidal car dans le premier l'acoustique ne donne qu'une vue « modélisée » du fond, rendant impérative la confirmation des entités qu'elle détecte par des observations rapprochées et des prélèvements.

Le programme Natura 2000, le programme Rebenet et d'autres initiatives réalisent couramment de telles cartographies issues de levés et d'interprétation. Le Rebenet par exemple a traité en six ans quelque 600 à 700 km<sup>2</sup> de fonds marins répartis tant dans le domaine intertidal que subtidal côtier breton, ce qui ne représente malheureusement qu'une fraction très faible de l'espace marin. En Méditerranée, de nombreux chantiers ont permis de lever intégralement les herbiers de posidonies et quelques autres biocénoses prioritaires. Les échelles de ces levés sont fines et les habitats marins y sont très bien décrits, couramment jusqu'au niveau 5, voire 6 d'Eunis, en revanche les territoires couverts sont très réduits et les fonds restent mal connus. Natura 2000 a produit de nombreuses cartographies, jusqu'ici intertidales, mais la phase actuelle d'extension en mer pose le problème de la couverture de vastes zones du large. Sur le plateau continental, de nombreuses missions de bathymétrie au sondeur multi-faisceaux ont donné lieu à la réalisation de cartes bathymétriques sur de grandes superficies. En ce qui concerne la nature du substrat des fonds, les connaissances sont beaucoup plus fragmentaires. Quand à la biologie benthique, elle est quasi-inconnue sur ces vastes zones.

A défaut d'une cartographie d'habitats thématiquement exhaustive qui n'est envisageable qu'à très long terme, l'obligation imposée par les directives européennes et plus simplement le besoin qu'a l'ensemble de la communauté nationale de mieux connaître les fonds marins - notamment côtiers - suggèrent de mettre en place une cartographie géographiquement exhaustive qui, en optimisant les connaissances disponibles, soit la plus robuste possible. Ce socle de cartographie, qui ne remplace en rien les cartes de détail mentionnées ci-dessus, présenterait l'avantage d'être disponible en tout point où les informations de base

existent, d'être rattaché à un standard (Eunis) et d'être facilement mis à jour et amélioré au fur et à mesure des acquisitions futures de données.

Ceci vaut aussi au niveau européen et toute initiative qui ne viserait pas à harmoniser ces cartes entre les frontières des pays membres serait rétrograde. C'est ainsi que cette étude se trouve adossée à une étude préparatoire du projet Emodnet de la Commission européenne (DG/MARE) dénommé EUSeaMap dont les réflexions ont apporté de nombreux éléments à ce travail.

## **1.2. Objectifs**

L'objectif général de cette étude est d'utiliser les données existantes et, en les structurant suivant des règles propres à Eunis permettant de donner aux données physiques une pertinence vis à vis de la biologie du fond, de créer une couverture continue de cartes d'habitats des côtes de France. Ces cartes, ersatz de cartes d'habitats venant combler les énormes lacunes en cartes détaillées, permettront de contribuer à la gestion et la protection des espaces marins côtiers et du plateau continental et d'orienter les efforts futurs de levés des fonds marins plus localement. En particulier, ils permettront de répondre à un certain nombre de questions posées par la Directive Habitats et le programme Natura 2000 en mer sur la distribution potentielle de certains habitats prioritaires. Après une rapide revue de l'historique de la modélisation d'habitats et des programmes en cours, le rapport présente les étapes clés de ce travail : a) la collecte des informations sources et leur harmonisation, b) la sélection des habitats modélisables aux deux échelles de travail retenues et la révision des seuils des classes Eunis en fonction de critères biologiques, c) la mise en œuvre du modèle et la présentation des cartes, d) l'évaluation de leur qualité et de leurs limites d'utilisation, e) la dissémination et les perspectives futures.

## **2. Historique de la modélisation de carte d'habitats en Europe**

### **2.1. Généralités**

Le fond de la mer est un environnement complexe qui subit l'influence d'un grand nombre de facteurs physiques, chimiques et biologiques. Les paramètres physiques (abiotiques) tels que la profondeur, la topographie, le substrat influencent la biologie à des échelles très précises et en retour la biologie, par l'action des bio-constructions par exemple, influencent les facteurs abiotiques au niveau du fond. Les communautés sont aussi influencées par les variables de la colonne d'eau que sont la température, la salinité et l'énergie ambiante due aux mouvements de l'eau.

La cartographie des habitats du fond de la mer a généralement été abordée de deux manières que l'on peut dénommer interprétation ou prédiction, mais dans tous les cas, ces deux approches sont une modélisation (c'est à dire une approximation de la réalité des choses) du milieu visant à parvenir au résultat le plus probable. En effet, même les cartes réalisées autrefois à partir d'observation éparses comportaient une large part d'interpolation (autrement dit, de modélisation). Plus récemment, l'emploi de techniques acoustiques a largement réduit cette incertitude.

La modélisation d'habitats est généralement fondée sur la définition de règles de présence de tel ou tel habitat généralement obtenues par observation directe du milieu biologique en relation avec les déterminants physiques. C'est la méthode dite « de bas en haut » qui part des connaissances de terrain. Dans cette approche, objet par exemple du projet (Habmap 2008) en Mer d'Irlande ou des initiatives de modélisation des grandes algues en Bretagne (Méléder, 2010), on génère une carte de probabilité pour chaque habitat. Or ces cartes ont des recouvrements importants, ce qui n'a rien d'étonnant quand on sait la forte variabilité naturelle et les transitions très graduelles du milieu. Il est donc difficile d'assembler ces cartes pour donner une vision d'ensemble utile aux gestionnaires de l'espace.

La modélisation peut aussi être basée sur l'agrégation de variables d'environnement physique classées en catégories séparées par des seuils « encadrant » la présence d'espèces ou de communautés caractéristiques d'un habitat. Ces seuils peuvent être ceux exprimés qualitativement par les typologies d'habitats, qui résultent de l'observation de variables physiques caractérisant les prélèvements ou observations biologiques. Deux filières ont été développées au cours des dernières années, la filière des paysages marins (Marine landscape) et celle de la typologie Eunis.

### **2.2. Les paysages marins**

Pour remédier au manque général d'information structurée sur les fonds marins, les canadiens Roff et Taylor (2000) ont développé le concept de la carte des paysages marins ou « Marine Landscape ». Cette approche consiste à définir les paramètres environnementaux qui contrôlent la distribution des habitats et des espèces faunistiques et floristiques. Ce principe a été testé pour la première fois en Europe par le Royaume-Uni dans le cadre du projet « Irish Sea Pilot » en faisant appel aux techniques SIG, puis appliqué à la totalité des eaux britanniques dans le cadre du projet « UKSeaMap ». Ensuite

les projets Mesh (Mesh, 2008) et Balance (Al-Hamdani and Reker, 2007) ont aussi développé cette approche (voir 2.4.1 ci-dessous).

### 2.3. La typologie Eunis d'habitats marins

Les typologies d'habitats ont été conçues bien avant que n'apparaisse la cartographie prédictive, mais cette dernière a aidé à faire progresser la démarche typologique par la meilleure compréhension des variables physiques et des conditions géophysiques explicatives de la présence des communautés biologiques. Les revues faites par des auteurs britanniques (Hiscock & Connor, 1991 ; Connor et al., 2006) ont identifié les caractéristiques clés d'une typologie d'habitats :

- l'exhaustivité (tous les habitats de la zone étudiée sont présents);
- la structure hiérarchique (pas de duplication d'unités aux niveaux inférieurs) et des éléments de même « valeur » chaque niveau;
- la possibilité d'avoir une vue globale et instantanée aux niveaux supérieurs et une vue bien détaillée pour les experts aux niveaux inférieurs.

Pour satisfaire à ces critères, le développement de la typologie au Royaume Uni a conduit à la mise en place d'une première version de travail en 1997 basée sur l'analyse multivariée de quelque 30000 échantillons biologiques. Après une période d'utilisation probatoire intensive, l'acquisition de nouvelles données et des analyses complémentaires conduisirent à une révision majeure en 2004 ([www.jncc.gov.uk/MarineHabitatClassification](http://www.jncc.gov.uk/MarineHabitatClassification); Connor et al., 2004). Cette typologie est maintenant devenue un standard pour les praticiens de la protection de la nature, les agences régulant les activités industrielles et tous ceux impliqués dans les études de cartographie des habitats marins. Les prochains ajouts majeurs concerneront notamment les habitats profonds.

La typologie d'habitats EUNIS a été développée par l'Agence européenne de l'environnement (<http://eunis.eea.europa.eu/habitats.jsp>) pour répondre aux lacunes que présentaient les systèmes déjà en place comme CORINE. Ces systèmes incluaient déjà l'environnement marin mais restaient non-exhaustifs et manquaient de structure logique. La typologie EUNIS couvre à la fois les domaines terrestre et marin et outre les milieux de l'Atlantique nord-est (bien décrits dans le cadre de la convention OSPAR), elle a été adaptée à la mer Baltique (convention Helcom) et à la Méditerranée (Convention de Barcelone). La plus récente version de 2007 incorpore maintenant des habitats de mer Noire.

EUNIS constitue le seul système cohérent de classification des habitats marins européens. C'est pourquoi son application à un territoire au moyen de la modélisation est au cœur de ce projet. Rappelons que selon EUNIS, un habitat englobe à la fois la « *biocénose végétale et animale en tant qu'élément caractéristique d'un milieu biotique* » et ce milieu lui-même, caractérisé par des facteurs abiotiques. Cette acception du terme *habitat* qui inclut à la fois les éléments biotiques et abiotiques est adoptée dans de nombreux instruments politiques (p. ex. la directive Habitats et la convention OSPAR), et c'est dans ce sens que ce terme est employé dans le présent rapport. En résumé, un habitat est la combinaison d'un biotope (« *milieu physique dont les conditions uniformes permettent d'héberger une biocénose déterminée* » – MESH, 2008) et d'une biocénose (« *ensemble des animaux et végétaux qui vivent en un lieu donné* » – MESH, 2008).

Dans la typologie EUNIS (figure 1), les habitats sont classés selon une hiérarchie à six niveaux. Au niveau 1, les habitats sont répartis entre habitats marins (code A) et autres

(terrestres et d'eau douce). Au niveau 2, EUNIS distingue des types d'habitat marin selon la profondeur, le type de substrat, le caractère permanent ou non de l'immersion, le couvert de glace et les caractéristiques de la colonne d'eau dans la zone pélagique (codes A1 à A8) (Davies, Hill & Moss, 2004). Au niveau 3, les habitats sont classés selon des critères abiotiques tels que la nature du substrat (p. ex. sédiments grossiers, sable, vase sableuse), l'énergie hydrodynamique (forte, modérée ou faible), la température, la quantité de lumière et la salinité. Les distinctions entre habitats sur la base de composantes de la biocénose font leur apparition au niveau 4 dans les milieux rocheux (p. ex. A3.11 – Laminaires, accompagnées d'un tapis faunistique et d'algues rouges foliacées). Cependant, des éléments de la biocénose ne sont pas inclus au niveau 4 dans toute la typologie EUNIS. La figure 1 montre que, dans les milieux sédimentaires, on peut aller jusqu'au niveau 4 de la typologie avec uniquement des données physiques (p. ex. A5.35 – Vase sableuse, dans la zone circalittorale).



**Figure 1** - Exemples tirés de la hiérarchie de la typologie EUNIS. L'exemple de gauche est celui d'un milieu sédimentaire et montre que l'on peut atteindre le niveau 4 de la typologie à partir de données physiques uniquement. L'exemple de droite est celui d'un milieu rocheux et montre que non seulement des données physiques, mais aussi des données sur la biocénose, sont nécessaires pour atteindre le niveau 4.

## 2.4. Programmes internationaux de modélisation des habitats

Il y a eu jusqu'à présent un certain nombre d'initiatives de modélisation des habitats marins mais il demeure difficile de comparer les résultats entre eux. Ceci tient non seulement à des différences de méthodes et de typologies, mais aussi à des caractéristiques

physiographiques ou écologiques différentes. On verra plus bas qu'on compare difficilement l'océan Atlantique, le mer Baltique et la mer Méditerranée, ce qui se perçoit à l'examen de la typologie Eunis et des approximations qu'elle contient pour les deux dernières.

Il y a maintenant une demande explicite de cartographie transnationale, exprimée notamment par la Directive cadre stratégie du milieu marin (DCSMM). En 2012 les Etats membres devront « faire une évaluation initiale de leurs mers, par la compilation des données existantes, ... comprenant une analyse de leurs traits essentiels,... et couvrant les aspects physiques, chimiques, hydromorphiques, les types d'habitats et leurs caractéristiques biologiques ». En particulier l'Annexe III de la Directive définit toute une liste d'éléments à travers lesquels l'évaluation doit être faite, éléments que l'on retrouve pour une large part dans le présent travail.

### 2.4.1. BALANCE

Le projet Interreg IIIB Balance (Baltic Sea Management – Nature Conservation and Sustainable Development of the Ecosystem through Spatial Planning) a surtout développé le concept de Paysages marins. Les cartes produites par Balance restituaient trois visions différentes des fonds marins : a) tout d'abord les traits topographiques tels que plaine sédimentaire, canyon ou mont sous-marin, b) en second lieu les caractéristiques physiographiques tels que baie, archipel ou estuaire, c) enfin la description de la nature du substrat. Une illustration de ce dernier aspect est donnée en figure 2 (Al-Hamdani & Reker, 2007). On y voit une combinaison de zone biologique, de nature du substrat et de salinité, ce dernier facteur étant essentiel en Baltique. D'autres cartes donnent une description topographique du fond. Au total ces différents aspects, aussi riches et exhaustifs soient-ils, ne permettent pas de rendre compte dans un seul document des habitats des fonds marins.

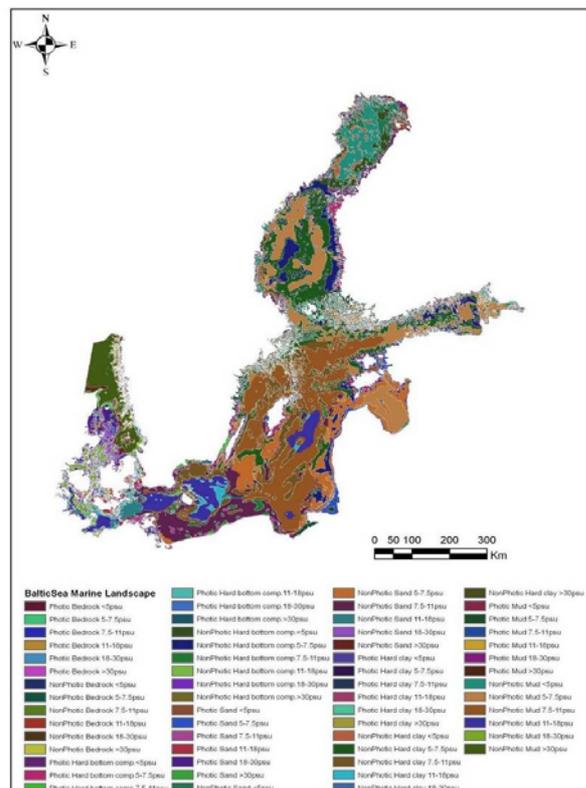


Figure 2 - Cartes d'habitats « Marine landscapes » du projet BALANCE.

## 2.4.2. MESH

De son côté le projet Interreg NW IIIB Mesh (Development of a Framework for Mapping European Seabed Habitats) a fortement développé entre 2004 et 2008 la cartographie prédictive d'habitats sur l'ensemble de la zone économique exclusive des cinq pays concernés. Mesh a affiné les méthodes utilisées dans le projet UKSeaMap et surtout a proposé l'adoption de la typologie EUNIS comme référence de nomenclature des cartes modélisées, ceci afin d'assurer l'homogénéité entre les pays participants. La modélisation Eunis ainsi promue par Mesh (figure 3) se démarquait de la notion plus riche mais aussi plus complexe et multiforme de paysage marin adoptée par Balance de façon à donner plus de lisibilité aux méthodes de modélisation. Pour ce faire, on y utilisait la combinaison de trois couches constitutives essentielles, la nature du substrat, les étages biologiques et l'agitation au niveau du fond, couches elles-mêmes produites à partir d'une série de variables d'environnement abiotique.

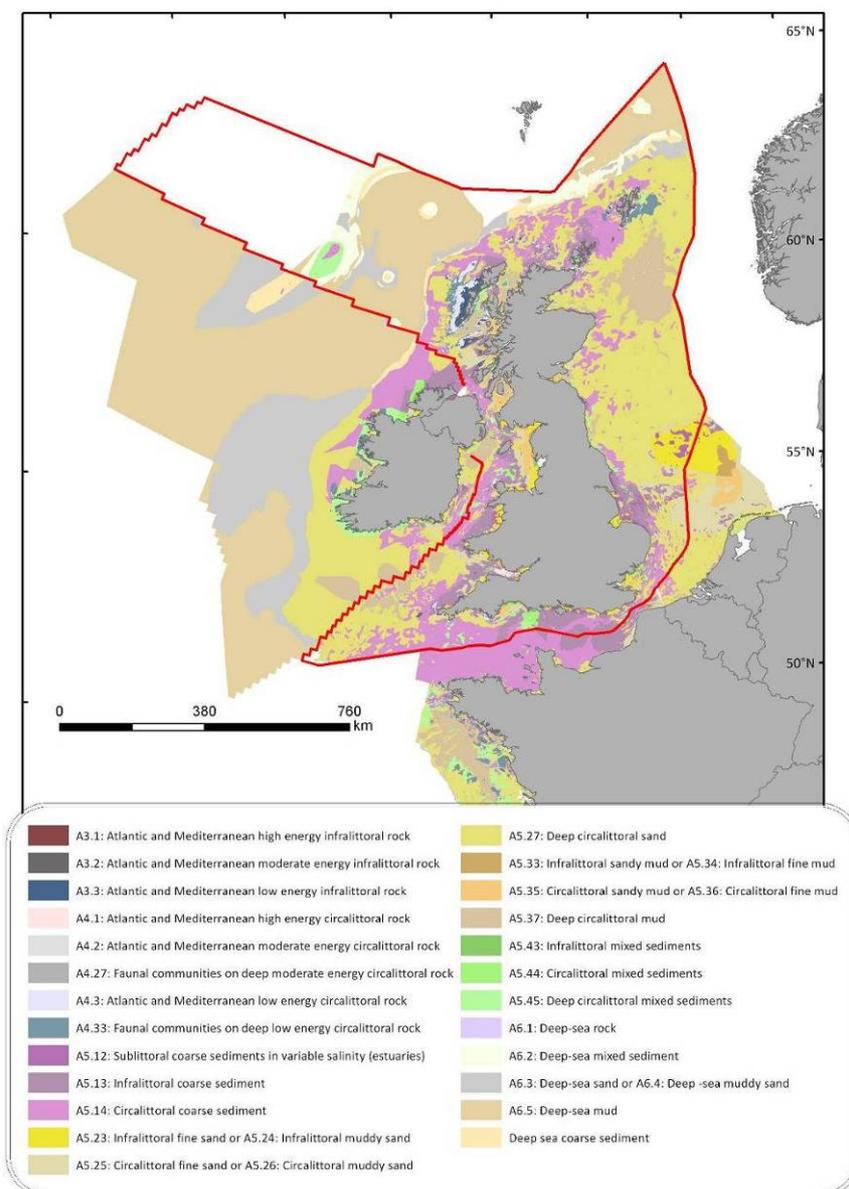


Figure 3 - Cartographie Mesh des habitats marins aux niveaux Eunis 3 et 4 (Coltman *et al*, 2008).

Mesh a aussi développé une procédure d'estimation de la fiabilité des cartes provenant de l'interprétation des levés (Mesh 2008), cependant cette méthode n'avait pas pu alors être étendue aux cartes modélisées.

## **2.5. Programmes nationaux de modélisation des habitats**

Plusieurs programmes nationaux se sont intéressés à la modélisation d'habitats. On peut citer Margis en Allemagne, le programme de cartographie de la plate-forme continentale belge, mais aussi des projets bilatéraux Interreg tels que Habmap dans la mer d'Irlande ou encore Charm en Manche qui se sont intéressés à des habitats particuliers plutôt qu'à une approche holistique.

Cependant ce sont bien les britanniques qui ont tenu le devant de la scène avec le projet UKSeaMap. Dans sa dernière version, UKSeaMap 2010 est un projet qui vise à fournir une carte prédictive complète sur les zones marines britanniques. En effet les cartes d'habitats ne représentent au Royaume Uni qu'à peu près 10% de la surface totale. On s'est donc intéressé depuis 5 ans (avec le premier projet UKSeaMap) à produire une carte pour les 90 % restants qui soit la meilleure possible compte tenu des données disponibles et qui donne une première indication sur les habitats les plus probables (McBreen et al., in prep.).

Pour bien juger de la fiabilité et donc des limites d'utilisation de cette carte, UKSeaMap 2010 fournit en tout point de la carte une estimation de sa fiabilité obtenue par combinaison des probabilités des trois couches constitutives.

Le tableau 1 ci-dessous, reproduit du rapport EUSeaMap (2010) donne les caractéristiques détaillées de cinq projets de modélisation des habitats et met en lumière leurs avantages et leurs limites.

Rappelons que malgré ces quelques initiatives nationales ou internationales, les efforts transnationaux de cartographie des fonds marins européens restent rares. La plupart des efforts de grande ampleur ont concerné les levés géophysiques (surtout depuis l'avènement des levés acoustiques) qui se traduisent par des données de bathymétrie ou de géologie sur de vastes zones. Bien qu'il existe des jeux de données biologiques nombreux et de qualité, ils sont en général localisés et on comprend qu'il ne soit guère possible de les extrapoler à des fins de production d'une carte globale à large couverture. On ne pourra sans doute jamais densifier suffisamment les levés biologiques en haute mer pour des raisons de coûts. C'est pourquoi une carte modélisée à échelle globale est cruciale pour définir une stratégie d'échantillonnage qui révèle les zones méritant des efforts particuliers et optimise les coûts de levés.

**Tableau 1** - Projets de modélisation des habitats benthiques en Europe (d'après EUSeaMap, 2010).

	BALANCE	Belgium	MarGIS	MESH	UKSeaMap
<b>Area covered</b>	Baltic sea	Belgian continental shelf	German EEZ	North-west Europe excluding NW approaches	UK continental shelf excluding NW approaches and North of 62 degrees
<b>Time taken</b>	3 years (2005 - 2007)	2 years (2005-2007)	6 years (1995 – 2000)	3 years (2004 - 2008)	1.5 years (2004 - 2006)
<b>Classification scheme</b>	No standard scheme - Marine landscapes identified in the course of project	Various: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prediction of macrobenthic communities occurring on the Belgian shelf</li> <li>• EUNIS habitat classification for selected benthic communities</li> <li>• Marine landscapes ; full statistical approach</li> </ul>	No standard classification scheme – statistical prediction scheme for selected benthic communities	EUNIS habitat classification	No standard scheme - Marine landscapes identified in the course of project
<b>Detail level (EUNIS equivalent)</b>	Level 3 equivalent – physical only	Level 5 (or equivalent where communities did not fit EUNIS)	Level 5 & 6 equivalent - Biological communities	Levels 3 & 4	Level 3 equivalent – physical only
<b>Input layers</b>	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 (for habitat suitability modelling of macrobenthic communities) (Degraer et al. 2008)</li> <li>• 2 (for EUNIS habitat modelling)</li> <li>• 17 (Marine landscape modelling) (Verfaillie et al. 2009)</li> </ul>	11 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Point map on benthic communities (Rachor and Nehmer 2003)</li> <li>• 10 raster layers on abiotic variables</li> </ul>	5	6 (for predictive mapping)

<b>Highest input layer resolution</b>	~600m	~80m (bathymetry) ~250 (other input layers, except as below) - Geostatistical interpolations of abiotic point data using bathymetry.	3.15 x 3.15 km - Geostatistical interpolations of abiotic point data	~250m	~250m
<b>Lowest input layer resolution</b>	7km	~1km (maximum Chlorophyll a concentration and maximum Total Suspended Matter)	182 point data on benthic communities (Rachor and Nehmer 2003)	12km	12km
<b>Output Scale/Resolution</b>	200m	250m	3.15km	0.0025° (~300m at Thames)	Fine – 0.02° to Coarse – 0.5° (~1.25km - 30km)
<b>Method to define thresholds</b>	Expert judgement	Statistical – Discriminant function analysis between biotic and abiotic datasets for habitat suitability maps and EUNIS classification maps Statistical - K-means cluster analysis between physical datasets for marine landscapes map	Statistical - Sample based decision tree (CART)	Expert judgement and some statistical testing	Expert judgement
<b>Validation</b>	Survey in study area with 4 marine landscapes to test ecological relevance of predicted types.	Used data from Macrodat database (University of Ghent) on macrobenthic communities	Not empirically	Used data from Marine Recorder translated to EUNIS, but not those point which were assigned biotopes by Habitat Matching Program. Validation carried out per polygon.	Table created to match UK&I codes to landscape types. Validation carried using data in UK&I scheme, per landscape type.
<b>Confidence Assessment</b>	No	Yes, using MESH confidence assessment scheme	No	Yes – but the MESH confidence assessment tool developed was only applied to surveyed	Limited - Visualisation of validation results.

				habitat maps, not the modelled habitats.	
<b>Strengths</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collated, harmonized and provided access to large amount of data at international level</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multiple habitat schemes attempted (EUNIS translation, Marine landscapes)</li> <li>• Thresholds based on biological data</li> <li>• Nationally useful for e.g. marine spatial planning</li> </ul>	Thresholds based on association of biotic and abiotic data	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standard and comparable predicted habitat units</li> <li>• Collated, harmonized and provided access to large amount of data at international level</li> </ul>	Variable resolution offshore
<b>Limitations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No standard classification scheme</li> <li>• Thresholds largely based on expert judgement rather than derived from biological data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No standard classification scheme</li> <li>• Requires large amount of biological community data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No standard classification scheme</li> <li>• Coarse resolution</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thresholds largely based on expert judgement rather than derived from biological data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No standard classification scheme</li> <li>• Thresholds largely based on expert judgement rather than derived from biological data</li> </ul>



## 3. Méthodologie

### 3.1. Application de la typologie EUNIS

Les niveaux supérieurs de la typologie EUNIS des habitats marins sont principalement définis à l'aide de variables abiotiques (substrat, profondeur, etc.) dont les classes sont pertinentes pour les biocénoses correspondantes. À titre d'exemple, le substrat comporte des classes pour la roche, le sable, le gravier et la vase, qui hébergent des biocénoses très différentes. Chaque combinaison de variables abiotiques donne lieu à des biocénoses différentes, de sorte qu'il est possible de modéliser la distribution des habitats benthiques à partir des données d'un certain nombre de variables environnementales, en utilisant la structure des niveaux supérieurs de la typologie EUNIS pour définir les relations entre les habitats et leurs caractéristiques abiotiques. La modélisation à l'aide de ces variables abiotiques permet de prédire les classes d'habitat aux niveaux 3 ou 4 de la typologie EUNIS. La structure actuelle de cette typologie n'est pas toujours la mieux adaptée à de tels processus de modélisation descendante, de sorte que la capacité prédictive du modèle n'est pas toujours liée à un même niveau de la typologie EUNIS (p. ex. les classes de niveau 4 ne peuvent pas toutes être prédites à partir des seules données abiotiques). Cela peut refléter des différences significatives dans les caractéristiques biologiques ou révéler des incohérences dans la structure actuelle d'EUNIS. De la même manière, le processus de modélisation peut résulter en des types d'habitat actuellement absents de la typologie EUNIS.

Pour créer une carte modélisée aux niveaux 3 à 4 d'Eunis, il convient d'abord de définir les paramètres physiques qui influencent les habitats du fond de la mer, découlant directement de ceux retenus par Eunis, et surtout de définir leurs seuils d'impact. Cette réflexion a déjà été entamée par l'Ifremer dans le cadre de Mesh pour la zone Manche-Atlantique, zone où la classification Eunis a reçu le plus d'attention. En Méditerranée un échange entre les biologistes de l'Ifremer et ceux de l'ISPRA italien (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) a permis de définir ces paramètres dans le cadre du projet européen EuSeaMap et d'aboutir à une liste de classes Eunis (annexe 1).

Les principaux paramètres environnementaux à inclure dans le modèle sont les suivants :

- le substrat du fond de la mer, qui a une influence tout à fait prépondérante sur la faune et la flore. Sans cette information la modélisation n'est pas possible. Les classes de substrat sont établies de manière à respecter Eunis, c'est-à-dire une typologie basée sur la classification de Folk qui diffère souvent des typologies utilisées par les auteurs de cartes de nature des fonds.
- les « zones biologiques » aussi appelées « zones de profondeur » - ou encore « étages » par Glémarec (1973) - ont été définies par les benthologues en fonction des communautés rencontrées. Par exemple la zone « infralittorale », aussi appelée zone photique est celle où la quantité de lumière permet l'établissement de la flore chlorophyllienne. Plus profondément on trouve ensuite les zones circalittorale puis bathyale, dont les limites ne sont pas strictement définies par un niveau bathymétrique mais sont régies par des conditions locales sur lesquelles s'accordent les biologistes. La définition de ces limites nécessite tout d'abord un travail bibliographique. Si le consensus n'est pas suffisamment établi quant aux seuils les caractérisant, il doit si possible être complété par un travail de validation à l'aide des

toutes les données de terrain historiques disponibles.

- l'énergie au fond de la mer : l'action hydrodynamique sur le fond influence fortement la faune et la flore qui s'y développent. On parle de tension de cisaillement, résultat de l'action commune des courants et des houles. Sur fond sédimentaire cette action conditionne la taille des grains en un endroit donné, elle est donc fortement corrélée à la nature du substrat, en revanche sur fond rocheux c'est une variable indépendante des autres descripteurs du fond.

Ces différentes données, provenant de disciplines diverses, sont en général complexes et leur mode d'action sur la biologie relativement mal connue, ce qui implique encore une réflexion approfondie sur les expressions statistiques discriminantes.

### **3.2. Définition de seuils caractérisant les habitats**

Un élément crucial du processus de modélisation du fond de la mer dans le cadre du projet est la structure de la typologie EUNIS, qui oriente l'application de seuils pertinents sur le plan écologique à des variables environnementales. Ces seuils doivent permettre de classer les variables de manière à obtenir des unités prédictives, en l'occurrence des types d'habitat des niveaux 3 et 4 d'EUNIS. Dans certains cas, la définition d'un habitat benthique se prête naturellement à un seuil clairement défini, qui peut éventuellement être facilement quantifiable. Dans le cas du substrat, il est facile de concevoir des aires rocheuses ou sableuses. Par contre, le concept de « faible énergie hydrodynamique » n'est pas facile à bien définir pour les habitats benthiques. L'étude de ces seuils constitue une étape clé du processus de modélisation. Un seuil peut être déterminé de différentes manières : de façon arbitraire ou intuitive, à partir de l'avis d'experts ou à l'aide d'une variété d'outils analytiques plus complexes.

Par exemple, on peut préciser les classes A3 et A4 de la typologie EUNIS (« Roche et autres substrats durs, dans la zone infralittorale » et « Roche et autres substrats durs, dans la zone circalittorale ») par le type et le degré du couvert végétal observé dans les diverses biocénoses des zones infralittorale et circalittorale. La zone infralittorale est de fait caractérisée par des biocénoses dominées par des Phanérogames marines et des algues photophiles telles que les laminaires et des algues rouges, vertes et brunes, alors que la zone circalittorale, en particulier la zone circalittorale côtière de certaines mers européennes, est caractérisée par une intensité lumineuse réduite qui permet l'existence de communautés végétales clairsemées dominées par des algues brunes et rouges sciaphiles. Selon la littérature scientifique sur les mers de l'Europe septentrionale, la frontière entre les zones infralittorale et circalittorale pourrait être définie par une fraction estimative de 1 % de la lumière présente à la surface atteignant le fond de la mer (voir annexe 3).

### **3.3. Cas particulier de la Méditerranée**

En Méditerranée, les habitats et biocénoses sont rarement décrits en typologie Eunis mais plus couramment par la typologie de la Convention de Barcelone (annexe 1). La transposition n'est pas immédiate et il a fallu plusieurs réunions de projet pour faire converger les définitions. Les habitats potentiellement modélisables ont été identifiés à partir d'une liste exhaustive de tous les habitats benthiques de la convention UNEP-MAP Barcelone rencontrés en Méditerranée occidentale. On n'a d'abord retenu que les habitats qui pouvaient être cartographiés, soit à la résolution de 250m, soit à celle de 100m, c'est-à-

dire dont l'extension dans les deux dimensions représentaient plus d'un ou deux pixels. Un certain nombre d'habitats des zones accores ont ainsi été éliminés. Dans la région de Cannes par exemple, la zone infralittorale peut ne faire que quelques pixels de large et certaines unités de substrat peuvent être plus petites encore et par conséquent non-cartographiables.

Les discussions ont porté sur la caractérisation la plus précise possible de chaque habitat sélectionné en termes de substrat, zone de profondeur et énergie au niveau du fond, en partant de la description donnée par la typologie de Barcelone et des ajouts de dires d'experts. Idéalement, on recherchait une relation univoque entre un habitat et un triplet de caractéristiques. Un exemple significatif est l'habitat "Mediterranean biocoenosis of muddy detritic bottoms" que l'on a défini comme un faciès de vase sableuse, situé dans le circalittoral côtier et à faible énergie, correspondant au code Eunis A5.38. Si ce triplet de caractéristiques est unique pour cet habitat, alors on peut par retour inverse le définir de manière univoque en tout point où ces trois caractéristiques sont réunies.

L'annexe 1 donne une liste des habitats modélisés, au nombre de 19 pour la résolution 250m, auxquels il convient d'ajouter les Posidonies et les Cymodocées (qui ne sont pas modélisées, voir ci-dessous). A la résolution de 100m, quatre habitats complémentaires apparaissent en zone infralittorale, même s'ils restent d'extension spatiale limitée et souvent sous forme de taches de quelques pixels, soit un total de 25.

### **3.4. Nature du substrat**

#### **3.4.1. Manche et Atlantique**

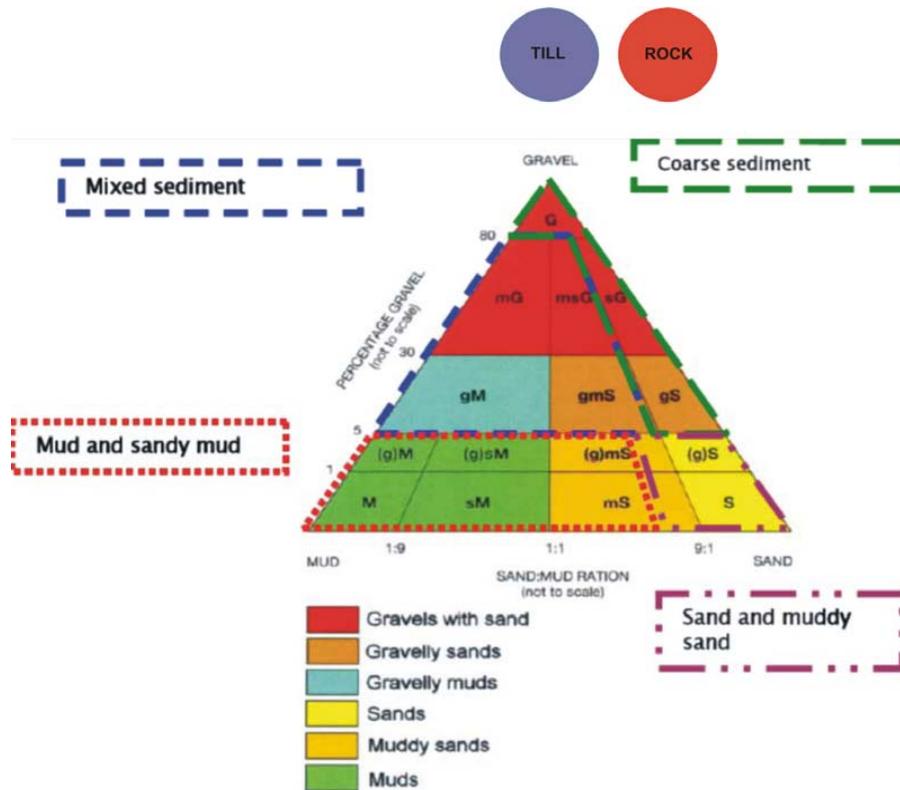
Il est important d'utiliser une typologie des sédiments appropriée qui non seulement soit compatible avec EUNIS, mais qui de plus se prête à la collecte et à l'harmonisation des données. Dans des projets antérieurs, la typologie de Folk avait été choisie parce que ses classes peuvent être adaptées à de nombreux jeux de données puis être regroupées afin de correspondre aux types de substrat de la typologie EUNIS.

Pour la Manche et l'Atlantique, à la différence du projet EUSeaMap qui a adopté quatre classes de sédiment ainsi que la roche (figure 4), il a paru possible de retenir sept classes permettant de respecter la description Eunis du substrat au niveau 4. Ainsi les classes utilisées sont : sédiments grossiers ; sédiments mixtes ou mixtes envasés ; sable ; sable vaseux ; vase sableuse ; vase ; roche.

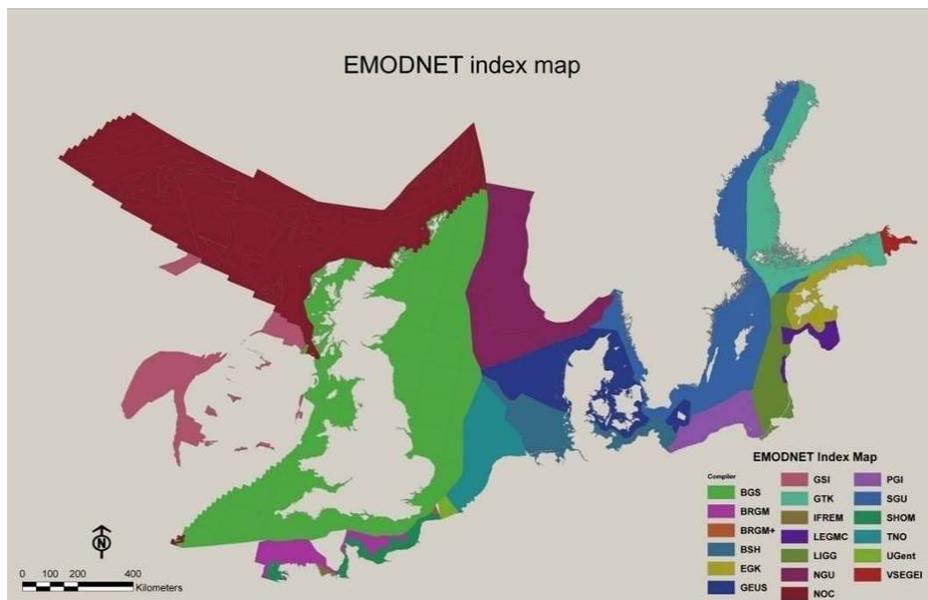
Les cartes de sédiments qui ne suivaient pas à l'origine la typologie de Folk ont fait l'objet d'une reclassification. La première étape de cette reclassification a consisté à analyser le matériau de surface. Autant que possible, le contenu du substrat a été examiné à partir des prélèvements réels effectués à la surface et d'une analyse granulométrique. Lorsque cela n'était pas possible, on a eu recours à une estimation des sédiments de surface fondée sur l'opinion d'experts.

On a ensuite établi la meilleure correspondance possible entre les estimations des sédiments de surface et la typologie de Folk modifiée. Malheureusement, la reclassification des substrats donne parfois des résultats ambigus. En particulier, il s'est avéré difficile de définir la classe « sédiments mixtes ». Par exemple dans le projet Emodnet, on a constaté que le terme « sédiments mixtes » avait été interprété différemment par les divers partenaires au cours du processus d'harmonisation. Par exemple, les types suivants de fond

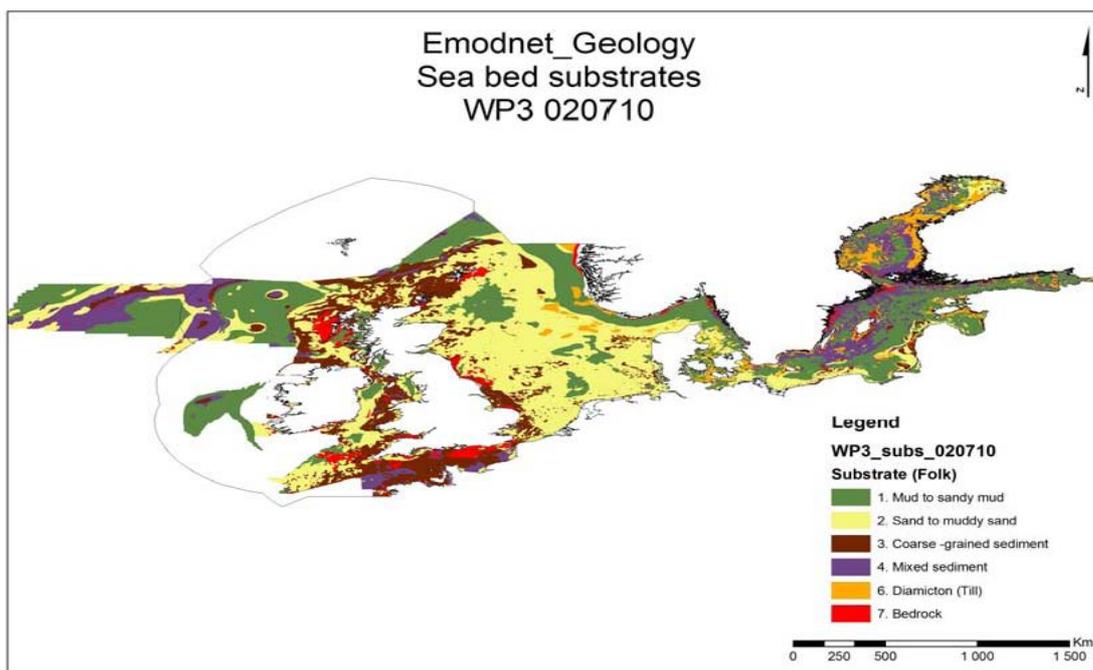
océanique et de sédiments ont été identifiés comme « sédiments mixtes » : fond océanique mosaïqué ; argile d'origine glaciaire ; distribution granulométrique bimodale.



**Figure 4** – Typologie de Folk des sédiments, avec les regroupements utilisés dans le projet EUSeaMap pour la mer du Nord et la mer Celtique. Noter le seuil des rapports modifié pour la classe « Sable et sable vaseux ». Noter également que les blocs et la roche en place sont regroupés.



**Figure 5** – Carte index d'EMODNET montrant les sources des cartes de substrats utilisées pour produire la carte de substrats harmonisée.



**Figure 6** – Carte de substrats benthiques de la section Géologie du projet EMODNET

### 3.4.2. Méditerranée

De manière générale, on possède des cartes à échelle fine des sédiments autour des côtes méditerranéennes. Aux endroits où des cartes détaillées n'étaient pas disponibles, on a utilisé les cartes de distribution des sédiments de la Carte bathymétrique internationale de la Méditerranée (IBCM) produite par la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO.

Dans le cadre d'EuSeaMap, à la suite de nombreuses discussions relatives aux habitats possibles à modéliser, les partenaires ont converti leurs cartes selon la typologie commune suivante : sédiments grossiers et mixtes envasés ; sable ; sable vaseux ; vase sableuse ; vase ; roche. Cette typologie est légèrement différente de celle de la zone Manche-Atlantique en ce que les biologistes ont préféré regrouper l'ensemble sédiments mixtes et sédiments grossiers – hors roches - en une seule classe, tout en conservant la description fine de la fraction de vase par quatre catégories allant du sable à la vase. Les données brutes qui ont servi à produire les cartes à échelle fine des sédiments n'étaient pas accessibles au projet, de sorte que les conversions ont résulté de l'interprétation par des experts de classes déjà cartographiées, plutôt que de l'examen des données sur la granulométrie ou la composition des sédiments.

En outre en Méditerranée, *Posidonia* et *Cymodocea* sont souvent considérés comme des types de substrat dans les cartes géologiques. Plutôt que de perdre cette information biologique utile (au profit d'une nature sédimentaire des fonds moins pertinente), on a intégré les classes *Posidonia* et *Cymodocea* dans la carte finale de substrats de la Méditerranée.

### 3.5. Zones biologiques

Les zones biologiques ou “étages” résultent d’une zonation des communautés depuis le rivage jusqu’aux abysses. Cette zonation n’est pas directement fonction de la profondeur mais reflète une combinaison de facteurs. Par exemple sur l’estran il s’agira de la durée d’exondation, combinaison de l’amplitude de la marée et de l’altitude du lieu. En zone subtidale, la profondeur de la zone photique varie du tout au tout avec la turbidité. Pour les grandes profondeurs, la stabilité thermique augmente plus on descend. Il y a des différences entre les manières de définir les seuils entre zones entre les différents bassins maritimes comme par exemple entre Atlantique et Méditerranée, qui résultent de consensus entre biologistes reflétés par la littérature.

En outre, les seuils s’exercent plus ou moins fortement suivant les deux grandes classes de nature du fond, dur ou meuble. Sur fond rocheux d’estran par exemple, les variations de faune et de flore peuvent intervenir en quelques dizaines de centimètres ou quelques mètres de distance, alors que sur faciès sédimentaires, les transitions généralement moins marquées.

#### 3.5.1. Pénétration de la lumière

##### Généralités

La disponibilité de la lumière dans la colonne d’eau et au fond de la mer varie de manière considérable. Elle exerce une influence particulière sur la profondeur à laquelle les macrophytes (laminaires, algues, Phanérogames marines, p. ex. *Posidonia* spp.) peuvent croître. L’intensité de la lumière diminue à mesure que la profondeur augmente, en raison des effets de dispersion et d’absorption de la lumière par les molécules d’eau, les particules en suspension, le phytoplancton et les matières organiques colorées dissoutes. Cette atténuation tend à être plus forte dans les eaux côtières, à cause des matériaux en suspension et dissous amenés par les cours d’eau, des concentrations plus élevées de phytoplancton, ainsi que des sédiments en suspension sous l’action des vagues en eau peu profonde.

L’atténuation de la lumière est la variable qui sert à définir la zone infralittorale, où l’irradiation du soleil est encore suffisante pour permettre une activité photosynthétique significative de végétaux tels que les laminaires et les Phanérogames marines. Cette variable peut également servir à définir la zone circalittorale côtière, où la quantité estimative de lumière qui atteint le fond se situe entre 0,01 % et 1 % de la lumière présente à la surface, ce qui rend possible une activité photosynthétique des algues sciaphiles telles que les Fucales (*Cystoseira* et *Sargassum* spp. d’eau profonde), Laminariales, Desmarestiales et Sporochnales, ainsi que d’espèces d’algues rouges (Rhodophycées). En Méditerranée, certains habitats caractéristiques tels que des assemblages coralligènes consistant en des bioconstructions plus ou moins massives formées de Corallinales, ainsi que des rhodolithes (bancs de maërl) prospèrent dans cette zone.

##### Calcul de l’intensité lumineuse dans la colonne d’eau

L’imagerie satellitaire de couleur des océans donne de manière efficace des cartes étendues de l’atténuation de la lumière, avec une grande résolution spatiale et temporelle. Plusieurs modèles communément employés permettent de dresser des cartes de  $K_{dPAR}$  (le coefficient d’atténuation dans l’eau de la lumière photosynthétiquement active) à partir d’images satellitaires. Pour le projet EUSeaMap, une estimation du  $K_{dPAR}$  a été réalisée à

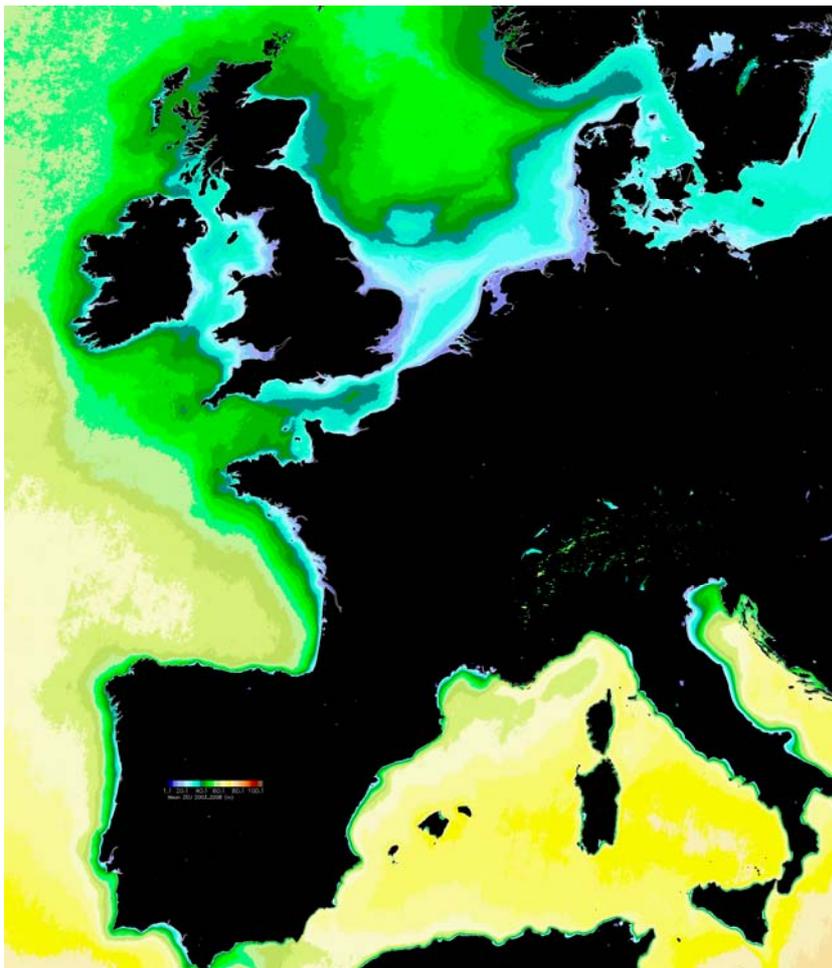
partir de la radiance mesurée par MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer – Saulquin et al., à paraître), le spectromètre imageur à résolution moyenne placé à bord du satellite européen Envisat.

Les zones bathymétriques peuvent être délimitées en combinant les données bathymétriques avec ces valeurs d'atténuation de la lumière et en utilisant un seuil prédéfini. La fraction de la lumière présente à la surface qui atteint une profondeur donnée se calcule à l'aide de la formule :

$$Fr = e^{-h/D_m} \quad (1)$$

où  $h$  est la profondeur, et où  $D_m = K_{d_{PAR}}^{-1}$  est parfois appelé la profondeur de pénétration moyenne.

Les images à haute résolution de MERIS (pixels de 250 m de côté) des années 2003 à 2008 ont été traitées pour la région illustrée sur la figure 7 (délimitée par les méridiens 13W et 18E, ainsi que les parallèles 36N et 60N). Une telle résolution est particulièrement utile pour les côtes plus accores de la Méditerranée ainsi que pour les côtes rocheuses complexes comme il y en a sur les rives de la Manche et de l'Atlantique. L'algorithme de prédiction de  $K_{d_{PAR}}$  à partir de données satellitaires de MERIS a été calibré par des données de radiométrie acquises in situ par plusieurs équipes au monde (Saulquin 2010).



**Figure 7** – Aperçu général de Zeu (profondeur de la zone photique) calculé à partir des images du capteur Meris du satellite Envisat de l'Agence spaale européenne.

Les traitements des données ont été effectués par la société ACRI, qui a accès à l'archive à l'ensemble de l'archive à haute (HR) et basse (RR) résolution du capteur de couleur de l'eau MERIS du satellite Envisat de l'Agence spatiale européenne. L'ensemble de la méthodologie est décrite en annexe 3.

### **Validation des seuils d'intensité lumineuse**

Pour valider les seuils de 1 % et de 0,01 % de lumière résiduelle obtenus par imagerie satellitaire, on a effectué des comparaisons avec des données recueillies sur le terrain pour chaque bassin. Dans l'Atlantique, on a comparé les mesures acoustiques des forêts de laminaires effectuées sur un certain nombre de sites en Bretagne, lors de campagnes menées en 2006 et 2007, avec la zone photique déduite des valeurs de  $K_{dPAR}$ .

La Méditerranée, où des données de terrain sur l'intensité lumineuse n'étaient pas disponibles, a fait l'objet d'une validation plus approfondie (voir l'annexe 3). Le modèle de la zone photique a été mis à l'épreuve au regard de la distribution connue de prairies de *Posidonia oceanica* en bonne santé et dont on sait que la limite inférieure est liée à la diminution de l'intensité lumineuse. La validation a porté sur 40 sites choisis en Espagne, en France et en Italie, où l'on a déterminé les polygones homogènes les plus grands, en excluant du processus les zones fragmentées. Les données bathymétriques utilisées pour établir la zone photique par intersection avec le fichier  $K_{dPAR}$  provenaient des meilleurs modèles numériques de terrain disponibles (MNT de résolution de 100 m). Les grandeurs statistiques ont été calculées pour le pourcentage le plus faible de lumière résiduelle selon les données de MERIS à 250 m dans chacun des 40 polygones. Étant donné la distribution log-normale, la valeur médiane de 0,82 % a été considérée comme un seuil valide déterminant la frontière entre les zones infralittorale et circalittorale.

La limite inférieure de la zone circalittorale côtière, réputée correspondre à 0,01 % de lumière résiduelle, est définie par la profondeur la plus grande à laquelle on trouve des algues sciaphiles. Cependant, non seulement la distribution de ces algues est mal connue et peu cartographiée, mais leur extension spatiale est limitée et beaucoup trop fine par rapport à la limite de résolution de 250 m du modèle. Faute de pouvoir valider la valeur de 0,01 % à cause du manque de données sur ces communautés, on a pris pour acquis ce seuil comme limite inférieure de la zone circalittorale côtière.

### **3.5.2. Autres facteurs de zonation**

La zone circalittorale côtière mentionnée ci-dessus n'est pas toujours définie par un niveau de lumière. Des auteurs s'accordent pour la définir comme la limite d'action des vagues (appelée « base des vagues »). Dans ce cas, on doit utiliser la demi-longueur d'ondes de la fréquence pic de houle calculée sur une longue période. Les lecteurs intéressés peuvent se reporter au rapport EUSeaMap (2010) qui décrit l'application de cette méthode en mer Celtique.

Dans ce projet, la limite définie ci-dessus à l'aide du 0.01% de lumière rémanente a été comparée à la limite externe du circalittoral sur les cartes d'habitats de sud Bretagne de Glémarec et la bonne concordance entre les deux contours nous a amenés à retenir cette définition. L'autre facteur de zonation est la pente (voir tableau 2 et section 4.1), utilisée surtout aux niveaux plus profonds.

**Tableau 2** - Limites des zones subtidales pour les façades Atlantique et Méditerranéenne.

Zone biologique	Limite haute	Limite basse
Infralittoral (Atlantique & Méditerranée)	Plus basses mers	Intersection du fond avec le niveau 1% de la lumière incidente en surface
Circalittoral côtier (Atlantique)	Intersection du fond avec le niveau 1% de la lumière incidente en surface	Intersection du fond avec le niveau 0.01% de la lumière incidente en surface
Circalittoral côtier (Méditerranée)	Intersection du fond avec le niveau 1% de la lumière incidente en surface	Intersection du fond avec le niveau 0.01% de la lumière incidente en surface
Circalittoral du large (Atlantique)	Intersection du fond avec le niveau 0.01% de la lumière incidente en surface	Rebord du plateau défini par cassure bathymétrique (à défaut profondeur de 200m)
Circalittoral du large (Méditerranée)	Intersection du fond avec le niveau 0.01% de la lumière incidente en surface	Rebord du plateau défini par cassure bathymétrique (à défaut valeur moyenne de profondeur)
Bathyal (Méditerranée)	Rebord du plateau défini par cassure bathymétrique (valeur moyenne de profondeur)	Pied du talus défini par cassure bathymétrique (à défaut valeur moyenne de profondeur)
Bathyal (Atlantique)	Sommet de la thermocline permanente (à défaut profondeur de 750m)	Pied du talus défini par cassure bathymétrique (à défaut valeur de profondeur de 2700m)
Abyssal (Atlantique & Méditerranée)	Pied du talus défini par cassure bathymétrique (à défaut profondeur de 2700m en Atlantique)	n/a

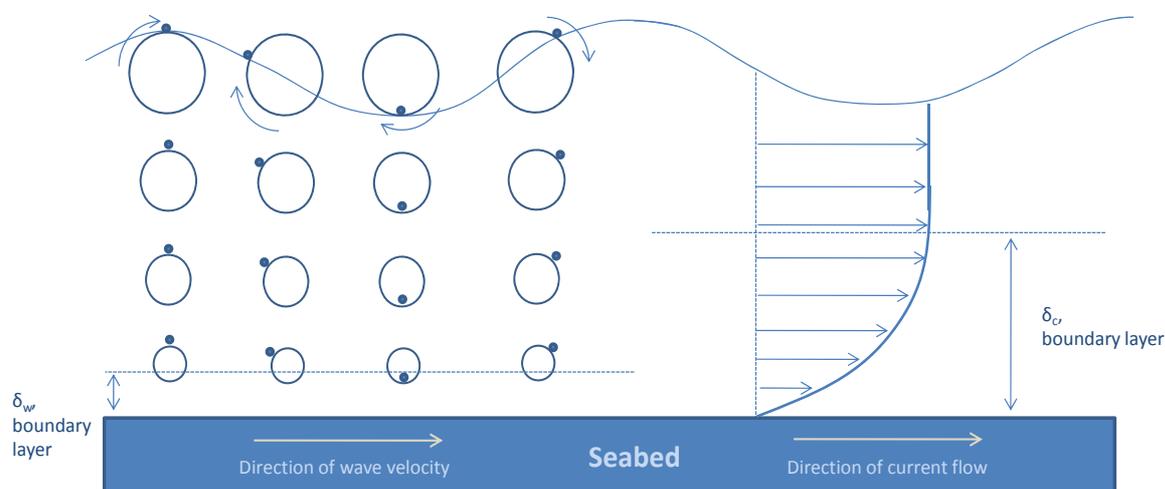
### 3.6. Agitation au niveau du fond

#### 3.6.1. Énergie hydrodynamique au fond de la mer

L'énergie exercée par les forces hydrodynamiques sur le fond de la mer conditionne pour une large part la faune et la flore qui s'y développent. Ceci est surtout vrai sur les fonds rocheux, mais aussi dans une moindre mesure sur les fonds meubles. Glémarec (1973) dans sa définition des étages, prend en considération la limite d'influence des grandes houles sur les fonds marins.

L'énergie sur le fond peut être caractérisée de plusieurs manières suivant qu'on considère l'action des courants, des vagues, ou mieux, de leur combinaison. Les vagues par exemple sont décrites statistiquement par leur hauteur, leur période, ou la vitesse orbitale de l'eau qui varie avec la profondeur. Les courants sont décrits par leur vitesse et leur direction. Un paramètre souvent utilisé est la tension de cisaillement, mesure de la contrainte exercée sur le fond par les vagues et les courants (figure 8). Cette tension est fonction de plusieurs paramètres hydrodynamiques, de la nature du fond (caractérisée par la granulométrie sur fond meuble) et des effets de couche limite. On a des connaissances sur la tenue des fonds meubles sous l'action hydrodynamique, ce qui est beaucoup moins bien connu est la

relation entre l'établissement des communautés benthiques sous ces mêmes effets. Le déficit d'information est encore plus grand sur les fonds rocheux, traditionnellement moins étudiés que les fonds meubles.



**Figure 8** – Schéma montrant l'interaction vagues/courants sur le fond.

L'importance relative de l'effet des vagues et des courants est très différente entre un système macrotidal tel que la Manche, un système dominé par la houle en Atlantique et un système dominé par l'action des vents tel que la Méditerranée. Ces phénomènes agissent à des niveaux d'amplitude très différents, mais il faut savoir que même des courants faibles au niveau du fond peuvent être tout à fait déterminant vis à vis de la présence de tel ou tel habitat. En zone côtière, les effets des courants et des vagues se combinent, et au fur et à mesure que la profondeur s'accroît, les courants deviennent prépondérants. La limite d'action des vagues est appelée « base des vagues »

Dans la typologie EUNIS, l'énergie hydrodynamique figure au niveau 3 dans le cas des habitats rocheux (voir figure 1), mais cela ne s'applique pas aux sédiments puisque les types de sédiments sont généralement le reflet du régime hydrodynamique de la zone où ils se trouvent. On a fait appel à la méthode de Soulsby (1997) pour combiner les données sur les vagues et les courants et obtenir une tension de cisaillement, méthode s'appliquant pour des milieux sédimentaires plutôt que rocheux (Annexe 4).

### 3.6.2. Energie due aux vagues

L'action des vagues affecte les communautés présentes en zone côtière en fonction de l'orientation de la côte vis-à-vis des vents dominants, du degré d'ouverture des baies, du fetch (distance des côtes les plus proches) et de la topographie à l'approche des côtes (Hiscock, 1996). Ceci se manifeste par un tri naturel des sédiments (sédiments plus grossiers sur les côtes exposées et plus fins en zone protégée) ou par une action directe sur les communautés d'épifaune rocheuse. L'action des vagues varie à la fois horizontalement (phénomènes de réflexion) et verticalement (réfraction ou dissipation avec la profondeur).

Des différences très marquées s'observent dans les communautés suivant leur exposition, depuis les rivages fortement exposés (dominance animale de type moules ou balanes) jusqu'aux milieux plus calmes caractérisés par les algues fucales. De telles différences

peuvent intervenir en quelques dizaines de mètres, comme par exemple entre les deux côtés d'un cap ou de part et d'autre d'un îlot. En zone subtidale, ces schémas demeurent mais au fur et à mesure que la profondeur augmente, ils s'atténuent au profit des courants.

Un certain nombre de variables peuvent constituer des mesures de l'énergie hydrodynamique, et la fréquence temporelle est une question importante à prendre en considération. L'énergie maximale des vagues structure les habitats benthiques par son pouvoir destructeur, mais il se peut qu'une onde de tempête n'affecte le fond de la mer à un endroit donné que tous les 10 ou 20 ans. Les variables classiques que sont la hauteur significative ( $H_{1/3}$ ) et la période de pic ( $T_p$ ) modélisées sur de longues périodes puis combinées avec le profondeur d'eau, peuvent donner une estimation de la vitesse orbitale au niveau du fond. Il est important d'exclure les événements exceptionnels en retenant les statistiques pour un rang centile élevé sur des périodes aussi longues que possible.

### **3.6.3. Energie due aux courants**

Les courants affectent fortement les communautés benthiques. Ils ont une influence marquée sur les fonds meubles, créant des formes sédimentaires qui ont une répercussion sur l'endofaune. Ils agissent directement sur la colonisation des roches par la flore et l'épifaune, ainsi que sur les bio-constructions de type maërl ou corail.

En zone très côtière, les courants peuvent être très violents dans des sections resserrées, avec une action positive sur la biodiversité. A la différence des vagues, des courants forts peuvent se produire sur l'ensemble de la colonne d'eau (comme par exemple en Manche). L'énergie hydrodynamique résultant des courants de marée constitue une force plus constante que celle des vagues, qui agit sur le fond de la mer pendant toute l'année. À titre d'exemple, des données probantes montrent que, dans la mer Baltique, ce sont ces conditions moyennes qui structurent les biocénoses. Les statistiques de courant devront prendre en compte ces caractéristiques.

### **3.7. Autres facteurs**

La typologie Eunis pour l'Atlantique et la Méditerranée ne retient pas d'autre facteur déterminant que les trois ci-dessus mentionnés. La température intervient bien sûr dans l'étagement des espèces, et en Atlantique le régime saisonnier est fortement lié à la stratification ou au brassage des eaux, cependant qu'en Méditerranée, deux zones de température bien distinctes existent. Cependant, aux dires des benthologues, il n'a pas paru capital de proposer ce facteur comme permettant d'individualiser un habitat particulier. De la même manière, la salinité n'est pas apparue comme un facteur discriminant. Notons qu'aucun de ces deux paramètres n'est pris en compte par Eunis sur les zones marines considérées ici.



## 4. Préparation des couches de base du modèle

Les tableaux 3 et 4 énumèrent les sources des données ayant permis d'alimenter le modèle pour les zones Atlantique et de Méditerranée.

**Tableau 3** - Couches physiques employées pour la modélisation pour le secteur Manche-Atlantique.

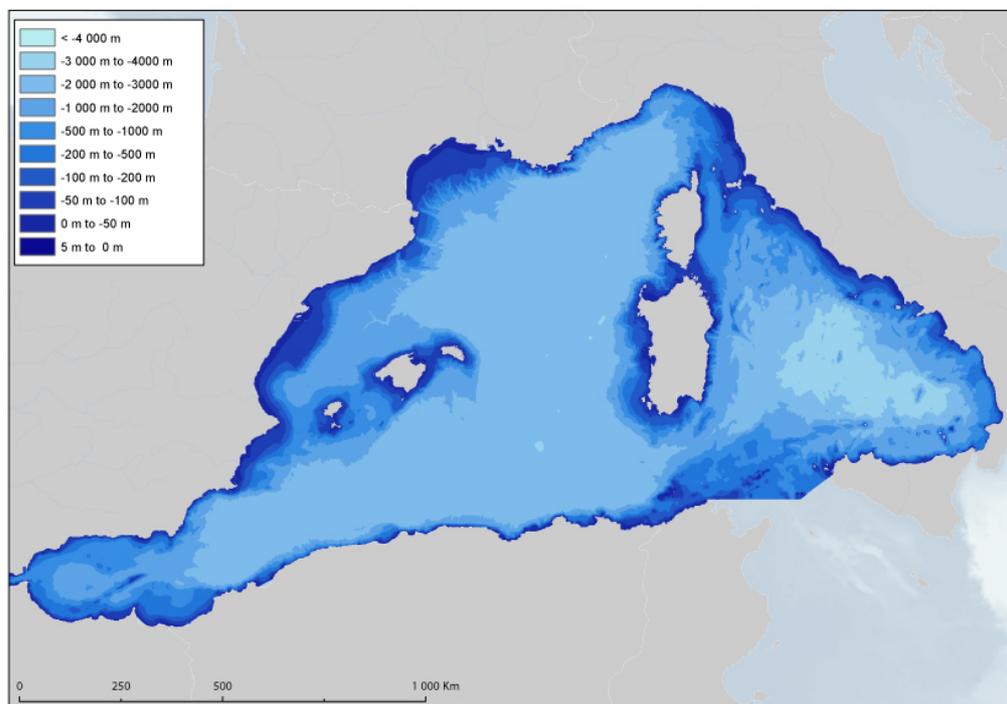
Couches physiques	Organisation	Source(s)	Résolution
Bathymétrie	SHOM	MNT	100m
	IFREMER	MNT	500m
Lumière	ESA	MERIS sur ENVISAT	250m et 1 km
Substrat	Sources variées	CNEXO/BRGM SHOM Univ. Bordeaux	de 1:50.000 à 1:500.000
Vagues	IFREMER	NORGAS et NOOS	4 km et 10 km
Courants	IFREMER	MARS 2D (modèle SBSM et NORM) et 3D	3 à 4 km (modèle 3D) de 250m à 1km (modèle 2D)

**Tableau 4** - Couches physiques employées pour la modélisation en Méditerranée

Couches physiques	Organisation	Source(s)	Résolution
Bathymétrie	SHOM	MNT	100m
	IFREMER	MNT	125m
Light	ESA	MERIS sur ENVISAT	250m et 1 km
Substrat	Sources variées	BRGM SHOM Univ. Perpignan GIS Posidonies	de 1:10.000 à 1:500.000
	IBCM	Carte IBCM	1:10.000.000
Vagues	PREVIMER	WAVEWATCH III	10km
Courants	PREVIMER	MENOR	1km

## 4.1. Bathymétrie

La bathymétrie est une donnée essentielle qui n'apparaît pas de manière explicite dans le modèle (au plus comme isolignes limitant des zones biologiques) mais qui sous-tend plusieurs des paramètres. Les sources de données sont principalement le SHOM mais aussi l'Ifremer. L'Ifremer a produit des MNT partiels à l'aide de données multifaisceaux tant sur le plateau aquitain que sur celui du golfe du Lion, à une résolution approchant la centaine de mètres. Le SHOM a délivré à l'Ifremer l'ensemble de sa BDBS (base de données de sondes) des côtes de France (densité maximale un point tous les 25m), en l'autorisant à réaliser des produits dérivés. A partir de cette source, il a été produit par interpolation par krigeage un modèle à résolution de 100m (Géovariances, 2008) qui est utilisé en totalité pour la version fine du modèle. Dans la version à basse résolution, ce modèle a été par endroits moyenné sur des pixels à 250m où les autres données manquaient.

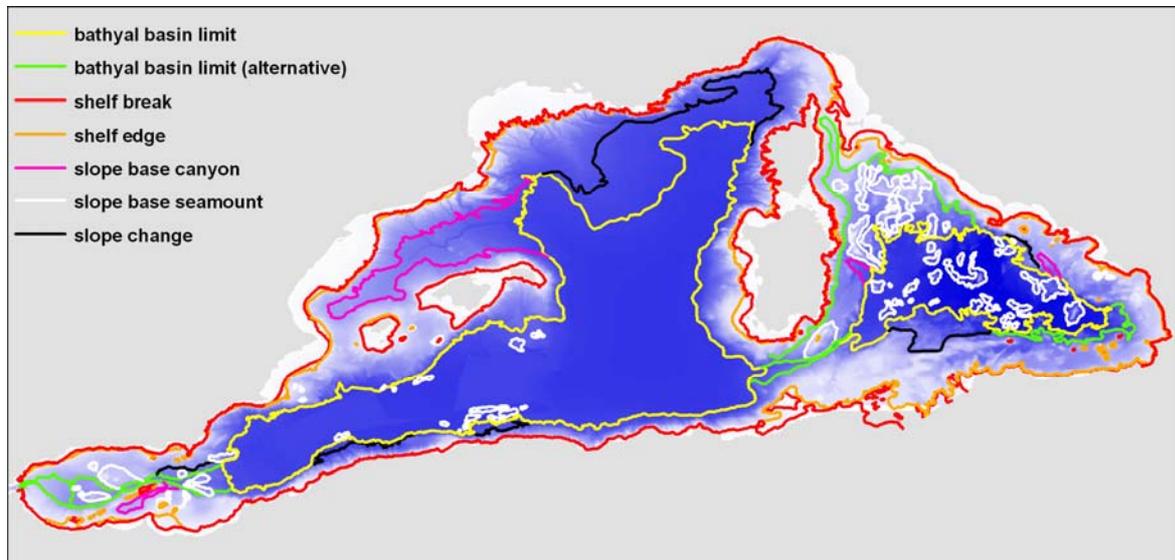


**Figure 8** - Bathymétrie du bassin de Méditerranée occidentale (projet EUSeaMap).

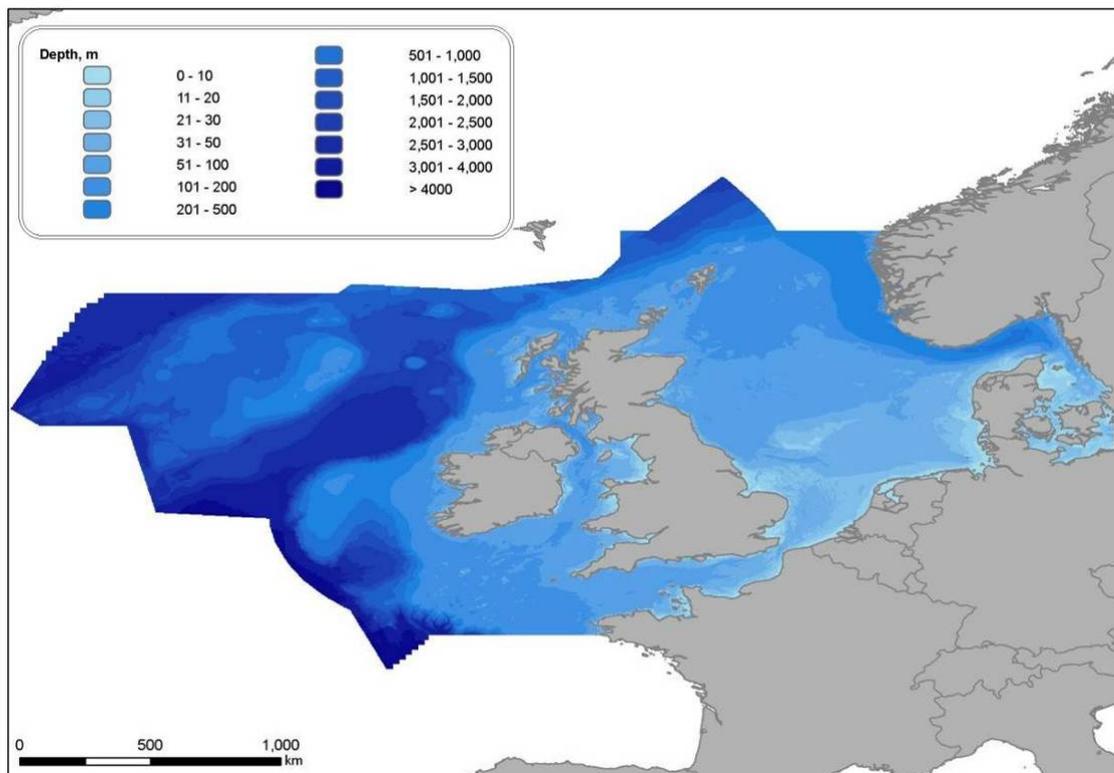
En Méditerranée, le modèle bathymétrique a été utilisé pour élaborer les limites des zones circalittorale, bathyale et abyssale comme indiqué dans le tableau 2. Ces zones sont définies par des ruptures de pente ayant une incidence sur la biologie. La rupture de pente dénommée "rebord du plateau" qui définit la limite inférieure du circalittoral du large est généralement bien perçue sur une vue des pentes du MNT bathymétrique. La littérature indique que cette rupture intervient entre 110 et 260m (Carpine, 1970) avec une fourchette plus ciblée de 170-210m. Similairement, le bathyal se termine là où apparaît une rupture de pente située entre 2500 et 3000m.

L'examen du MNT et de sa pente n'a pas permis de définir des valeurs de coupure suffisamment nettes pour pouvoir seuiller automatiquement le fichier de pente. Il a fallu s'en remettre à une identification quasi-manuelle se fondant sur l'examen de la pente et accessoirement de l'orientation pour trouver la valeur la plus satisfaisante. En certains endroits, l'absence de rupture marquée de la pente a obligé à recourir à une valeur de

profondeur par défaut. Cette valeur de profondeur a été définie en moyennant la bathymétrie des pixels sous-jacents à la ligne de rebord, là où cette dernière était franche. La figure 9 montre la topographie de la Méditerranée due aux différents niveaux de rupture de pente.



**Figure 9** - Lignes de rupture de pente observées en Méditerranée.



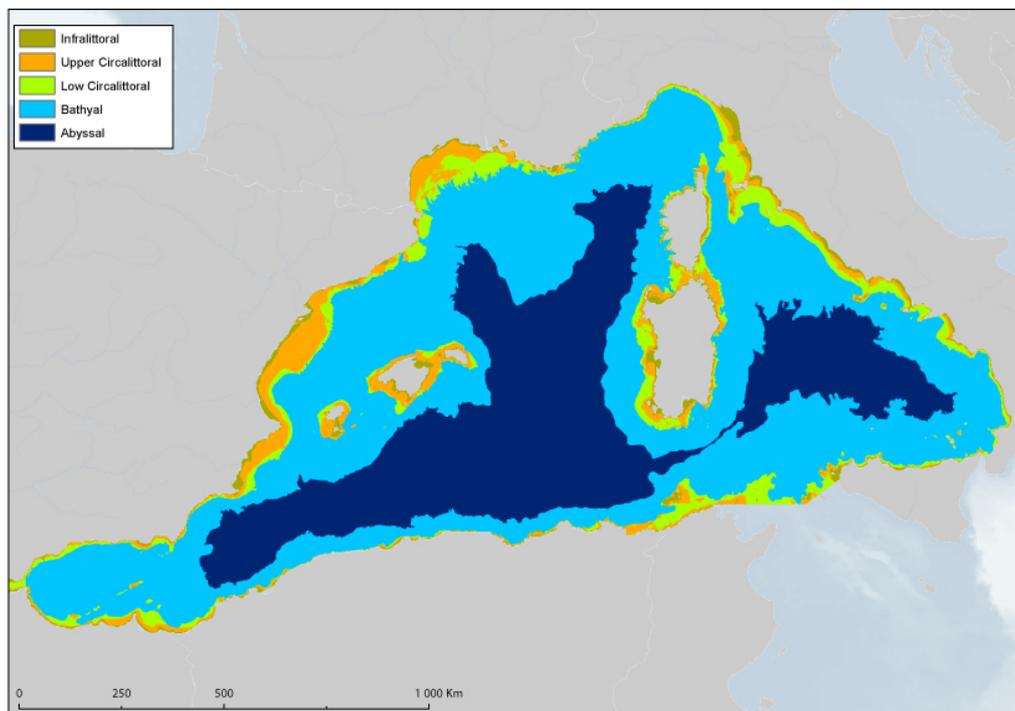
**Figure 10** - Bathymétrie des zones de mer du Nord et mer Celtique (projet EUSeaMap).

Les tableaux 5 et 6 détaillent les limites des zones biologiques pour chaque bassin.

**Tableau 5** - Zones biologiques en Méditerranée.

Zones biologiques	Limite haute	Limite basse
Infralittoral	Trait de côte	Profondeur de 1% de lumière résiduelle
Circalittoral côtier	Profondeur de 1% de lumière résiduelle	Profondeur de 0.01% de lumière résiduelle
Circalittoral du large	Profondeur de 0.01% de lumière résiduelle	Rebord du plateau (contourage semi-automatique)
Bathyal	Rebord du plateau (contourage manuel)	Pied de pente (contourage manuel)
Abyssal	Pied de pente (contourage manuel)	n/a

La figure 11 montre la vue globale des zones biologiques en Méditerranée (d'après le projet EUSeaMap).



**Figure 11** - Zones biologiques pour la Méditerranée occidentale.

**Tableau 6** - Zones biologiques en Manche et Atlantique

Zones biologiques	Limite haute	Limite basse
Infralittoral	0m	1% lumière incidente
Circalittoral côtier	1% lumière incidente	0.01% lumière incidente
Circalittoral du large	0.01% lumière incidente	200m
Bathyal	200m	2700m
Abyssal	2,700m	

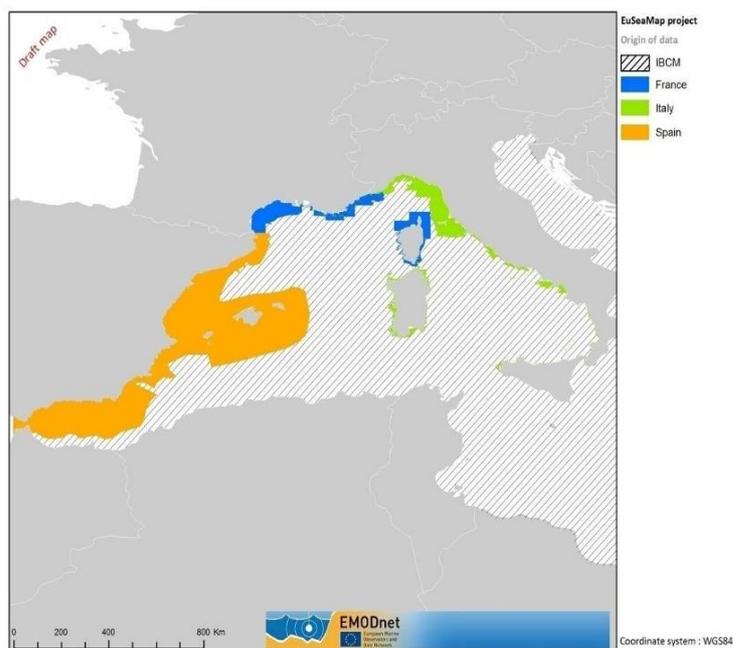
## 4.2. Substrat

La carte des substrats de Méditerranée occidentale a été construite à partir de diverses sources cartographiques résultant de travaux antérieurs. Par conséquent, les données sur les substrats de ces eaux représentent un assemblage de données diverses recueillies à des échelles ou des projections différentes, par des méthodes et avec des objectifs différents. En particulier, le projet a spécifiquement financé la réalisation de quatre cartes G du SHOM allant de Marseille à la frontière italienne. Des efforts importants ont été nécessaires pour normaliser les diverses typologies des sédiments employées dans ces cartes. Les données brutes des prélèvements étaient rarement disponibles, et le projet a donc dû se fier à la reclassification selon la typologie convenue de polygones déjà interprétés. Les données ont été obtenues sous divers formats (p. ex. fichiers de formes, images).

Voici les sources des données rassemblées pour les eaux françaises :

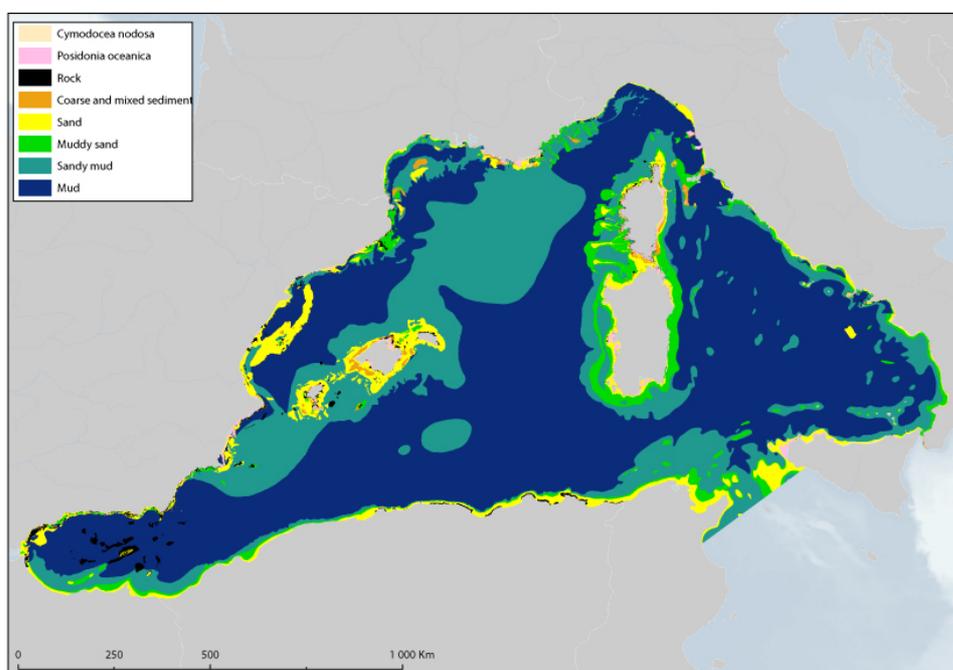
- le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM)
- le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
- l'Université de Perpignan
- le projet Lima
- la base de données du référentiel benthique méditerranéen MedBenth (herbiers de Phanérogames marines)
- la carte IBCM (International bathymetric chart of the Mediterranean).

Ces sources sont détaillées à l'annexe 2, qui donne les renseignements suivants : brève description du projet ; région géographique étudiée ; attributs des données ; projection d'origine ; échelle d'origine ; année des données ; typologie d'origine des sédiments et sa conversion dans les 6 classes de Folk convenues pour la Méditerranée (roche ; sable ; sédiment grossier et hétérogène ; sable vaseux ; vase sableuse ; vase).



**Figure 12** - Sources des cartes utilisées pour produire la carte harmonisée de substrats Méditerranée occidentale (source projet EUSeaMap).

Les polygones de types de substrat provenant des cartes sont transformés en pixels par conversion en mode maillé. Le logiciel de conversion attribue au pixel le code du polygone majoritairement intercepté par ce pixel. Ce mode de conversion réalise d’emblée un filtrage car tout polygone de superficie inférieure à la moitié de la surface du pixel (3125 m<sup>2</sup> dans le cas d’un pixel de 250m de côté) se voit immédiatement éliminé. Il en sera ainsi par exemple de nombre de petits polygones de posidonies issus de cartographie très fines.



**Figure 13** – Carte de substrats de la Méditerranée compilée par le projet EUSeaMap (résolution de 250m).

Deux résolutions sont produites par le projet, ce qui a un impact sur le maillage des polygones. Ainsi quand une carte source existe à une échelle compatible avec la résolution la moins fine (250 m), c'est cette carte qui est retenue (même s'il existe une échelle plus détaillée). A la résolution 100 m, on maillera bien sûr la carte détaillée ou à défaut, la carte plus grossière.

### **4.3. Énergie hydrodynamique au fond de la mer**

Dans le cadre d'un contrat spécifique au projet EUSeaMap, les couches de données sur l'énergie hydrodynamique ont été produites pour la mer du Nord et la mer Celtique. Ces couches sont construites à partir du modèle des vagues du NOC<sup>1</sup> (ProWAM, avec une limite de résolution de 12,5 km) et de modèles des courants (les modèles CS20, CS3 et NEA, dont les limites de résolution sont respectivement de 1,8 km, 10 km et 35 km). Tous ces modèles ont été traités de manière à remplir une grille ayant une résolution de 1 km, à l'aide d'un modèle spectral DHI pour obtenir de meilleurs résultats dans les zones côtières où la résolution du modèle ProWAM était inadéquate.

Dans la partie Nord de la Méditerranée occidentale (approximativement au nord des Baléares), un modèle d'énergie hydrodynamique a été construit sur la base des modèles de vagues et de courants Prévimer<sup>2</sup> (WAVEWATCH III, à résolution de 10 km, et MENOR, à résolution de 1 km). Le modèle méditerranéen a été exécuté avec une fréquence temporelle de trois heures sur une période de trois ans (2001 et de 2007 à 2009). Les effets des vagues et des courants ont été combinés selon des méthodes fondées sur les travaux de Soulsby (1997).

Au bout du compte, les couches de données sur l'énergie hydrodynamique élaborées pour la Méditerranée n'ont pas été utilisées dans le modèle, car une analyse des seuils a montré que les modèles employés étaient trop grossiers et que trop peu de données de terrain biologiques y étaient disponibles pour pouvoir classifier les régimes d'énergie hydrodynamique (annexe 4).

### **4.4. Salinité**

La salinité n'intervient en zone Manche-Gascogne que dans les estuaires. Or ceux-ci n'ont pas une taille réellement significative, même à l'échelle du 1/300000. On a donc décidé par défaut et dans l'attente d'une méthode plus fiable de coder les habitats de la même manière que les habitats pleinement marins, sans prendre en compte la dessalure dont ils peuvent être l'objet.

### **4.5. Cas particulier des zones intertidales**

Du fait du caractère global de la cartographie prédictive, ce projet se voulait essentiellement à caractère subtidal. Or il est apparu qu'à la résolution la plus détaillée de 100m, la zone intertidale prend une taille significative en bien des endroits. Il devenait difficile de laisser un « ruban blanc » non renseigné ou pire, une grande zone dans le cas des grands estrans. La

---

<sup>1</sup> Le National Oceanography Centre (autrefois les Proudman Oceanographic Laboratories, à Liverpool, et le National Oceanography Centre, à Southampton).

<sup>2</sup> PREViMer Observations et prévisions côtières – [www.previmer.org](http://www.previmer.org)

modélisation n'apportant pas grand-chose en zone intertidale où les outils d'imagerie de satellite ou encore de photographie aérienne délivrent plus d'information qu'une classe Eunis abiotique, il a été décidé sur des bases principalement esthétiques de renseigner la zone intertidale au niveau 2 Eunis. Pour ce faire, on est parti de l'ensemble de la zone intertidale disponible à l'Ifremer sous forme de polygones à l'échelle du 1/25000. On a rassemblé par ailleurs tous les polygones de « roche intertidale » disponibles dans les cartes sédimentaires et dans certains fichiers de cartes d'habitats du Rebert (notamment en Bretagne nord). Par intersection de ces derniers avec la zone intertidale, on a défini deux classes, la « roche intertidale » d'une part, et par simple complément booléen le « sédiment intertidal » d'autre part.

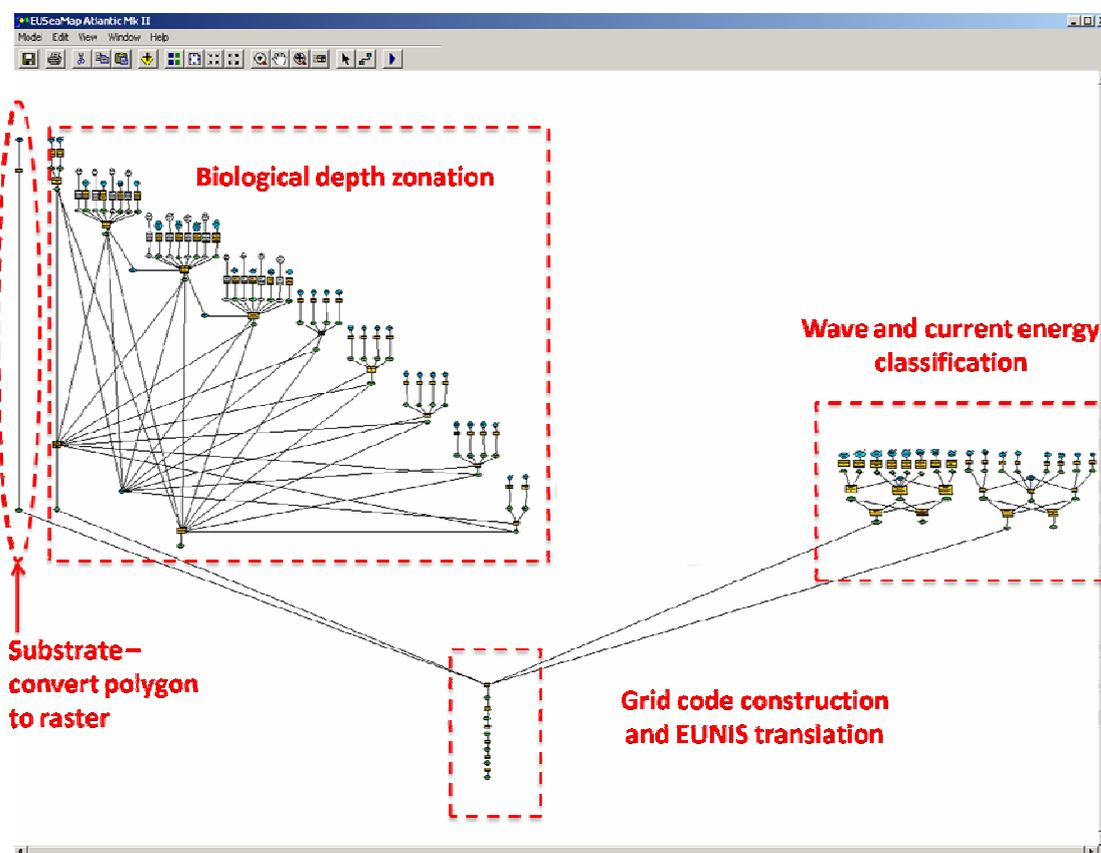
Ces deux classes sont transformées en pixels puis incrustées dans la carte finale en fin de processus.

## 5. Modélisation

### 5.1. Principes généraux

Les modèles ont été construits à l'aide de l'application *ModelBuilder* de l'environnement logiciel ArcGIS 9.3 de la société ESRI<sup>MD</sup> avec le module d'extension *Spatial Analyst*<sup>MC</sup>. Le module *Spatial Analyst*<sup>MC</sup> est une extension d'ArcGIS<sup>MC</sup>, dans laquelle des couches de données matricielles peuvent être combinées au moyen de l'« algèbre cartographique ». *ModelBuilder* permet de construire des modèles en combinant de manière graphique des outils d'ArcGIS<sup>MC</sup>, le résultat d'un outil servant à alimenter un autre outil. Les modèles construits à l'aide de *ModelBuilder* peuvent être enregistrés et exécutés plusieurs fois. Cela assure de pouvoir répéter le processus de modélisation, de sorte que lorsque des jeux de données nouveaux ou plus détaillés seront disponibles dans l'avenir, ils pourront facilement être incorporés dans le modèle pour produire de nouvelles versions des cartes prédictives d'habitats benthiques EUSeaMap.

À cause des problèmes de résolution abordés plus loin, pour des raisons d'espace de stockage, et parce que chaque bassin possède sa spécificité biologique et physique deux modèles ont été construits : un pour la Manche et l'Atlantique, l'autre pour la Méditerranée. Les modèles ont été alimentés en couches de base à la meilleure résolution possible. Ils sont paramétrés en sortie pour donner la taille de maille désirée (100 ou 250m). L'annexe 5 est consacrée à la modélisation.



**Figure 14** - Représentation du modèle des habitats benthiques Manche / Atlantique dans l'interface de l'application *ModelBuilder* d'ArcGIS.

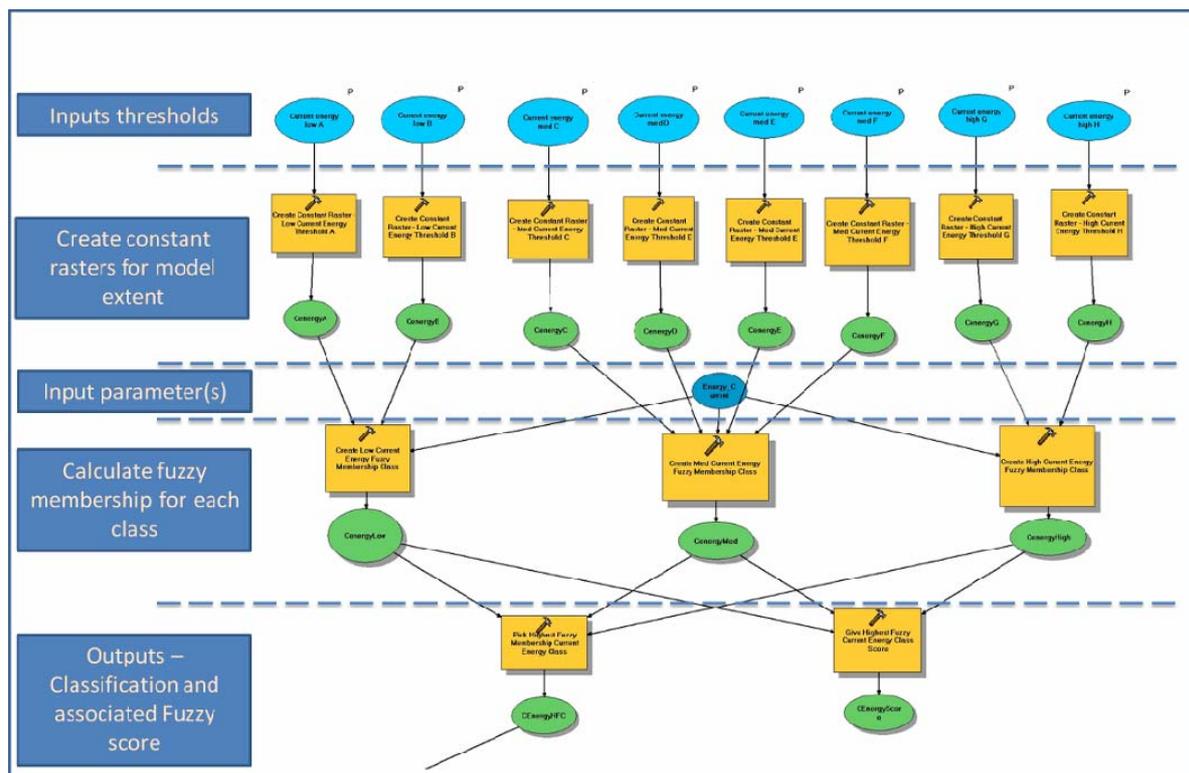
## 5.2. Les deux résolutions du projet

Les spécifications du projet comportent la fourniture de deux séries de cartes à deux résolutions différentes (250 et 100m). Chaque modèle utilise les couches de données les plus adaptées à sa résolution.

Pour le modèle à 250m, la bathymétrie est issue de plusieurs modèles numériques de terrain du plateau continental disponibles à l'Ifremer dont la résolution varie de 125 à 500m. La nature du substrat provient de cartes à échelle proche du 1/500000 réalisées dans les années 70 ou 80 par l'interprétation de données de prélèvements. Les données de physique vont au mieux de 250m (couleur de l'eau) à 10km (vagues en Méditerranée).

Pour le modèle à 100m, la bathymétrie provient d'un MNT à cette résolution récemment produit par l'Ifremer à partir de données du SHOM. La nature du fond est principalement une compilation des cartes G, cartes Lima pour la Corse et autres cartes à moyenne échelle. Les données de physique sont les mêmes que dans la version la plus grossière car aucune source plus fine n'est aujourd'hui disponible. Elles représentent le facteur le plus limitant.

Il existe un modèle par bassin (Manche-Atlantique et Méditerranée) mais le modèle est unique pour les deux résolutions. Seuls diffèrent les données en entrée - le cas échéant - et le gabarit de la maille de sortie.



**Figure 15** - Vue détaillée d'une sous-section du modèle des habitats benthiques Manche- Atlantique, montrant les couches en entrée et les processus qui produisent les classes d'énergie hydrodynamique.

### 5.3. Projection et conversion en mode maillé

Le projet a été totalement mené en système de coordonnées projeté Mercator utilisant le système géodésique WGS 84. Ce choix a été dicté par la présence comme couche de base de plusieurs MNT bathymétriques exprimés dans ce système de coordonnées. Ce choix a eu pour avantage de limiter au maximum les ré-échantillonnages de données, qui se produisent en mode maillé chaque fois que l'on change de système. Le système Mercator natif des MNT a ainsi été maintenu cependant que les autres couches de données ont été ré-échantillonnées une seule fois depuis leur format d'origine. C'est le cas des données de couleur de l'eau et d'hydrodynamique, qui ont été simplement projetées depuis leurs coordonnées sphériques d'origine, mais aussi des fichiers numériques de polygones de nature du fond, qui ont été directement convertis à la maille finale Mercator.

L'outil *Raster Calculator* d'ArcGIS<sup>MC</sup> n'exige pas que toutes les couches de données soient exprimées selon la même projection. Ceci a été testé avec succès sur une petite zone en Bretagne. L'outil *Raster Calculator de Spatial Analyst*<sup>MC</sup> est capable d'exécuter des fonctions à partir de couches de données d'entrée exprimées dans des systèmes de coordonnées différents (p. ex. latitude et longitude WGS84 et projection azimutale équivalente de Lambert ETRS89), en faisant les conversions nécessaires au fur et à mesure. Le logiciel calcule la carte de sortie selon n'importe quelle résolution spécifiée, en ré-échantillonnant les couches de données en fonction des dimensions finales des cellules.

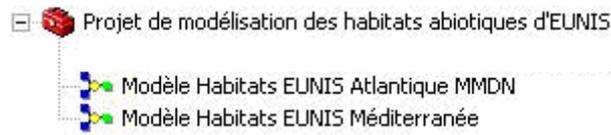
L'extension géographique du résultat est simplement l'intersection de l'extension de tous les fichiers d'entrée. Des tests ont été effectués et les résultats obtenus en convertissant toutes les couches de données selon une même projection avant l'exécution d'une fonction étaient très voisins de ceux obtenus en faisant ces conversions au fur et à mesure pendant l'exécution de la fonction.

La conversion de polygones de cartes de substrats en mailles a posé le problème de l'échantillonnage de polygones. Ainsi on a le choix entre une conversion brute fondée uniquement sur la position du centroïde de chaque polygone et la recherche, au sein d'un pixel donné, du polygone qui couvre la plus grande partie d'une cellule donnée (critère de majorité). C'est ce deuxième mode qui a été choisi.

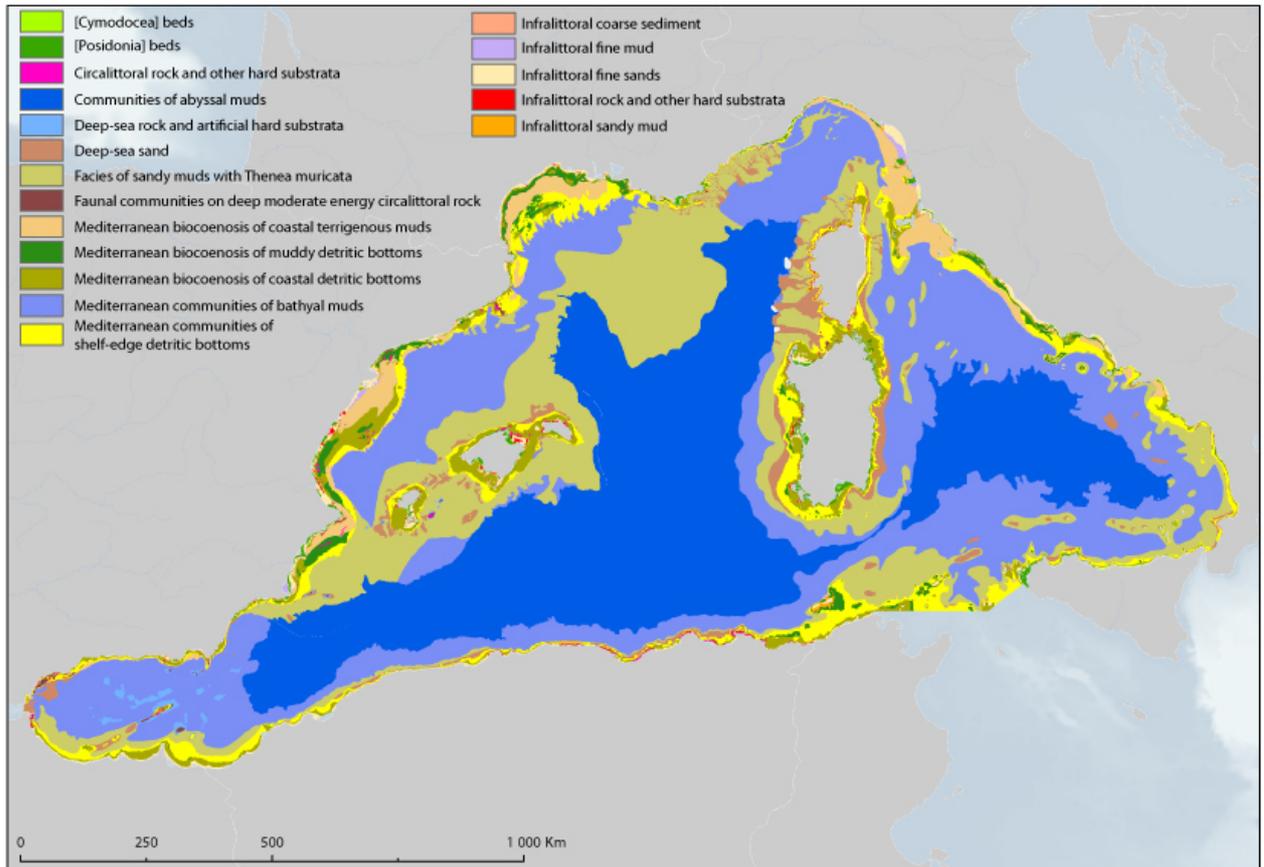
Ce type de conversion génère facilement des pixels isolés. Des discussions ont eu lieu pour savoir s'il était préférable de conserver une telle information élémentaire - intéressante en soi - mais nuisible à la qualité de la cartographie. En effet les cartographes suppriment souvent de tels pixels isolés (comme par exemple dans la cartographie thématique d'occupation du sol Corine), qui nuisent à la qualité de la carte en raison de l'effet « poivre et sel » qu'ils produisent. Finalement, compte-tenu de la mise à disposition prévue par cartographie interactive, il a été décidé de conserver ces informations, même si elles sont très petites à l'échelle nominale de la carte.

### 5.4. Reproductibilité

L'un des principaux défis du projet était de construire des modèles réutilisables, c'est-à-dire qui puissent être exploités à un moment quelconque par des personnes ayant une expérience limitée de la programmation ou de l'application *ModelBuilder* d'ArcGIS<sup>MC</sup>. C'est pourquoi une boîte à outils (figure 16) a été créée dans l'environnement ArcGIS<sup>MC</sup>. Cette boîte compte deux modèles.



**Figure 16** - Boîte à outils comportant un outil par bassin.



**Figure 17** - Carte d'habitats modélisée produite pour la Méditerranée occidentale par le projet EUSeaMap (résolution 250m).

## 6. Évaluation de la fiabilité des cartes résultant du modèle

La modélisation étant une approximation de la réalité, il est fondamental d'en établir la qualité afin d'avertir l'utilisateur de ses limites. On admet que cette approximation puisse être grossière pourvu que des limites d'utilisation soient fournies. La confiance est l'appréciation par l'utilisateur de la fiabilité d'une carte relativement à son objet (Mesh, 2008). Elle ne repose pas sur une définition mathématique comme l'exactitude ou l'incertitude, mais elle constitue un jugement porté par l'utilisateur et est donc susceptible de varier quelle que soit la carte. Ce jugement peut toutefois reposer sur des données probantes provenant :

- de mesures de l'exactitude ;
- de cartes auxiliaires montrant les données utilisées pour interpréter la carte ;
- d'une évaluation de toutes les données utilisées ;
- d'une validation indépendante ;
- de l'opinion d'experts ;
- du soutien apporté par les utilisateurs.

Une représentation spatiale de la fiabilité des habitats résultant du modèle est considérée comme un livrable du projet au même titre que les cartes d'habitats elles-mêmes. Deux méthodes d'élaboration de cartes de fiabilité ont été mises en oeuvre :

- une évaluation quantitative de l'incertitude sur les valeurs des données représentées
- une évaluation quantitative des classes d'habitat cartographiées par comparaison à des données de terrain.

### 6.1. Évaluation des données sources

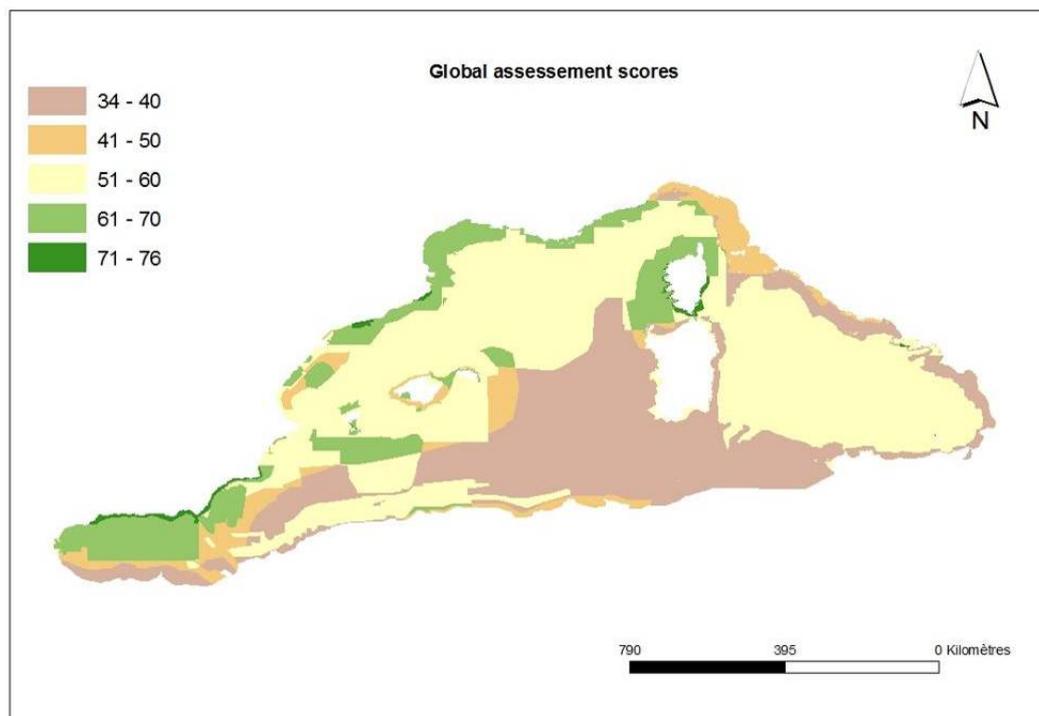
L'analyse statistique des incertitudes liées aux données représentées afin d'obtenir une mesure quantitative probabiliste de leur fiabilité est un processus complexe. C'est d'autant plus vrai que chaque variable utilisée dans le modèle doit être validée au regard d'une quantité suffisante de données de terrain. À cause de la diversité des sources de données dans les bassins couverts par le projet EUSeaMap, on a estimé que le calcul d'une probabilité d'occurrence de chaque paramètre d'entrée, y compris l'obtention des données de terrain nécessaires pour effectuer un tel calcul, débordait le cadre du présent contrat. En effet ceci aurait impliqué une implication des physiciens (en couleur de l'eau, en hydrodynamique) difficile à obtenir. Pour les sédiments, la probabilité d'une classe de sédiment provenant d'une interpolation de points de terrain est un sujet de recherche en soi.

Cependant, il est important que la carte finale de fiabilité puisse montrer quels jeux de données doivent être améliorés dans l'avenir et à quels endroits. Pour ce faire, on a simplement évalué la fiabilité de deux couches de données clés, à savoir le substrat et la bathymétrie, puis calculé une somme pondérée des deux scores obtenus. Ne retenir que ces deux couches est significatif car elles portent une large partie de la variance de la carte finale. En effet la profondeur, non représentée directement, contribue notamment à la détermination de toutes les zones biologiques.

L'outil MESH (<http://www.searchmesh.com/Default.aspx?page=1635>) d'évaluation de la fiabilité) a été légèrement modifié, en coordination avec la section Géologie des actions préparatoires du projet EMODNET, puis appliqué aux couches de données sources du projet EUSeaMap. La figure 18 montre l'application de cet indice à l'ensemble du bassin méditerranéen occidental, avec des scores de fiabilité variant de 30 dans la Méditerranée

centrale (carte bathymétrique internationale de la Méditerranée IBCM) à 80 pour certaines cartes détaillées des côtes.

Dans le cas de la bathymétrie, le projet a dû élaborer sa propre méthode. On a choisi trois caractéristiques dont on estime qu'elles déterminent en grande partie la qualité des MNT : la résolution, l'âge et l'origine des données. Le même principe est appliqué pour les façades de la Manche et de l'Atlantique. La méthodologie détaillée se trouve en Annexe 6.



**Figure 18** – Exemple sur la Méditerranée : Scores de fiabilité des cartes résultant de l'association du score de la couche de substrat et de celui de la couche de bathymétrie.

## 6.2. Évaluation quantitative des classes d'habitat par des données externes

Ce test n'a été effectué que pour la Méditerranée - dans le cadre du projet EUSeaMap - à l'aide de données italiennes et espagnoles. La comparaison a été effectuée en utilisant 172 points de vérité terrain italiens (dont seulement 79 vrais point de benthos, le reste étant des centroïdes de polygones de cartes biocénotiques récentes). On y a ajouté 99 centroïdes de cartes provenant d'Espagne (Baléares). Dans cette première tentative il n'a pas été incorporé de données françaises.

La matrice de confusion (voir Annexe 6) a révélé un taux d'exactitude global de 61%, qui peut paraître faible mais reste significatif étant donné le fossé qui existe entre les données modélisées et les données de vérité terrain ponctuelles. Les limites de cette validation sont évidentes à cause de la nature très différente des choses que l'on compare. D'un côté la carte modélisée résulte de données qui sont le plus souvent à caractère zonal et pour certaines très approximatives (par exemple des polygones de nature du fond résultant pour la plupart d'une interprétation basée sur des échantillons très espacés), de l'autre les données de prélèvements sont très ponctuelles, d'où des biais inévitables. Notons que si

nous étions capables de nous procurer des données de terrain dans toutes les régions, il serait possible de « régionaliser » la matrice de confusion. Le projet Mesh a reconnu qu'en matière de modélisation des habitats, il y avait environ 50% de chances que le modèle donne le résultat obtenu par un levé de terrain (Mesh, 2008).

Une discussion habitat par habitat des taux obtenus dans ces matrices est disponible dans le rapport EuSeaMap (2010). Cette évaluation devra être poursuivie et améliorée dans une mise à jour du projet, lorsque davantage de données de terrain, tant pour la Méditerranée que pour la Manche et le golfe de Gascogne, auront été rassemblées et compilées. On pourra alors éventuellement mettre en place un échantillonnage stratifié et si les données sont en nombre suffisant, et même envisager une validation par zone géographique.

### **6.3. Évaluation globale**

Nous ne donnons pas ici une méthode toute faite d'évaluation de la fiabilité de la carte modélisée, mais plutôt un ensemble d'outils visant à avertir ses utilisateurs de ses limites potentielles, car bien souvent ces derniers prennent le contenu d'une carte pour argent comptant. Bien que la fiabilité puisse être grande dans le cas d'une carte produite à partir de levés, ce n'est pas le cas ici car nous avons utilisé des sources de données anciennes dont la qualité est généralement difficile à évaluer.

L'évaluation des sources de données comporte un aspect fortement spatial car elle renseigne qualitativement des blocs homogènes de données, mais elle reste grossière et ne fait pas mieux que les métadonnées qu'on arrive à compiler pour chaque lot de données. Elle est cependant très acceptable à échelle globale. Quant à la validation externe, elle est au mieux régionale par bassin et comporte des limites évoquées ci-dessus.

Une troisième voie a été explorée dans le projet EUSeaMap (2010) mais pas finalisée. Elle se base sur le fait qu'outre la qualité des différentes couches de données, il faut considérer avec précaution toutes les frontières entre classes, car des frontières nettes sont très rares dans la nature. On suggère donc la création de limites floues autour des frontières nettes pour qualifier l'incertitude de leur emplacement. La définition de ces limites floues est idéalement fondée sur des données de terrain.

En conclusion il est conseillé aux utilisateurs de considérer chacun de ces éléments d'estimation de la fiabilité à sa juste valeur afin de se faire la meilleure idée possible. Pour l'aider, suivant la nature du rendu, les perspectives sont différentes. Sur la carte papier, illustrer la qualité reste une tâche ingrate qui passe habituellement par un encart à petite échelle peu lisible. Heureusement la cartographie interactive sur le web offre des possibilités plus étendues. Dans le cadre du présent contrat, il est prévu de rendre disponible sur le serveur Sextant, pour chaque pixel de la carte modélisée, la valeur de fiabilité correspondante.



## **7. Les produits : rendu cartographique et mise à disposition interactive sur Sextant**

### **7.1. Production de cartes sur papier**

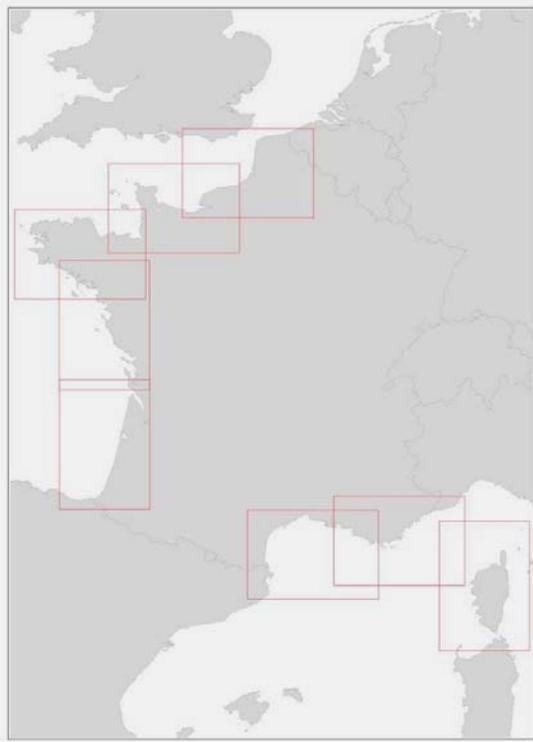
Outre la mise à disposition de couches numériques et d'une cartographie interactive, il a été jugé opportun d'offrir une version papier des cartes, qui donne une signature plus forte au projet et permet un niveau d'utilisation complémentaire au numérique, notamment lors de délibérations d'experts ou de gestionnaires.

Bien que le projet comporte deux niveaux d'échelle, seule l'échelle la plus détaillée a fait l'objet d'une sortie sur papier. Le plan d'assemblage (figure 19) optimise la disposition des 8 cartes en fonction de la géographie des côtes françaises, tout en respectant certaines unités physiographiques. Ainsi on a pu englober la région Bretagne dans une seule carte et il en a été de même pour la Basse-Normandie. Sur le plan de situation ci-dessous (Figure 19) apparaissent les emprises des 8 cartes à l'échelle du 1/300000, soit 5 pour la façade Manche-Atlantique et 3 pour la Méditerranée. Rappelons que les cartes sont limitées en mer par l'extension des couches constitutives. A cette échelle il s'agit d'une part du MNT à résolution de 100m, d'autre part principalement des cartes de nature du fond du SHOM et du BRGM au 1/50000. Il s'est posé la question de savoir, à des fins esthétiques, s'il convenait de compléter l'espace plus au large avec des pixels provenant de la basse résolution, avec le risque de tromper l'utilisateur sur la résolution réelle. Compte-tenu du fait qu'une carte de fiabilité est systématiquement annexée à la carte modélisée et que l'utilisateur a tout loisir de s'y référer, il a été décidé d'effectuer cette extension.

### **7.2. Rendu cartographique**

Le rendu cartographique, obtenu par l'application d'une symbologie, est un élément esthétique très important qui pour une large part va conditionner le succès de la carte. Il n'existe pas à ce jour de communauté très structurée en matière de cartographie des habitats marins et autant des efforts importants ont été faits par certaines équipes européennes pour mettre en place puis populariser Eunis, autant l'harmonisation en termes de rendu cartographique est restée pour l'instant inexistante. Quelques principes de base se retrouvent à l'examen des cartes interprétées produites par divers pays, qui sont partiellement hérités de la communauté des sédimentologues marins, plus avancée en la matière. Cependant ces principes ne que partiellement applicables du fait de la multiplicité des codes Eunis, qui au niveau trois sont déjà nombreux.

Quelques idées simples guident l'application des couleurs (annexe 7). Tout d'abord les habitats de petite taille doivent être mis en exergue afin de ne pas être écrasés par leurs voisins, ceci par l'utilisation de couleurs plus saturées. Ceci prend tout son sens en Méditerranée où l'on trouve une frange côtière très dense en polygones d'habitats de forme allongée puis une zone bathyale, voire abyssale, occupée par d'immenses polygones. La symbologie doit essayer de favoriser la lecture des zones denses à la côte.



**Figure 19** – Plan d’assemblage des cartes au 1/300000 pour l’ensemble des côtes de France.

Il se pose aujourd’hui une difficulté supplémentaire qui est la compatibilité entre la sémiologie sur papier et celle sur l’internet. La technique WMS autorise le choix de toutes les couleurs possibles mais pas celui de trames. Or on sait que l’œil humain ne distingue que peu de couleurs simultanément et les cartographes avaient pris l’habitude de pallier cette difficulté par l’application d’un tramage. Ce procédé trouve néanmoins rapidement ses limites, notamment pour les petits polygones où le remède peut s’avérer pire que le mal. On a ainsi préféré s’abstenir de l’utilisation de trames.

### **7.3. Filtrage des habitats de petite taille**

La cartographie dite « thématique » (qui représente des surfaces) se heurte toujours à la question de la plus petite unité affichable. Cette notion, très présente sur les cartes papier où il en va du confort de lecture de l’utilisateur, se trouve remise en question en numérique par l’utilisation du zoom, qui permet de visualiser toute unité très petite. Certains principes ont été énoncés par exemple par Corine Land Cover, qui ne retient aucune unité inférieure à 25 hectares à l’échelle du 1/100000, ou encore par le projet Mesh qui préconise de ne pas faire figurer sur le papier d’unité plus petite que 3mm de côté (soit 3 km sur notre carte au 1/1Mème ou encore 12 pixels de côté). Ceci pouvant nuire à la représentation de petites unités très représentatives, et compte tenu par ailleurs de la complexité de mise en œuvre de la généralisation en mode maillé, il a été décidé de laisser les groupes de pixels tels qu’ils sortent de la modélisation. Ceci explique l’existence sur les cartes de petits groupes de pixels (parfois même isolés) qui peuvent leur donner par endroits un aspect légèrement bruité.

## 7.4. Mise à disposition sur le serveur Sextant

Les cartes modélisées seront librement mises à disposition des utilisateurs dans le serveur Sextant de l'Ifremer, conformément aux termes de référence de la convention. Sextant est un serveur de couches et de cartes, ce qui signifie que les utilisateurs, suivant leur degré de compétence et les logiciels dont ils disposent, peuvent opter pour deux alternatives. S'ils disposent d'un logiciel de SIG, ils peuvent télécharger un fichier maillé et effectuer tous les traitements qu'ils désirent. S'ils ne disposent que d'Internet, Sextant leur propose un Geoviewer qui leur permet par une requête WMS (Web mapping service) d'afficher la carte sous forme d'image avec cependant une gamme de couleurs imposée. Ce visualisateur permet d'afficher simultanément une autre couche provenant d'un autre serveur interopérable (par exemple un contour d'aire marine protégée ou par exemple l'Atlas européen des mers de la DG/MARE) et de manipuler les deux pour produire un document de travail. Les fonctionnalités sont les suivantes :

- Fonctions standards de zoom, panoramique
- Identification d'attributs de pixels, légende
- Impression en pdf, téléchargement
- Mécanisme d'ajout de couche WMS depuis une liste standard ou par activation d'URL.

La couche décrivant la qualité de la carte est activable depuis le panneau de légende. La requête sur les attributs peut concerner simultanément le pixel de la carte modélisée et celui de sa couche de qualité, permettant de juger ainsi de la fiabilité de l'information du modèle.

Les métadonnées seront capturées par le système de saisie Geonetwork aux standard ISO19115. Ces métadonnées sont aussi stockées dans un serveur de métadonnées de Sextant. Les métadonnées contiennent par ailleurs la note de qualité attribuée à la carte modélisée par la validation externe.



## 8. Application à l'Outre-mer

L'application de la modélisation aux départements d'outre-mer est ici discutée à la lumière de la motivation première de la modélisation prédictive d'habitats physiques qui est de fournir, sur de vastes espaces et donc à échelle globale, un premier niveau de cartographie basé sur l'association raisonnée de données caractérisant le fond de la mer.

Les départements d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Guyane, Réunion et bientôt Mayotte) sont d'une part des territoires de surface réduite, d'autre part ils jouissent souvent aujourd'hui de mesures particulières qui vont les placer dans une position largement favorable par rapport à la métropole en matière de cartographie des habitats. C'est le cas pour au moins trois d'entre eux où, au-delà de cartographies spécifiques effectuées au cours du temps, le projet Litto3D est mené très activement depuis environ deux ans, avec la perspective de disposer à court terme de couvertures complètes tant du relief que de la description du sol. On se retrouvera à l'issue de Litto3D en possession de modèles numériques de terrain très précis (résolution horizontale et précision verticale respectivement meilleures que 5 m et 50 cm) et de mosaïques d'images à très haute résolution provenant de levés hyperspectraux.

Ces données sont au moins d'un - voire presque deux - ordres de grandeur plus fines que la résolution de la modélisation décrite dans ce rapport (100m). Elles doivent bientôt faire l'objet d'une d'interprétation visant à restituer des cartographies aux niveaux détaillés d'Eunis. Sans doute ne concernent-elles a priori que les zones peu profondes (celles atteintes par le lidar bathymétrique, soit moins de 30m) où existent aussi des données de levés sédimentaires. C'est le cas par exemple à La Réunion où la frange couverte par le lidar l'est aussi par le projet Cartomar qui a fourni en 2008 une cartographie morpho-sédimentaire du tour de l'île au 1/25000. Nul doute que l'on pourra - sitôt que les données de biologie de terrain seront acquises - produire rapidement sur cette frange côtière des cartes détaillées des habitats marins par la mise en oeuvre de traitements classiques d'interprétation.

Faut-il pour autant négliger la vue plus globale que donnerait la présente modélisation par sa capacité à s'étendre plus loin en mer? En d'autres termes les enjeux de ce secteur plus éloigné des côtes, plus profond aussi, et subissant de ce fait une influence largement moindre des activités anthropiques terrestres, sont-ils suffisants pour motiver cette entreprise? Quelle serait sa véritable valeur ajoutée en termes de gestion de l'environnement? Il n'est pas facile de répondre à ces questions qui mériteraient d'être traitées au cas par cas. Une rapide revue de la faisabilité des conditions d'application du modèle est faite ci-dessous pour chacun des départements d'outre-mer.

Une autre limitation du modèle réside dans son choix de décrire les habitats selon la typologie Eunis. Déjà en Méditerranée, où le modèle Eunis est traditionnellement peu employé, il a été nécessaire de traduire les types d'habitats dits « de la convention de Barcelone » en habitats décrits par les paramètres Eunis (en l'occurrence zone de profondeur, énergie, sédiment). Ce besoin est encore plus vif pour les milieux coralliens que l'on trouve abondamment dans les départements d'outre-mer (à l'exception peut-être de la Guyane). En effet la typologie Eunis y est inapplicable car inapte à décrire ces milieux et il n'existe pas encore de consensus sur une typologie - française - commune à tous. Il conviendrait dans ce cas de s'entourer des meilleurs spécialistes pour tenter d'exprimer les habitats coralliens par leurs descripteurs physiques tels que cités ci-dessus (voire

augmentés d'autres paramètres plus appropriés) en s'efforçant de rester le plus possible dans un esprit « Eunis élargi », ainsi qu'il a été fait pour la façade méditerranéenne.

### **8.1. Département de La Réunion**

La Réunion a été l'objet, avant Litto3D, de plusieurs initiatives de levés des fonds marins. En matière de bathymétrie, des MNT (modèles numériques de terrain) couvrant la totalité du pourtour de l'île existent aux résolutions de 50 et 100m, jusqu'à des profondeurs importantes. Ces modèles sont libres de droits et seraient utilisables pour la modélisation.

Une frange côtière a aussi été couverte par le projet Cartomar réalisé par le BRGM. Cartomar a délivré en 2008 une cartographie morpho-sédimentaire du tour de l'île au 1/25000 (5 cartes). La profondeur atteinte est généralement de 100 m. Ces deux premières couches permettent la modélisation jusqu'aux niveaux 2 à 4 d'Eunis selon les cas.

En matière de modélisation hydrodynamique, une initiative est en cours, sur financement de la DIREN dans le cadre de la DCE, de réalisation d'un modèle hydrodynamique de type MARS développé par l'Ifremer, destiné à comprendre le dynamique des masses d'eau autour de l'île, et notamment de la dilution des effluents. Ce modèle, une fois réalisé, devra tourner pendant un temps assez long (au strict minimum un à deux ans) si l'on veut pouvoir en tirer une climatologie des actions du courant au voisinage du fond. Concernant les vagues, un modèle existe à résolution de 100m. Enfin, pour la transparence de l'eau, aucun traitement n'a été fait jusqu'ici mais rien n'empêcherait de réaliser un complément à l'étude faite par l'Ifremer pour les façades métropolitaines. On pourrait alors associer dans ce même complément d'étude l'ensemble des départements d'outre-mer.

A Mayotte, doit devenir très bientôt un département français, le projet Litto3D a livré récemment un MNT de l'ensemble des fonds marins côtiers.

### **8.2. Départements de Martinique et de Guadeloupe**

La Martinique a aussi fait l'objet récemment d'un levé Litto3D qui a été étendu jusqu'à l'isobathe 30m et ses données sont disponibles. En Guadeloupe, le levé Litto3D est programmé en 2011, cependant il est volontairement limité à l'isobathe 10m. Dans les deux cas, la bathymétrie Litto3D devra être complétée par des levés classiques du SHOM. La production d'un MNT à résolution de 100m ne pose aucun problème dans les deux cas.

En matière de nature des fonds, des cartes des sédiments superficiels ont été produites par l'Ifremer pour les deux îles. Ces cartes s'étendent jusqu'au rebord du plateau, soit une profondeur d'environ 100m. Elles seront le facteur limitant du modèle.

Pour l'hydrodynamique, hormis une étude ancienne sur la baie de Fort de France, aucun modèle n'existe ni pour la Guadeloupe ni pour la Martinique. Concernant les données de transparence de l'eau, la remarque faite pour La Réunion s'applique de manière identique.

### **8.3. Département de la Guyane**

La Guyane représente un cas très particulier du fait du caractère extrêmement turbide des eaux, ainsi que de la présence de mangrove, qui viennent bousculer les principes méthodologiques habituels. Ce département devra faire l'objet d'une réflexion particulière qui sort des limites du présent rapport.

## **9. Perspectives futures**

### **9.1. Amélioration des données sources**

#### **9.1.1. Bathymétrie**

L'amélioration des données de bathymétrie est possible pour parvenir à un modèle numérique de terrain homogène dans sa qualité sur la plus grande partie des côtes de France. On peut attendre du SHOM qu'il délivre dans le futur des minutes de bathymétrie numérique de meilleure qualité provenant de digitalisations récentes, voire de nouvelles missions d'acquisition, ainsi que la mise à jour de ses fonds. Il restera sans doute des zones peu couvertes comme par exemple la côte des Landes, où le modèle à 100m élaboré pour cette étude reste une très grossière interpolation. Heureusement ces zones à très forte dominance sableuse restent moins intéressantes au plan écologique.

#### **9.1.2. Nature du fond**

Les données de substrat peuvent être séparées en deux zones. Pour ce qui concerne le plateau, on ne peut pas s'attendre à beaucoup de progrès au cours des années qui viennent car la France n'est pas prête à mettre en place un programme de connaissance sur le fond de la mer pour cette zone. Les cartographies effectuées au titre de Natura 2000 en mer ou la Directive cadre sur le milieu marin (DCSMM) ne viendront combler ce vide que de manière très parcellaire. La récupération et le traitement de données acquises par le passé par la flotte nationale ne viendront pas non plus combler significativement ces lacunes. Il faudra donc continuer à vivre sur les cartes historiques approximatives telles qu'utilisées ici.

Pour la zone côtière (faisant l'objet de la cartographie à 100m de résolution), des progrès sont attendus. Le SHOM poursuit en effet sa tâche de réalisation de cartes de nature des fonds dites « G », au rythme approximatif de 2 par an, au gré des aides qu'il peut recevoir de l'extérieur. A ce rythme le golfe du Lion, l'estuaire de la Loire et les quelques autres lacunes devaient être traités d'ici 5 ans. La couverture de la côte de nord-Bretagne est principalement entre les mains de l'Ifremer puisque grâce à de nombreuses missions de cartographie récentes (Département de géosciences marines et réseau Rebernet principalement), la couverture en données de cette région est quasi-continue.

#### **9.1.3. Données océanographiques**

Les données océanographiques sont celles de couleur de l'eau et d'hydrodynamique. Pour les premières, on ne peut attendre d'amélioration prochaine car le satellite actuel MERIS n'a pas encore de successeur annoncé. Sa résolution de 250m est jugée tout à fait convenable pour traiter de cartographie à résolution de 100m.

Les données de modélisation hydrodynamique (courants et vagues) ont un fort potentiel d'amélioration pour parvenir en tout point aux résolutions hectométriques qu'on obtient déjà en quelques sites (Bretagne et Normandie). Une résolution de 200 à 300m en tout lieu serait un objectif à atteindre pour une mise à jour du modèle d'ici deux ou trois ans. Pour ce faire, il conviendrait de motiver davantage les physiciens à l'utilité de ce projet en les y associant de près. Des compétences ont été récemment mises en place en matière de vagues à l'Ifremer, ce qui devrait accélérer la production de modèles fins. Il est important de rappeler qu'une

fois ces modèles implémentés il est nécessaire qu'ils tournent quelque temps (2 à 3 ans) afin de fournir une climatologie suffisamment fiable.

## **9.2. Amélioration de la résolution et intégration de biologie**

Pousser le concept de modélisation vers les plus hautes résolutions est une question complexe. L'objectif pourrait être de combler les vides entre les cartes interprétées (telles que celles provenant du Reben, Natura 2000 et autres initiatives), cartes qui sont produites à des échelles généralement meilleures que le 1/25000ème. Il y a donc entre ces cartes et les cartes modélisées un saut d'échelle d'un facteur 10 qui semble utopique à combler. Y a-t-il cependant une place pour cette filière de modélisation si l'on souhaite parvenir à une connaissance minimale significative en tout point de notre espace marin?

Autant la valeur ajoutée que procure la carte d'habitats modélisée par rapport aux cartes individuelles (MNT bathymétrique, carte sédimentaire, cartes d'habitats historiques) est forte à échelle globale, autant le concept doit être traité avec prudence si l'on veut se placer à un plus fort niveau de détail. La résolution spatiale va de pair avec la « résolution sémantique » (c'est à dire l'atteinte de niveaux Eunis plus détaillés), autrement dit à quoi servirait d'augmenter le niveau détail d'une modélisation qui somme toute reste physique si parallèlement on n'essayait pas d'améliorer les choses au plan de la biologie ?

Examinons par exemple une carte de nature des fonds sur une zone très côtière exclusivement infralittorale. Le gain de détail en termes de typologie Eunis ne peut provenir que de la description de l'énergie au niveau du fond sur substrat rocheux. En effet sur fond meuble, la carte sédimentaire décrit à elle seule le niveau 4 Eunis car elle ne recourt pas à l'énergie. On gagnera donc certes à décrire finement l'énergie afin d'atteindre le niveau 3 sur les roches. Au-delà, sur fond meubles notamment, l'amélioration ne peut provenir que de l'injection de données biologiques qui permettraient d'atteindre des niveaux plus précis d'Eunis.

Ces données biologiques, qui demandent à être récentes, sont rares car elles sont très coûteuses à acquérir. Les données de prélèvements ou d'observation acquises récemment l'ont été pour la plupart sur des territoires restreints afin de produire des cartes détaillées. Par définition elles ne concernent donc pas les zones où les cartes d'habitats sont absentes. On peut cependant espérer trouver des données d'opportunité (par exemple celles d'épibenthos recueillies au cours de campagnes de pêche, ou encore des données stationnelles de la DCE) qui n'aient pas été exploitées dans un but cartographique. Pour s'en assurer, il conviendrait de faire la compilation de toutes ces données d'habitats ponctuelles détenues au niveau français et de voir si leur positionnement et la typologie dans laquelle elles sont exprimées permettrait d'envisager l'enrichissement des cartes modélisées.

## 10. Références

Al-Hamdani, Z., & Reker, J. (eds) (2007) *Towards marine landscapes in the Baltic Sea*. Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen. (BALANCE Interim Report, No. 10).

Carpine C. (1970) *Ecologie de l'étage bathyal dans la Méditerranée occidentale*. Mém. Inst. Océanogr. (Monaco). 2 :1-146

Coltman, N., Golding, N. & Verling, E. (2008) *Developing a broadscale predictive EUNIS habitat map for the MESH study area*. In: MESH Guide to Marine Habitat Mapping, [www.searchMESH.net](http://www.searchMESH.net).

Connor, D.W., Allen, J.H., Golding, N., Howell, K.L. Lieberknecht, L.M., Northen, K.O. & Reker, J.B. (2004) *The Marine Habitat Classification for Britain and Ireland. Version 04.05* (internet version: [www.jncc.gov.uk/MarineHabitatClassification](http://www.jncc.gov.uk/MarineHabitatClassification)). Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.

Connor, D.W., Gilliland, P.M., Golding, N., Robinson, P., Todd, D. & Verling, E. (2006) *UKSeaMap: the mapping of seabed and water column features of UK seas*. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.

Convention on Biological Diversity (2004). *Decisions adopted at the Conference of the Parties to the Convention of Biological Diversity at its Seventh meeting*. Convention of Biological Diversity, UNEP/CBD/COP/7, Kuala Lumpur, Malaysia.

Dauvin, J.C., Bellan, G., Bellan-Santini, D., Castric, A., Francour, P., Gentil, F., Girard, A., Gofas, S., Mahe, C., Noel, P. & Reviers, B. de. (1994). *Typologie des ZNIEFF-MER. Liste des paramètres et des biocoenoses des côtes françaises métropolitaines*. 2nd ed. Paris, Museum National d'Histoire Naturelle, Secretariat Faune-Flore. (Collection Patrimoines Naturels, Serie Patrimoine Ecologique, No. 12.).

Davies, C.E., Moss, D. & Hill, M.O. (2004). *EUNIS Habitat Classification*. Report to the European Topic Centre on Nature Protection and Biodiversity, Paris for European Environment Agency, Copenhagen. October 2004. <http://EUNIS.eea.eu.int/habitats.jsp>.

EUSeaMap (2010). *Preparatory Action for development and assessment of a European broadscale seabed habitat map*. Draft Final Report of EC contract no. MARE/2008/07. JNCC, Peterborough, UK.

Géovariations (2008). *Cartographie de données bathymétriques – Façades Manche et Gascogne*. Contrat Ifremer Ref : E/0711/7198/2-1, Brest.

Glémarec (1973). *The benthic communities of the european north Atlantic continental shelf*. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 1973, 11, 263-289.

Habmap(2008).

[http://habmap.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=35&Itemid=45](http://habmap.org/index.php?option=com_content&task=view&id=35&Itemid=45);

Hiscock, K. & Connor, D.W. (1991) *Benthic marine habitats and communities in Great Britain: the development of an MNCR classification*. JNCC Report 6; Marine Nature Conservation Review Report No. MNCR/OR/14. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough. 92pp.

Hiscock, K. (ed.) (1996) *Marine Nature Conservation Review: rationale and methods*. Coasts and seas of the United Kingdom, MNCR series. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.

McBreen, F. *et al.* (2010) *UKSeaMap 2010 Final Report* – in prep.

Méléder V., Populus J., Guillaumont B. & Mouquet P. (2010) *Predictive modelling of seabed habitats - Case study of subtidal kelp forests on the coast of Brittany, France*. *Marine Biology*, 157(7), 1525-1541.

Mesh, 2008. Mesh Guide to Marine Habitat Mapping ([www.searchMESH.net](http://www.searchMESH.net)).

Moreno D., Aguilera P. & Castro H. (2001) *Assessment of the conservation status of seagrass (*Posidonia oceanica*) meadows: implication for monitoring strategy and the decision-making process*. *Biological Conservation* 102, 325-332.

Rivier, A. (2010). *Evaluation de l'action de la houle et du courant sur les fonds marins dans le cadre de la réalisation de cartographie d'habitats marins*. Ifremer, Brest, France. 30 pp.

Robinson K., Ramsay K., Wilson J., Mackie A., Wheeler A., O'Beirn F., Lindenbaum C., Van Landeghem K., McBreen F. & Mitchell N. (2007) *HABMAP: Habitat mapping for conservation and management of the southern Irish Sea*. Report to the Welsh European Funding Office. CCW Science Report Number 810. Countryside Council for Wales, Bangor. 233 pp plus appendices.

Roff J. C., Taylor M. E. (2000). *National frameworks for marine conservation – a hierarchical geophysical approach*. *Aquatic Conser: Mar. Freshw. Ecosyst.* 10: 209–223.

Saulquin, B., Hamdi, A., Populus, J., Loutier, R. & Mangin, A. (In prep.) *Estimation of the diffuse attenuation coefficient  $K_{dpar}$  using MERIS satellite reflectances for European coastal waters*. *ESA Living Planet Symposium*. 28 June – 2 July, 2010, Bergen, Norway.

Soulsby, R. L. (1997) *Dynamics of Marine Sands*. Thomas Telford Publications. 249 pp.

UNESCO (2009) *Global Open Oceans and Deep Seabed (GOODS) – Biogeographic Classification*. IOC Technical Series, 84, Paris, UNESCO-IOC.

Verfaillie, E., Degraer, S., Schelfaut, K., Willems, W. and Van Lancker, V. (2009) *A protocol for classifying ecologically relevant marine zones, a statistical approach*. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 83(2): 175-185.

Vincent, M.A., Atkins, S.M., Lumb, C.M., Golding, N., Lieberknecht, L.M. & Webster, M. (2004) *Marine nature conservation and sustainable development – the Irish Sea Pilot*. Report to Defra by the Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.

# Annexe 1: Habitats EUNIS

## a) Mer Méditerranée (pour modèle à résolution 250 m)

EUNIS Habitat code	EUNIS Level	EUNIS name (in parenthesis eventual notes)	Barcelona Code	Barcelona Convention name	Zone	Light	Bathymetry (or slope where appropriate)	Substrat	Energy conditions	Bottom temp
A3	2	Infralittoral rock and other hard substrata	III.6.	HARD BEDS AND ROCKS (intended as biocenosis of infralittoral algae)	INFRA	>1% surface light - <i>in situ</i> data	1-45 max	bedrock, boulders and cobbles / ROCK		
A5.23	4	Infralittoral fine sands	III.2.	FINE SANDS WITH MORE OR LESS MUD	INFRA	>1% surface light - <i>in situ</i> data	0-45	fine homogenous granulometry and well sorted fine sands / SAND / MUDDY SAND		
A5.13	4	Infralittoral coarse sediments	III.3	COARSE SANDS WITH MORE OR LESS MUD	INFRA	>1% surface light - <i>in situ</i> data	0-45	COARSE & MIXED SEDIMENT		Eurithermic
A5.33	4	Infralittoral sandy mud		<i>No corresponding Barcelona Convention habitat type</i>	INFRA			SANDY MUD		
A5.34	4	Infralittoral mud		<i>No corresponding Barcelona Convention habitat type</i>	INFRA			MUD		
A4.26	4	Méditerranée coralligenous communities moderately exposed to hydrodynamic action (we intend Coralligenous beds)	IV.3.1	Coralligenous biocenosis	UPPER CIRCA	<1% surface light >0.01% - <i>in situ</i> data	25-100	ROCK		13-18
A5.46	4	Méditerranée biocenosis of coastal detritic bottoms	IV.2.2.	Biocenosis of the coastal detritic bottom	UPPER CIRCA	<1% surface light >0.01% - <i>in situ</i> data	below P. oceanica until the break of continental	gravel, sand and shell debris / COARSE & MIXED SEDIMENT/	medium constant current	

							slope, lower depth is 100 meters	MUDDY SAND / SAND		
A5.38	4	Méditerranée biocoenosis of muddy detritic bottoms	IV.2.1.	Biocenosis of the muddy detritic bottom	UPPER CIRCA	<1% surface light >0.01% - <i>in situ</i> data	below P. oceanica until beginning of continental slope	very sandy mud or muddy sand, compact mud rich in shell debris, gravel and sand present but with constant mud predominance / SANDY MUD	sedimentation slow; low energy	
A5.39	4	Méditerranée biocoenosis of coastal terrigenous muds	IV.1.1.	Biocenosis of coastal terrigenous muds	CIRCA	<1% surface light	25 – continental shelf	pure mud of fluvial origin, fine and rapid settling, more or less clayey, can be both soft or sticky mud / MUD	low to medium	
A4.27	4	Faunal communities on deep moderate energy circalittoral rock	IV.3.3.	Biocenosis of shelf-edge rock	DEEP CIRCA	0	120-180	hard substrata / ROCK		
A5.47	4	Méditerranée communities of shelf-edge detritic bottoms	IV.2.3.	Biocenosis of shelf-edge detritic bottom	DEEP CIRCA	0	-80 m to shelfbreak	detritic, high abundance dead shells, bryozoans and coral skeletons which are calcareous debris of quaternary thanatocenosis; higher proportion of fine sand and mud rather than gravel / COARSE & MIXED SEDIMENT / MUDDY SAND / SAND / SANDY MUD	medium - high	
A6.1	3	Deep-sea rock and artificial hard substrata	V.3.	HARD BEDS AND ROCKS	BATHYAL	0	from the shelf-break (150-250m) to the	ROCK		

							beginning of the abyssal plain			
A6.51	4	Méditerranée communities of bathyal muds	V.1.1.	Biocenosis of bathyal muds	BATHYAL	0	from the shelf-break (150-250m) to the beginning of the abyssal plain	fluid to compact mud (Clayey usually compact, yellowish or bluish, sometimes a bit sandy / MUD		
A6.511	5	Facies of sandy muds with <i>Thenia muricata</i>	V.1.1.1.	Facies of sandy muds with <i>Thenia muricata</i>	BATHYAL	0	from the shelf-break (150-250m) to the beginning of the abyssal plain	SANDY MUD		
A6.3	3	Deep-sea sand	V.2.	SANDS	BATHYAL		from the shelf-break (150-250m) to the beginning of the abyssal plain	MUDDY SAND		
A6.1	3	Deep-sea rock and artificial hard substrata		<i>No corresponding Barcelona Convention habitat type</i>	ABYSSAL	0		ROCK		
A6.52	4	Communities of abyssal muds	VI.1.1.	Biocenosis of abyssal muds	ABYSSAL	0	abyssal plain	MUD		
A6.3	3	Deep-sea sand		<i>No corresponding Barcelona Convention habitat type</i>	ABYSSAL			SAND		

**Note:** Les herbiers à *Posidonia oceanica* et *Cymodocea nodosa* ne sont pas modélisés mais sont portés sur la carte finale en tant qu'entités de "nature du fond" au même titre que les types de substrat.

## b) Mer Méditerranée (pour modèle à résolution 100 m)

Code Habitat Eunis	Niveau Eunis	Habitat Eunis	Code Habitat (Barcelone)	Habitat Barcelone	Zone	Fraction de lumière	Bathymétrie	Pente	Sédiment classification de Folk
A3.13	4	Mediterranean communities of infralittoral algae very exposed to wave action	III.6.1	Biocénose des algues infralittorales	Infralittoral	>=1%			Rock
A5.138	4	Association with rhodolithes in coarse sands and fine gravels mixed by waves	III.3.1	Biocénose des sables grossiers et fins graviers brassés par les vagues	Infralittoral	>=1%	1 à 3 m		Coarse and mixed sediment
A5.13	4	Infralittoral coarse sediment	III.3.2	Biocénose des sables grossiers et fins graviers sous influence des courants de fond	Infralittoral	>=1%			Coarse and mixed sediment
A5.235	5	Mediterranean communities of fine sands in very shallow waters	III.2.1	Biocénose des sables fins de haut niveau	Infralittoral	>=1%	1 à 3 m		Sand
A5.236	5	Mediterranean communities of well sorted fine sands	III.2.2	Biocénose des sables fins bien calibrés	Infralittoral	>=1%			Sand
A5.24	4	Infralittoral muddy sand	Pas de correspondance	Pas de correspondance	Infralittoral	>=1%			Muddy sand
A5.28	4	Mediterranean communities of superficial muddy sands in sheltered waters	III.2.3	Biocénose des sables vaseux superficiels de mode calme	Infralittoral	>=1%	1 à 3 m		Muddy sand
A5.33	4	Infralittoral sandy mud	Pas de correspondance	Pas de correspondance	Infralittoral	>=1%			Sandy mud
A5.34	4	Infralittoral fine mud	Pas de correspondance	Pas de correspondance	Infralittoral	>=1%			Mud
A5.535	5	[Posidonia] beds	III.5	Herbier à Posidonia oceanica	Infralittoral	>=1%			
A5.531	5	[Cymodocea] beds	III.2.2.1 et III.2.3.4	Les Cymodocées	Infralittoral	>=1%			
A4.26	4	Mediterranean coralligenous communities moderately exposed to hydrodynamic action	IV.3.1	Biocénose coralligène	Haut Circalittoral	>=0.01%			Rock
A4.27	4	Faunal communities on deep moderate energy circalittoral rock	IV.3.3	Biocenosis of shelf-edge rock	Bas Circalittoral	<=0.01%			Rock
A5.38	4	Mediterranean communities of muddy detritic bottoms	IV.2.1	Biocénose des fonds détritiques envasés	Haut Circalittoral	>=0.01%			Sandy mud
A5.39	4	Mediterranean communities of coastal terrigenous muds	IV.1.1	Biocénose des vases terrigènes côtières	Circalittoral (Haut et Bas)	>=0.01%			Mud
A5.46	4	Mediterranean animal communities of coastal detritic bottoms	IV.2.2	Biocénose du détritique côtier	Haut Circalittoral	>=0.01%			Coarse and mixed sediment,

									Muddy sand, Sand
A5.47	4	Mediterranean communities of shelf-edge detritic bottoms	IV.2.3.	Biocenosis of shelf-edge detritic bottom	Bas Circalittoral	<=0.01%			Coarse and mixed sediment, Sand, Muddy sand, Sandy mud
A6.2	3	Deep-sea mixed substrata	Pas de correspondance	Pas de correspondance	Bathyal				Coarse and mixed sediment
A6.3	3	Deep-sea sand	V.2	Sable du Bathyal	Bathyal				Sand
A6.4	3	Deep-sea muddy sand	Pas de correspondance	Pas de correspondance	Bathyal				Muddy sand
A6.51	4	Mediterranean communities of bathyal muds	V.1.1	Biocénose des vases bathyales	Bathyal				Mud
A6.511	5	Facies of sandy muds with <i>Thenea muricata</i>	V.1.1.1	Faciès des vases sableuses à <i>Thenea muricata</i>	Bathyal				Sandy mud
A6.513	5	Facies of soft muds with [ <i>Funiculina quadrangularis</i> ] and [ <i>Apporhais seressianus</i> ]	V.1.1.3	Faciès de vase molle à [ <i>Funiculina quadrangularis</i> ] et [ <i>Apporhais seressianus</i> ]	Bathyal		de 200 à 400m	Pente accentuée >5%	Mud
A6.514	5	Facies of compact muds with [ <i>Isidella elongata</i> ]	V.1.1.4	Faciès de la vase compacte à [ <i>Isidella elongata</i> ]	Bathyal		de 400 à 1000m	Pente faible et plaine bathyale <5%	Mud
A6.61	4	Communities of deep-sea corals	V.3.1	Biocénose des coraux profonds	Bathyal				Rock
A6.1	3	Deep-sea rock and artificial hard substrata	Pas de correspondance	Pas de correspondance	Abyssal				Rock
A6.2	3	Deep-sea mixed substrata	Pas de correspondance	Pas de correspondance	Abyssal				Coarse and mixed sediment
A6.3	3	Deep-sea sand	Pas de correspondance	Pas de correspondance	Abyssal				Sand
A6.4	3	Deep-sea muddy sand	Pas de correspondance	Pas de correspondance	Abyssal				Muddy sand
A6.52	4	Communities of abyssal muds	VI.1.1	Biocenosis of abyssal muds	Abyssal				Mud ou sandy mud

### c) Manche-Atlantique (pour modèle aux deux résolutions)

Code Habitat Eunis	Niveau Eunis	Habitat Eunis	Zone	Fraction de la lumière	Bathymétrie	Sédiments Folk	Energie
A1	2	Littoral rock and other hard substrata	Intertidal		> 0 m		
A2	2	Littoral sediment	Intertidal		> 0 m		
A2.3	3	Littoral mud	Intertidal		> 0 m		
A3.1	3	Atlantic and Mediterranean high energy infralittoral rock	Infralittoral	>1%		Rock	Fort
A3.2	3	Atlantic and Mediterranean moderate energy infralittoral rock	Infralittoral	>1%		Rock	Moyen
A3.3	3	Atlantic and Mediterranean low energy infralittoral rock	Infralittoral	>1%		Rock	Faible
A5.13	4	Infralittoral coarse sediment	Infralittoral	>1%		Coarse sediment (Gravelly sand, Sandy gravel and Gravel)	
A5.23	4	Infralittoral fine sand	Infralittoral	>1%		Sand	
A5.24	4	Infralittoral muddy sand	Infralittoral	>1%		Muddy sand	
A5.33	4	Infralittoral sandy mud	Infralittoral	>1%		Sandy mud	
A5.34	4	Infralittoral fine mud	Infralittoral	>1%		Mud	
A5.43	4	Infralittoral mixed sediments	Infralittoral	>1%		Mixed sediment (Gravelly muddy sand, Gravelly mud, Muddy gravel and Muddy sandy gravel)	
A4.1	3	Atlantic and Mediterranean high energy circalittoral rock	Circalittoral	<1%	< 200 m	Rock	Fort

A4.2	3	Atlantic and Mediterranean moderate energy circalittoral rock	Circalittoral	<1%	< 200 m	Rock	Moyen
A4.3	3	Atlantic and Mediterranean low energy circalittoral rock	Circalittoral	<1%	< 200 m	Rock	Faible
A5.14	4	Circalittoral coarse sediment	Haut circalittoral	>0,01%		Coarse sediment (Gravelly sand, Sandy gravel and Gravel)	
A5.15	4	Deep circalittoral coarse sediment	Circalittoral profond	<0,01%	< 200 m	Coarse sediment (Gravelly sand, Sandy gravel and Gravel)	
A5.25	4	Circalittoral fine sand	Haut circalittoral	>0,01%		Sand	
A5.26	4	Circalittoral muddy sand	Haut circalittoral	>0,01%		Muddy sand	
A5.27	4	Deep circalittoral sand	Circalittoral profond	<0,01%	< 200 m	Sands and muddy sands	
A5.35	4	Circalittoral sandy mud	Haut circalittoral	>0,01%		Sandy mud	
A5.36	4	Circalittoral fine mud	Haut circalittoral	>0,01%		Mud	
A5.37	4	Deep circalittoral mud	Circalittoral profond	>0,01%	< 200 m	Muds and sandy muds	
A5.44	4	Circalittoral mixed sediments	Haut circalittoral	>0,01%		Mixed sediment (Gravelly muddy sand, Gravelly mud, Muddy gravel and Muddy sandy gravel)	
A5.45	4	Deep mixed sediments	Circalittoral profond	>0,01%	< 200 m	Mixed sediment (Gravelly muddy sand, Gravelly mud, Muddy gravel and Muddy sandy gravel)	

## Annexe 2: Données sources

Région: Manche et Atlantique						
Model Layer	Variable	Data Set	Date	Source	Resolution/Scale	Owner of Intellectual Property Rights
Substrat	Sediment	Larsonneur	NA	Vaslet D, Larsonneur C, Auffret J-P, 1979. Les sédiments superficiels de la Manche. 1/500 000ème. Carte géologique de la marge continentale française. BRGM/CNEXO	1:500,000	Ifremer
Substrat	Sediment	EMODNET Geology	NA	EMODNET Geology (Various)	1:1,000,000	Public domain
Biological depth zone	Bathymetry	GEBCO_08 Grid	NA	The GEBCO_08 Grid, version 20090202, www.gebco.net	30 arcsecond grid	
Biological depth zone	Bathymetry	SeaZone DTM	NA	SeaZone Hydrospectral Coastal DTM	1 arcsecond grid	SeaZone Ltd.
Biological depth zone	Bathymetry	EMODNET Hydrography DTM	NA	DTM - built from composite surveys and DTMs	15 arcsecond grid	Public domain
Biological depth zone	Light	MERIS	2003 - 2008	Détermination de KdPAR, Kd490, et de la profondeur euphotique à partir de données satellitaires. Contrat Ifremer n° 022-791, 2009.	0,015° * 0,01° tif (~1km)	Ifremer/ACRI
Biological depth zone	Wavebase	MB102	2000 - 2004	NOC ProWAM and ABPMer bespoke coastal model (based on DHI MIKE Spectral Wave) from Data contract MB102: Accessing and developing the required biophysical datasets and datalayers for Marine Protected Areas network planning and wider marine spatial planning purposes	300m grid	Defra

Energie	Wave Energie at seabed	MB102	2000 - 2004	NOC ProWAM and ABPMer bespoke coastal model (based on DHI MIKE Spectral Wave) from Data contract MB102: Accessing and developing the required biophysical datasets and datalayers for Marine Protected Areas network planning and wider marine spatial planning purposes	300m grid	Defra
Energie	Tidal Energie at seabed	MB102	2000 - 2004	NOC CS30, CS3 and NEA tidal models from Data contract MB102: Accessing and developing the required biophysical datasets and datalayers for Marine Protected Areas network planning and wider marine spatial planning purposes	300m grid	Defra

## Région: Manche et Atlantique (suite)

Model Layer	Variable	Data Set	Date	Source	Resolution/Scale	Owner of Intellectual Property Rights
Substrat	Sédiment	EMODNET Geology	NA	EMODNET Geology (Various)	1:1,000,000	Public domain
Biological depth zone	Bathymetry	GEBCO_08 Grid	NA	The GEBCO_08 Grid, version 20090202, <a href="http://www.gebco.net">www.gebco.net</a>	30 arcsecond grid	
Biological depth zone	Bathymetry	EMODNET Hydrography DTM	NA	DTM - built from composite surveys and DTMs	15 arcsecond grid	Public domain
Biological depth zone	Light	MERIS	2003 - 2008	Détermination de KdPAR, Kd490, et de la profondeur euphotique à partir de données satellitaires. Contrat Ifremer n° 022-791, 2009.	0,015° * 0,01° tif (~1km)	Ifremer/ACRI
Biological depth zone	Wavebase	MB102	2000 - 2004	NOC ProWAM and ABPMer bespoke coastal model (based on DHI MIKE Spectral Wave) from Data contract MB102: Accessing and developing the required biophysical datasets and datalayers for Marine Protected Areas network planning and wider marine spatial planning purposes	300m grid	Defra
Energie	Wave Energie at seabed	MB102	2000 - 2004	NOC ProWAM and ABPMer bespoke coastal model (based on DHI MIKE Spectral Wave)	300m grid	Defra
Energie	Tidal Energie at seabed	MB102	2000 - 2004	NOC CS30, CS3 and NEA tidal models	300m grid	Defra

Région: mer Méditerranée						
Model Layer	Variable	Data Set	Date	Source	Resolution/ Scale	Owner of Intellectual Property Rights
Biological depth zone	Bathymetry	EMODNET Hydrography DTM	NA	DTM - built from composite surveys and DTMs	15 arcsecond grid	Public domain
Biological depth zone	Bathymetry	GEBCO_08 Grid	NA	The GEBCO_08 Grid, version 20090202, www.gebco.net	30 arcsecond grid	
Biological depth zone	Bathymetry	Depth DTM for Golfe du Lion and Région PACA	2009	Etude pour la réalisation d'un Modèle Numérique de terrain pour les façades méditerranée et Corse. Contrat Ifremer n° 2009-2-20694022	250m grid	SHOM and Ifremer
Biological depth zone	Light	MERIS	2007 - 2009	Détermination de KdPAR, Kd490, et de la profondeur euphotique à partir de données satellitaires. Contrat Ifremer n° 022-791, 2009.	0,0038° * 0,0027° tif (~250m)	Ifremer/ACRI
Biological Depth Zone	Light	MERIS	2003 - 2008	Détermination de KdPAR, Kd490, et de la profondeur euphotique à partir de données satellitaires. Contrat Ifremer n° 022-791, 2009.	0,015° * 0,01° tif (~1km)	Ifremer/ACRI
Depth Zone	Bathymetry	Morpho-Bathymetry of the Méditerranée Sea. DTM	2008	CIESM - IFREMER. Morpho-Bathymetry of the Méditerranée Sea	1:3,000,000	CIESM - IFREMER
Substrat	Substrat	IBCM-Sed		IBCM. Unconsolidate bottom surface Sédiments (ICBM sed). www.ngdc.noaa.gov/mgg/ibcm	1 : 1,000,000	IOC - IBCM
Substrat	Sédiments/geology	Carte des formations superficielles sous-marines entre Port-Barcarès et Saint-Cyprien (Pyrénées Orientales)	1986	AUGRIS C. , MEAR Y., « Carte des formations superficielles sous-marines entre Port-Barcarès et Saint-Cyprien - Pyrénées Orientales », 1986, Ifremer, Université de Perpignan, Région Languedoc-Roussillon.	1:20 000	Ifremer, Université de Perpignan, Région Languedoc-Roussillon

Substrat	Sédiments/geology	Cartographie des plates-formes sous-marines de la Corse entre 0 et 100m de profondeur - LIMA 1	2001 and 2004	GUENNOC P., PALVADEAU E., PLUQUET F., MORANDO A., VAIRON J. (2001) - LIMA, Cartographie des plates-formes sous-marines de la Corse entre 0 et 100m de profondeur, BRGM/RP-51523-FR, 53 p., 16 fig., 6 tabl., 4 pl., 9 cartes (hors texte). et PLUQUET F., GUENNOC P., GARLAN T., PALVADEAU E., (2004) - La plate-forme sous-marine de Corse : cartographie « historique » des formations superficielles à partir des levés anciens du SHOM (1884-1891), Bull. Soc. Sci. hist. nat. Corse, 606-607, 111-132.	1: 100 000	BRGM, OEC, DIREN Corse, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, Ifremer, SHOM
Substrat	Sédiments/geology	Carte géomorphologique du précontinent languedocien	1973 and 1986	GOT H., 1973, « Etude des corrélations tectonique-sédimentation au cours de l'histoire quaternaire du précontinent pyrénéo-catalan ». Thèse d'Etat de l'Université de Montpellier, 295 p. ALOISI J.C. 1986, Sur un modèle de sédimentation deltaïque. Contribution a la connaissance des marges passives ». Thèse d'Etat de l'Universite de Perpignan, 178 p. et Annexes.	1:250 000	Université de Perpignan
Substrat	Sédiments/geology	Cartes G	2009	6822G - Abords Nord de Bastia - Pluquet F., Guennoc P. ; 6822G - Abords Nord de Bastia - Pluquet F., Guennoc P. ; 6969G - Du Cap Corse à la Punta di d'Acciolu, Golfe de Saint-Florent - Pluquet F., Guennoc P. ; 6970G - De Punta di d'Acciolu à Capo Cavallo - Pluquet F., Guennoc P.	1:50 000	SHOM

Substrat	Sédiments/geology	Cartes géologiques de la France à 1/50 000	1975 to 1994	Cartes géologiques de la France à 1/50 000 : Feuille 1017 - LE GRAU DU ROI - 1993 ; Feuille 1018 - SAINTES MARIES DE LA MER - 1975 ; Feuille 1019 - ISTRES - 1975 ; Feuille 1020 - MARTIGUES MARSEILLE - 1977 ; Feuille 1024 - FREJUS CANNES - 1994 ; Feuille 1040 - AGDE - 1978 ; Feuille 1044 - AUBAGNE MARSEILLE ; Feuille 1047 - SAINT TROPEZ CAP LARDIER ; Feuille 1061 - NARBONNE - 1982 ; Feuille 1063 - LA CIOTAT - 1977 ; Feuille 1065 - HYERES PORQUEROLLES - 1976 ; Feuille 1079 - LEUCATE - 1982 ; Feuille 1091 - PERPIGNAN - 1988 ; Feuille 973 - MENTON NICE	1:50 000	BRGM
Substrat	Sédiments/geology	Cartes géologiques de la France à 1/250 000	1979 and 2001	Cartes géologiques de la France à 1/250 000 : Feuille 38 - MONTPELLIER - 2001 ; Feuille 39 - MARSEILLE - 1979 ; Feuille 40 - NICE - 1979	1:250 000	BRGM
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Étude des sédiments superficiels marins, des herbiers à phanérogames et des peuplements à <i>Caulerpa taxifolia</i> de Menton au Cap d'Ail	2001	BELSHER, T., HOULGATTE, E., 2000. Étude des sédiments superficiels marins, des herbiers à phanérogames et des peuplements à <i>Caulerpa taxifolia</i> de Menton au Cap d'Ail. Éditions Ifremer 43 p. et 3 cartes	1:7 500	Ifremer, Bureau d'Etude Géologique - Brest
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartographie des biocénoses marines entre Antibes et Cap d'Ail	2007	HOLON F., DESCAMP P., 2007. CARTOGRAPHIE ET ANALYSE DES BIOCENOSSES MARINES ENTRE ANTIBES ET CAP D'AIL. Contrat Communauté d'Agglomération Nice-Côte d'Azur.	1:5 000	Communauté d'Agglomération Nice Côte d'Azur, Conseil Général des Alpes-Maritimes, Région PACA, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, Andromède Environnement

Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartographie des biocénoses marines - Contrat de Baie des Golfes de Lérins	2008	HOLON F., DESCAMP P., 2008. ETUDE DE L'ÉCOLOGIE MARINE - ETUDE COMPLÉMENTAIRE AU CONTRAT DE BAIE DES GOLFES DE LÉRINS. Contrat ANDROMEDE / Ville de Cannes	1:10 000	Ville de Cannes, Conseil Général des Alpes-Maritimes, Région PACA, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, Andromède Océanologie
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartographie des biocénoses marines du littoral des Maures	2004	Création de l'Observatoire Marin du littoral des Maures. Contrat SIVOM du Littoral des Maures, 1997, CETIIS, 174p; Etude préalable à la mise en place de l'Observatoire marin du littoral des Maures le long des côtes de Ramatuelle - Etat de la connaissance du milieu, synthèse bibliographique, 2004, SIVOM du Littoral des Maures, Agence de l'Eau RM&C, SAFEGE CETIIS.	1:80 000	SIVOM du Littoral des Maures, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, SAFEGE CETIIS
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Carte des biocénoses benthiques ou types de fond de la zone Natura 2000 de l'île du Levant (Hyères - Var)	2007	RUITTON S., BONHOMME D., BONHOMME P., CADIOU G., EMERY E., HARMELIN J.G., HERVE G., KANTIN R., 2007, Etude et cartographie des biocénoses du milieu marin de l'île du Levant (Var - France). Phase 3 - Rapport final, Contrat Parc national de Port-Cros & GIS Posidonie - Ifremer, GIS Posidonie Publ. : 1 - 163	1:5 000	Parc national de Port-Cros, DIREN PACA, GIS Posidonie, Ifremer
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartographie de la prairie à Posidonia oceanica et des principaux faciès sédimentaires marins du Parc national de Port-Cros (Var - France - Méditerranée)	2001	Carte de l'Herbier à Posidonia oceanica et des principaux faciès sédimentaires des fonds sous-marins du Parc National de Port-Cros, 2001, Parc National de Port-Cros, DIREN PACA, Ifremer, Bureau d'étude Géologique (Brest).	1:7 500	Parc national Port-Cros, DIREN PACA, Ifremer, Bureau d'étude géologique (Brest), Centre d'océanologie de Marseille

Substrat	Posidonia and Cymodocea	Carte des biocénoses benthiques ou type de fond de la zone Natura 2000 de l'île de Porquerolles (Hyères - Var)	2007	RUITTON S., BONHOMME D., BONHOMME P., CADIOU G., EMERY E., HARMELIN J.G., HERVE G., KANTIN R., ZIBROWIUS H., 2007. Etude et cartographie des biocénoses du milieu marin de l'île de Porquerolles (Var - France). Phase 3 - Rapport final, Contrat Parc national de Port-Cros & GIS Posidonie - Ifremer, GIS Posidonie Publ. : 1 - 153.	1:5 000	Parc national de Port-Cros, DIREN PACA, GIS Posidonie, Ifremer
Substrat	Posidonia and Cymodocea	Cartographie de l'herbier de Posidonie et des fonds marins environnants de Toulon à Hyères (Var, France)	1993	PAILLARD M., GRAVEZ V., CLABAUT P., WALKER P., BLANC J.J., BOUDOURESQUES C.F., BELSHER T., URSCHER F., POYDENOT F., SINNASSAMY J.M., AUGRIS C., PEYRONNET J.P., KESSLER M., AUGUSTIN J.M., LE DREZEN E., PRUDHOMME C., RAILLARD J.M., PERGENT G., HOAREAU A. & CHARBONNEL E., 1993. - Cartographie de l'herbier de Posidonie et des fonds marins environnants de Toulon à Hyères (Var - France). Reconnaissance par sonar latéral et photographie aérienne. Notice de présentation. Ifremer & GIS Posidonie Publ., Fr. :1-36 + 3 cartes annexes.	1:10 000	Région PACA, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, Ifremer, GIS Posidonie
Substrat	Posidonia and Cymodocea	Cartographie des biocénoses marines de la rade de Toulon	2001	BERNARD G., DENIS J., DENEUX F., BELSHER T., SAUZADE D., BOUDOURESQUE C.F., CHARBONNEL E., EMERY E., HERVE G., BONHOMME P., 2001. Etude et cartographie des biocénoses de la rade de Toulon - Rapport de synthèse final. Contrat d'étude pour le Syndicat Intercommunal de l'Aire Toulonnaise, IFREMER et GIS Posidonie. IFREMER publ., La Seyne, fr. : 1-150.	1:10 000	Toulon Provence Métropole, Région PACA, DIREN PACA, Conseil Général du Var, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, GIS Posidonie, Ifremer

Substrat	Posodonia and Cymodocea	Les Biocénoses Benthiques de la Baie de La Ciotat	2003	Etude du patrimoine marin environnant les domaines départementaux de l'île verte et du Mugel - phase 1 (Etat de la connaissance), 2003, Conseil général des Bouches du Rhône, GIS Posidonie, Ifremer, Philippe Clabaut Consultant	1:30 000	Conseil général des Bouches du Rhône, Ifremer, GIS Posidonie, Philippe Clabaut Consultant
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartographie des habitats marins - Plan de gestion de la rade de Marseille	2007	Cartographie des habitats marins - Plan de gestion de la rade de Marseille, 2007, Ville de Marseille, Agence de l'Eau RM&C, DIREN PACA, Conseil Régional PACA, Conseil Général des Bouches du Rhône, Marseille Provence Métropole, BCEOM	1:5 000	Ville de Marseille, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, DIREN PACA, Conseil Régional PACA, Conseil Général des Bouches du Rhône, Marseille Provence Métropole, BCEOM
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartographie des biocénoses marines de la Côte Bleue - L'Herbier à Posidonia océanica	2003	Cartographie des biocénoses marines de la Côte Bleue - Volet n°1 : l'Herbier à Posidonia océanica, Février 2003, Agence de l'eau RMC, Région PACA, DIREN PACA, Gis Posidonie, Ifremer, Centre d'Océanologie de Marseille, Parc Marin de la Côte Bleue	1:25 000	Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, Région PACA, DIREN PACA, Gis Posidonie, Ifremer, Centre d'Océanologie de Marseille, Parc Marin de la Côte Bleue
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Fonds et recouvrement sédimentaire du golfe de Fos	1975	BLANC J.-J., ROUX M., VERNIER E. Fonds et recouvrement sédimentaire du golfe de Fos et ses annexes, 1975, Centre national pour l'exploitation des océans, Centre d'Océanologie de Marseille, Laboratoire de géologie marine et sédimentologie appliquée,	1:25 000	Centre d'Océanologie de Marseille, CNEXO

Substrat	Posodonia and Cymodocea	Etude et cartographie du milieu marin du site Natura 2000 « Posidonies de la Côte Palavasienne »	2008	HOLON F., DESCAMP P., 2008. ETUDE ET CARTOGRAPHIE DU MILIEU MARIN DU SITE NATURA 2000 « POSIDONIES DE LA COTE PALAVASIENNE », ANDROMEDE ENVIRONNEMENT 2008. Rapport final. Contrat DIREN & Andromede Environnement. Andromede publ., Fr. : 1-104 + annexes.	1:2 000	DIREN Languedoc-Roussillon, Andromede Environnement
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Localisation des habitats naturels présents dans l'enveloppe de référence du site Natura 2000 « Posidonies du Cap d'Agde » - Atlas	2008	DUPUY DE LA GRANDRIVE R., FOULQUIE M., BLOUET S., Janvier 2008. Document d'objectifs du site Natura 2000 « Posidonies du Cap d'Agde ». Atlas. ADENA, 20 cartes, 24 p.	1:25 000	ADENA, DIREN Languedoc-Roussillon, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, Conseil Régional du Languedoc-Roussillon, Université de Nice, CNRS-EPHE Université de Perpignan, GIS Posidonie, Ville d'Agde
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Carte des habitats du site Natura 2000 « Posidonies de la Côte des Albères » Phase I : Inventaire et analyse de l'existant	2004	LICARI M.L., LENFANT P., AMOUROUX J.M., DUPUY DE LA GRANDRIVE R., LABRUNE C., FOULQUIE M., ROCHEL E., BONHOMME P., CADIOU G., 2004. Document d'objectifs site Natura 2000 « Posidonies de la Côte des Albères » Phase I : Inventaire et analyse de l'existant, volume 3 : cartes, 60p.	1:25 000	Réserve Naturelle Marine de Cerbère-Banyuls, GIS Posidonie, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Observatoire océanologique de Banyuls, ADENA, Conseil Général des Pyrénées-Orientales, DIREN Languedoc-Roussillon
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartes des herbiers à Posidonies en Corse : de Saint Florent à Bastia, de Bastia à Campoloro, de Campoloro à Solenzara, de Solenzara à Porto-Vecchio, de Porto-Vecchio à Senetosa, de Senetosa aux îles Sanguinaires, des îles Sanguinaires à Capu	1997	PASQUALINI V., 1997. Caractérisation des peuplements et types de fonds le long du littoral corse (Méditerranée, France). Thèse Doct. « Ecologie marine », Univ. Corse : 1 - 165	1:20 000	Equipe Ecosystèmes Littoraux - Université de Corse

		Rossu, de Capu Rossu à la pointe de La Revellata et de la pointe de La Revellata à Saint Florent.				
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartes des herbiers à Posidonies en Corse : baie de Tizzano	1997	FERNANDEZ C., PERGENT-MARTINI C., PASQUALINI V., 1997. Etude de faisabilité d'un mouillage organisé dans la baie de Tizzano - Approche environnementale. Contrat Mairie de Sartène/GIS Posidonie N°9702, GIS Posidonie - Centre de Corse édit., Corte	1:20 000	Mairie de Sartène, GIS Posidonie, Université de Corse
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartes des herbiers à Posidonies en Corse : lagune de Biguglia, lagune de Diana, lagune d'Urbinu,	1999 and 2000	PERGENT-MARTINI C., FERNANDEZ C., PASQUALINI V., PERGENT G., SEGUI C., TOMASZEWSKI J.E., 2000. Les étangs littoraux de Corse : Cartographie des peuplements et types de fonds. Contrat Equipe Ecosystèmes Littoraux - Université de Corse & IFREMER, N° 99 3 514004 : 1-33	1:10 000	Equipe Ecosystèmes Littoraux - Université de Corse, IFREMER
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartes des herbiers à Posidonies en Corse : région de Pianottoli-Caldarelli : îles Bruzzi, région de Porto-Vecchio : îles Cerbicale, île Lavezzi,	2001	VELA A., PERGENT-MARTINI C., PASQUALINI V., LEONI V., PERGENT G., 2001. Parc Marin International des Bouches de Bonifacio, Etat de référence des herbiers à Posidonia oceanica, Contrat GIS Posidonie & O.E.C. : 1-35	1:12 000	Office de l'Environnement de la Corse, GIS Posidonie, Equipe Ecosystèmes Littoraux - Université de Corse
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartes des herbiers à Posidonies en Corse : Est de la lagune de Biguglia, Nord du port de Campoloro, Nord de l'embouchure du Fium'Orbu, marine de Sisco, Est du port de Solenzara,	2004	PERGENT G., ABIVEN T., HAUDEN S., MIMAUULT B., PASQUALINI V., PATRONE J., PERGENT-MARTINI C., 2004. Mise en oeuvre d'un Réseau de Surveillance Posidonies le long du littoral de la Corse. Première phase : Cap Corse / Porto-Vecchio. Contrat Office de l'Environnement de la Corse et GIS Posidonie Centre de Corse, GIS Posidonie Publ., Corte : 1-108	1:5 000	Office de l'Environnement de la Corse, GIS Posidonie, Equipe Ecosystèmes Littoraux - Université de Corse

Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartes des herbiers à Posidonies en Corse : falaises de Bonifacio, îles Moines	2004	PETRAGALLO S., MIMAULT B., PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., PERGENT G., 2004. Etat de référence des principaux peuplements et types de fonds du Parc Marin International des Bouches de Bonifacio. Convention de recherche Seagrass 2000 & O.E.C., Seagrass 2000 édit., Corte : 1-54 + annexes	1:10 000	Equipe Ecosystèmes Littoraux - Université de Corse, Office de l'Environnement de la Corse
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartes des herbiers à Posidonies en Corse : baie de Campomoro, Est de l'étang d'Arje, Porticcio, golfe de Roccapina, anse de Sciumara,	2005	PERGENT G., CLABAUT P., MIMAULT B., PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., 2005. Mise en oeuvre d'un Réseau de Surveillance Posidonies le long du littoral de la Corse. Deuxième phase : Porto-Vecchio / Ajaccio. Contrat Office de l'Environnement de la Corse et GIS Posidonie Centre de Corse, GIS Posidonie Publ., Corte : 1-133	1:5 000	Office de l'Environnement de la Corse, GIS Posidonie, Equipe Ecosystèmes Littoraux - Université de Corse
Substrat	Posodonia and Cymodocea	Cartes des herbiers à Posidonies en Corse : Les Agriates, baie de Calvi, Sud du port de Centuri, baie de Girolata, golfe de Saint Florent	2006 and 2008	PERGENT G., LEONARDINI R., MIMAULT B., 2008. Mise en oeuvre d'un Réseau de Surveillance Posidonies le long du littoral de la Corse – Troisième phase : Ajaccio / Cap Corse. Contrat Office de l'Environnement de la Corse et GIS Posidonie Centre de Corse, GIS Posidonie Publ., Corte : 1 – 141	1:5 000	Office de l'Environnement de la Corse, GIS Posidonie, Equipe Ecosystèmes Littoraux - Université de Corse
Énergie	Wave énergie at seabed	WaveWatch III model	june 2007 to april 2009	Previmer/SHOM and Ifremer	0.1° x 0.1° NetCDF	Previmer/SHOM and Ifremer
Énergie	Tidal énergie at seabed	MFS model	june 2007 to april 2009	INGV	0.625° x 0.625° NetCDF	INGV
Énergie	Tidal énergie at seabed	Previmer model	june 2007 to april 2009	Previmer/Ifremer	0.014° x 0.01° NetCDF	Previmer/Ifremer
Énergie	Tidal and wave énergie at seabed	Ifremer model	june 2007 to april 2009	Previmer/Ifremer	0.625° x 0.625° NetCDF	Previmer/Ifremer
Énergie	Tidal and wave énergie at seabed	Ifremer model	june 2007 to april 2009	Previmer/Ifremer	0.014° x 0.01° NetCDF	Previmer/Ifremer



# Annexe 3 : Définition des zones bathymétriques en fonction de la pénétration de la lumière dans la mer

1. Contexte.....	62
2. Calcul de l'intensité lumineuse dans la colonne d'eau.....	63
3. Seuils de lumière dans la mer du Nord et la mer Celte .....	65
4. Seuils d'intensité lumineuse dans la Méditerranée.....	66
5. Références.....	72

## 1. Contexte

La disponibilité de la lumière dans la colonne d'eau et au fond de la mer varie de manière considérable. Elle exerce une influence particulière sur la profondeur à laquelle les macrophytes (laminaires, algues, Phanérogames marines, p. ex. *Posidonia spp.*) peuvent croître. L'intensité de la lumière diminue à mesure que la profondeur augmente, en raison des effets de dispersion et d'absorption de la lumière (par les molécules d'eau, les particules en suspension, le phytoplancton et les matières organiques colorées dissoutes) dans la colonne d'eau (turbidité). Cette atténuation tend à être plus forte dans les eaux côtières, à cause des matériaux en suspension et dissous amenés par les cours d'eau, des concentrations plus élevées de phytoplancton, ainsi que des sédiments en suspension sous l'action des vagues en eau peu profonde.

L'atténuation de la lumière est la variable qui sert à définir la zone infralittorale, où l'irradiation du soleil est encore suffisante pour permettre une activité photosynthétique significative. Sur les plates-formes continentales de l'Atlantique, la diminution de l'intensité lumineuse à mesure que la profondeur augmente se traduit par la définition de trois zones (Hiscock, 1996) :

- Zone infralittorale – population dense de laminaires
- Zone circalittorale côtière – algues clairsemées et algues sciaphiles (qui s'épanouissent dans des conditions de forte luminosité)
- Zone circalittorale du large – algues encroûtantes seulement

Dans la Méditerranée, les différences d'intensité lumineuse au fond de la mer déterminent aussi trois zones principales :

- Zone infralittorale – Phanérogames marines et algues photophiles<sup>13</sup>
- Zone circalittorale côtière – algues brunes et rouges sciaphiles<sup>14</sup>
- Zone circalittorale du large – zone de survie d'algues sciaphiles dispersées originaires de la zone circalittorale côtière

Les zones biologiques de la Méditerranée dépendent de variables différentes de celles de la mer du Nord et de la mer Celte, avec cependant certains chevauchements. Dans la Méditerranée, la zone infralittorale commence à la hauteur de la marée basse et s'étend jusqu'à la profondeur maximale de croissance de *Posidonia oceanica*. La limite inférieure de la zone infralittorale est donc définie par la profondeur à laquelle l'intensité lumineuse est tout juste suffisante pour que les Phanérogames marines (c.-à-d. *Posidonia oceanica*) et les

algues photophiles puissent survivre. Ce seuil d'intensité lumineuse est estimé à 1 % de la lumière présente à la surface.

La zone circalittorale commence à la limite inférieure de la zone infralittorale et s'étend jusqu'à la profondeur maximale à laquelle des organismes photosynthétiques pluricellulaires peuvent survivre. Les biocénoses présentes dans cette zone sont donc caractérisées par la prédominance de communautés d'algues sciaphiles. La zone circalittorale peut en outre se subdiviser en zone circalittorale côtière et zone circalittorale du large, selon la quantité de lumière qui atteint le fond de la mer. Dans la zone circalittorale côtière, la quantité estimative de lumière qui atteint le fond se situe entre 0,01 % et 1 % de la lumière présente à la surface, ce qui rend possible l'activité photosynthétique d'algues pluricellulaires. Cette quantité de lumière est suffisante pour permettre l'activité photosynthétique de diverses algues brunes telles que les Fucales (*Cystoseira* et *Sargassum* spp. d'eau profonde), Laminariales, Desmarestiales et Sporochnales, ainsi que des espèces d'algues rouges (Rhodophycées). Les habitats caractéristiques de cette zone sont les assemblages coralligènes consistant en des bioconstructions plus ou moins massives formées de Corallinales, ainsi que des rhodolithes (bancs de maërl) formés d'algues rouges Corallinacées vivantes ou mortes, posées sur le fond sans y être fixées, généralement rassemblées en masses sur un gravier coquillier mêlé de sable grossier. Par contre, dans la zone circalittorale du large, le fond de la mer reçoit moins de 0,01 % de la lumière présente à la surface, et les algues pluricellulaires n'y sont généralement pas présentes en grande quantité, la lumière devenant un facteur de plus en plus limitant.

## 2. Calcul de l'intensité lumineuse dans la colonne d'eau

Il y a deux manières de déterminer l'intensité lumineuse dans la colonne d'eau. La première consiste à utiliser la méthode très simple du « disque de Secchi », qui demeure la méthode standard employée dans les expéditions océanographiques. Même si elle est un peu trop simpliste, cette méthode permet de comparer des bassins entre eux et aussi d'exploiter les données antérieures. Comme on le verra plus loin à la section 5, elle peut constituer une solution de remplacement valable dans la mer Baltique, où les concentrations élevées de matériaux détritiques constituent un obstacle à l'emploi de l'imagerie satellitaire.

La seconde méthode fait appel aux observations satellitaires du coefficient d'atténuation diffuse de la lumière plongeante de longueur d'onde 490 nm ( $K_{d490}$ ) ou du coefficient d'atténuation diffuse de la lumière plongeante photosynthétiquement active ( $K_{dPAR}$ ), qui constitue un moyen efficace d'obtenir des cartes étendues de l'atténuation de la lumière, avec une grande résolution spatiale et temporelle. Plusieurs modèles sont communément employés pour dresser des cartes de  $K_{d490}$  et  $K_{dPAR}$  à partir d'images satellitaires couleurs des océans, comme celles qui sont fournies par MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*), le spectromètre imageur à résolution moyenne placé à bord du satellite européen Envisat, par le capteur SeaWiFs (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*), et par le spectroradiomètre imageur à résolution modérée MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). La plupart des modèles actuels ont été étalonnés sur des océans ouverts et donnent de bons résultats dans ces zones, mais ont tendance à sous-estimer l'atténuation de la lumière dans les eaux côtières turbides.

On peut délimiter la zone infralittorale en combinant les données bathymétriques avec ces valeurs d'atténuation de la lumière et en utilisant un seuil prédéfini. Le seuil de 1 % fait

encore l'objet de débats dans les milieux scientifiques, et ce projet vise entre autres à valider ce seuil avec des données de terrain appropriées pour l'Atlantique et la Méditerranée.

La fraction de la lumière présente à la surface qui atteint une profondeur donnée se calcule à l'aide de la formule :

$$Fr = e^{-h/D_m} \quad (1)$$

où  $h$  est la profondeur, et où  $D_m = Kd_{PAR}^{-1}$  est parfois appelé la profondeur de pénétration moyenne.

Pour le projet EUSeaMap, une estimation améliorée des zones hypsométriques de  $Kd_{PAR}$  a été réalisée à partir de la radiance mesurée par MERIS (Saulquin *et al.*, à paraître).



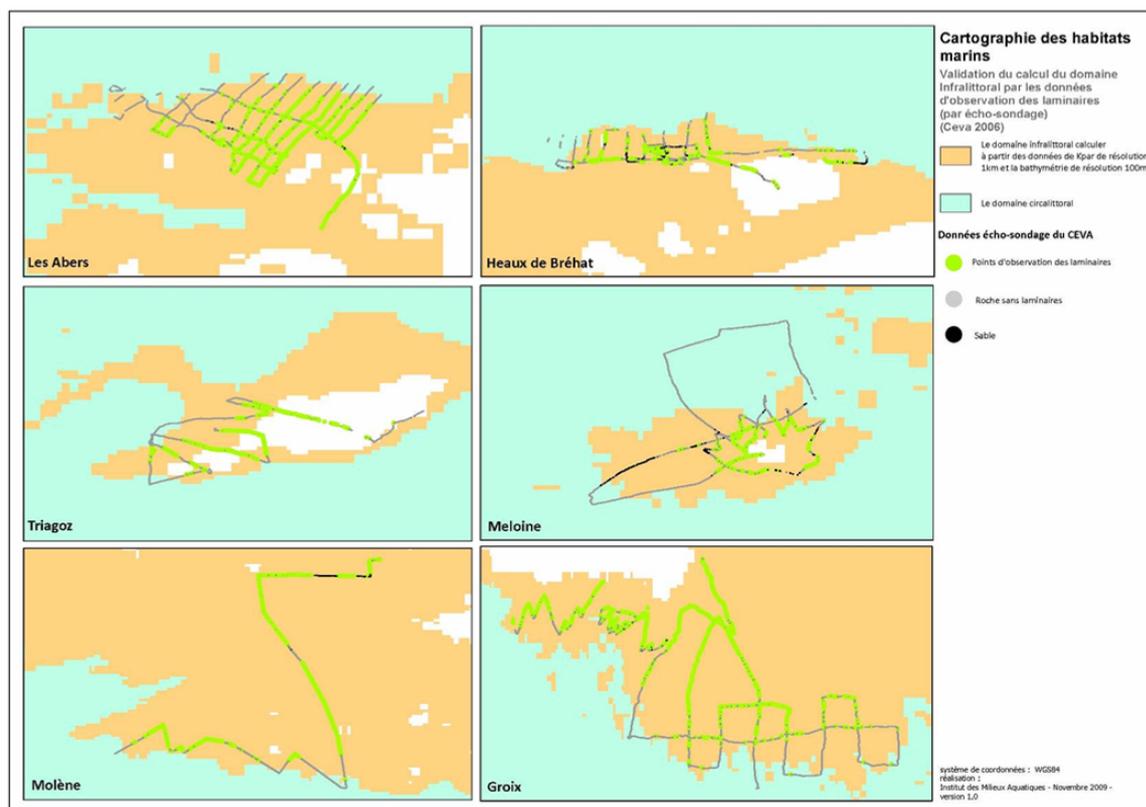
**Figure 1** – Aperçu général de la zone balayée par MERIS

Des données de deux types ont été traitées. Dans un premier temps, le traitement a porté sur les données de résolution réduite de niveau 2 (limite de résolution de 1 km) pour les années 2003 à 2008 et les quatre bassins (dans la région délimitée par les méridiens 130 et 18E, ainsi que les parallèles 36N et 60N). Au cours de la seconde phase, le traitement a porté sur les données à haute résolution de MERIS (limite de résolution de 250 m) pour la même période et la même région, ce qui correspond aux résolutions spécifiées dans le cahier des charges du projet. La limite de résolution de 250 m est particulièrement utile pour les côtes plus accores de la Méditerranée ainsi que pour les côtes rocheuses complexes telles qu'il y en a en Bretagne. Les zones hypsométriques d'intensité lumineuse représentent une amélioration importante au-delà de la seule limite de résolution des données. Dans le cadre du projet EUSeaMap, l'algorithme de prédiction de  $Kd_{PAR}$  à partir des données satellitaires de MERIS a été amélioré pour les eaux côtières par une analyse statistique au regard des données de terrain recueillies dans les divers bassins (voir la description donnée plus loin).

Pour calculer les limites de la zone photique, il suffit de faire l'intersection de la courbe hypsométrique correspondant à 1 % de lumière résiduelle et des données bathymétriques. Si en un point quelconque la profondeur réelle est supérieure ou inférieure à la limite de la zone photique, le pixel correspondant est marqué comme appartenant respectivement à la zone infralittorale ou circalittorale côtière. Il est à noter que la qualité de la bathymétrie joue un rôle important dans la qualité du résultat obtenu. Il faut garder cela à l'esprit lorsqu'on fait la comparaison avec les données de terrain.

### 3. Seuils de lumière dans la mer du Nord et la mer Celte

Pour valider le seuil de 1 % de lumière résiduelle obtenu par imagerie satellitaire, on a effectué des comparaisons avec des données recueillies sur le terrain. Dans l'Atlantique, on a comparé les mesures acoustiques des forêts de laminaires effectuées sur un certain nombre de sites (Abers, Héaux de Bréhat, Triagoz, Méloine, Molène et Île de Groix – voir Méléder *et al.*, 2010) avec la zone photique déduite des valeurs de  $K_{dPAR}$  avec une limite de résolution de 1 km (figure 2).



**Figure 2** – Données recueillies à l'aide d'un échosondeur monofaisceau, montrant la présence d'une forêt de laminaires (points verts, alors que la roche nue est représentée par des points gris), superposées sur la zone infralittorale (en orangé) telle que calculée à partir des données de MERIS avec une limite de résolution de 1 km

Ces cartes montrent que les laminaires sont très rarement présentes dans la zone aphotique (en bleu) et que, dans bien des cas, elles cessent effectivement d'être présentes là où le parcours de l'échosondeur traverse la frontière de la zone photique. Il faut toutefois accorder une valeur limitée à de telles comparaisons, parce que le calcul de la zone photique est

fondé sur les meilleures données bathymétriques disponibles. Dans ce cas-ci en Bretagne, ces données consistent en un modèle numérique de terrain (MNT), d'une limite de résolution de 100 m, issu des échosondages du SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine). Pour faire une première évaluation de la qualité de la comparaison, il faut consulter la carte des erreurs d'interpolation qui accompagne le MNT, afin de vérifier si la profondeur donnée en chaque point est fiable. Cette étape franchie, la zone photique (ou infralittorale) a été délimitée par l'application du seuil de 1 % de lumière résiduelle à l'ensemble de la partie atlantique de la région couverte par le projet.

Certaines questions qui mériteraient de faire l'objet de recherches subsistent à propos de l'utilisation de telles images. Jusqu'à maintenant, on a utilisé des valeurs moyennes sur une période de plusieurs années. Il serait intéressant d'examiner aussi les valeurs mensuelles ou saisonnières. Nous avons eu des discussions sur la saison propice aux tests des seuils — p. ex. de mars à fin juin pour couvrir la période de recrutement et de croissance —, mais on trouve dans la littérature de nombreuses divergences d'opinion. Par exemple, l'hiver pourrait être important quant au temps dont les différentes espèces ont besoin pour emmagasiner l'énergie lumineuse, ou peut-être vaudrait-il mieux étudier un rapport entre les moyennes estivale et hivernale. Il faut également tenir compte des différences entre régions quant aux espèces présentes (*Posidonia*, *Fucus* et *Laminaria*). Il a en outre été suggéré de faire appel à des moyennes corrigées en fonction des variations saisonnières.

## **4. Seuils d'intensité lumineuse dans la Méditerranée**

### **4.1 Définition et validation de la frontière entre les zones infralittorale et circalittorale**

Le passage de la zone infralittorale à la zone circalittorale est déterminé par la quantité de lumière qui atteint le fond de la mer, puisqu'au-delà d'un certain seuil les Phanérogames marines et les algues photophiles ne peuvent plus avoir d'activité photosynthétique. Selon la littérature, ce seuil est fixé par hypothèse à 1 % de la lumière présente à la surface. Cependant, puisque les valeurs fixées par hypothèse ne coïncident pas nécessairement avec celles issues du modèle de courbe hypsométrique de lumière résiduelle, il est important que ce modèle soit validé. Comme des données de terrain sur la lumière résiduelle n'étaient pas disponibles pour la Méditerranée, le modèle de courbe hypsométrique correspondant à 1 % de lumière résiduelle (Buia *et al.*, 2003) a été testé au regard de la distribution connue de prairies de *Posidonia oceanica* en bonne santé et dont on sait que la limite inférieure est liée à la diminution de l'intensité lumineuse plutôt qu'à d'autres causes d'origine humaine (mouillage, pollution, altération de la qualité de l'eau ou chalutage).

Une analyse statistique des données de lumière résiduelle pour les prairies évaluées a ensuite permis de définir le seuil définitif à utiliser dans le modèle, ainsi que les bornes supérieure et inférieure des limites floues de ce seuil. Cette méthode a été appliquée à des prairies choisies en Espagne, en France et en Italie, aux données quotidiennes moyennes de la période 2003–2008 sur la lumière résiduelle obtenues à partir d'images de MERIS avec une limite de résolution de 1 km. Les données bathymétriques utilisées pour établir la zone photique par intersection avec le fichier Kd<sub>PAR</sub> provenaient des meilleurs modèles numériques de terrain (MNT) disponibles en Italie et en France (limite de résolution d'environ 100 m).

Deux méthodes, décrites ci-après, ont servi à mettre à l'épreuve le seuil estimatif de 1 % de lumière résiduelle et à établir la valeur définissant la frontière entre les zones infralittorale et circalittorale.

## 4.2. Choix de prairies de *Posidonia* en bon état

En France, l'analyse a porté sur les prairies connues, selon la littérature scientifique et de l'avis d'experts, pour être dans le meilleur état de conservation, ainsi que sur des prairies situées dans des aires marines protégées notables. Dans ces prairies, on a choisi des polygones où la limite inférieure de la prairie est en bon état et où l'on s'attend à ce que cette limite ne soit déterminée que par la diminution de l'intensité lumineuse. Quatre sites ont été choisis le long de la terre ferme, à partir de Hyères et en direction est, et cinq sites ont été choisis autour de la Corse. Le tableau 1 énumère les lieux où ces polygones sont situés.

En Italie, les prairies de *Posidonia oceanica* qui ont fait l'objet de procédures de validation appartiennent à trois catégories : a) prairies pour lesquelles l'ISPRA (*Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale*) possède des données cartographiques et bathymétriques précises sur l'état de bonne conservation de la limite inférieure (île d'Elbe) ; b) prairies censées être en bon état de conservation d'après les données tirées du projet national de surveillance de *Posidonia* mené depuis 2003 par le ministère italien de l'Environnement (*Programma di monitoraggio Legge 979*). Dans ce cas, les prairies considérées pour le processus de validation étaient celles dont la limite inférieure était notée comme progressive (cela implique que la limite inférieure de la prairie n'est déterminée que par la diminution de l'intensité lumineuse). Les prairies dont la limite inférieure était d'un autre type (franche, érosive) n'ont été retenues pour le processus de validation que si leur indice de conservation (défini par le rapport du pourcentage de *Posidonia* vivant sur le pourcentage de matière morte (Moreno *et al.*, 2001) se situait entre 0,9 et 1,0 et que leur état de conservation (défini par la densité des feuilles en fonction de la profondeur – voir Buia *et al.*, 2003) était considéré comme excellent ou en équilibre normal ; c) prairies de la côte ligurienne dont la limite était, selon des experts, la plus intacte.

Dans les prairies de *Posidonia* de la catégorie b) ci-dessus, les polygones retenus étaient les polygones homogènes les plus grands de chaque lieu, en excluant du processus les zones périphériques fragmentées et dispersées. Le tableau 1 énumère les 20 lieux où sont situés ces polygones contenant des prairies de *Posidonia*.

En Espagne, les prairies de *Posidonia* retenues pour le processus de validation étaient celles dont la limite inférieure était en bon état de conservation et qui, de l'avis d'experts, n'étaient pas exposées aux effets du chalutage et du mouillage. Seules les prairies récemment cartographiées à grande résolution ont été prises en considération. On a ensuite raffiné ces données en éliminant certains polygones dont les valeurs bathymétriques étaient incompatibles avec la présence de prairies de *Posidonia*. Ce processus manuel a consisté à vérifier chaque polygone au regard des données bathymétriques définitives ou (lorsqu'elles étaient disponibles) avec les courbes isobathes à haute résolution (pour les Baléares). Le tableau 1 énumère les 11 lieux au voisinage desquels sont situés les polygones retenus.

### 4.3. Fraction de lumière estimée à partir des pixels de la limite inférieure des prairies de *Posidonia*

La première méthode de validation a consisté à considérer la valeur de fraction de lumière de tous les pixels traversant la limite inférieure des 29 prairies de *Posidonia* situées en France et en Italie, et dont l'état de conservation était considéré comme bon. La limite inférieure a été choisie manuellement comme étant la limite « la plus loin du rivage ». Cette méthode a été fondée principalement sur l'argument selon lequel elle devrait donner une évaluation statistique plus solide, puisqu'elle ferait intervenir un plus grand nombre de données pour toutes les prairies de *Posidonia* disponibles. Cette méthode n'a été appliquée que pour les prairies françaises et italiennes choisies.

**Tableau 1** – Sites de *Posidonia* choisis pour la validation dans les trois pays méditerranéens faisant l'objet de l'étude

Meadow location	Area	Meadow location	Region
Port-Cros	SE France	Punta Licosa	Campania
Cannes	SE France	Camerota	Campania
Iles de Lérins	SE France	Torre Paola	Lazio
Porquerolles	SE France	S. Lorenzo	Liguria
Southern Bastia	Corsica	Porto Maurizio	Liguria
Aléria	Corsica	S. Stefano Sud	Liguria
Archipelago of Lavezzi	Corsica	Capo Berta	Liguria
Scandola	Corsica	Capo Cervo	Liguria
Calvi	Corsica	Ospedaletti - Capo Nero	Liguria
		P.ta S.Martino-Capo Verde	Liguria
		Alghero	Sardinia
		Arbatax	Sardinia
		S. Antioco	Sardinia
		Olbia	Sardinia
		Asinara	Sardinia
		Capo Carbonara	Sardinia
		Maraone - AMP Isole Egadi	Sicily
		Antignano	Tuscany
		Foce Tirso	Tuscany
		Carbonifera	Tuscany

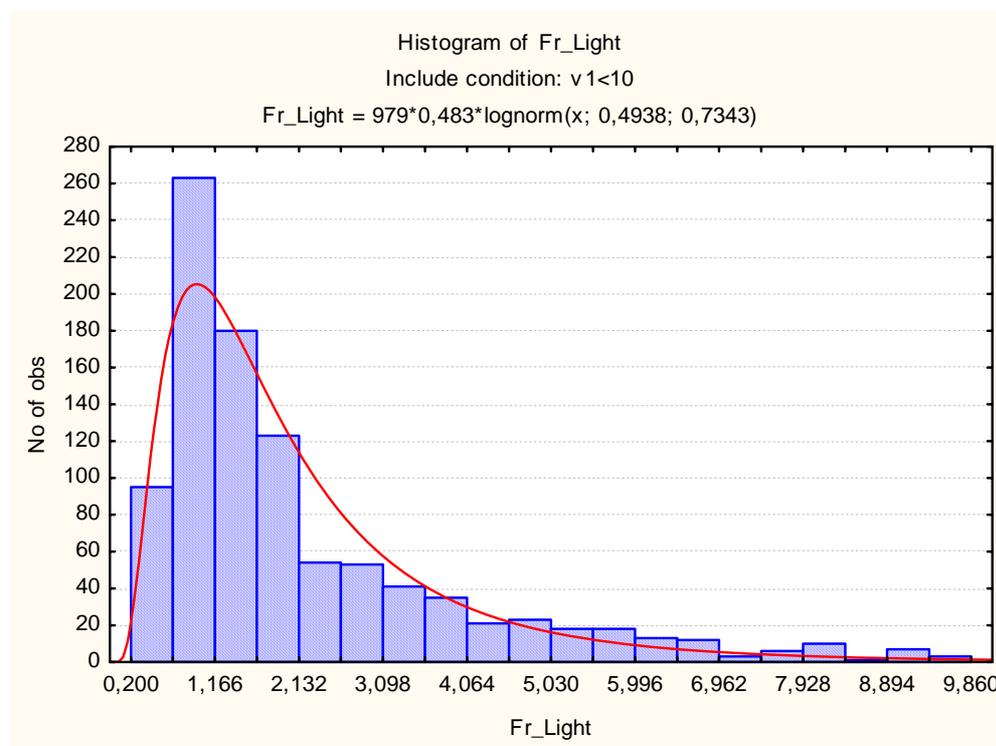
Meadow location	Region
Bega de Mar	Alicante
Cap de La Nao	Alicante
Santa Pola	Alicante
El Oasis	Alicante
West Parc National Calbarque	Murcia
East Parc National Calbarque	Murcia
Calabardina	Murcia
Ibiza	Balearic Is.
Maiorca	Balearic Is.
Menorca	Balearic Is.
South Alicante	Alicante

Le tableau 2 et la figure 3 donnent la distribution des valeurs obtenues et les paramètres statistiques des données d'intensité lumineuse correspondantes. Ces valeurs (moyenne de 2,17 % et médiane de 1,52 %) sont généralement plus élevées que ce que suggère la littérature scientifique. Un examen plus attentif des données du site de Port-Cros (figure 4)

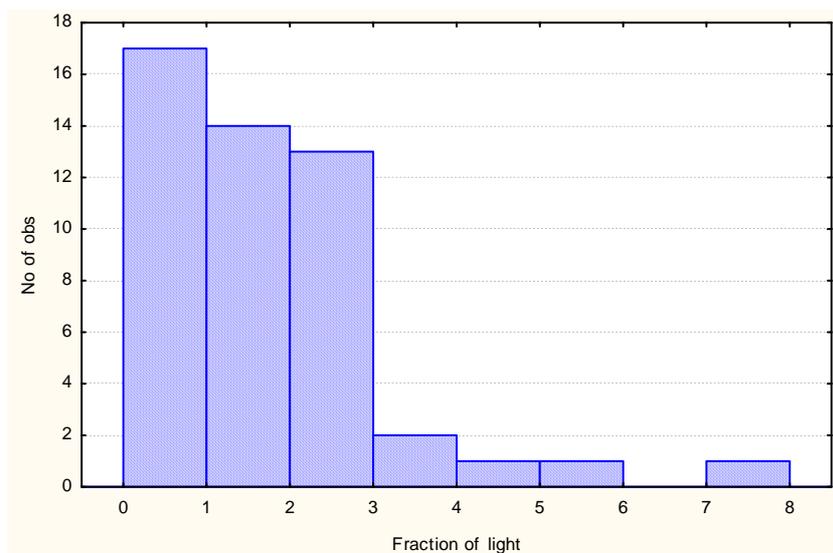
montre la difficulté du choix de la limite inférieure, en raison des grandes variations des valeurs d'intensité lumineuse (jusqu'à 8 %) et des profondeurs correspondantes (de 24 à 46 m). Ces variations montrent que de nombreux points ne sont pas sur la limite inférieure, ou alors que des facteurs autres que la lumière limitent la présence des plantes à une profondeur plus grande (type de sédiment, pressions d'origine humaine, erreurs de cartographie, etc.). Il a donc été décidé de ne pas adopter cette méthode de validation pour déterminer la limite de la zone infralittorale.

**Tableau 2** – Statistiques des fractions de lumière observées associées à la limite inférieure des prairies françaises et italiennes de *Posidonia*

	Nb observ.	Moyenne	Moyenne géométrique	Médiane	Minimum	Maximum	10 <sup>e</sup> centile	90 <sup>e</sup> centile	Écart type
Fraction de lumière	979,00	2,17	1,64	1,52	0,20	9,86	0,69	4,80	1,82



**Figure 3** – Histogramme des valeurs de fraction de lumière observées à la limite inférieure des prairies françaises et italiennes de *Posidonia*



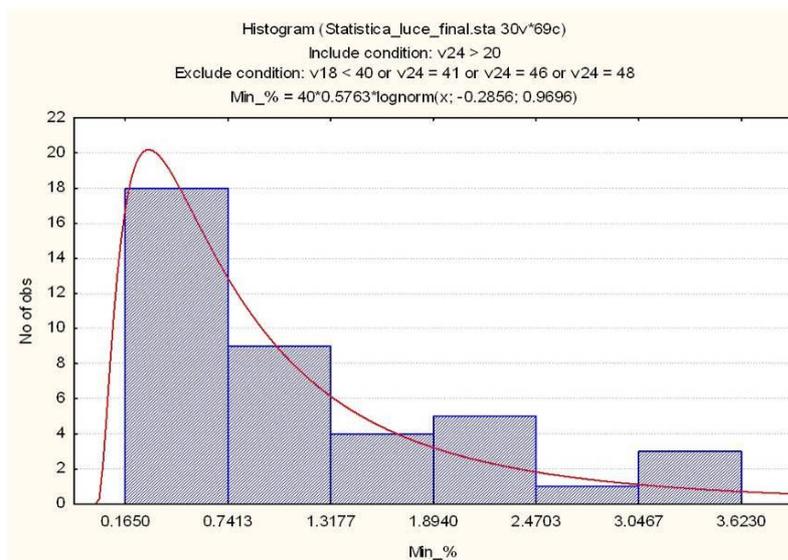
**Figure 4** – Histogramme des valeurs de fraction de lumière observées à la limite inférieure des prairies de *Posidonia* à Port-Cros

#### 4.4. Fraction de lumière minimale observée dans les prairies de *Posidonia*

La seconde méthode de validation a consisté à retenir la plus petite valeur de fraction de lumière d'un pixel dans chacune des 40 prairies de *Posidonia* choisies pour leur bon état de conservation dans les eaux françaises, italiennes et espagnoles. Les paramètres statistiques de ces données sont énumérés ci-dessous (voir le tableau 3 et la figure 5). La moyenne et la médiane des valeurs observées sur l'ensemble de ces données sont très voisines de la fraction de lumière minimale hypothétique (1 %) censée permettre l'activité photosynthétique de *Posidonia*. Étant donné la distribution log-normale, la valeur médiane de 0,82 % a donc été considérée comme un seuil valide déterminant la frontière entre les zones infralittorale et circalittorale, les quartiles inférieur (0,34 %) et supérieur (1,6 %) constituant les bornes inférieure et supérieure des limites floues servant à cartographier la fiabilité de ce seuil. Voir la section sur les limites floues pour visualiser la zone tampon qui en résulte.

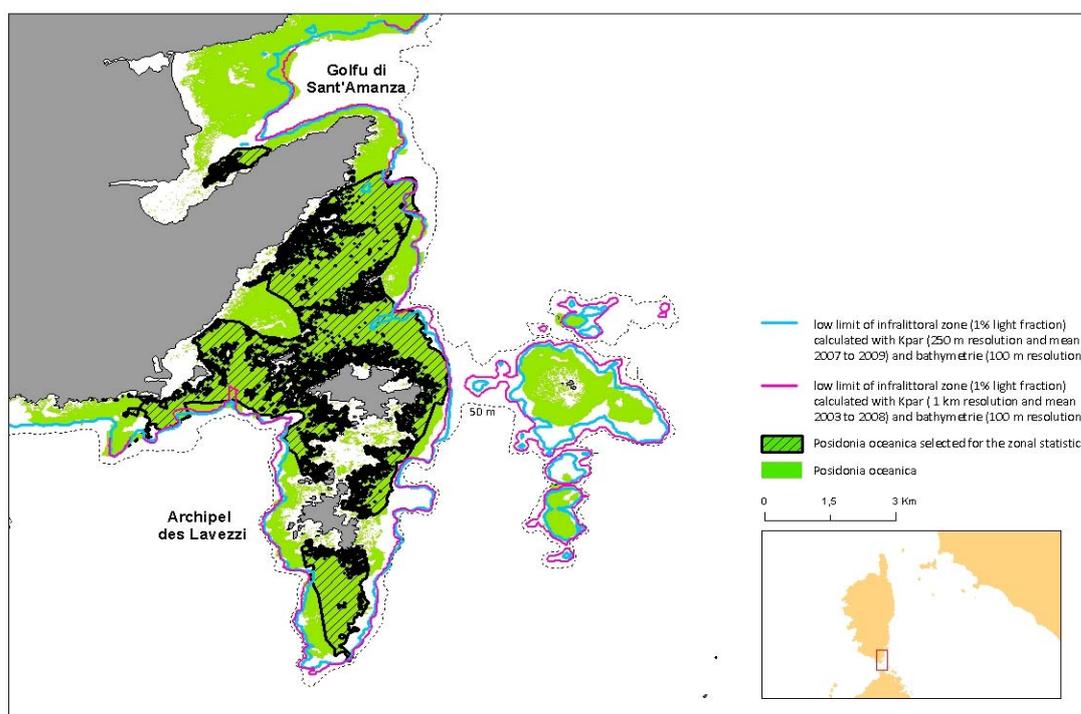
**Tableau 3** – Statistiques des fractions de lumière minimales observées dans les polygones des prairies italiennes, françaises et espagnoles de *Posidonia*

Statistiques descriptives (Statistica_luce_final.sta)											
Condition d'inclusion : v24 > 20 – Condition d'exclusion : v18 < 40 ou v24 = 41 ou v24 = 46 ou v24 = 48											
	Nombre d'observations valables	Moyenne	Moyenne géom.	Médiane	Min.	Max.	Quartile inf.	Quartile sup.	10 <sup>e</sup> centile	90 <sup>e</sup> centile	Écart type
<b>Fraction minimale (%)</b>	40	1,136	0,751	0,821	0,165	3,623	0,340	1,609	0,188	2,535	0,997



**Figure 5** – Histogramme des valeurs minimales de fraction de lumière associées à 40 prairies italiennes, françaises et espagnoles de *Posidonia*

La figure 6 montre la qualité de la correspondance entre la zone photique et l’extension des prairies de *Posidonia*. Cette correspondance a été de fait calculée à partir du seuil de 1 % (avant d’adopter la valeur de 0,82 %), mais la différence est négligeable. Il est à noter que la qualité de la bathymétrie est cruciale pour cette validation. Quelle que soit la qualité de nos données de terrain, si le calcul de  $Z_{eu}$  est compromis par une bathymétrie approximative, le processus de validation perd alors toute signification. Dans la région de l’archipel des Lavezzi, le MNT est issu de sondages non biaisés, et l’erreur du MNT krigé se situe entre 1 et 5 m.



**Figure 6** – Comparaison visuelle entre les valeurs de  $Z_{eu}$  (profondeur de la zone photique) calculées à partir des images satellitaires de MERIS avec une limite de résolution de 1 km (en rouge) et de 250 m (en bleu), et limite inférieure des prairies de *Posidonia* en Corse (archipel des Lavezzi).

#### 4.5. Détermination et validation de la frontière des zones circalittorale côtière et du large

La limite inférieure de la zone circalittorale côtière est définie par la profondeur la plus grande d'activité photosynthétique des algues sciaphiles (algues brunes *Cystoseira*, *Sargassum*, *Laminaria*). Selon la littérature scientifique, cette profondeur correspond à 0,01 % de la lumière présente à la surface qui atteint le fond de la mer. Cependant, non seulement la distribution de ces algues sciaphiles est mal connue et peu cartographiée, mais leur extension spatiale est limitée et beaucoup trop fine par rapport à la limite de résolution de 250 m du modèle. Il n'est donc pas possible de valider le seuil de 0,01 % par rapport à ces biocénoses, puisque notre expérience précédente de validation du seuil de 1 % avec *Posidonia* a montré que les données ponctuelles à échelle fine ne sont pas utiles pour interpoler les valeurs de variables rapportées pour des pixels de grande taille tels que ceux utilisés dans le présent projet. On en conclut qu'il n'est pas possible de valider le seuil de 0,01 % de lumière résiduelle en utilisant les biocénoses qui, selon la littérature scientifique, sont censées indiquer le seuil de changement pour cette variable.

Dans le but d'exprimer cette incertitude et avertir les utilisateurs en conséquence, il a été décidé de fixer des limites floues pour ce seuil. Étant donné que des limites floues ne peuvent pas être fondées sur les données des quartiles inférieur et supérieur comme dans le cas de la zone photique, l'équipe a décidé d'utiliser un intervalle centré sur le seuil présumé [de 0,005 à 0,015 %]. Voir la section sur les limites floues pour visualiser la zone tampon qui en résulte.

## 5. Références

- Buia *et al.*, 2003 – BUIA, M.C., M.C. GAMBI, M. DAPPIANO. « I sistemi a fanerogame marine », Gambi, M.C., et M. Dappiano (éd.), *Manuale di Metodologie di campionamento e studio del benthos marino mediterraneo*, *Biol. Mar. Med*, vol. 19 (Supplément), p. 145-198.
- HELCOM, 1999. *Guidelines for monitoring of phytobenthic plant and animal communities in the Baltic Sea – Annex C9 for HELCOM COMBINE programme*.  
(<http://www.helcom.fi/stc/files/CombineManual/PartC/AnnexC9.pdf>)
- KAUTSKY, H., 1993. « Methods for monitoring of phytobenthic plant and animal communities in the Baltic Sea », Plinski, M. (éd.), *The Ecology of Baltic Terrestrial, Coastal and Offshore Areas*, actes d'une conférence tenue à Sopot, partie 1 – *Protection and Management*, Gdansk, Pologne, p. 21-59.
- Méléder *et al.*, 2010 – MELEDER V., J. POPULUS, B. GUILLAUMONT et P. MOUQUET. « Predictive modelling of seabed habitats - Case study of subtidal kelp forests on the coast of Brittany, France », *Marine Biology*, vol. 157, n° 7, p. 1525-1541.
- Moreno *et al.*, 2001 – MORENO D., P. AGUILERA et H. CASTRO. « Assessment of the conservation status of seagrass (*Posidonia oceanica*) meadows: implication for monitoring strategy and the decision-making process », *Biological Conservation* vol. 102, p. 325-332.
- Saulquin *et al.*, à paraître – SAULQUIN, B., A. HAMDY, J. POPULUS, R. LOUTIER et A. MANGIN. « Estimation of the diffuse attenuation coefficient  $K_{d_{par}}$  using MERIS satellite reflectances for European coastal waters », *ESA Living Planet Symposium*, du 28 juin au 2 juillet 2010, Bergen, Norvège.



# Annexe 4 : Énergie hydrodynamique au fond de la mer en relation avec les habitats benthiques. Cas de la Méditerranée occidentale

1. Introduction .....	73
2. Formulation physique.....	73
3. Données utilisées.....	76
4. Résultats et discussion .....	77
5. Seuils d'énergie en relation avec les habitats.....	80
6. Références.....	83

## 1. Introduction

Ce qui différencie la Méditerranée de mers plus ouvertes est l'absence de marées et l'existence d'un courant permanent le long du talus. Les vagues et les courants présents dans cette zone sont liés aux vents, d'où l'intérêt de considérer à tout moment l'interaction entre la houle et le courant. La notion de contrainte de cisaillement résultant de l'action combinée des vagues et des courants n'est pas la même que dans l'Atlantique, où l'énergie des courants de marée peut être du même ordre de grandeur que celle résultant de la vitesse des vagues. En particulier, il y a une limite au concept de contrainte de cisaillement sur les côtes accores (p. ex. les baies de la Corse), où l'énergie due aux vagues seules constituerait une meilleure représentation du degré d'exposition.

## 2. Formulation physique

### 2.1. Courants

La contrainte de cisaillement sur le fond due aux courants est exprimée par :

$$\tau_c = \rho u_*^2 \quad \text{où} \quad u_* = \frac{\kappa \times u_{couche1}}{\ln(z_{couche1} / z_0)} \quad \text{dans un cas 3D}$$

$$u_* = \frac{\kappa \times \bar{u}}{(\ln(h / z_0) - 1)} \quad \text{dans un cas 2D}$$

- avec
- $\rho$  densité de l'eau
  - $z_{couche1}$  hauteur de la première couche au dessus du fond
  - $u_{couche1}$  vitesse associée à  $z_{couche1}$
  - $z_0$  longueur de rugosité
  - $\bar{u}$  vitesse moyennée sur la verticale
  - $h$  hauteur d'eau

$z_0$  est pris constant et égal à 0,1 mm dans le cas de la Méditerranée. Il est important de souligner que la valeur de  $z_0$  conditionne énormément les résultats. Des tests de sensibilité ont été réalisés et sont présentés ci-dessous.

## 2.2. Vagues

On utilise la théorie linéaire de houle, c'est-à-dire qu'on suppose que la bathymétrie est grande par rapport à l'amplitude des vagues et que les cambrures des vagues sont faibles. Cette théorie a bien sûr une limite en zone très peu profonde.

### 2.2.1. Longueur d'onde significative

La longueur d'onde significative est donnée par :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi \cdot d}{L}\right)$$

avec  $g$  gravité  
 $T$  période  
 $d$  hauteur d'eau  
 $L$  longueur d'onde

Cette équation est résolue en utilisant la méthode itérative de Newton-Raphson.

### 2.2.2. Vitesse orbitale au fond $U_b$ :

Dans le modèle de vague de la zone Manche-Atlantique la vitesse orbitale  $U_b$  et le déplacement  $A$  sur le fond sont calculés directement dans le modèle en tenant compte de toutes les fréquences présentes. Dans le modèle Méditerranée ces variables ne sont pas calculées directement et sont donc calculées dans cette étude à partir de  $H_s$  (hauteur significative), de  $f_p$  (fréquence de pic) et de la bathymétrie avec la méthode suivante :

Pour une vague monochromatique :

$$U_b = \frac{\pi \cdot H}{T \sinh\left(\frac{2\pi}{L} d\right)}$$

avec  $T$  période  
 $d$  hauteur d'eau  
 $H$  hauteur des vagues  
 $L$  longueur d'onde

Dans des conditions réelles, les couples  $H=H_{rms}$  et  $T=T_p$  sont choisis (Whitehouse, 2000).

$$A = U_b T/2 \pi$$

avec  $A$  déplacement sur le fond  
 $T$  période  
 $Ub$  vitesse orbitale sur le fond

### 2.2.3. Contrainte de cisaillement sur le fond due aux vagues

Elle est donnée par :

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w Ub^2$$

Avec :  $f_w$  facteur de frottement des vagues (calculé avec Swart, 1974)  
 $Ub$  vitesse orbitale sur le fond  
 $\rho$  densité de l'eau

Il faut choisir comme suit (Swart, 1974) un facteur de frottement des vagues  $f_w$  (en donnant la priorité aux substrats rocheux) :

- $f_w = 0,3$  si  $A/(30z_0) < 1,57$
- Sinon  $f_w = 0,00251 \exp(5,21(A/30z_0)^{-0,19})$

### 2.3. Interaction houle-courant

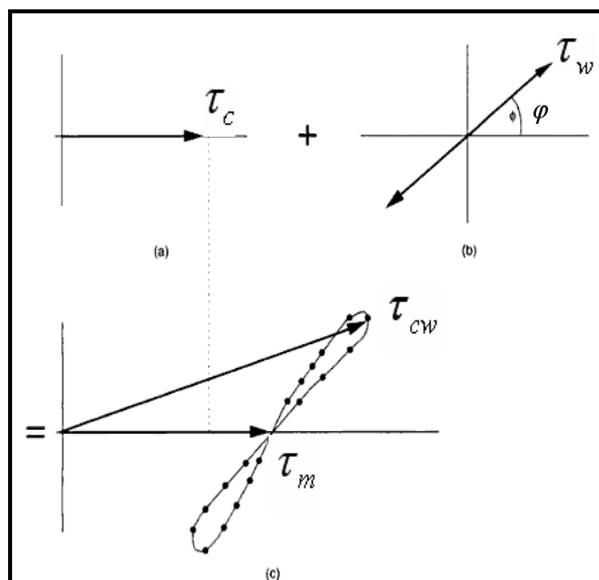
Pour le calcul de la contrainte de cisaillement, il est conseillé d'adopter la formule simplifiée de Soulsby (1997). L'interaction entre les vagues et les courants est non linéaire. D'après Soulsby, elle s'exprime comme suit :

$$\tau_m = \tau_c \left[ 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_w}{\tau_w + \tau_c} \right)^{3.2} \right]$$

$$\tau_{cw} = \left[ (\tau_m + \tau_w |\cos \varphi|)^2 + (\tau_w |\sin \varphi|)^2 \right]^{0.5}$$

Où :  $\tau_m$  représente la moyenne de la contrainte de cisaillement dans la direction du courant,  
 $\tau_{cw}$  est le maximum de la contrainte de cisaillement générée pendant une période de houle,  
 $\varphi$  est l'angle entre les directions du courant et des vagues.

Dans la zone Méditerranée, la direction de pic a été prise. La direction du courant est la direction de la vitesse du courant, au fond de la mer dans le cas d'un modèle 2D, ou moyenne sur la verticale dans le cas d'un modèle 3D.



**Figure 1** – Représentation schématique de l'interaction non linéaire entre la contrainte de cisaillement due aux vagues et celle qui est due au courant (Soulsby *et al.*, 1997).

### 3. Données utilisées

Il y avait fondamentalement quatre sources de données disponibles :

- Données climatologiques en format Metatlas (moyennes mensuelles uniquement)
- Modélisation hydrodynamique numérique :
  - Courants Prévimer (2001-2009) – limite de résolution spatiale de 1 km, fréquence temporelle de 3 heures ; territoire couvert : au nord de 39,5N
  - Courants Moon/MFS – limite de résolution spatiale de 6 km, fréquence temporelle de 24 heures ; territoire couvert : toute la Méditerranée
  - Modélisation numérique des vagues (2007-2009) de la totalité du bassin méditerranéen, fournie par Prévimer-SHOM avec une limite de résolution de 10 km

#### 3.1. Courants

Les résultats sont issus du modèle 3D MENOR d'Ifremer. La résolution du modèle est d'environ 1 km. La fréquence temporelle des résultats est de 3 heures. Les périodes analysées dans le cadre de l'étude sont, d'une part, 2001 et, d'autre part, de juin 2007 à avril 2009. D'autres années sont disponibles en courant mais non en vagues d'où cette restriction temporelle. Les variables utilisées sont z (hauteur), H0 (bathymétrie), XE (hauteur de la surface au-dessus du niveau de la mer), UZ (vitesse de l'eau vers l'est), VZ (vitesse de l'eau vers le nord).

Les chemins d'accès aux données brutes sont les suivants :

[/home/coriolis\\_exp/spool/co01/co0123/co012302/co01230207/rejeu f2/](#) (2001 à 2008)

[/home/coriolis\\_exp/spool/co01/co0123/co012302/co01230207\\_v2/f2/best\\_estimate/](/home/coriolis_exp/spool/co01/co0123/co012302/co01230207_v2/f2/best_estimate/)  
(Depuis 2009)

Afin de couvrir la partie sud de la Méditerranée, les résultats du modèle MFS de l'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) ont été utilisés. La résolution spatiale est d'environ 6 km et la fréquence temporelle de 3 heures.

Le chemin d'accès aux données brutes est le suivant :

[/home/coriolis\\_exp/spool/co01/co0123/co012302/co01230209/best-estimate/](/home/coriolis_exp/spool/co01/co0123/co012302/co01230209/best-estimate/)

### 3.2. Vagues

Pour la période allant de juin 2007 à avril 2009, les résultats du modèle MED01DEG ont été utilisés. La résolution du modèle est de 0,1° (soit environ 10 km) et la fréquence temporelle des résultats est de 3 heures. Ces fichiers ont été supprimés de la base de données du CDOCO (Centre de données d'océanographie côtière opérationnelle), car le modèle ne tournait plus et a été remplacé par le modèle MED-6MIN depuis juin 2009. Pour l'année 2001, les résultats utilisés sont ceux du modèle réalisé par François Dufois lors de sa thèse. La résolution spatiale et temporelle est identique à celle utilisée dans MED01DEG. Les variables utilisées sont Hs (hauteur significative), fp (fréquence de pic), la profondeur et dp (direction du pic des vagues, utilisée pour l'interaction houle-courant).

## 4. Résultats et discussion

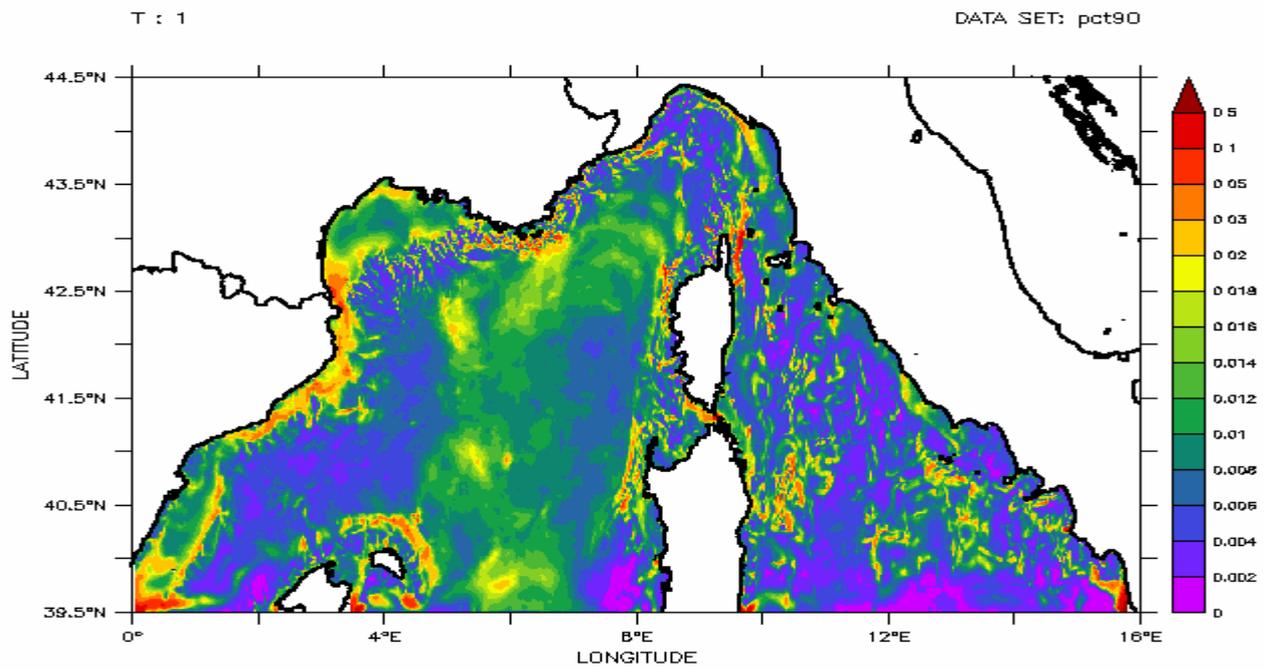
Les statistiques suivantes ont été effectuées sur la période 2001 et de juin 2007 à avril 2009 :

- Courant
- Vitesse du courant sur le fond  $U1$  (à 2,25% de la hauteur d'eau pour la Méditerranée Nord) : moyenne et écart-type
- Interaction houle-courant : contrainte exercée par la houle et le courant sur le fond  $Thaumax$  : Maximum et 90<sup>e</sup> centile

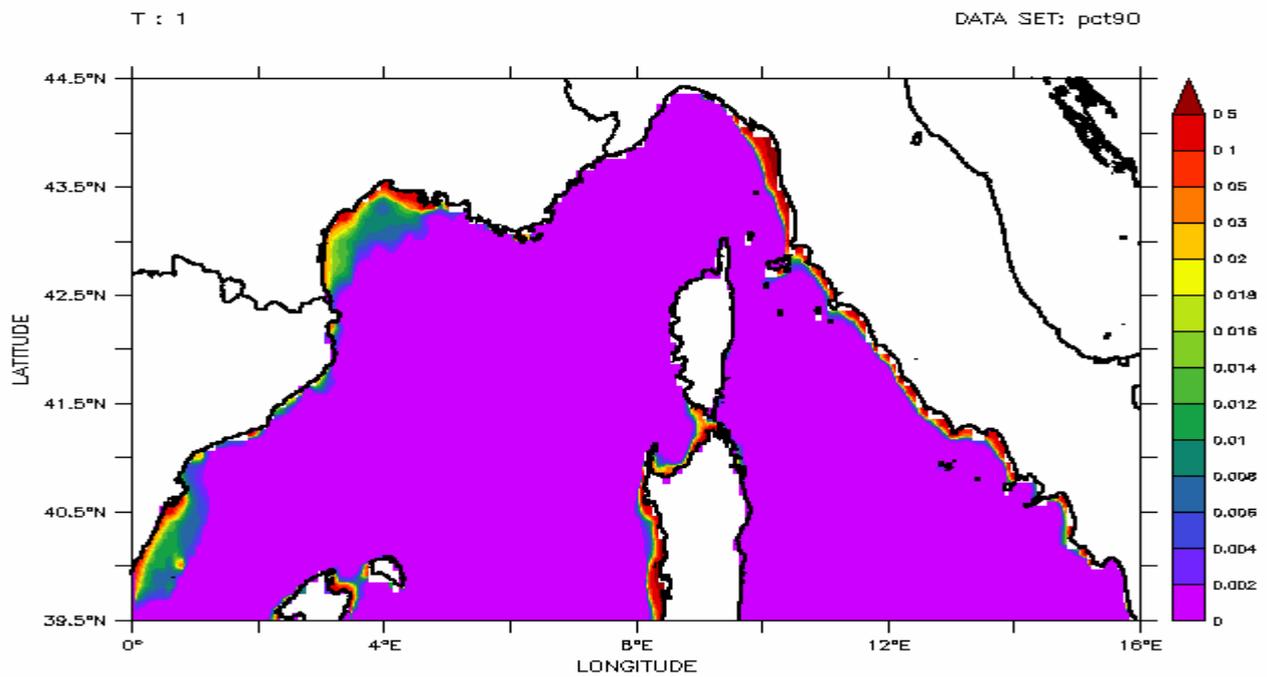
On note que le modèle de courant MFS de l'INGV à 6 km et le modèle de courant MENOR d'Iframer à 1 km donnent des résultats différents. Cela peut s'expliquer par un type de maillage vertical différent entre les deux modèles (z pour le MFS et sigma pour MENOR). Les figures 2 à 4 représentent les contraintes calculées exercées par le courant, la houle et la combinaison houle + courant.

Les courants ont de l'effet principalement au bord du talus. Quand aux vagues, leurs effets sont principalement retrouvés sur les plateaux, là où la bathymétrie est relativement faible. Les coups de Mistral et de Tramontane d'un côté, et les tempêtes d'est hivernales de l'autre, expliquent les fortes contraintes dues à la houle. Une mise en garde est nécessaire : les valeurs de contraintes calculées pour la houle se basent sur un modèle à 10 km de résolution. Ainsi les plages et autres zones côtières sont-elles exclues de l'étude.

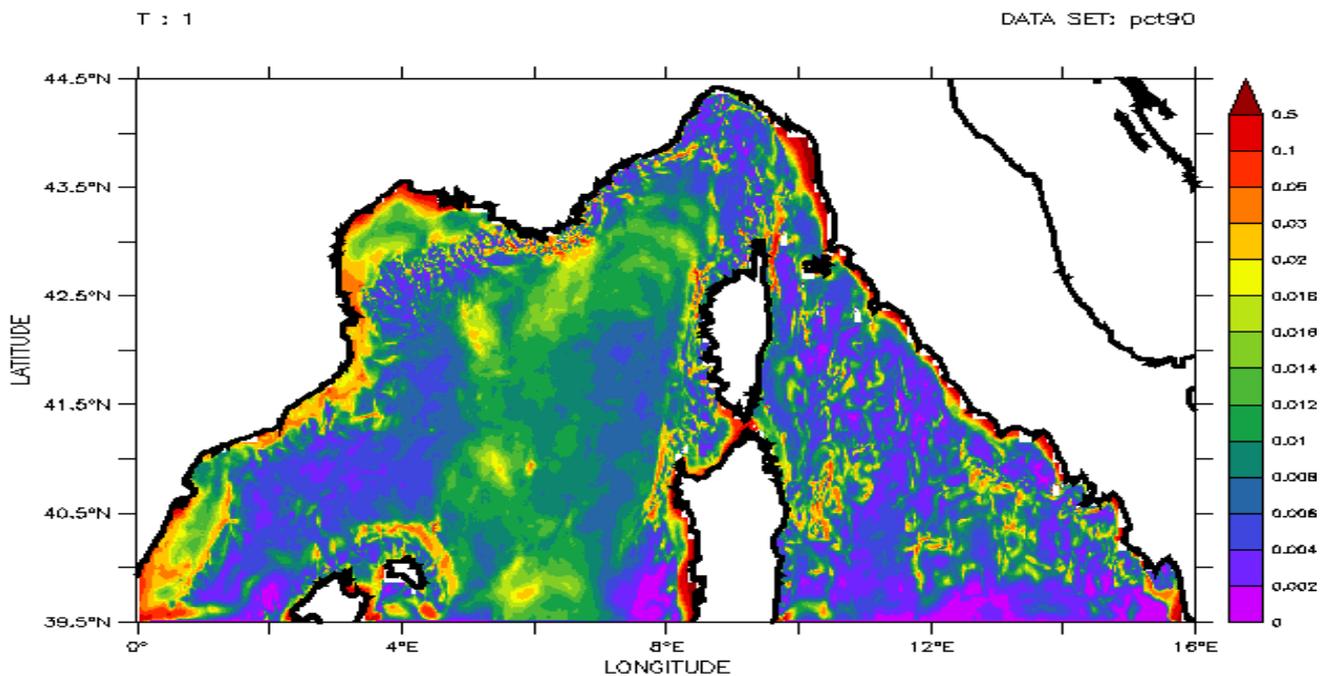
La figure 4 représentant les résultats avec l'interaction montre une combinaison des contraintes houle et courant. Une question peut se soulever au vu des résultats : y a-t-il un intérêt à calculer l'interaction houle-courant à chaque pas de temps ? Une simple addition de la contrainte due au courant et de celle due à la houle ne donnerait-elle pas le même résultat ?



**Figure 2** – 90<sup>e</sup> centile de la contrainte exercée par le courant ( $N.m^{-2}$ ).



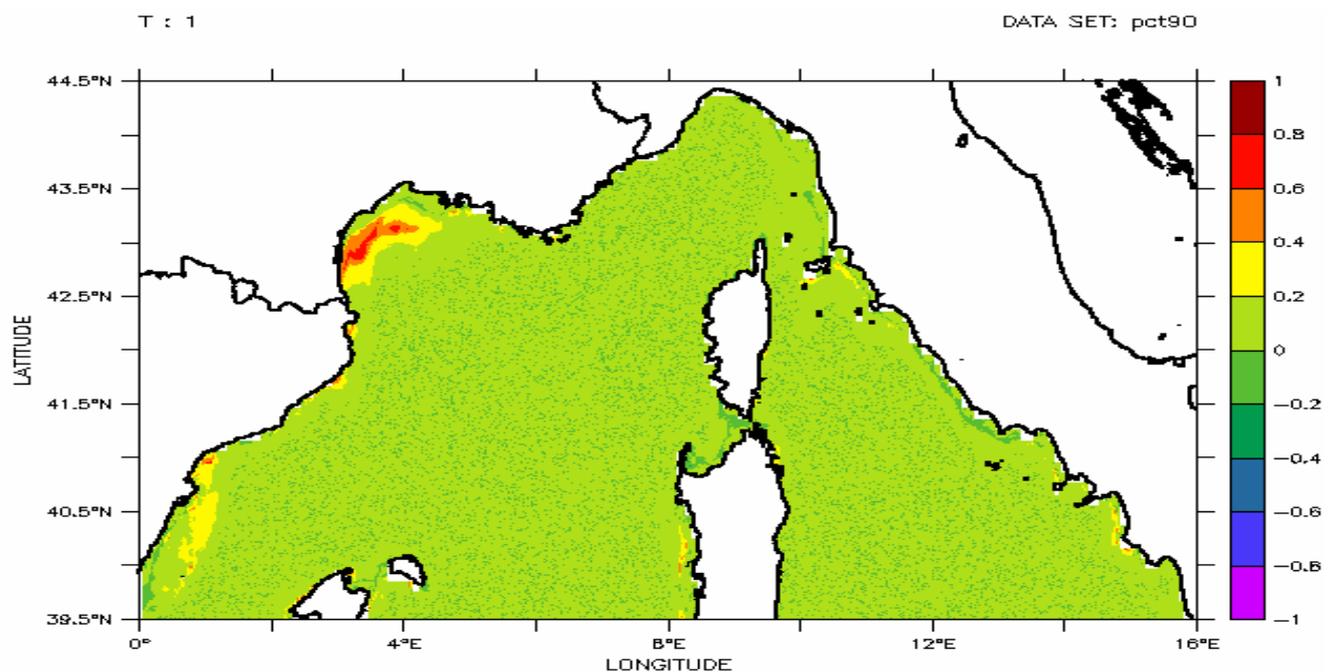
**Figure 3** – 90<sup>e</sup> centile de la contrainte exercée par la houle ( $N.m^{-2}$ ).



Contrainte maximale exercée par la houle et le courant (N/m<sup>2</sup>)

Figure 4 – 90<sup>e</sup> centile de la contrainte exercée par la houle et le courant (N.m<sup>-2</sup>).

La figure 5 représente la différence relative entre la contrainte exercée par la houle et le courant obtenue en utilisant la formule d'interaction à chaque pas de temps puis en calculant le 90<sup>e</sup> centile et la contrainte exercée par la houle et le courant obtenue en ajoutant simplement le 90<sup>e</sup> centile de la contrainte exercée par le courant et le 90<sup>e</sup> centile de la contrainte exercée par la houle. On remarque que le fait de calculer l'interaction à chaque pas de temps a un impact, principalement dans le golfe du Lion.



$(\text{THAUW} + \text{THAUC} - \text{THAUMAX}) / \text{THAUMAX}$

Figure 5 – Différence relative entre (pct90 (THAUC) + pct90 (THAUW)) et pct90 (THAUMAX)

## 5. Seuils d'énergie en relation avec les habitats

### 5.1. Introduction

Rappelons tout d'abord que l'entrée au niveau 3 de la classification EUNIS sur les fonds durs est l'exposition du fond aux turbulences induites par la masse d'eau. Cette entrée par niveau d'énergie n'existe pas sur les sédiments dont la granulométrie exprime d'emblée le régime énergétique au niveau du fond. La composition sur le fond d'une contrainte due aux vagues et d'une contrainte due aux courants est assez mal connue. On définit la zone marine « peu profonde » vis-à-vis de l'agitation au fond comme les endroits où la profondeur est égale à environ la demi-longueur d'onde des trains de houle les plus fréquents, soit environ 50 m en Méditerranée. Dans cette zone houle et courants interagissent, tandis qu'au-delà la houle n'a plus d'influence.

Cette particularité entraîne une difficulté immédiate quand on sait la rareté des modèles de vagues à haute résolution : plus on approche de la côte, plus le besoin de connaissance des vagues est important mais plus les données disponibles sont rares. Ceci s'exprime de manière encore plus vive en Méditerranée, où nombre de rivages sont accores. À quelques centaines de mètres de la côte, il est possible d'atteindre déjà la zone bathyale (au-delà de 200 m de profondeur environ). Un modèle de houle de 10 km de résolution comme celui dont nous disposons en Méditerranée est sans utilité à la côte. Ces données n'auraient éventuellement une signification que sur les zones de plateau peu profondes et peu pentues. Si l'on se penche sur la table d'habitats retenus pour la Méditerranée, ceux caractérisés par une énergie comme par exemple les fonds durs à Coralligènes, n'ont pas été retenus faute de pouvoir figurer sur un modèle à 250 m de résolution. Il n'a donc pas été possible dans ce projet d'utiliser l'énergie des vagues.

Concernant les courants, la situation est différente. Ceux-ci existent jusque dans les zones profondes (notamment les accores des canyons par exemple). On sait que des courants même très faibles mais réguliers sont essentiels pour le maintien de certains habitats comme les fonds à rhodolithes. À la différence des vagues, les courants sont modélisés sur une maille kilométrique dans toute la partie nord du bassin, ce qui rend leur utilisation possible. On montre ci-dessous une tentative d'utilisation de caractérisation d'habitats de fonds meubles à l'aide de l'énergie modélisée au fond.

### 5.2 Définition des valeurs seuils d'énergie

L'énergie hydrodynamique est un facteur essentiel qui détermine le développement d'habitats spécifiques tels que les rhodolithes (bancs de maërl) dans la zone circalittorale, puisque l'intensité des courants accroît le mouvement de roulement d'algues rouges spécifiques sur les sédiments, stimulant ainsi la production de concrétions d'algues sur les granules sédimentaires, ce qui entraîne la formation de rhodolithes. Parallèlement à cela, les courants de fond, ajoutés à l'apport des cours d'eau et à d'autres facteurs océanographiques, contribuent à long terme au dépôt de sédiments de granulométrie et de types précis, ce qui donne différents habitats. Selon la littérature, les habitats détritiques côtiers et détritiques vaseux de la zone circalittorale côtière sont fortement influencés par l'intensité des courants de fond. Dans le cas des habitats détritiques côtiers, des courants constants d'intensité moyenne contribuent au dépôt de substrats graveleux et sableux provenant de la côte et de la zone infralittorale voisine (surtout des roches, des débris de coquilles de Mollusques, des Bryozoaires morts ou *Melobesia*), alors que dans le cas des habitats vaseux, les courants d'intensité plus faible contribuent à la formation de vase par des dépôts terrigènes sur un fond détritique.

C'est pour cela que l'on a tenté d'utiliser les données énergétiques modélisées dans le cas de deux problèmes précis. Le premier est celui de la détermination des valeurs seuils pour les rhodolithes, par opposition aux fonds détritiques côtiers. En effet, ces deux habitats sont présents sur les mêmes types de substrat et peuvent être définis par des niveaux d'énergie différents. Les seuils d'énergie peuvent donc servir à délimiter ces deux habitats dans le modèle final.

Le second problème est celui des fourchettes d'énergie pour deux habitats de fonds meubles (habitats détritiques côtiers et détritiques vaseux) présents dans la zone circalittorale côtière sur deux types différents de substrat. En théorie, on peut distinguer ces deux types d'habitat sur la base des classes de substrat correspondantes. Il peut néanmoins être intéressant de comparer les données énergétiques, à titre d'intrant supplémentaire, avec les distributions connues de ces habitats, là où les données sur les substrats ne sont pas suffisamment exhaustives, ou encore pour renforcer le modèle.

### 5.3 Calcul des seuils pour les rhodolithes ainsi que pour les habitats détritiques côtiers et détritiques vaseux

Pour la procédure de validation, l'information disponible sur tous les types de rhodolithes a été prise en considération, et tous les types de rhodolithes ont été regroupés en une même catégorie. La validation a été effectuée à partir de la distribution des bancs de maërl, des faciès de *Peyssonneliaceae* libres et des rhodolithes non spécifiés de quatre lieux en France (Antibes-Cap d'Ail, Cannes, La Ciotat et Marseille) ; des rhodolithes, des habitats détritiques côtiers et des habitats détritiques vaseux en Italie (archipel toscan et mer Ligurienne) ; des habitats détritiques côtiers, des rhodolithes et des bancs de maërl en Espagne (archipel des Baléares).

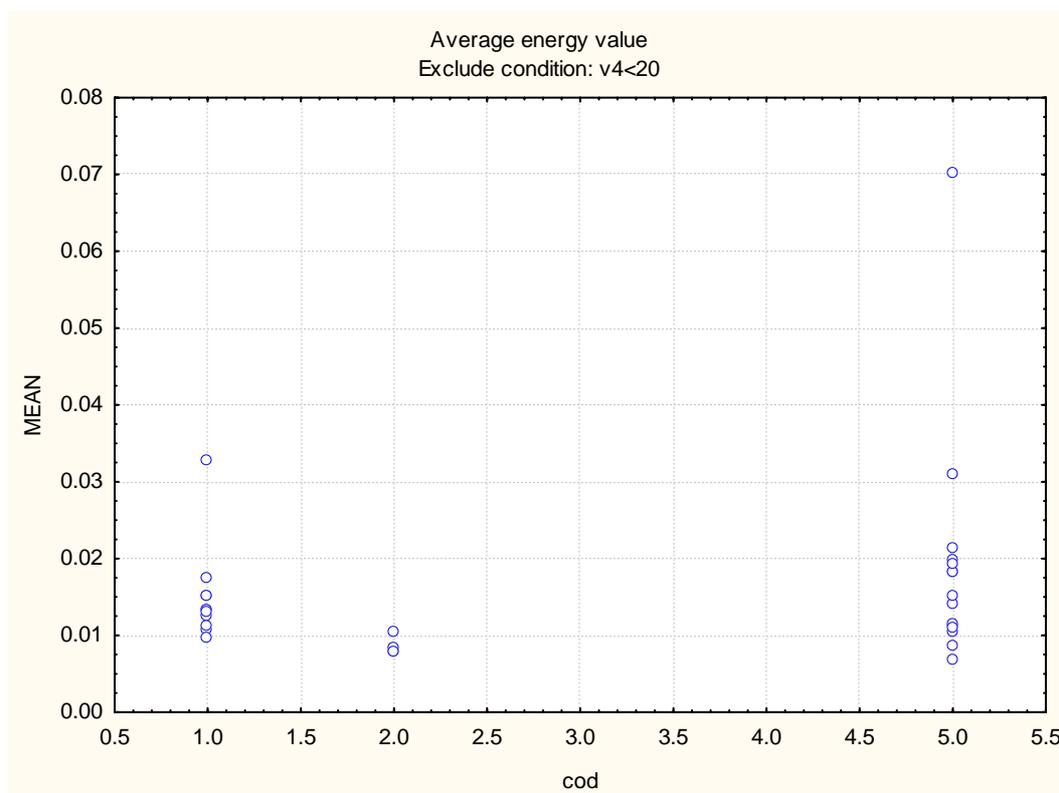
Pour la validation, on n'a tenu compte que des polygones d'habitat ayant une taille d'au moins 20 pixels, afin d'assurer une signification spatiale élevée étant donné l'échelle d'élaboration du modèle. Cela a donné 137 occurrences des divers types d'habitat, mais seulement 28 polygones d'au moins 20 pixels ont été retenus pour le processus d'analyse (tableau 1).

Les résultats des statistiques de ces polygones pour chacun des niveaux énergétiques du modèle au fond de la mer (minimum, maximum, moyenne et 90<sup>e</sup> centile), avec une limite de résolution de 1 km, ont été reportés sur des diagrammes de dispersion. On a ensuite analysé la valeur moyenne des niveaux énergétiques moyen et du 90<sup>e</sup> centile, dans l'espoir de déterminer des seuils d'énergie élevée, moyenne et faible pour les trois types d'habitat (rhodolithes, détritiques côtiers et détritiques vaseux).

**Tableau 1** – Nombre de polygones considérés pour l'analyse

Habitat	Nombre de polygones dans la fourchette du niveau énergétique (moyenne et 90 <sup>e</sup> centile)	Nombre de polygones d'au moins 20 pixels (moyenne et 90 <sup>e</sup> centile)
Détritique vaseux	26	4
Détritique côtier	56	12
Rhodolithe	55	14

Totaux	137	28
--------	-----	----



**Figure 7** – Diagramme de dispersion des valeurs énergétiques pour les habitats détritiques côtiers (cod 1), détritiques vaseux (cod 2) et les rhodolithes (cod 5) dans les eaux italiennes, françaises et espagnoles, pour le modèle du niveau énergétique moyen des courants.

Le diagramme de dispersion de tous les habitats obtenu pour le niveau énergétique moyen (voir la figure 7) montre qu'il n'est pas possible de distinguer les valeurs énergétiques associées aux trois types d'habitat. Les polygones des habitats détritiques vaseux (cod 2) et des rhodolithes (cod 5) sont caractérisés par des valeurs minimales semblables, et les rhodolithes sont caractérisés par des valeurs énergétiques moyennes et moyennes à élevées semblables à celles des habitats détritiques côtiers (cod 1). On observe une tendance semblable lorsque l'on produit un diagramme de dispersion des polygones pour le 90<sup>e</sup> centile des niveaux énergétiques.

## 5.4. Discussion

On a également tenté d'analyser la distribution de ces polygones pour les valeurs faisant intervenir à la fois les courants de fond et l'énergie des vagues, mais on n'a pas pu observer de différences de valeurs énergétiques qui auraient permis de distinguer les trois types d'habitat. La faible résolution (limite de résolution de 10 km) des données énergétiques et les lacunes constantes du modèle près des côtes ont probablement nui à l'utilisation de cette approche.

Les résultats de la comparaison effectuée dans le cadre de cet exercice entre, d'une part, le modèle de données énergétiques et, d'autre part, la distribution des habitats connus soumis à l'influence de courants, n'ont pas permis de tirer de conclusion sur des seuils précis

d'énergie à utiliser pour la modélisation des trois types d'habitat. Par conséquent, la tentative initiale de cartographier les rhodolithes de la Méditerranée occidentale sur la base des données énergétiques a été abandonnée. De la même manière, on n'a pas pu déterminer de seuil d'énergie permettant de distinguer les habitats détritiques côtiers et les habitats détritiques vaseux. Cela a moins d'importance, puisque ces deux types d'habitat peuvent être modélisés sur la base du type de substrat et de la zone bathymétrique.

En ce qui concerne les travaux futurs, ce qui précède amène à conclure au besoin pressant d'améliorer la résolution des modèles physiques. Près des côtes, il faut une limite de résolution d'au plus 250 m pour les vagues et les courants dans les habitats de la zone infralittorale, alors que des résolutions moins fines (de l'ordre du kilomètre) suffisent pour les plates-formes continentales. C'est le domaine où le modèle peut être amélioré de manière significative, avec la perspective de pouvoir identifier plusieurs habitats des zones infralittorale et circalittorale côtière sur la base du régime énergétique lorsque cela n'est pas possible sur la base d'autres variables.

La température est également jugée importante pour des habitats côtiers tels que les formations coralligènes et les rhodolithes, ainsi que pour les zones bathyales (homéothermiques). Il faudra procéder à une recherche bibliographique adéquate, afin de déterminer de manière quantitative quels habitats sont sensibles à quels changements de température. Par exemple, les déplacements de la thermocline de 18 m (normale) à 24 m (anormale) au cours de l'été peuvent entraîner la destruction de gorgones et d'éponges. Cela soulève la question des couches de données construites à partir du modèle de température qui sont pertinentes sur le plan biologique pour des habitats précis : quantiles, moyennes, anomalies (écarts par rapport à la moyenne).

## 6. Références

- BLANPAIN, O. 2009. *Dynamique sédimentaire multiclasse : de l'étude des processus à la modélisation en Manche*, thèse de doctorat, Université de Rouen.
- Connor *et al.*, 2006 – CONNOR, D.W., P.M. GILLILAND, N. GOLDING, P. ROBINSON, D. TODD et E. VERLING. *UKSeaMap: the mapping of seabed and water column features of UK seas*, Peterborough, Joint Nature Conservation Committee.
- DUFOIS, F. 2008. *Modélisation du transport particulaire dans le Golfe du Lion en vue d'une application au devenir des traceurs radioactifs issus du Rhône*, thèse de doctorat, Université du Sud, Toulon, Var.
- Rapport ACTIMAR. *Cartographie de l'agitation sur les fonds marins. Bande littorale Atlantique-Manche*, Brest, IFREMER, 2005.
- RIVIER, 2010. *Évaluation de l'action de la houle et du courant sur les fonds marins dans le cadre de la réalisation de cartographie d'habitats marins*. Brest, IFREMER, 30 p.
- SOULSBY, R. 1997. *Dynamics of marine sands*, Londres, Thomas Telford.
- Whitehouse *et al.*, 2000 – WHITEHOUSE, R., R. SOULSBY, W. ROBERTS et H. MITCHENER. *Dynamics of estuarine muds*, Londres, Thomas Telford.



## Annexe 5 : Technique de modélisation

1. Méthodologie : approche des « triplets » .....	84
2. Seuils et logique floue.....	85
3. Considérations techniques.....	88
4. Références bibliographiques .....	90

Le projet avait pour objectif non seulement de produire des cartes d'habitats, mais aussi de fournir un modèle réutilisable, c'est-à-dire un modèle pouvant être exécuté à nouveau par des personnes ayant une connaissance raisonnable des systèmes d'information géographique, mais aucune expérience en programmation.

Après un rappel des divers concepts utilisés dans le projet (approche des "triplets" et logique floue), le présent document décrit la manière dont les modèles ont été élaborés, leurs constituants, et ce qu'il faut pour les faire fonctionner.

### 1. Méthodologie : approche des "triplets"

La méthodologie de modélisation mise en œuvre est fondée sur l'approche des "triplets" du projet MESH, qui fait intervenir la combinaison de trois couches d'information (Coltman *et al.*, 2008) :

- La nature du fond (p. ex. vase, sable, roche) ;
- les zones biologiques (p. ex. zone infralittorale ou circalittorale), déterminées à partir de la bathymétrie et de l'intensité lumineuse ;
- l'énergie hydrodynamique (p. ex. énergie faible ou modérée), déterminée à partir de variables qui décrivent l'action des vagues et les courants de marée.

Chacune de ces trois couches d'information contient des codes. La carte d'habitats finale résulte d'une simple addition de ces codes. Les unités employées pour chaque couche sont différentes, de sorte que l'information propre à chaque couche n'est pas perdue lorsque l'on combine les diverses couches. Les codes d'énergie sont exprimés par des unités (p. ex. 2 signifie « énergie hydrodynamique modérée »), les codes de substrat benthique par des dizaines (p. ex. 10 pour la roche) et les codes de zone biologique par des centaines (p. ex. 300 pour la zone circalittorale du large). L'addition des trois couches donne donc une couche dont les codes à 3 chiffres sont très faciles à déchiffrer (la somme des exemples ci-dessus donne le code 312, qui signifie « zone circalittorale du large + roche + énergie hydrodynamique modérée »).

Une telle codification en trois parties était pertinente pour la région étudiée dans le cadre du projet MESH. Pour ce concerne le travail réalisé ici, elle est pertinente pour la Manche et l'Atlantique, mais elle ne l'est pas pour la Méditerranée, où la variable d'énergie hydrodynamique n'a pas pu être utilisée.

## 2. Seuils et logique floue

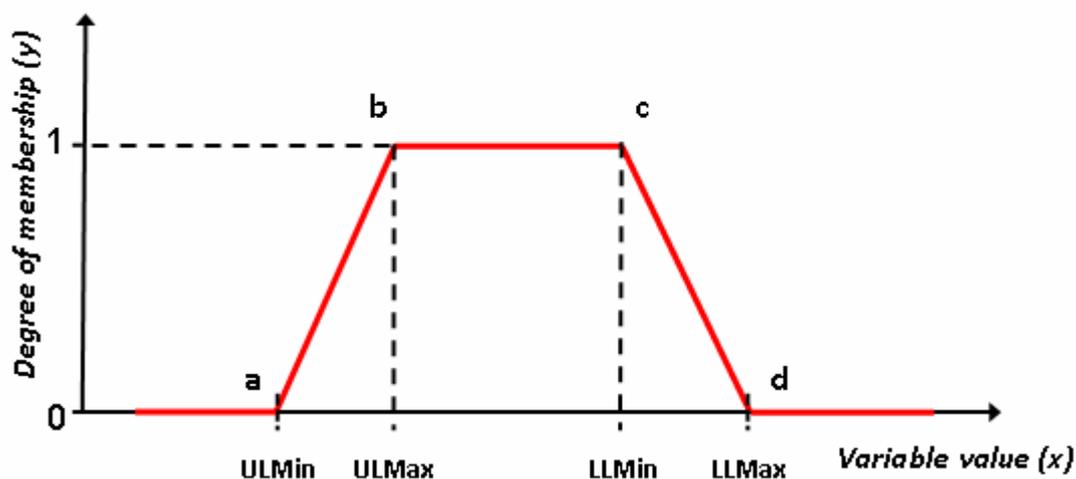
Le calcul de catégories cartographiques, par exemple les zones biologiques (infralittorale, circalittorale, etc.), à partir de variables continues suppose la détermination d'un ensemble de seuils. Par exemple, dans la Méditerranée, le seuil définissant la frontière entre la zone infralittorale et la zone circalittorale correspond à 1 % de la lumière présente à la surface qui atteint le fond de la mer. En effet, on considère qu'en dessous de cette valeur, les Phanérogames marines n'ont plus assez de lumière pour croître. Au-dessus de ce seuil de 1 %, la probabilité d'être dans la zone infralittorale est de 1, alors qu'en dessous, elle est de 0. De manière symétrique, au-dessus de ce seuil, la probabilité d'être dans la zone circalittorale est de 0, alors qu'en dessous, elle est de 1.

Cependant, une telle méthode de classification a ses limites. Évidemment, la nature n'est pas aussi simple, et les frontières entre habitats ne sont pas aussi marquées. Une manière de décrire une partie de la complexité du monde réel consiste à utiliser des limites floues plutôt que des limites nettes.

La logique floue fait intervenir des calculs de probabilités qui ne sont pas dérivés de la simple logique booléenne comme dans l'exemple ci-dessus, mais qui exploitent plutôt une fonction floue d'appartenance à une catégorie. La forme de cette fonction est régie par quatre points de contrôle (Roberson *et al.*, 2004). La figure 1 illustre la fonction floue d'appartenance à une catégorie (p. ex. zone biologique « zone circalittorale côtière »). L'abscisse correspond à la variable dont dépend la catégorie (p. ex. le pourcentage de lumière au fond de la mer). L'ordonnée donne le degré, c'est-à-dire la probabilité, d'appartenance à la catégorie. Les points de contrôle sont « a », « b », « c » et « d ». Leur abscisse est respectivement ULMIn (Upper Limit Minimum, abscisse Minimale de la Limite Supérieure), ULMax (Upper Limit Maximum, abscisse Maximale de la Limite Supérieure), LLMin (Lower Limit Minimum, abscisse Minimale de la Limite Inférieure) et LLMax (Lower Limit Maximum, abscisse Maximale de la Limite Inférieure).

Le point « a » est celui où la fonction d'appartenance commence à prendre une valeur supérieure à 0. Le point « b » est celui où le degré d'appartenance atteint son plateau, c'est-à-dire la valeur 1. Le point « c » est celui où la fonction d'appartenance commence à baisser sous la valeur 1, et « d » celui où le degré d'appartenance revient à 0. Autrement dit, avant le point « a » et après le point « d », il n'y a aucun doute que l'on est à l'extérieur de la catégorie en question. Entre les points « b » et « c », il n'y a aucun doute que l'on est dans la catégorie. Entre les points « a » et « b » d'une part (limite supérieure de la catégorie), et les points « c » et « d » d'autre part (limite inférieure de la catégorie), l'appartenance à la catégorie est « floue » et s'exprime par une équation. Cette équation peut être celle d'une simple droite, comme dans la figure 1, ou peut être celle d'une fonction plus complexe. Dans le cadre du projet on a utilisé des droites pour modéliser l'appartenance floue à une catégorie.

La forme de la fonction d'appartenance floue n'est pas toujours régie par quatre points. Si une catégorie n'a qu'une seule limite parce qu'il n'y a aucune classe au-dessus (ce qui est le cas de la zone infralittorale) ou en dessous d'elle (ce qui est le cas de la zone abyssale), la forme de la fonction d'appartenance est alors régie par deux points seulement.



**Figure 1** – Fonction d'appartenance floue à une catégorie (p. ex. zone biologique circalittorale côtière). Les points de contrôle sont « a », « b », « c » et « d ». De gauche à droite, avant « a » et après « d », la probabilité d'appartenance à la catégorie est de 0. Entre « b » et « c », elle est de 1. La partie entre « a » et « b » correspond à la limite supérieure de la catégorie, et la probabilité augmente de 0 à 1. La partie entre « c » et « d » correspond à la limite inférieure de la catégorie, et la probabilité décroît de 1 à 0.

Pour ce qui est des seuils, dans le cas d'une fonction d'appartenance floue, il faut davantage qu'un seuil unique pour définir les limites d'une catégorie. Il faut un ensemble de valeurs, qui correspond aux intervalles [ULMin, ULMax] et [LLMin, LLMax] de la figure 1. Ces limites floues sont définies soit à partir de la littérature scientifique et du jugement d'experts (rarement), soit par comparaison avec des données de terrain.

Une fois ces valeurs définies, la fonction qui permet d'attribuer un « score » d'appartenance de 0 ou 1 à chaque cellule d'une grille dans une couche de données à limites floues est définie de la manière suivante.

$$\text{Si } x \leq \text{ULMin} \text{ ou } x \geq \text{LLMax}, y = 0$$

$$\text{Si } x \geq \text{ULMax} \text{ et } x \leq \text{LLMin}, y = 1$$

$$\text{Si } x > \text{ULMin} \text{ et } x < \text{ULMax}, y = \frac{x - \text{ULMin}}{\text{ULMax} - \text{ULMin}}$$

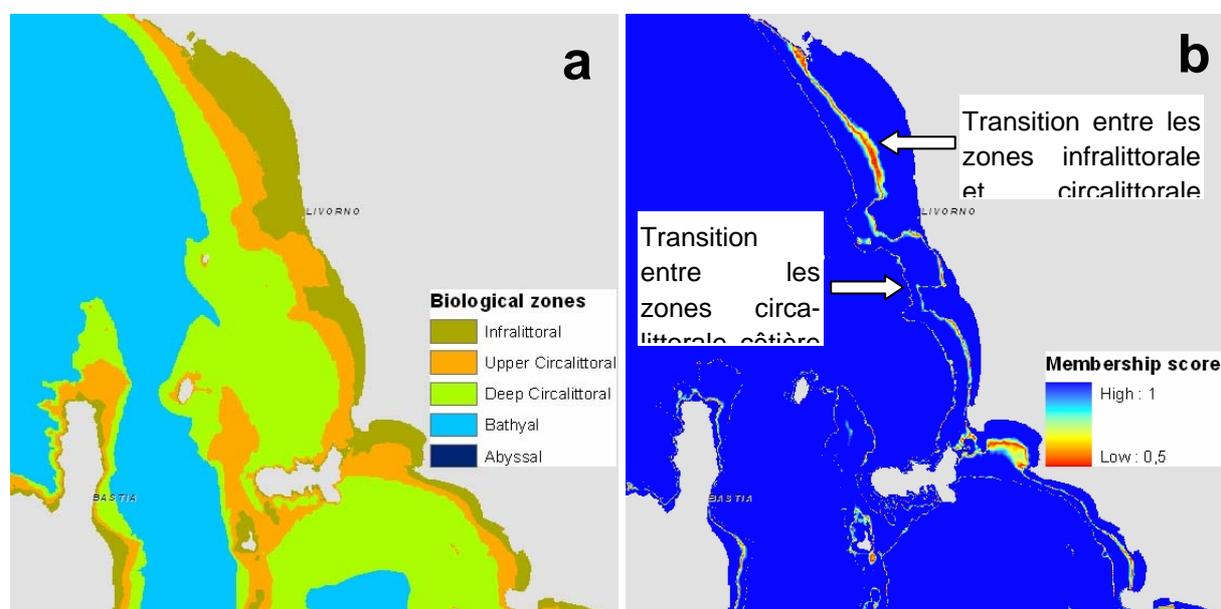
$$\text{Si } x > \text{LLMin} \text{ et } x < \text{LLMax}, y = \frac{\text{LLMin} - x}{\text{LLMin} - \text{LLMax}}$$

Cette fonction doit être exécutée pour chaque catégorie définie pour une variable donnée. Il en résulte donc une couche de « scores » d'appartenance par catégorie. Par exemple, dans le cas des zones biologiques de la Méditerranée, nous obtenons cinq couches de scores d'appartenance (une pour chacune des zones infralittorale, circalittorale côtière, circalittorale du large, bathyale et abyssale). Ceci ne constitue évidemment pas un produit final et doit être simplifié.

Deux produits peuvent être dérivés des couches de scores d'appartenance (figure 2) :

- une couche « d'appartenance » aux diverses catégories (figure 2a), qui indique à quelle catégorie appartient chaque pixel. Cette couche s'obtient en prenant, pour chaque pixel, la catégorie ayant le score d'appartenance le plus élevé.
- une couche de « scores d'appartenance » (figure 2b), dans laquelle la valeur attribuée à chaque pixel est le score d'appartenance à la catégorie ayant le score d'appartenance le plus élevé.

Ces deux produits sont complémentaires. Le premier est une carte classique de catégories, facile à comprendre. Le second donne de l'information supplémentaire, puisque pour chaque pixel, il indique la probabilité d'appartenance à la catégorie et donne une représentation visuelle des zones de transition, où l'on passe d'un milieu à un autre (p. ex. de la zone infralittorale à la zone circalittorale ou d'une zone à faible énergie hydrodynamique à une zone à forte énergie hydrodynamique).



**Figure 2** – Produits dérivés d'une classification floue (cas des zones biologiques) : (a) couche « d'appartenance », où la valeur de chaque pixel est l'identifiant de la catégorie ayant le score d'appartenance le plus élevé; (b) couche de « scores d'appartenance », où la valeur de chaque pixel est le score d'appartenance à la catégorie ayant le score d'appartenance le plus élevé. La première carte est une carte classique de catégories, facile à comprendre, et la seconde carte donne de l'information supplémentaire lorsque l'on clique sur un pixel dans un logiciel de SIG, à savoir la probabilité d'appartenance à une catégorie. Elle montre en outre les zones de transition, où l'on passe d'un milieu à un autre (lignes plus ou moins épaisses qui ne sont pas en bleu foncé).

### 3. Considérations techniques

Dans le projet la modélisation a été effectuée en mode matriciel, qui constitue la manière la plus commode et la plus efficace de combiner plusieurs variables continues. Les logiciels de la société ESRI<sup>MD</sup> ArcGIS<sup>MC</sup> 9.3 et *Spatial Analyst* ont été utilisés. ArcGIS<sup>MC</sup> est un logiciel de SIG. L'un de ses modules, *ModelBuilder*, permet de concevoir des modèles, c'est-à-dire de relier graphiquement les outils d'ArcGIS<sup>MC</sup>, le résultat d'un outil pouvant être utilisé comme entrée d'un autre outil. Les modèles construits à l'aide de *ModelBuilder* peuvent être enregistrés et exécutés plusieurs fois. *Spatial Analyst*<sup>MC</sup> est une extension d'ArcGIS<sup>MC</sup>, dans laquelle des couches de données matricielles peuvent être combinées au moyen de l'« algèbre cartographique ».

#### 3.1. Les paramètres du modèle

Etant donné que la Méditerranée diffère de la Manche et l'Atlantique par le fait que l'énergie n'y est pas prise en compte, deux modèles ont été élaborés : un pour la Méditerranée, et un pour l'ensemble Manche / Atlantique.

Les variables d'environnement suivantes d'ArcGIS<sup>MC</sup> ont été appliquées à chacun de ces modèles :

Paramètres cartographiques > Système de coordonnées cartographiques > **Mercator - WGS84** (latitude d'échelles conservées 46° N pour Manche/Atlantique, 38° N pour la Méditerranée)

Paramètres généraux > Étendue > *Limites de latitude et de longitude spécifiées pour chaque modèle* (voir le tableau 1)

Paramètres généraux > Raster de capture > *La couche de bathymétrie*

Paramètres d'analyse raster > Taille des cellules > *100 m ou 250 m, selon la résolution souhaitée en sortie*

**Tableau 1** – Coordonnées de l'emprise de chaque modèle. Les valeurs sont en mètre, selon la projection Mercator – WGS54 (latitude d'échelles conservées 46° N pour Manche/Atlantique, 38° N pour la Méditerranée)

Région	X min.	X max.	Y min.	Y max.
Manche/Atlantique	-929800	232200	3715500	4708100
Méditerranée occidentale	239950	878450	3932650	4289150

#### 3.2. La boîte à outils du projet

Comme on le mentionne dans l'introduction, l'un des principaux défis du projet a été de construire des modèles réutilisables, c'est-à-dire des modèles pouvant être exécutés de manière répétée par des personnes ayant peu d'expérience de la programmation ou de l'utilisation du module *ModelBuilder* d'ArcGIS<sup>MC</sup>.

On a donc créé une boîte à outils ArcGIS<sup>MC</sup> (figure 3). Cette boîte contient les deux modèles.

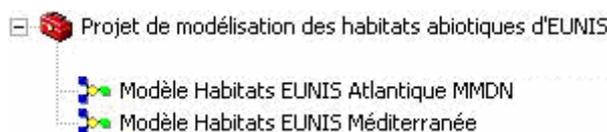


Figure 3 – La boîte à outils

### 3.3. La structure de fichiers du projet

Les modèles et les données sont conservés dans la structure hiérarchique illustrée en figure 4 : deux dossiers au niveau supérieur, un pour chaque modèle plus le dossier « toolbox », qui contient le fichier « FRSeamap.tbx ». Ce fichier est le fichier ArcGIS<sup>MC</sup> correspondant à la boîte à outils décrite ci-dessus. Chaque dossier de modèle comporte quatre sous-dossiers : « inputs », pour les données en entrée du modèle ; « output », pour les données produites par le modèle ; « temp », pour les données temporaires créées par le modèle pendant l'exécution ; « translation\_table », qui contient le fichier *Excel* servant à traduire les codes "triplets" de la carte d'habitats en codes EUNIS (pour plus de détails, voir la section sur la table de traduction d'habitats).

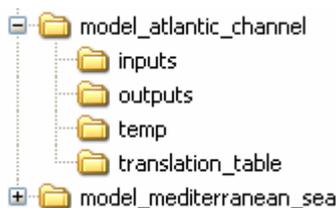


Figure 4 – Structure de fichiers de modélisation

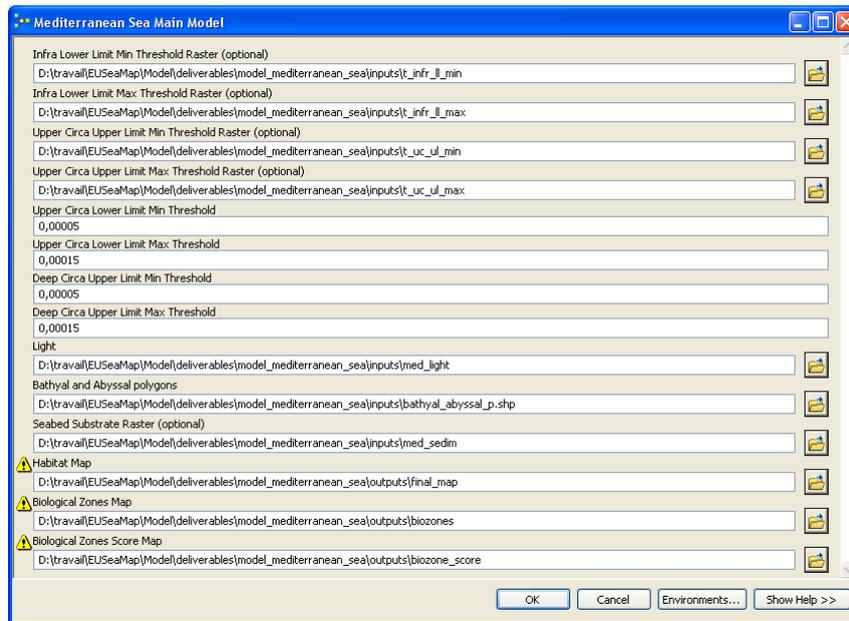
### 3.4. Tables de traduction des habitats

Comme mentionné dans le chapitre 2, les modèles produisent des cartes identifiées par des triplets. Pour rendre les cartes intelligibles, ces codes doivent être traduits en Eunis. Ceci est possible grâce à une table de traduction, qui donne, pour chaque triplet, le code Eunis associé. Cette table est au format Excel et se situe dans le répertoire "translation\_table".

### 3.5. Comment utiliser la boîte à outils

Pour installer la boîte à outils dans un document ArcMap (fichier mxd), effectuer un clic droit dans l'entrée "ArcToolbox" de la fenêtre ArcToolbox, et cliquer sur 'Ajouter une boîte à outils'. Choisir le fichier "FRSeamap.tbx" (situé dans le "répertoire "toolbox", comme indiqué dans la section précédente)

Pour lancer un modèle double-cliquer sur son nom. Une boîte de dialogue apparaît, permettant de paramétrer le modèle (figure 5). Les paramètres à renseigner sont les couches en entrée, les seuils, et les couches en sortie. Après avoir paramétré le modèle, cliquer sur OK. Le modèle est lancé.



**Figure 5-** Exemple de boîte de dialogue de paramétrage du modèle, ici le modèle correspondant à la Méditerranée

#### 4. Références bibliographiques

Coltman, N., Golding, N., Verling, E., 2008. Developing a broadscale predictive EUNIS habitat map for the MESH study area. pp. 1-16.

Robertson, M. P., Villet, M. H. and Palmer, A. R. (2004), A fuzzy classification technique for predicting species' distributions: applications using invasive alien plants and indigenous insects. *Diversity and Distributions*, 10: 461–474. doi: 10.1111/j.1366-9516.2004.00108.x



## Annexe 6 : Évaluation de la fiabilité de la carte modélisée

1. Introduction .....	91
2. Evaluation des couches individuelles de données.....	91
3. Evaluation des cartes fondée sur des données externes .....	100
4. Références.....	103

### 1. Introduction

Il y a essentiellement deux types de méthodes pour aborder l'évaluation de la carte du résultant du modèle, les méthodes internes reposant sur l'évaluation des données explicatives, et les méthodes externes reposant sur des données de contrôle.

Comme la carte résultante est une simple combinaison de couches de données source, une manière simple consiste à évaluer la fiabilité des données physiques à grande échelle sur lesquelles repose le modèle EUNIS, puis de calculer une somme pondérée des valeurs de fiabilité obtenues. Cette « évaluation interne » peut se faire à l'échelle locale ou régionale, selon la méthode employée. Les méthodes donnant une évaluation pour chaque pixel seraient très probablement considérées comme les meilleures, mais elles produiraient une carte ayant la même limite de résolution que la carte évaluée elle-même, et donc potentiellement difficile à interpréter pour les utilisateurs s'il y avait trop de variations locales. Des méthodes d'évaluation à l'échelle régionale par blocs de données (comme par exemple dans les cartes marines montrant l'origine des sondages) seraient plus faciles à utiliser, mais au prix d'une information moins précise.

Un second aspect de l'évaluation interne de la fiabilité concerne les seuils. Même si les couches de données étaient très fiables, il ne est pas moins que la pertinence d'un seuil donné (quantité de lumière ou énergie hydrodynamique au fond de la mer) peut être contestée car le seuil est au mieux fondé sur des données de terrain approximatives. Par conséquent, il est sage de tracer des limites floues autour d'une frontière nette entre deux classes. Cette génération de limites floues n'est pas abordée ici car sa son implémentation reste complexe et nécessite de très bien connaître l'ensemble des données sources.

L'autre manière possible (dite « évaluation externe ») est de nature statistique. À partir de vérifications effectuées localement au regard de données externes, elle donne ce que l'on appelle en télédétection une « matrice de confusion », qui constitue une mesure de la fiabilité d'ensemble de la carte. Selon la quantité de données de terrain disponibles, cette matrice pourrait être régionalisée, c'est-à-dire calculée pour chaque bassin (ou même sous-bassin). Ajoutée à l'évaluation interne, une telle évaluation externe pourrait fournir de l'information supplémentaire sur la qualité de la carte résultant du modèle.

### 2. Évaluation des couches individuelles de données

Cette évaluation est locale lorsqu'elle porte sur chaque pixel de chaque couche de la région qui fait l'objet du modèle, ou régionale lorsque des blocs régionaux de données sont évalués puis combinés.

#### 2.1. Évaluation par pixel des couches de données

Cette méthode est la plus complète et précise, mais aussi la plus complexe. Elle est décrite en détail dans l'étude intitulée *Assessing the confidence of broad-scale classification maps*

(ABPMer, 2009) a été menée pour le ministère de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales (Defra) du Royaume-Uni. L'incertitude sur chaque couche de données (zone biologique, substrat et énergie hydrodynamique) est évaluée à partir d'une combinaison de trois types d'incertitude : les erreurs de mesure, les erreurs de traitement et les variations naturelles. Une probabilité d'occurrence est calculée pour chaque paramètre et chaque pixel. La probabilité totale est le produit des probabilités calculées pour les divers paramètres.

Cette méthode d'évaluation aurait pu être explorée, mais on s'est heurté à deux difficultés :

- comme les couches de données ont été produites par un grand nombre d'équipes différentes (équipes associées au sein du projet EUSeaMap ainsi que sous-traitants), il aurait fallu procéder à un examen complet des méthodes employées et il aurait été très difficile d'obtenir des résultats fiables ;
- les coûts de l'évaluation auraient probablement été élevés, en raison de la nécessité de retenir les services d'experts pour chaque couche de données, de préférence ceux qui ont produit ces données. ABPMer a proposé de calculer l'incertitude pour le projet UKSeaMap au coût d'environ 40 000 £, et ce montant aurait fort bien pu être doublé pour la région beaucoup plus grande couverte par le projet EUSeaMap.

L'avantage de cette méthode est sa couverture spatiale exhaustive, qui donne une carte de fiabilité à la même échelle que la carte résultant du modèle, où chaque pixel fait l'objet d'une évaluation. Elle permettrait aussi à l'équipe de projet de donner un retour d'information aux fournisseurs des couches de données physiques, ce qui est une condition préalable à l'amélioration des données futures. Cependant, étant donné les difficultés mentionnées plus haut, une telle évaluation n'a pas été jugée faisable dans le cadre de EUSeaMap mais pourrait être recommandée pour une version future.

## **2.2. Évaluation globale par une somme pondérée des scores régionaux**

### **2.2.1. Évaluation de la couche de données sur les types de sédiments**

La couche de données sur les types de sédiments est en grande partie héritée du passé, résultant de la compilation de cartes anciennes réalisées avant l'« ère des échosondages » et dont les polygones étaient traités à partir du contenu de simples échantillons. De récents échosondages ont montré jusqu'à quel point ces cartes donnaient une vue grossière de la réalité du fond de la mer, d'où le besoin urgent d'en évaluer la qualité. Dans certains cas, des cartes de petite taille résultant de levés ont aussi été incorporées dans l'assemblage final. Cela signifie que l'évaluation de la couche de données sur les types de substrat peut s'inspirer de l'évaluation de la fiabilité des cartes d'habitats du projet MESH et être effectuée séparément pour chaque carte. Les cartes de substrats et les cartes d'habitats sont produites essentiellement de la même manière, de sorte que les méthodes mises en œuvre dans le projet MESH pour les cartes d'habitats peuvent être facilement adaptées aux cartes des types de sédiments.

Trois types de paramètres ont été pris en considération (Outil MESH d'évaluation de la fiabilité : <http://www.searchmesh.net/Default.aspx?page=1635>) :

- cinq paramètres qualifiant les levés par télédétection ;
- six paramètres qualifiant la collecte de données de terrain ;

- quatre autres paramètres relatifs à la qualité du processus de réalisation des cartes.

Dans le projet MESH, on a ainsi obtenu 15 scores individuels qui ont servi au calcul d'une somme pondérée finale. La plupart de ces paramètres demeurent pertinents dans le cas d'une carte des types de sédiments, à l'exception de ceux qui portent sur la collecte de données biologiques sur le terrain. On pourrait aussi examiner de plus près les quatre paramètres relatifs à l'interprétation, afin de s'assurer qu'ils ne comportent aucune redondance. Le score final est exprimé en pourcentage. De manière générale, les anciennes cartes à faible résolution évaluées à l'aide de cette méthode obtiennent des scores qui se situent entre 50 et 65 %.

### 2.2.2 Évaluation de la couche de données sur les zones biologiques

Cette couche de données est complexe puisque chaque zone biologique (ou étage) est définie par l'intersection de différentes variables.

- a) Les définitions des zones infralittorale et circalittorale côtière (cette dernière pour la Méditerranée uniquement) sont fondées sur la profondeur et sur une fraction de lumière résiduelle de 1 % et 0,01 % respectivement. Le coefficient d'atténuation de la lumière  $K_{dPAR}$  est calculé à l'aide d'un algorithme qui est le même pour toute l'Europe occidentale, ce qui ne permet pas de faire de distinction selon les lieux. L'exactitude avec laquelle ce coefficient  $K_{dPAR}$  est déterminé est nécessairement assez constante, sauf dans les eaux peu profondes où il y a une erreur due à la réflexion sur le fond — mais cela n'a aucune conséquence puisque ces eaux appartiennent par définition à la zone infralittorale. Par conséquent, on peut considérer pour simplifier que les mesures de la profondeur constituent le principal facteur qui affecte — du moins de manière relative — la fiabilité de la détermination des zones infralittorale et circalittorale côtière.
- b) Dans l'Atlantique, la définition de la zone circalittorale côtière est fondée sur le niveau de base des vagues, et donc assujettie aux perturbations du fond dues aux vagues et calculées à l'aide de statistiques issues de modèles des vagues. Comme dans le cas ci-dessus, nous n'avons aucun moyen simple d'évaluer l'exactitude de ces statistiques et nous sommes donc dans l'obligation de les considérer comme constantes sur toute la région étudiée. Le niveau de base des vagues a été calculé à l'aide des données bathymétriques à faible résolution de GEBCO (carte bathymétrique générale des océans), dont la fiabilité est elle aussi très difficile à établir. À moins de faire appel à des probabilités fondées sur le calcul de modèles, nous n'avons aucune idée claire de la fiabilité de ces couches de données.
- c) En Méditerranée, la limite inférieure de la zone circalittorale du large est définie par la « ligne de discontinuité du plateau continental », là où la pente s'accroît, à une profondeur de 120 à 180 m. De la même manière, la limite inférieure de la région bathyale est définie par la ligne de discontinuité située au pied de la pente continentale. Dans l'Atlantique, la limite inférieure de la zone circalittorale est définie plus simplement à 200 m de profondeur. Ces limites sont directement affectées par la qualité des données bathymétriques, de sorte qu'en première approximation, on pourrait se baser sur un indice de qualité de ces données pour évaluer la fiabilité des limites de ces zones.

En résumé, il découle des points a) à c) ci-dessus que la bathymétrie est la seule variable commune aux zones bathymétriques (ou étages) qui pourrait donner lieu à un critère de qualité.

### **2.2.3. Évaluation de la couche de données d'énergie**

Nous ne connaissons rien de la fiabilité des valeurs d'énergie calculées à partir de modèles hydrodynamiques des vagues et des courants, et encore moins de leur combinaison statistique au fond de la mer. Une manière très primaire d'évaluer la fiabilité de ces données serait de retenir simplement la résolution de ces modèles comme critère de qualité. Ainsi pour les côtes de France nous avons en réalité trois types de modèles des courants depuis le modèle plus au large, d'une limite de résolution de 2 km, aux modèles côtiers, dont la résolution est de 200 ou de 400 m. Pour les modèles de vagues, les résolutions sont plus grossières, atteignant 10 km en Méditerranée.

En conclusion, étant donné le rôle relativement modeste des données énergétiques dans la modélisation, l'évaluation de la fiabilité des couches de données énergétiques aurait assez peu d'influence sur l'évaluation d'ensemble. On peut également diminuer l'importance de ce facteur en considérant que la qualité des données énergétiques est reflétée par la qualité des données bathymétriques qui sont une variable clé entrant dans les calculs hydrodynamiques.

### **2.2.4. Évaluation des données bathymétriques**

L'incertitude attachée aux modèles maillés de bathymétrie est rarement connue et ceci se complique si comme dans le cas présent les modèles proviennent de diverses sources. Trois descripteurs de MNT modérément corrélés entre eux ont été retenus, et même s'ils ne rendent pas compte de toute la diversité des données bathymétriques et des modes de traitement des MNT, ils peuvent constituer une approche initiale de la mesure de la fiabilité d'une carte.

#### ***Résolution et densité des données***

Ces deux facteurs sont très différents. En théorie, la résolution devrait être le reflet de la densité des données. Mais il peut arriver que l'on obtienne une grande résolution avec des données de faible densité. La meilleure manière d'en tenir compte serait d'étudier la densité de données pour chaque cellule, mais cette tâche déborde le cadre de la présente évaluation et a été laissée à la section Hydrographie du projet EMODNET.

Pour faire une évaluation de la fiabilité de manière plus simple et réalisable, nous prenons pour acquis que les fournisseurs de MNT ont adapté la taille de leurs cellules à la densité moyenne de leurs nuages de points. Il est évidemment probable que cette hypothèse soit fautive là où la densité des données est moindre, mais nous acceptons ce fait et nous considérons que la résolution rend également compte de la densité des données. Par conséquent, nous considérons en première approximation que la résolution des différents MNT constitue le facteur prédominant.

Nous suggérons d'attribuer les scores suivants en fonction de la résolution :

- résolution kilométrique : score = 1
- limite de résolution de l'ordre de 500 m : score = 2
- résolution hectométrique : score = 3

#### ***Date des données***

En général, les MNT sont réalisés à partir d'une variété de sources de données, et même si la résolution retenue est censée être représentative de toutes ces données, il est important de prendre en considération la date des données (comme le montre l'exemple du cartouche

des cartes marines). Ce critère est plus important dans le cas des fonds meubles qui évoluent dans le temps, et probablement moins pertinent dans le cas des fonds durs. Il est courant de voir des sondages historiques réalisés il y a plus d'un siècle combinés à des données plus récentes pour donner un MNT. Au vu de ces pratiques, il semble raisonnable de répartir l'âge des données en trois catégories.

Nous suggérons d'attribuer les scores suivants en fonction de l'année des données :

- avant 1945 : score = 1
- de 1945 à 1980 : score = 2
- après 1980 : score = 3

### **Origine des données**

Ce qui est pertinent ici n'est pas tant l'origine primitive des données, mais plutôt l'origine des données qui ont effectivement servi à l'élaboration des MNT.

La source de données la plus répandue consiste en des levés individuels, et de nombreux MNT locaux ont fait appel à des minutes hydrographiques numériques certifiées. Ces levés ont été effectués il y a longtemps à l'aide d'une sonde, avant l'avènement de l'échosondeur monofaisceau. Il est très difficile d'évaluer en détail la qualité de ces données, car les données de sondages même très anciens effectués à proximité des côtes peuvent être très exactes. Il suffit de rappeler que ces données ont été utilisées par les levés hydrographiques pour la production de cartes marines et qu'elles sont de ce fait garanties. Les systèmes à balayage (p. ex. échosondeurs multifaisceaux) utilisés en hydrographie moderne sont reconnus pour produire les données de la plus grande qualité. Utilisés en conjonction avec des techniques modernes de positionnement, ils donnent des MNT très pertinents, même au large des côtes.

**Tableau 1** – Exemple de notation de deux cartes bathymétriques françaises

Identification du jeu de données	Description	Limite de résolution du MNT	Date des données	Origine des données	Score bathymétrique (SB) total
<b>Carte 1</b>	Minutes hydrographiques au 1/10 000 (Cap d'Agde)	3	2	2	<b>7</b>
<b>Carte 2</b>	Sondages multifaisceaux (ZEE française)	2	3	3	<b>8</b>

Lorsque des minutes hydrographiques ne sont pas disponibles, une solution de rechange consiste à utiliser des valeurs indiquées sur des cartes (points ou isolignes). Dans ce cas, les données bathymétriques sont faussées et de moindre qualité.

En résumé, nous suggérons d'attribuer les scores suivants en fonction de l'origine des données :

- cartes : score = 1
- levés (minutes hydrographiques) : score = 2
- échosondages multifaisceaux : score = 3

### **2.2.5. Autres considérations**

Pour mieux connaître la fiabilité des données, il faudrait examiner la manière dont certains des MNT ont été produits. Les données bathymétriques proviennent essentiellement de deux types de sondeurs. Dans le cas d'échosondeurs multifaisceaux couvrant la totalité d'un territoire, le MNT est partout très fiable et peut être considéré comme homogène. Dans le cas d'échosondeurs monofaisceaux, comme la densité des données varie considérablement dans les deux directions dans une même minute hydrographique, la qualité des données bathymétriques dépend de la qualité de l'interpolation (pour chaque pixel, l'erreur d'interpolation est facile à déterminer à l'aide d'algorithmes évolués tels que le krigeage). Lorsque cette erreur est fournie par le producteur de la carte, nous pouvons disposer d'une évaluation réelle de la fiabilité avec une grande résolution spatiale.

## **2.3. Application : Attribution de scores aux cartes du bassin méditerranéen**

### **2.3.1. Cartes des types de sédiments**

Comme le montre la section du rapport sur les couches de données sources, les cartes des types de sédiments proviennent de nombreuses sources. À titre d'exemple, les côtes françaises de la Méditerranée sont couvertes par quatre types de cartes : a) les cartes des types de sédiments du projet Lima pour la Corse, au 1/100 000 ; b) les cartes de la « série G » du SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine), au 1/50 000 ; c) les cartes du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) pour la région Provence-Alpes-Côte d'azur, au 1/50 000 ; d) la carte des types de sédiments du Golfe du Lion de l'Université de Perpignan (au 1/250 000). Toutes ces cartes font appel à des classifications différentes adoptées par leurs auteurs. L'application de la notation de Mesh à l'ensemble du bassin est illustrée en figure 1. On voit que tant les cartes BRGM que les cartes G sont de qualité moyenne quand on les passe au crible de cette méthode de notation. En Corse, les cartes LIMA obtiennent un meilleur score.

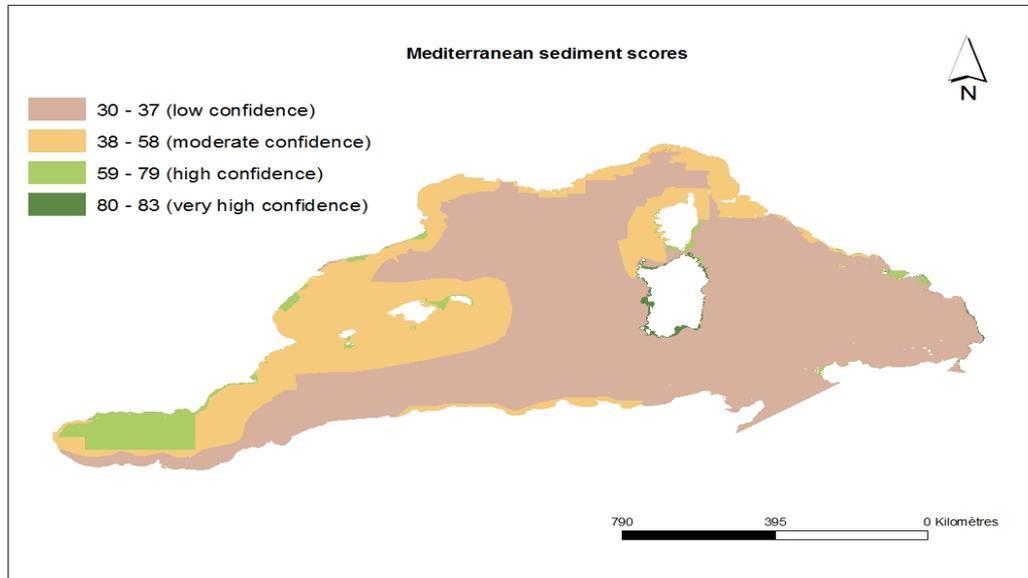
### **2.3.2. Cartes bathymétriques**

Les données bathymétriques du projet EUSeaMap pour la Méditerranée proviennent essentiellement de trois sources.

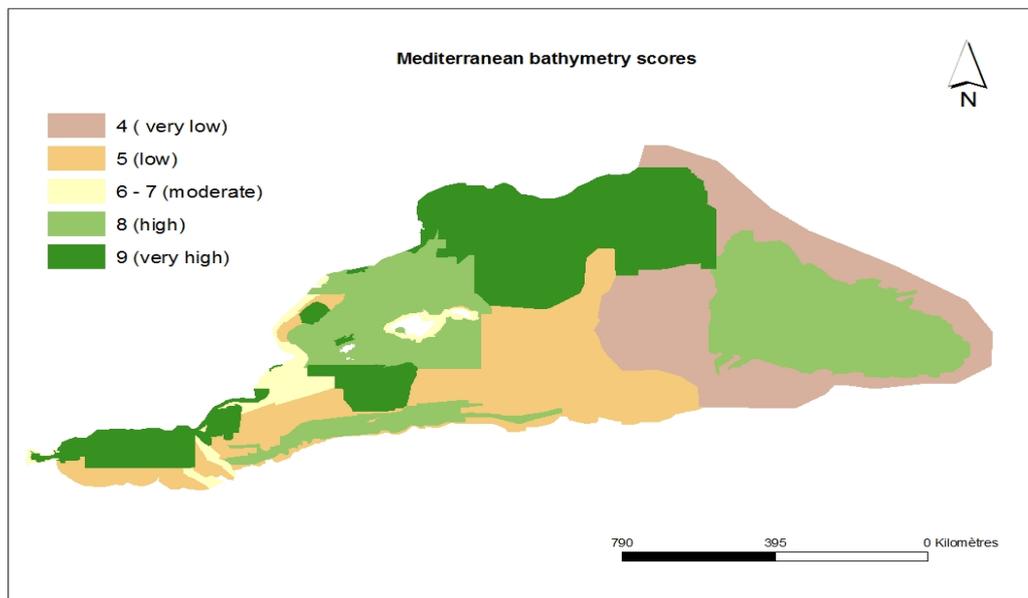
- a) Les pays participants ont leurs propres MNT bathymétriques construits à partir de données locales. Ces modèles sont généralement limités aux plates-formes continentales et ont une extension limitée lorsque le fond de la mer descend en forte pente près des côtes. Les données avaient en général une limite de résolution plus fine que la limite actuelle de 250 m du projet EUSeaMap, de sorte que les données de cellules de 250 m de côté peuvent résulter d'une moyenne de plusieurs pixels ou sondages.
- b) Plus au large, une compilation des données bathymétriques de la Méditerranée est disponible auprès de la CIESM (Commission internationale d'exploration scientifique de la Méditerranée), avec une limite de résolution actuelle de 500 m. Toutes ces données ont été obtenues à partir d'échosondages multifaisceaux récents, de sorte que leur qualité est homogène sur la totalité de la carte.

- c) Au centre du bassin et dans la mer Tyrrhénienne, la bathymétrie implicite est celle de GEBCO (limite de résolution de 1 km).

Les scores sont illustrés à la figure 2. Pour la France, la présence d'un MNT côtier complet à la résolution de 100M et de MNT réalisés au sondeur multifaisceaux au large permet d'obtenir la note maximale.



**Figure 1** - Scores de fiabilité des cartes de substrat pour la Méditerranée.



**Figure 2** - Scores de fiabilité de la bathymétrie pour la Méditerranée

### 2.3.3. Évaluation globale : somme pondérée

Les Dans ce qui suit, SB et SS représentent respectivement les scores de fiabilité attribués en ce qui concerne la bathymétrie et les substrats. Les valeurs possibles de SB vont de 0 à 9, alors que celle de SS vont théoriquement de 0 à 100 %. Cependant, même les cartes de

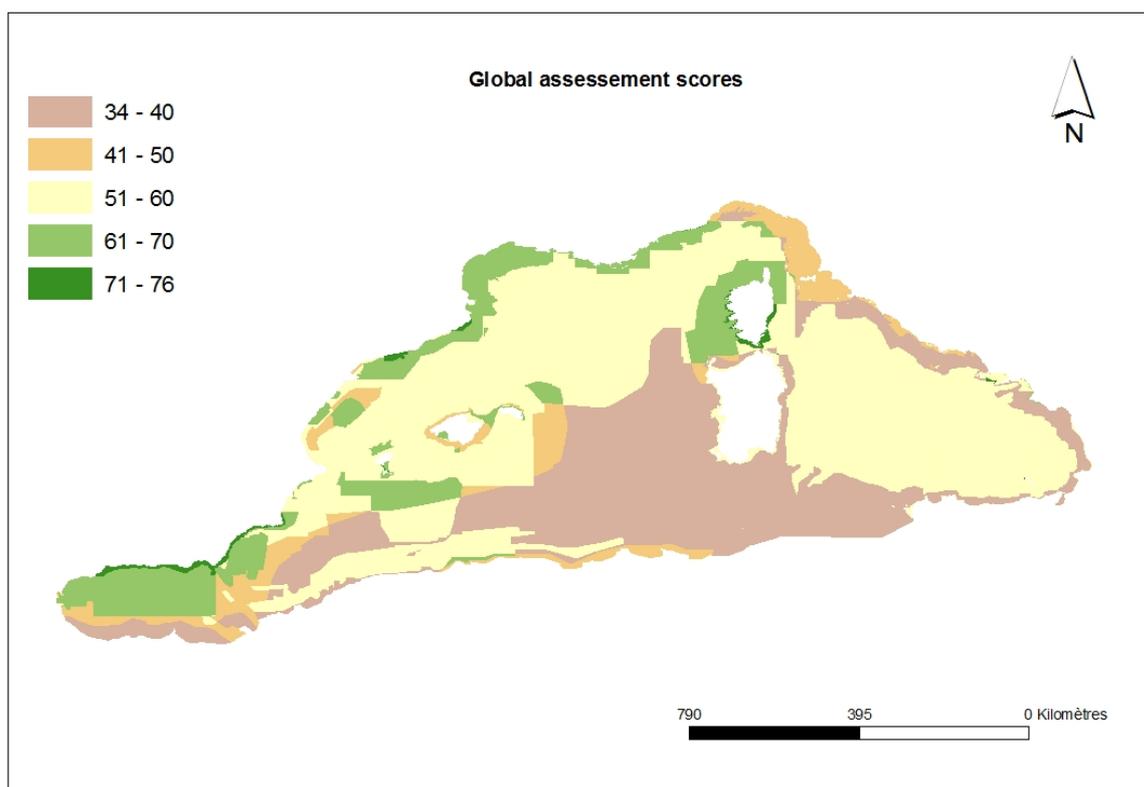
substrats de la plus grande qualité n'atteignent jamais 100 % (plus généralement 80 %), de sorte qu'il peut être nécessaire de normaliser ces deux valeurs.

Nous suggérons d'employer la formule suivante pour calculer le score final (SF) :

$$SF (\%) = 0,5 [(8,3 SB + 5,1) + 100 SS] / 100$$

On constate que la note maximale est atteinte en sud Corse, ceci résultant de la présence simultanée de données très détaillées en substrat comme en bathymétrie. La côte continentale obtient entre 60 et 70%, du fait d'une bathymétrie de haute qualité. La lacune au niveau de delta du Rhône est due à l'absence de carte sédimentaire récente.

Notons que l'échelle spatiale de ce type de carte de qualité pourrait être augmentée. Alors qu'on a estimé chaque carte G dans son ensemble, il serait possible, à l'aide des documents de métadonnées des cartes G (encart sur l'origine des levés), de découper chaque zone en sous-zones, chacune recueillant une note différente. De la même manière pour la bathymétrie, le MNT de résolution 100m est accompagné d'une carte d'erreur de krigeage qui pourrait donner une vue plus locale de la qualité de la bathymétrie. Avant de pousser plus avant ce type de réflexion, il est nécessaire cependant d'obtenir le retour des utilisateurs.



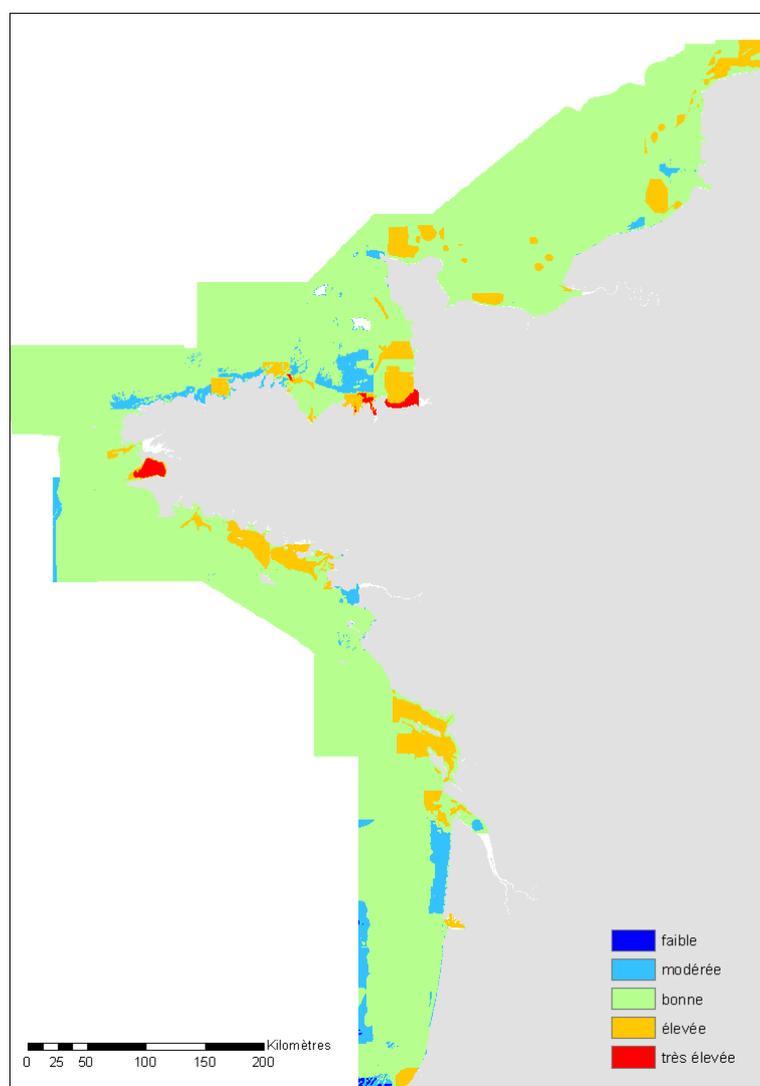
**Figure 3 :** Scores de fiabilité globale (substrat + bathymétrie) pour la Méditerranée, sous forme de polygones.

## 2.4. Application de scores en Manche-Atlantique

En Manche-Atlantique (figure 4), l'évaluation de la fiabilité a pu être poussée à un niveau spatial plus fin qu'en Atlantique. Au lieu d'attribuer des notes à des cartes sources où la note globale de la carte est identique pour tous les polygones la constituant, on a cherché, dans la mesure où les métadonnées le permettaient, à descendre à un niveau de détail plus fort.

En ce qui concerne la bathymétrie, tout du moins la large partie le MNT de résolution 100m était disponible, on a utilisé les fichiers maillés caractérisant d'une part l'âge des données, d'autre part la méthode utilisée pour produire le MNT. Ces caractéristiques étaient décrites pour chaque pixel du fichier (livrables du contrat d'interpolation).

Pour la nature du fond, on a utilisé les métadonnées accompagnant les cartes G pour renseigner à un niveau plus fin les sous-zones de ces cartes où de l'acoustique avait été utilisée. Il a fallu ensuite convertir ces cartes de fiabilité en pixels afin de pouvoir les associer à celle de la bathymétrie. La carte résultante est présentée ci-dessous. On peut y noter la forte discrimination spatiale qu'elle fournit.



**Figure 4 :** Scores de fiabilité globale (substrat + bathymétrie) pour la Méditerranée, sous forme de polygones.

### 3. Évaluation des cartes fondée sur des données externes

#### 3.1. La matrice de confusion

La seconde manière d'évaluer la carte du projet EUSeaMap est dite « évaluation externe » et consiste à construire une matrice de confusion (figure 5), c'est-à-dire une matrice dont une dimension correspond aux données résultant du modèle, et l'autre dimension à des données de terrain fournies par des cartes d'habitats locales et récentes.

	Nephthys	Ophiura	Kelp	Faunal turf	Ophithrix
Nephthys	78	8	0	0	0
Ophiura	5	54	0	0	0
Kelp	0	0	8	0	0
Faunal turf	0	2	0	16	2
Ophithrix	0	0	0	1	18
<b>% accuracy</b>				90.6	
<b>Kappa</b>				0.89	

Figure 5 – Exemple de matrice de confusion (MESH, 2008)

Dans le cas présent, nous devons nous assurer que l'évaluation a un sens, autrement dit que la comparaison porte sur des objets comparables. Malgré leur nature quelque peu différente décrite plus avant ci-dessous, les points d'observation sur le terrain et les polygones résultant du modèle sont tous deux classifiés selon la typologie EUNIS. Cependant, avant de procéder à une comparaison, il faut déterminer les raisons pour lesquelles des différences entre les classes des points d'observation sur le terrain et celles des polygones résultant du modèle sont probables.

#### 3.2. Principales caractéristiques des données de terrain benthiques

Les données de terrain constituent une description des habitats tels qu'ils se présentent dans les prélèvements ou aux points d'observation qui servent à interpréter les images acoustiques du fond de la mer. Ces données de terrain peuvent être de plusieurs types, dont des observations (photographies, bandes vidéo) ou des prélèvements (à la benne, au chalut). Sur des substrats rocheux, seules les observations sont possibles. Mais les substrats de ce type sont rarement étudiés, de sorte que peu de connaissances sont disponibles à leur sujet. Même là où des observations ont permis d'obtenir une description au niveau 4 de la typologie EUNIS (biocénoses présentes sur le substrat), elles ne nous sont pas forcément utiles car ce dont nous avons besoin est une description au niveau 3

avec des données sur l'énergie hydrodynamique au fond de la mer comme décrit par le modèle. Dans ce cas, la comparaison ne pourrait probablement pas aller au-delà du niveau 2.

Les prélèvements dans des substrats sédimentaires permettent d'analyser la granulométrie des sédiments et l'endofaune qui s'y trouve. À partir de ces données, les auteurs décrivent le fond de la mer selon des classes de la typologie EUNIS ou de leur propre typologie. Ces descriptions permettent d'atteindre le niveau 5 et peut-être même le niveau 6 de la typologie EUNIS. Par contre, il se peut que les biologistes ne disent pas de quel étage il s'agit parce qu'ils ne disposent avec leur prélèvement que d'une mesure de profondeur, à l'exclusion de toute autre donnée physique. Quant aux données biologiques, elles ne traduisent pas toujours l'étage d'une manière unique car certaines espèces d'endofaune occupent des étages contigus. Dans ces cas, on ne peut pas traduire les prélèvements en fonction de la typologie EUNIS, et ces données ne peuvent pas être utilisées.

### **3.3. Principales caractéristiques de la carte modélisée**

Si l'on examine de près la carte modélisée, on constate les choses suivantes :

- les types de substrat sont fournis par d'anciennes cartes des sédiments produites par l'interpolation de polygones à partir de données d'échantillons. Tout en étant bien définis selon la typologie EUNIS, ces polygones ont donc une fiabilité limitée en dehors des échantillons qui ont servi à les définir, d'où des différences potentiellement importantes entre la carte fondée sur le modèle et la carte résultant de levés.
- les zones biologiques (ou étages) sont définies à partir de couches de données physiques (pente, intensité lumineuse, énergie hydrodynamique au fond de la mer), qui sont liées aux caractéristiques biologiques si les seuils sont définis correctement, mais qui ne constituent pas une expression directe de la biocénose.
- les données sur l'énergie hydrodynamique au fond de la mer combinent des données statistiques sur les courants et les vagues dont la pertinence maximale est également assurée par des seuils fondés sur des connaissances biologiques.

La combinaison de ces trois paramètres permet d'obtenir une carte du fond de la mer au niveau 3, voire 4 sur substrat meuble, de la typologie EUNIS, mais les limites de classes restent pour le moins des limites « floues ».

### **3.4. Choix des données de terrain**

Il est préférable de choisir des données de terrain ponctuelles issues de levés récents. La traduction de ces données en codes EUNIS est impérative pour mener à bien la comparaison. Au Royaume-Uni par exemple, on dispose d'une grande quantité de données benthiques réparties sur un vaste territoire, ce qui rend pertinente la comparaison pour la mer Celte et la mer du Nord. En Méditerranée, il est beaucoup plus difficile de recueillir des données de terrain exprimées en classes Eunis, comme on l'explique ci-dessous.

Une autre manière de faire la comparaison lorsque des données de levés ne sont pas disponibles consiste à sélectionner les centroïdes de polygones de cartes de biocénoses récentes. Cela a toutefois pour effet de diminuer la qualité des données de référence (un

centroïde n'étant que le « représentant » le plus probable du polygone), et donc probablement la fiabilité de la comparaison.

### 3.5. Résultats préliminaires et discussion

Ce test n'a été effectué que pour la Méditerranée - dans le cadre du projet EUSeaMap - à l'aide de données italiennes et espagnoles. La comparaison a été effectuée en utilisant seulement 172 points de vérité terrain italiens (dont seulement 79 vrais point de benthos, le reste étant des centroïdes de polygones de cartes biocénotiques récentes). On y a ajouté 99 centroïdes de cartes provenant d'Espagne (Iles Baléares). Dans cette première tentative il n'a pas été incorporé de données françaises, car il n'a pas été possible d'en recueillir dans les temps impartis.

Les habitats pour lesquels aucune donnée n'était disponible sont les faciès sablo-vaseux à *Thenea muricata* et les sables profonds. Pour d'autres habitats le nombre de points utilisables pour la comparaison était trop réduit (<10 pour les sables grossiers infralittoraux, les roches circalittorales moyennement exposées, les fonds détritiques de rebord de plateau, les vases bathyales). On n'a donc retenu que 5 habitats, pour lesquels de 17 à 56 points de contrôle étaient disponibles.

**Tableau 1** - Matrice d'erreur des données de terrain italiennes (en haut en fréquence, en bas en pourcentages).

		Modelled habitat category in which point data fall (expressed as number of point data records)														
		Italy	A3	A5.13	A5.23	A5.33	A5.34	A5.535	A4.26	A5.46	A5.38	A5.39	A4.27	A5.47	A6.51	Total
Category of known habitat point data used for the validation	A3		4		10				1	2	5				2	24
	A5.13			2	2									5		9
	A5.23				39	1		2		5	1		1			49
	A5.33															0
	A5.34															0
	A5.535															0
	A4.26										1					1
	A5.46			3	5				1	15					2	26
	A5.38				3		1			7	5				1	17
	A5.39									2	13	21			6	42
	A4.27															0
	A5.47											6		3		9
	A6.51												1	3		4
		Modelled habitat category in which point data fall (expressed in percentage)														
		Italy	A3	A5.13	A5.23	A5.33	A5.34	A5.535	A4.26	A5.46	A5.38	A5.39	A4.27	A5.47	A6.51	
Category of known habitat point data used for the validation	A3		16,7		41,7				4,2	8,3	20,8				8,3	
	A5.13			22,2	22,2										55,6	
	A5.23				79,6	2,0		4,1		10,2	2,0		2,0			
	A5.33															
	A5.34															
	A5.535															
	A4.26											100,0				
	A5.46			11,5	19,2					3,8	57,7				7,7	
	A5.38				17,6		5,9				41,2	29,4			5,9	
	A5.39									4,8	31,0	50,0			14,3	
	A4.27															
	A5.47											66,7		33,3		
	A6.51													25,0	75,0	

On a ainsi bâti une classique matrice de confusion comportant sur un axe les données du modèle et sur l'autre les données de vérité de terrain. Les données italiennes et espagnoles apparaissent respectivement dans les tableaux 1 et 2. Ce test a donné un taux d'exactitude global de 61%, qui peut paraître faible mais reste significatif étant donné le fossé qui existe entre les données modélisées et les données de vérité terrain ponctuelles. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des zones accores de Méditerranée où les changements rapides d'habitats sur des distances courtes est mal prises en compte, même par un modèle à 100m de résolution. Il convient de noter que les classes bathyales et abyssales sont de

toutes façons très mal représentées - et que ceci n'a guère de chances de s'améliorer à court terme.

**Tableau 2** - Matrice d'erreur des données de terrain espagnoles (en haut en fréquence, en bas en pourcentages).

		Modelled habitat category in which point data fall (expressed as number of point data records)									
Category of known habitat point data used for the validation	Spain	A3	A5.23	A5.535	A5.531	A4.26	A5.46	A5.38	A4.27	A5.47	Total
	A3		1								1
	A5.23						1				1
	A5.535										0
	A5.531										0
	A4.26	2				33			2		37
	A5.46	1	5			4	45			1	56
	A5.38						3				3
	A4.27										0
	A5.47										0
		Modelled habitat category in which point data fall (expressed in percentage)									
Category of known habitat point data used for the validation	Spain	A3	A5.23	A5.535	A5.531	A4.26	A5.46	A5.38	A4.27	A5.47	
	A3		100,0								
	A5.23						100,0				
	A5.535										
	A5.531										
	A4.26	5,4				89,2			5,4		
	A5.46	1,8	8,9			7,1	80,4			1,8	
	A5.38						100,0				
	A4.27										
	A5.47										

La discussion sur les taux obtenus dans ces matrices est disponible dans le rapport EuSeaMap (EUSeaMap 2010). Cette évaluation devra être reprise dans une mise à jour du projet, lorsque davantage de données de terrain des trois pays participants auront été recueillies et qu'on pourra mettre en place un échantillonnage stratifié.

## 4. Références

ABPMer, 2009. « Assessing and developing the required biophysical datasets and data layers for Marine Protected Areas network planning and wider marine spatial planning purposes », rapport n° 1, tâche 1C, *Assessing the confidence of broad scale classification maps*, DEFRA et JNCC, Royaume-Uni, 2009.

Outil MESH d'évaluation de la fiabilité : <http://www.searchmesh.net/Default.aspx?page=1635>  
*Guidelines for metadata, data and DTM QA/QC*, 2010. Contrat de service « MARE /2008/03. Lot 1 Hydrography – SI2.531515 »



## Annexe 7 : Rendu cartographique

1. Démarche symbologique .....	104
2. Symbologie de la carte méditerranéenne .....	105
3. Symbologie de la carte Manche-Atlantique .....	109

### 1. Démarche symbologique

La conception d'une symbologie de couleurs pour les cartes d'habitats est une étape importante car le message porté par la carte en dépend largement. La communauté de la cartographie d'habitats n'est pas encore suffisamment structurée – à la différence des géologues marins – pour que des principes bien clairs de rendu aient été établis. Par ailleurs la multiplicité des typologies, variant d'un auteur et d'un bassin maritime à l'autre, n'ont pas favorisé l'élaboration de règles homogènes. Avec l'adoption récente par beaucoup d'équipes de la typologie Eunis, un début d'harmonisation de la présentation des cartes est possible. Autant des cartes locales pourraient conserver leur signature symbologique, autant des cartes harmonisées entre les états méritent-elles d'avoir un aspect commun.

**Tableau 1** - Habitats modélisés en Méditerranée (se reporter à l'annexe 1 pour la dénomination des habitats).

	Infralittoral	Circalittoral Upper	Circalittoral Deep	Deep Sea Bathyal	Deep Sea Abyssal
Rock (or other Hard substrata)	A3	A4.26	A4.27	A6.1	A6.1
Coarse sediments	A5.13				
Detritic		A5.46	A5.47	A6.2	A6.2
Muddy detritic			A5.38		
Sand	A5.23			A6.3	
Muddy sand				A6.4	A6.4
Sandy mud	A5.33			A6.511	
Mud	A5.34	A5.39		A6.51	A6.52
Posidonia	A5.535				
Cymodocea	A5.531				

La difficulté de l'exercice vient du nombre d'habitats que la carte modélisée contient, à savoir 24 habitats en Atlantique et 22 en Méditerranée (tableau 1 pour la Méditerranée). Ce nombre est déjà difficile à représenter par des couleurs bien différenciées que l'œil puisse distinguer au premier coup d'œil, tout en conservant une carte agréable et esthétique. En

outre, la symbologie retenue doit pouvoir s'adapter à la cartographie sur internet, afin que version numérique et version papier aient la même allure.

Les principes généraux retenus pour l'élaboration de la typologie sont les suivants :

- à-plats de couleur simples, à l'exclusion des hachures ;
- double symbologie pour la grande échelle (1/300000) et la petite échelle (1/1M), avec lien logique entre les deux ;
- bonne séparabilité des couleurs tant sur la version papier qu'à l'écran (webGIS).

Plusieurs tests ont été effectués en prenant en compte les éléments suivants :

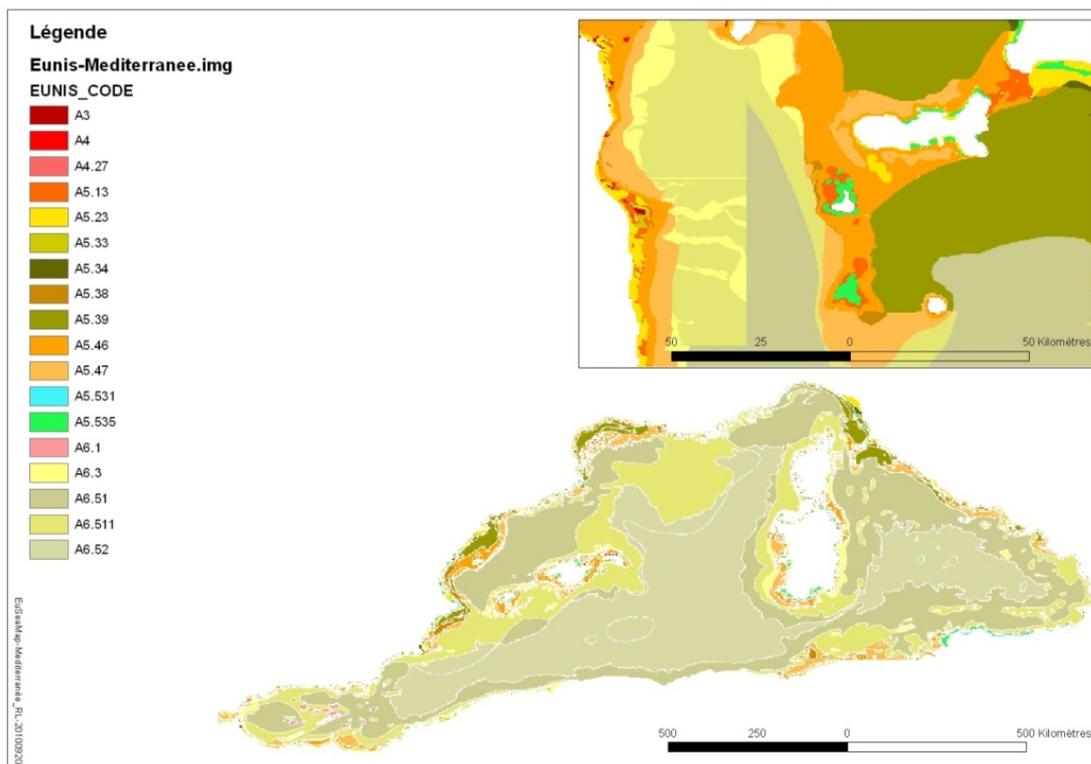
- autant que possible, respect de règles courantes en cartographie des sédiments marins :
  - sédiment sableux : tons allant du jaune à l'orange ;
  - sédiment vaseux : tons bruns/verts
  - roche : couleurs qui tranchent sur les autres (rouge, noir, gris foncé) ;
- rehaussement des habitats de petite taille (pour l'essentiel, à la côte) par l'adoption de couleurs vives ;
- au contraire, désaturation des couleurs de ces mêmes habitats au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la côte vers les grandes profondeurs. En règle générale, ce faisant les polygones d'habitats augmentent de taille et l'attribution de tons pastels est souhaitable pour des raisons d'esthétique. Par exemple en Méditerranée on trouve les vastes habitats bathyaux et abyssaux A6.51 and A6.52.
- vérification de la stabilité des couleurs entre l'écran et le papier, chaque imprimante ayant sa fonction de transfert, le modèle utilisé ici étant la HP Designjet 5500ps 42 A0 .
- désir de produire de belles cartes.

Les deux bassins – Méditerranée et Manche-Atlantique – ont fait l'objet de traitements différents et il n'a pas été possible de les harmoniser. En effet, l'Atlantique suit rigoureusement Eunis par construction, descendant jusqu'au niveau 3 sur la roche et 4 sur fonds meubles et on obtient 22 habitats très hiérarchisés.

En Méditerranée, les quelque 25 habitats concernés à l'échelle la plus détaillée (seulement 21 à l'échelle la plus globale) s'étendent du niveau 2 au niveau 5 de manière plus aléatoire (ceci résultant d'un tri initial dicté par les biologistes). Si donc on avait voulu appliquer les couleurs retenues pour la Méditerranée à l'Atlantique, on aurait buté sur l'impossibilité de respecter les principes ci-dessus.

## **2. Symbologie de la carte méditerranéenne**

En Méditerranée un premier test a été entrepris en assignant des tons jaunes aux fonds sableux et verts-bruns aux vases, allant de couleurs fortes au voisinage de la côte vers des tons plus légers au centre. Les herbiers étaient soulignés par des couleurs bleu/vertes vives. Ceci a produit une carte aux tons relativement chauds sur le zoom en encart de la figure 1, mais trop triste pour le bassin dans son ensemble, du fait des vastes habitats de Méditerranée centrale.



**Figure 1** - Carte d'habitats résultant du premier test de symbologie.

Une manière de contourner ce problème a été le recours à des tons de vert pour représenter la vase dans la succession des zones biologiques, depuis un vert foncé pour les vases infralittorales (A5.34) jusqu'à un vert pale pour les vases abyssales (A6.52). De manière similaire les sédiments grossiers vont de l'orange profond à la côte jusqu'à un orange pale pour les sédiments de la zone circalittorale du large (Tableau 2) et les sables et sables vaseux occupent les variations de jaune. Les tons rouges ont été réservés traditionnellement aux fonds rocheux, depuis des rouges vifs en infralittoral jusqu'au saumon en zone profonde. Les habitats à composante biogène (A4.26 et A6.61) se distinguent des autres habitats de substrat dur par un apport de bleu (magenta).

Les herbiers ont un statut à part d'habitat prioritaire et pour cette raison, on souhaite qu'ils soient bien visibles, même sur les petites taches qu'ils occupent sur la carte à l'échelle du 1/1M. On leur a donc assigné deux tons de turquoise, en réservant le plus voyant aux herbiers de posidonies, de loin les plus fréquents.

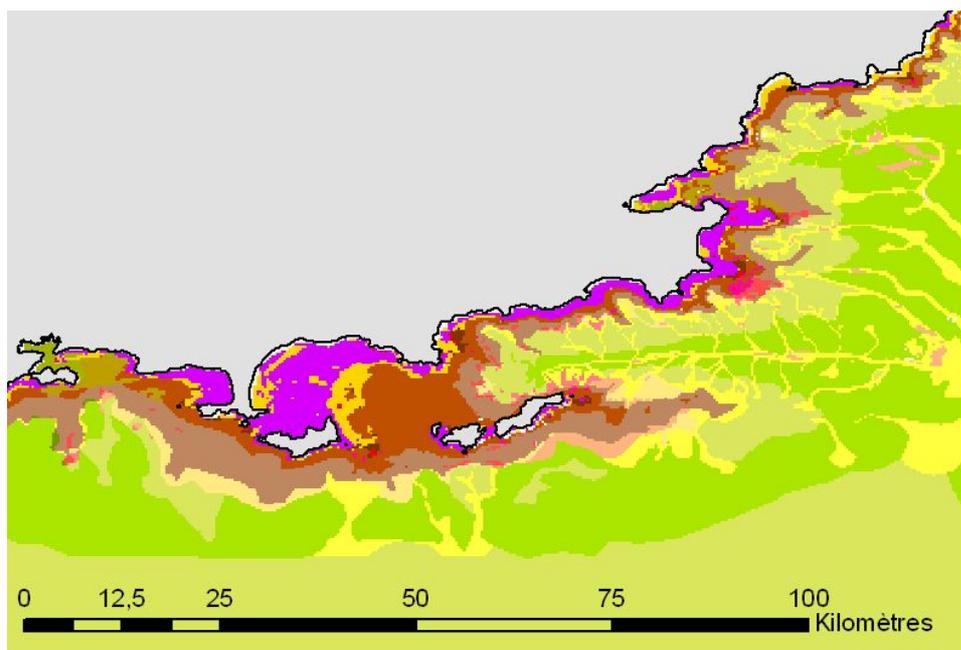
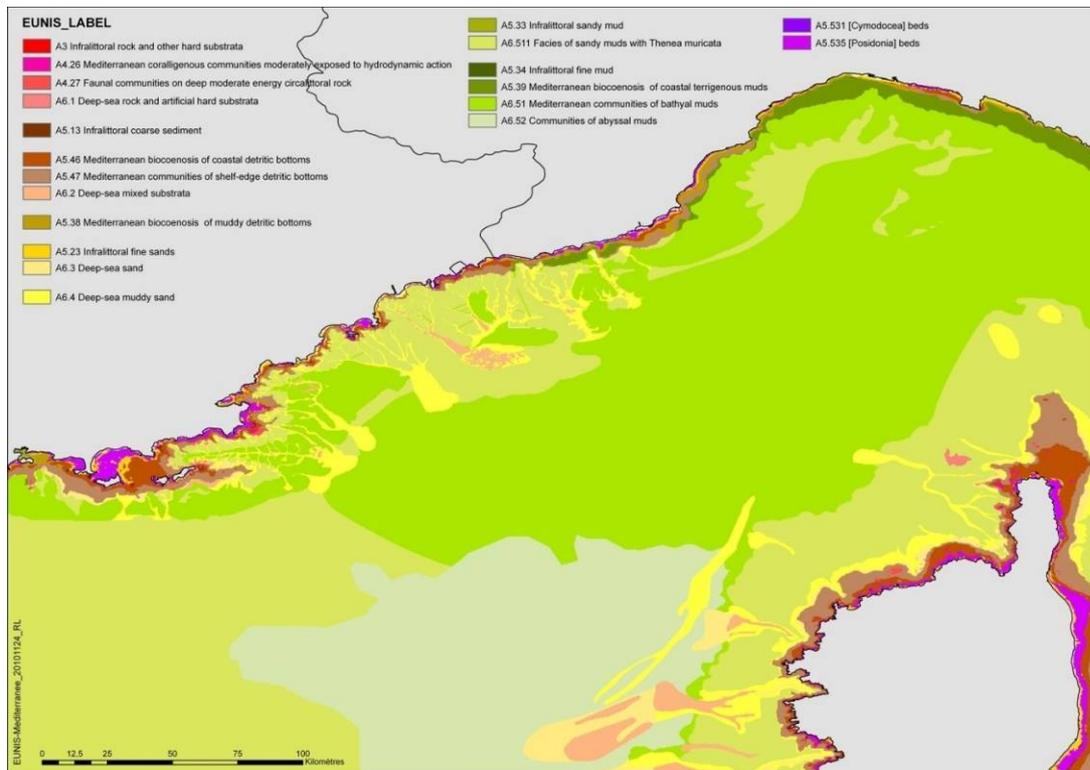
A la suite de ces modifications la gamme de couleurs a été stabilisée ainsi qu'elle apparaît dans le tableau 2. Elle a été élargie de manière non-conventionnelle, avec les couleurs fortes réservées pour les zones infralittorales et des couleurs progressivement désaturées vers le large. Les couleurs les plus chaudes qualifient les substrats durs et grossiers tandis que les plus froides sont appliquées aux sédiments les plus fins.

Un réglage final a été appliqué après impression de la carte sur le traceur A0 en utilisant le système TSL (teinte, saturation, lumière) pour ajuster au mieux le contraste aux couleurs telles qu'elles sortent sur papier.

**Tableau 2** - Palette de couleurs finale pour la Méditerranée. Les couleurs sont codées en TSL (teinte,saturation, lumière en %) et RVB pour chaque habitat.

Codes couleurs ArcGis TSL (%) et RVB	Infralittoral	Circalittoral Upper circalittoral	Circalittoral Deep circalittoral	Deep Sea Bathyal	Deep Sea Abyssal
Substrats durs	A3 360,100,100 255,0,0	A4.26 320,100,100 255,0,170	A4.27 360,60,100 255,100,100	A6.1 360,40,100 255,150,150	
Sédiments grossiers	A5.13 25,100,50 30,55,0				
Détritique		A5.46 35,100,90 230,135,0	A5.47 35,70,100 255,180,75	A6.2 35,50,100 255,200,130	
Détritique envasé			A5.38 50,100,75 190,160,0		
Sable	A5.23 45,100,100 255,190,0			A6.3 45,40,100 255,230,155	
Sablo-vaseux				A6.4 60,60,100 255,255,100	
Vase sableuse	A5.33 70,100,70 150,180,0			A6.511 70,70,90 200,230,70	
Vase	A5.34 85,100,40 60,100,0	A5.39 85,100,60 90,150,0		A6.51 85,100,75 110,190,0	A6.52 85,25,90 205,230,170
Posidonia	A5.535 160,60,100 100,255,205				
Cymodocea	A5.531 160,100,70 0,180,120				

Les cartes finales sont représentées en figure 2 ci-dessous. A l'échelle du 1:1M, l'effet poivre et sel induits par la présence de petits groupes de pixels reste limité. Il est inhérent à une carte thématique non généralisée. Sur l'internet, ces petites taches d'habitats gardent leur signification car grâce au zoom, on peut les amplifier, même si ce faisant on sort des limites régulières de l'échelle initiale de la carte.



**Figure 2** - La carte finale, en bas à l'échelle approximative du 1/1M, en haut vue globale de l'est de la côte Méditerranéenne française.

### 3. Symbologie de la carte Manche-Atlantique

Pour la façade Manche-Atlantique, la liste des habitats est la suivante (tableau 3) :

**Tableau 3** - Habitats modélisés en Manche-Atlantique.

Habitats	Intertidal	Infralittoral	Circalittoral côtier	Circalittoral du large
<b>Substrats durs</b>	<b>A1</b>	<b>A3.1</b>	<b>A4.1</b>	
		<b>A3.2</b>	<b>A4.2</b>	
		<b>A3.3</b>	<b>A4.3</b>	
<b>Substrat meuble</b>	<b>A2, A2.3</b>			
	<b>A2.3</b>			
<b>Coarse sediments</b>		<b>A5.13</b>	<b>A5.14</b>	<b>A5.15</b>
<b>Hétérogène envasé</b>		<b>A5.43</b>	<b>A5.44</b>	<b>A5.45</b>
<b>Sand</b>		<b>A5.23</b>	<b>A5.25</b>	<b>A5.27</b>
<b>Muddy Sand</b>		<b>A5.24</b>	<b>A5.26</b>	
<b>Sandy mud</b>		<b>A5.33</b>	<b>A5.35</b>	
<b>Mud</b>		<b>A5.34</b>	<b>A5.36</b>	<b>A5.37</b>

Le nombre total d'habitats se trouve être proche, mais leur répartition est différente entre Manche-Atlantique et Méditerranée. Il n'y a pas sur la première d'habitats bathyaux ni abyssaux. Seuls deux habitats sont identiques entre les deux bassins (A5.13 et A5.24). Des légendes séparées s'imposent donc, bien qu'on puisse garder la même logique dans le choix des couleurs. La prise en compte de l'exposition aux houles (haute, moyenne et basse énergie) des substrats durs (rouge) est rendue par un apport de bleu permettant un dégradé de magenta (A3.1, A3.2, A3.3, A4.1, A4.2, A.3), très visibles dans le golfe de Gascogne où existent de nombreux plateaux rocheux circalittoraux. La zone intertidale, étage très spécifique, est traitée à part en gris plus/moins forts pour rendre les substrats durs (A1) et substrats meubles (A2., A.3). Enfin, à la différence de la Méditerranée, les herbiers ne sont pas représentés, en revanche deux classes décrivent la zone intertidale (affectés de deux tons de gris).

Du fait de la grande hétérogénéité des fonds en Bretagne sud, bien décrite à l'échelle du 1/300000 par les cartes G disponibles partout, la cartographie qui en résulte est très détaillée et très colorée, notamment dans les baies de Concarneau et de Quiberon ainsi que dans les Pertuis Charentais.

**Tableau 4** - Palette de couleurs finale pour la Méditerranée. Les couleurs sont codées en TSL (teinte,saturation, lumière en %) et RVB pour chaque habitat.

Habitats AMMdN	Intertidal	Infralittoral	Circalittoral Upper circalittoral	Circalittoral Deep circalittoral
Substrats durs	<b>A1</b> 0,0,40 100,100,100	<b>A3.1</b> 280,100,90 150,0,230	<b>A4.1</b> 280,60,100 205,100,255	
		<b>A3.2</b> 300,100,80 205,0,205	<b>A4.2</b> 300,60,100 255,100,255	
		<b>A3.3</b> 340,100,90 230,0,75	<b>A4.3</b> 340,60,100 255,100,155	
Substrat meuble	<b>A2, A2.3</b> 0,0,70 180,180,180			
Coarse sediments		<b>A5.13</b> 25,100,50 130,55,0	<b>A5.14</b> 25,100,75 190,80,0	<b>A5.15</b> 25,50,75, 190,135,95
Hétérogène envasé		<b>A5.43</b> 50,100,60 155,130,0	<b>A5.44</b> 50,100,90 230,190,0	<b>A5.45</b> 50,40,90 230,215,140
Sand		<b>A5.23</b> 45,100,85 215,165,0	<b>A5.25</b> 45,75,100 255,205,65	<b>A5.27</b> 45,30,100 255,235,180
Muddy Sand		<b>A5.24</b> 60,100,75 190,190,0	<b>A5.26</b> 60,75,90 230,230,60	
Sandy mud		<b>A5.33</b> 70,100,70 150,180,0	<b>A5.35</b> 70,60,90 210,230,90	
Mud		<b>A5.34</b> 85,100,40 60,100,0	<b>A5.36</b> 85,100,60 90,150,0	<b>A5.37</b> 85,100,90 135,230,0