

Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes

<sup>1</sup> Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes

<sup>2</sup> Département des Ressources Biologiques et Environnement

<sup>1</sup>Isabelle Gailhard-Rocher, <sup>2</sup>Martin Huret, <sup>1</sup>Pascal Lazure, <sup>1</sup>Frédéric Vandermeirsch, <sup>1</sup>Julie Gatti, <sup>1</sup>Pierre Garreau, <sup>1</sup>Francis Gohin

Mars 2012 - R.INT.ODE/DYNECO/D 12-04



**Ifremer**

## **Identification de « paysages hydrologiques » dans les eaux marines sous juridiction française (France métropolitaine)**

**Identification de « paysages  
hydrologiques » dans les eaux  
marines sous juridiction française  
(France métropolitaine)**

## Fiche documentaire

<b>Numéro d'identification du rapport :</b> <b>Diffusion :</b> libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		<b>date de publication :</b> <b>nombre de pages :</b> 48 <b>bibliographie :</b> <b>illustration(s) :</b> <b>langue du rapport :</b> Français	
<b>Validé par :</b> P. Le Hir, P. Petitgas, P. Camus Adresse électronique :			
<b>Titre de l'article : Identification de « paysages hydrologiques » dans les eaux marines sous juridiction française (France métropolitaine)</b>			
Contrat n°		Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
<b>Auteur(s) principal(aux) :</b> Isabelle Gailhard-Rocher, Martin Huret, Pascal Lazure, Frédéric Vandermeirsch, Julie Gatti, Pierre Garreau, Francis Gohin		<b>Organisme / Direction / Service, laboratoire</b> IFREMER/ODE IFREMER/RBE	
<b>Encadrement(s) : M. Huret</b>			
Cadre de la recherche : Réponse à la demande description des habitats principaux de la colonne d'eau pour dans le cadre de Évaluation Initiale de la DCSMM			
<b>Résumé</b> Dans le contexte de l'évaluation initiale des eaux communautaires demandée par la Directive cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM), les états membres sont chargés de décrire les types d'habitats dominants de la colonne d'eau pour chaque sous-région marine. La présente étude s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif de décrire les principales structures hydrologiques de la colonne d'eau. Sur la base des données existantes et des travaux antérieurs, il s'agit de classer les masses d'eau en fonction de critères physiques (température, salinité, turbidité, stratification), reconnus d'intérêt pour les espèces pélagiques et l'écosystème en général, et ainsi de définir une cartographie de l'habitat pélagique moyen. Les données utilisées correspondent aux climatologies <i>in-situ</i> ou satellitales disponibles sur les différentes sous-régions. Une méthodologie de classification statistique permet d'obtenir des zones géographiques homogènes au plan des indices hydrologiques sélectionnés, à l'échelle du mois, ou de l'année en considérant dans le second cas des évolutions saisonnières similaires par type d'habitat. Cette typologie constitue un niveau de structuration des biocénoses supérieur vis-à-vis des variables physiques brutes.			
<b>Mots-clés</b> <b>DCSMM, Habitat pélagique, Classification, Indices hydrologiques, Distribution des espèces</b> <b>Keywords</b> MSFD, Pelagic Habitat, Clustering, Hydrological indices, Species distribution			
<b>Rédacteurs</b>		<b>Vérificateur</b>	
<b>Nom : I. Gailhard, M. Huret</b> <b>Date : 27/02/2012</b> <b>Visa</b> 		<b>Nom : P. Le Hir</b> <b>Date : 28/02/2012</b> <b>Visa</b> 	
<b>Nom : P. Camus</b> <b>Date : 28/02/2012</b> <b>Visa</b> 		<b>Nom : P. Petitgas</b> <b>Date : 15/01/2012</b> <b>Visa</b> 	

# Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>2. De la définition de « paysages hydrologiques » vers la notion d'habitats pélagiques : choix d'une approche.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Méthodologie d'identification des habitats pélagiques.....</b>	<b>8</b>
3.1 Les indices hydrologiques d'intérêt pour les communautés pélagiques.....	8
3.2 Données disponibles.....	10
3.3 Analyse statistique.....	11
<b>4. Paysages hydrologiques identifiés sur les façades de France métropolitaine..</b>	<b>12</b>
4.1 Distribution des paysages hydrologiques sur la façade Manche-Atlantique.....	12
4.1.1 Cartographie des indices hydrologiques.....	13
4.1.2 Evolution annuelle des paysages hydrologiques.....	19
4.1.3 Paysages hydrologiques présentant une variabilité annuelle similaire....	25
4.2 Distribution des paysages hydrologiques dans le bassin méditerranéen....	30
4.2.1 Cartographie des indices hydrologiques sélectionnés.....	30
4.2.2 Choix des indices hydrologiques.....	36
4.2.3 Paysages hydrologiques présentant une variabilité annuelle similaire....	38
<b>5. Discussion.....</b>	<b>43</b>
<b>6. Références.....</b>	<b>46</b>

## 1. Introduction

Dans le contexte de l'évaluation initiale des eaux communautaires demandée par la Directive cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM), les états membres ont été chargés de décrire l'état de l'environnement des eaux marines sous leur juridiction. Ce premier exercice doit servir de base à la définition ultérieure du bon état écologique, ces deux éléments devant permettre, *in fine*, l'élaboration d'un Plan d'action pour le milieu marin (PAMM), visant à préserver ou à atteindre le « bon état écologique » dès 2020.

L'échelle géographique adoptée par la DCSMM est la sous-région marine, la France en compte quatre : la Manche-Mer du Nord, le golfe de Gascogne, les mers Celtiques et la Méditerranée occidentale.

L'évaluation initiale a notamment pour objectif de recenser les données disponibles permettant de décrire l'état de l'environnement marin dans chaque sous région marine, et s'appuyer sur les travaux de référence existants.

Parmi les caractéristiques et spécificités de l'état écologique servant de base à l'évaluation initiale, il est demandé aux états membres de décrire les types d'habitats dominants de la colonne d'eau pour chaque sous région, sans mention spécifique à une biocénose précise. Il est cependant précisé que la description des habitats devra comprendre des informations sur le phytoplancton et le zooplancton, y compris les espèces, et la variabilité saisonnière et géographique.

L'étude présentée ici s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif de décrire les principales structures hydrologiques de la colonne d'eau dans les quatre sous-régions marines françaises concernées par la DCSMM. Sur la base des données existantes et des travaux antérieurs, il s'agit de classer les masses d'eau en fonction de critères physiques, reconnus d'intérêt pour les espèces pélagiques et l'écosystème en général, et ainsi de définir une cartographie de l'habitat pélagique moyen.

## 2. De la définition de « paysages hydrologiques » vers la notion d'habitats pélagiques : choix d'une approche

Selon le conseil international pour l'exploitation de la mer (CIEM), le terme habitat se réfère à un environnement particulier, qui se distingue par ses caractéristiques abiotiques et par les assemblages biologiques associés, formant des aires géographiques distinctes, à des échelles variables dans le temps et dans l'espace. La notion d'habitat inclue ainsi conjointement les caractéristiques abiotiques du milieu (parfois qualifiées « d'habitat physique » ou de « paysages hydrologiques ») et la communauté biologique associée [1].

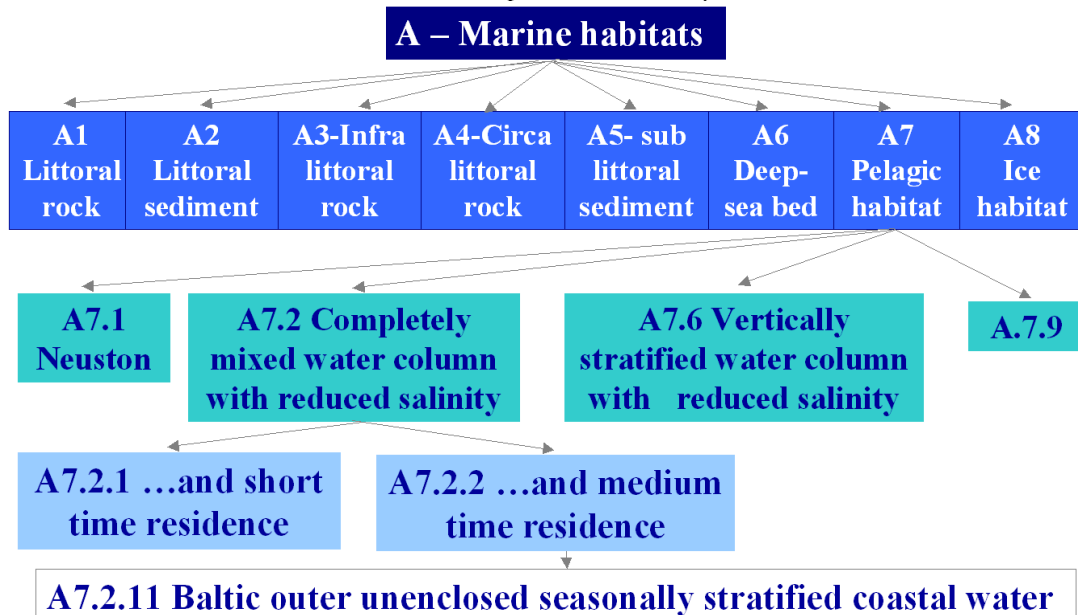
L'identification et la classification des différents types d'habitats marins représentent des éléments indispensables à la compréhension globale du fonctionnement des écosystèmes, des liens qui unissent les biocénoses à leur environnement, ou de ceux qui agissent au sein même de ces communautés. La connaissance des habitats constitue ainsi un préalable indispensable à la gestion des ressources marines ou à la description et au maintien de la biodiversité [2]. Cependant, l'identification des habitats nécessite un grand nombre de données, biologiques et physiques, à de larges échelles spatiales et

temporelles. En outre, il existe une grande variété d'habitats marins, dynamiques dans le temps et dans l'espace, ceci particulièrement pour le domaine pélagique, et présents à différentes échelles, rendant leur classification complexe.

Les études ayant trait à la classification des habitats marins portent essentiellement sur les habitats benthiques [3-5]. De nombreuses études se sont également intéressées à la cartographie des habitats d'espèces vulnérables ou d'intérêt, notamment dans un cadre réglementaire (liste OSPAR des habitats menacés, liste des habitats élémentaires de la Directive Habitat-Faune-Flore). Les études génériques sur les habitats pélagiques sont plus rares, notamment en raison de la grande variabilité spatio-temporelle des conditions hydrologiques de la colonne d'eau, de la diversité des populations pélagiques (phytoplanctoniques, zooplanctoniques, ichtyologiques) et surtout, de la dynamique de ces populations qui peuvent changer d'habitat au cours de l'année ou du stade de leur cycle de vie pour les espèces ichtyologiques (larves, juvéniles, adultes, période d'alimentation, de reproduction, etc...) [6-8].

Les deux typologies de référence, permettant de recenser l'ensemble des habitats marins (pélagiques et benthiques), sont la classification CMECS (Coastal and Marine Ecological Classification Standard) aux Etats Unis et la classification paneuropéenne Eunis (European Nature Information) [9,10].

Dans cette dernière typologie, les habitats marins sont divisés en huit niveaux, concernant essentiellement les fonds marins, avec un niveau pour la colonne d'eau. La classification des habitats du fond peut comporter jusqu'à 5 sous-niveaux, discriminés selon des critères abiotiques jusqu'au niveau 3, puis par des critères biologiques à partir du niveau 4. La discrimination des habitats pélagiques comporte, quant à elle, 3 sous-niveaux uniquement basés sur des critères physiques et hydrodynamiques (salinité, stratification de la colonne d'eau, fronts horizontaux ou verticaux, temps de résidence).



Cette classification, bien qu'elle constitue un standard européen et offre l'avantage, de par sa structure hiérarchique, d'être exhaustive, demeure d'utilisation complexe. Les critères utilisés pour la classification des habitats de la colonne d'eau sont en effet qualitatifs (et

donc subjectifs). En outre, la classification Eunis peut se révéler inadaptée à certaines zones géographiques (elle a initialement été développée pour les eaux de Grande Bretagne, sur la base des travaux du JNCC [4]).

D'autres approches, moins génériques s'intéressent au lien entre communautés ou espèces pélagiques et habitats, et tentent de prédire au mieux la distribution spatio-temporelle des populations, en particulier à l'aide de la modélisation statistique, statique ou dynamique [11-13]. Elles se focalisent sur des espèces cibles, le plus souvent ichtyologiques, et sur des stades précis de leur cycle de vie (période de ponte, ...). Ces travaux déclinent la notion d'habitat, avec trois états possibles : les habitats potentiels (où la présence peut être observée), les habitats réalisés (où la présence est effectivement observée), et les habitats essentiels (habitats essentiels à la survie de l'espèce). Il ressort en outre que pour l'habitat réalisé, l'environnement seul est insuffisant à déterminer la distribution des espèces ichtyologiques, et que d'autres facteurs tels que l'attachement géographique, la densité des individus, la structure démographique, ou encore la mémoire des populations, doivent également être considérés.

De tels travaux, élargis à l'ensemble des habitats pélagiques, nécessitent de disposer d'une description des distributions de la totalité des espèces pélagiques clefs, à des échelles temporelles et spatiales fines, ainsi qu'à plusieurs périodes de leurs cycles de vie en ce qui concerne les poissons. Or, si des études spécifiques sur les distributions des communautés pélagiques, phytoplanctoniques, zooplanctoniques, ou encore ichtyologiques, sont disponibles, elles ne concernent que des zones limitées (essentiellement côtières) pour le phytoplancton et le zooplancton, et des périodes de l'année ponctuelles [8].

Enfin, d'autres études ont pour objectif d'analyser l'influence des facteurs environnementaux (et notamment du changement climatique) sur les variations d'abondance et de distribution d'une population précise, le plus souvent ichtyologique, ou de plusieurs espèces [14,15]. Mais, comme pour les travaux précédents, les emprises temporelles et spatiales fines, ainsi que leur approche spécifique ne permettent pas à ces études d'appréhender la notion d'habitat pélagique dans son ensemble.

Notre étude tente de conserver une approche générique, et se limite donc à la classification des « habitats physiques » ou « paysages hydrologiques ». Par conséquent, nous sommes amenés à définir des frontières entre ces habitats. Néanmoins celles-ci gardent un caractère relatif et dépendront en particulier de l'échelle spatio-temporelle sur laquelle la classification est réalisée. En outre, ces frontières pourront varier en fonction des facteurs environnementaux déterminants pour une espèce d'intérêt donnée, introduits dans l'analyse.

La démarche adoptée ici rejoint les approches « top-down » utilisées en classification des habitats marins, qui visent, tout d'abord, à identifier des structures physiques homogènes, puis dans un deuxième temps, à collecter ou à rassembler des données biologiques, afin de décrire les assemblages associés à ces structures<sup>1</sup>.

Cette démarche de synthèse des données relatives aux communautés biologiques a été entreprise en parallèle dans d'autres contributions à l'élaboration de l'évaluation initiale de la DCSMM. L'utilisation d'un jeu de données représentatif de l'existant semble donc prématurée pour une classification des habitats selon des critères à la fois physiques et biologiques, mais pourrait être entreprise dans une seconde phase lors de l'élaboration du bon état écologique. Notre démarche est par ailleurs cohérente avec les critères uniquement physiques permettant de discriminer les habitats pélagiques de la classification Eunis.

### 3. Méthodologie d'identification des paysages hydrologiques

#### 3.1. Les indices hydrologiques d'intérêt pour les communautés pélagiques

Outre la température, qui joue un rôle direct sur la production primaire et sur l'ensemble du réseau trophique, d'autres caractéristiques telles que la stratification de la colonne d'eau, ou la salinité, qui reflète l'influence des panaches, ont un impact fort sur la distribution des communautés marines.

Les structures hydrodynamiques à méso-échelle telles que les tourbillons, les zones de front et les upwellings peuvent également expliquer certaines distributions.

Les indices hydrodynamiques, développés dans des études antérieures, sélectionnés ici sont les suivants [18 - 19] :

- **Indices de stratification de la colonne d'eau :**

- Déficit d'énergie potentielle (PHI,  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$ ) : énergie nécessaire pour homogénéiser (en température, en salinité ou en densité) la colonne d'eau,

---

1 L'approche « top-down », classiquement utilisée en cartographie des habitats benthiques, est basée sur la discrimination de « groupes », uniquement sur la base de critères physiques. Cette approche considère *a priori* que la distribution spatiale des communautés est influencée par ces critères physiques et utilise des données biologiques pour donner un « sens écologique » aux groupes physiques préalablement identifiés. La classification des habitats marins peut également être appréhendée au travers d'une autre approche, qualifiée de « bottom-up », qui vise à identifier les liens au sein des communautés (assemblages d'espèces) et/ou les liens entre ces assemblages ou populations et les facteurs environnementaux, afin de déterminer quels facteurs abiotiques jouent un rôle prépondérant sur la répartition spatiale des assemblages ou populations. Cette approche nécessite de disposer de données, le plus souvent disponibles à une petite échelle spatiale, les liens établis pouvant ensuite être extrapoler à une grande échelle afin d'obtenir une cartographie exhaustive. Ces deux approches peuvent être utilement mises en œuvre conjointement, lorsque les données sont disponibles, afin de progresser dans l'identification fine des différents type d'habitats marins [16, 17].



$PHI = \frac{1}{H_0 + \xi} \int_{-H_0}^{\xi} (\bar{\rho} - \rho_z) g z dz$  ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$ ), avec  $\bar{\rho} = \frac{1}{H_0 + \xi} \int_{-H_0}^{\xi} \rho_z dz$ , la masse volumique moyenne sur

la colonne d'eau,  $\rho_z$  la masse volumique à la profondeur  $z$ ,  $H_0$  la bathymétrie,  $\xi$  la hauteur de la surface libre et  $g$ , la gravité (9,81).

La masse volumique peut être calculée à partir de la température et de la salinité :

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha(T - T_0) + \beta(S - S_0)),$$

ou seulement de la température, dans le cas où l'on s'intéresse à la stratification thermique :

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha(T - T_0)).$$

Les valeurs de référence  $\rho_0$ ,  $T_0$  et  $S_0$  sont fixées à :  $\rho_0 = 1027.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $T_0 = 10.0^\circ\text{C}$  et  $S_0 = 35.5$ .

- Gradient maximum vertical en température :

$$\text{GradTmax } (^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}) = \max(\text{GradT}_k) \text{ avec } \text{GradT}_k = \frac{T_{k+1} - T_k}{dz_k}.$$

- Profondeur de la couche de mélange (thermocline) :  $Z_m = Z_l \frac{T_m - T_l}{T_0 - T_l}$  (en mètres), avec  $T_0$  :

température de surface,  $T_l$  : température de fond,  $T_m$  : température moyenne sur toute la colonne d'eau, et  $Z_l$  : profondeur de la colonne d'eau.

Cet indice représente la profondeur telle qu'un système (idéal) à 2 couches de températures respectives (celles de surface et de fond) auraient la même température moyenne que l'intégration des observations sur tout le profil.

- **Indice de « panaches fluviaux »** : Salinité de surface (SS)
- **Température de fond** (Bottom Temperature BT,  $^\circ\text{C}$ )

Les indices hydrologiques sont calculés selon les formules proposées [18,19]. Pour la température de fond, une profondeur seuil de 200 mètres a été fixée (Si  $H_0 > 200\text{m}$  alors  $BT = T_{200}$ ). Pour les autres indices (déficit d'énergie potentielle, gradient vertical maximum et profondeur de la couche de mélange), une profondeur maximale (100 mètres) a été fixée pour les calculs intégrés ou la recherche de gradient maximum.

La bathymétrie elle-même n'a pas été prise en compte car elle n'est pas jugée directement structurante pour les communautés pélagiques, mise à part au travers de la disponibilité du volume d'habitat (plus restreint dans les faibles profondeurs). Son intégration dans la classification aurait eu un impact trop important masquant les autres propriétés plus intéressantes des masses d'eau. Elle est cependant prise en compte indirectement au travers du calcul intégré sur la verticale de certains indices.

- **Autres indices** :

- La turbidité, en atténuant la disponibilité en lumière pour la production primaire ou la visibilité, peut également jouer un rôle sur la distribution spatiale des populations pélagiques et a été prise en compte dans l'analyse, au même titre que les indices physiques.

- En outre, en référence aux espèces ichtyologiques, il peut être judicieux d'élargir la notion de biotope en prenant en compte le plancton, constituant l'alimentation de certaines populations ichtyologiques, et donc structurant leur distribution. C'est pourquoi le



paramètre *Chlorophylle-a* a été intégré dans cette étude, en l'absence de données suffisamment synoptiques pour le zooplancton.

### 3.2. Données disponibles

Afin de décrire les propriétés physiques influant sur la répartition spatiale des populations, des mesures *in situ* de salinité et de température sur toute la colonne d'eau sont utilisées.

- Sur la façade atlantique, la climatologie BOBYCLIM rassemble l'ensemble des mesures *in situ* collectées lors des campagnes océanographiques depuis plus d'un siècle (1862-2006). Des estimations par interpolation horizontale (analyse objective) permettent de reconstituer des champs complets de température et de salinité pour chaque profondeur (de 0 à -4000 mètres), à une résolution horizontale de  $1/10^\circ$ . Un pourcentage de confiance, dépendant du nombre de mesures utilisées pour l'interpolation, est calculé afin de décrire la qualité des estimations <sup>2</sup>.
- Sur le même principe, en Méditerranée, la climatologie MEDATLAS, plus ancienne (1998-2001), regroupe les mesures *in situ* collectées lors des campagnes océanographiques. Après un contrôle qualité des données brutes (identification des valeurs aberrantes, détection d'anomalies sur les profils verticaux...), une méthode de krigeage est utilisée afin d'interpoler les données à des niveaux standards (25 niveaux de 0 m à 4000 m à intervalles irréguliers), puis des procédures de maillage neuronal et de recherche de voisinage permettent d'estimer des données robustes sur une grille régulière d'une résolution de  $0.2^\circ$  sur l'ensemble de la Méditerranée. Cette résolution est affinée pour certaines sous-régions plus restreintes et bénéficiant d'une densité de données supérieure, telles que la zone étendue du Golfe du Lion ( $2.5^\circ\text{N}$  à  $12^\circ\text{N}$ ,  $42^\circ\text{W}$  à  $44.5^\circ\text{W}$ , résolution de  $0.05^\circ$ ), utilisée dans cette étude.
- Enfin, pour l'ensemble des façades de France métropolitaine, les données « couleur de l'eau », issues du traitement d'images satellitales, permettent d'obtenir des estimations des moyennes mensuelles (de 2003 à 2010) des températures de surface ainsi que des concentrations en matières en suspension inorganiques et en chlorophylle *a* dans la couche de surface, à une résolution spatiale fine [20].

La donnée de type climatologie mensuelle utilisée dans notre étude ne permet pas de capturer la variabilité associée aux structures hydrodynamiques à méso-échelle (tourbillons, zones de front et upwellings), structures caractérisant notamment l'hydrodynamique de la Méditerranée.

### 3.3. Analyse statistique

Les données décrites ci-dessus permettent de disposer de tables mensuelles présentant les paramètres sélectionnés, calculés sur les deux zones géographiques (Manche-Atlantique à une résolution de  $0.1^\circ$ , et Golfe du Lion à une résolution de  $0.05^\circ$ ). Pour des raisons de pertinence écologique et de *continuum* entre les structures hydrologiques, l'analyse n'est pas conduite indépendamment pour chaque sous-région marine de la DCSMM mais à l'échelle de la façade Manche-Atlantique d'une part, et du Golfe du Lion d'autre part.

---

<sup>2</sup> <http://www.ifremer.fr/climatologiegascogne/index.php>. BOBYCLIM V2.2 (01/06/2011). Extension BOBYCLIM données Sismar/Coriolis, résolution  $0.1^\circ$ , données moyennées à une résolution de  $0.035^\circ$ , résolution verticale de 2,5km.

La méthodologie se base sur une étude similaire ayant pour objectif d'identifier des «paysages hydrologiques» homogènes sur la base de facteurs hydrodynamiques, dans le golfe de Gascogne en domaine côtier [19, 21]. Dans ces travaux, les indices hydrologiques ont été calculés à partir de simulations de température et de salinité issues d'un modèle hydrodynamique 3D [22]. Ces indices ont été sélectionnés pour leur intérêt hydrologique et biologique : salinité de surface, température de fond, profondeur de la couche de mélange et déficit d'énergie potentielle. Cette étude s'est principalement intéressée à la période du printemps (mois de mars à juin), saison pendant laquelle la variabilité hydrologique est importante, en lien avec des espèces d'intérêt halieutique.

Une Analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur la table présentant les 3764 nœuds de chaque maille du modèle (résolution 0.4°) en individus, et les 4 indices calculés tous les deux jours pour les 4 mois en variables. Une classification (méthode d'agrégation autour des centres mobiles, *k-means*) est ensuite mise en œuvre sur les *p* premiers axes de l'ACP, expliquant 90 % de l'inertie totale. Ce type de classification consiste à définir une typologie à partir d'un nombre pré-établi de classes. Un algorithme permet d'identifier des groupes homogènes pour des partitions dont le nombre de classes varie de 2 à 10. Le choix de la meilleure partition est basé sur le rapport entre les distances intracluster et la distance inter-clusters (indice de Davies-Bouldin). Pour la période concernée (mars à avril), 8 groupes de sites présentant des caractéristiques hydrologiques similaires ont été identifiés (haut d'estuaire, bas d'estuaire, zone côtière, panaches, côtier proche, plateau central, plateau large et plateau nord ouest) [19, 21].

Sur la base de cette étude, deux analyses ont été envisagées ici :

- dans un premier temps, une Analyse en composantes principales (ACP) est réalisée sur la table rassemblant les mois en lignes. Les individus sont ici les pixels/mois, et les variables, les indices hydrologiques sélectionnés. Les indices hydrologiques sont ici considérés comme des variables communes à l'ensemble des mois. Des classifications *K-means* sont ensuite réalisées sur les axes de l'ACP (expliquant 90 % de l'inertie initiale) afin de regrouper les pixels/mois présentant des conditions hydrologiques similaires. Le choix de la meilleure partition est basé sur les valeurs du rapport variance inter-groupes/variance totale et sur l'index de Davies-Bouldin's (DB). Cette analyse permet d'identifier des groupes communs à l'ensemble des mois et de décrire l'évolution de ces groupes au cours de l'année.
- Dans un deuxième temps, une méthode de comparaison multi-tableaux (Analyse factorielle multiple - AFM) est mise en œuvre. Les variables de chaque mois sont ici considérées comme indépendantes mais sont structurées en groupes (les mois) et sont étudiées simultanément. Cette méthode consiste en une analyse globale de l'ensemble des variables, chaque variable d'un groupe/mois étant préalablement pondérée par l'inverse de la valeur propre de l'ACP partielle du groupe/mois. La valeur propre de l'analyse séparée résume le pouvoir discriminant du groupe/mois vis-à-vis des individus/pixels, la pondération permet ainsi d'équilibrer l'influence des différents groupes /mois dans l'analyse globale. La classification réalisée sur les coordonnées de ces individus « compromis » permet d'identifier des groupes d'individus présentant une variabilité des conditions hydrologiques similaire au cours de l'année.

L'ensemble des indices hydrologiques (cf.chapitre 3.1) sont initialement introduits dans les analyses pour les deux zones géographiques : température de fond (BT), salinité de surface (SS), déficit d'énergie potentielle induit par la température (PhiT), gradient vertical



maximum de température (GradTmax), profondeur de la thermocline (Zm), concentration en matières en suspension (MES) et en chlorophylle-*a* (Chla) dans la couche de surface.

Cette dernière variable ne s'inscrivant pas dans la démarche d'identification d'habitats uniquement sur la base de critères physiques, elle est tout d'abord introduite en variable supplémentaire. Elle n'intervient pas dans la discrimination des groupes, mais apporte une information complémentaire pour leur interprétation écologique.

Les deux zones géographiques (Manche-Atlantique et Golfe du Lion) présentant des caractéristiques biologiques et physiques différentes, le choix des variables introduites fera l'objet d'analyses approfondies, séparées pour les deux zones. Les variables retenues pourront ainsi différer selon la zone d'analyse.

L'ensemble des analyses statistiques et des représentations graphiques ont été réalisées avec le logiciel R.

## 4. Paysages hydrologiques identifiés sur les façades de France métropolitaine

### 4.1. Distribution des paysages hydrologiques sur la façade Manche-Atlantique

Le pourcentage de confiance associé aux estimations de température et de salinité dans la climatologie BOBYCLIM permet de juger de la qualité de ces estimations. Les valeurs numériques et les cartes de ces pourcentages calculés pour les paramètres « Température » et « Salinité » pour chaque mois et à chaque profondeur sont disponibles sur le site internet dédié<sup>3</sup>.

En raison du nombre moins élevé de mesures *in situ* collectées au cours de la saison hivernale et donc de la moindre confiance associée aux estimations, les mois de décembre, janvier et février n'ont pas été pris en compte dans l'analyse. En outre, l'hydrodynamique de la zone pour cette période se caractérise par une grande homogénéité des propriétés de la colonne d'eau.

Par ailleurs, le nombre de mesures de salinité étant plus faible et les estimations pour ce paramètre de moins bonne qualité, le calcul de la densité à partir de la température et de la salinité n'est pas toujours cohérent. Par conséquent le calcul des trois indices hydrologiques (déficit d'énergie potentielle, gradient vertical maximal et profondeur de la couche de mélange) n'est basé que sur la température. Cette limite ne permet pas de décrire les processus hydrologiques uniquement liés à la stratification haline, concernant notamment les zones très côtières en périodes hivernales ou automnales.

Enfin, l'examen de ces pourcentages de confiance<sup>4</sup> montre une très faible densité de données en mer d'Irlande et donc, une faible « confiance » associée aux estimations dans cette zone, qui par conséquent, a été masquée pour l'analyse .

<sup>3</sup> <http://www.ifremer.fr/climatologie-gascogne/index.php>

<sup>4</sup> Pourcentages disponibles sur <http://www.ifremer.fr/climatologie-gascogne/index.php>

#### 4.1.1. Cartographie des indices hydrologiques

Les cartes ci-dessous présentent la distribution spatio-temporelle des indices hydrologiques sélectionnés pour l'ensemble de la zone d'analyse.

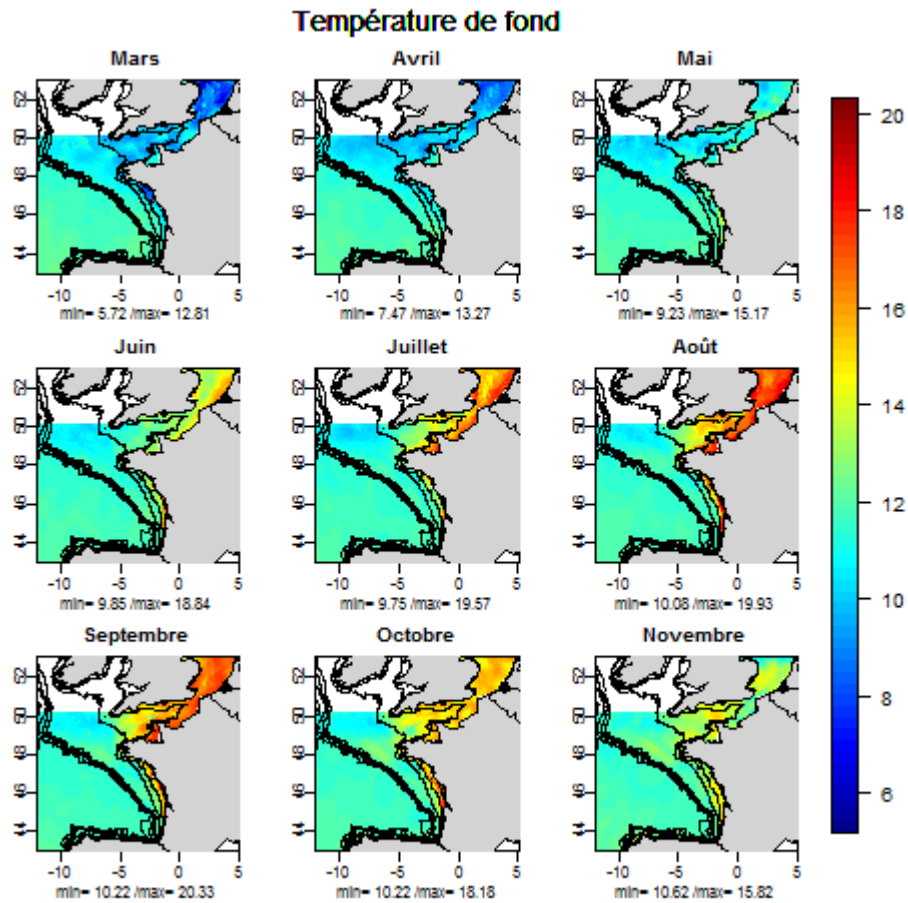


Figure 1. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : température de fond (°C)

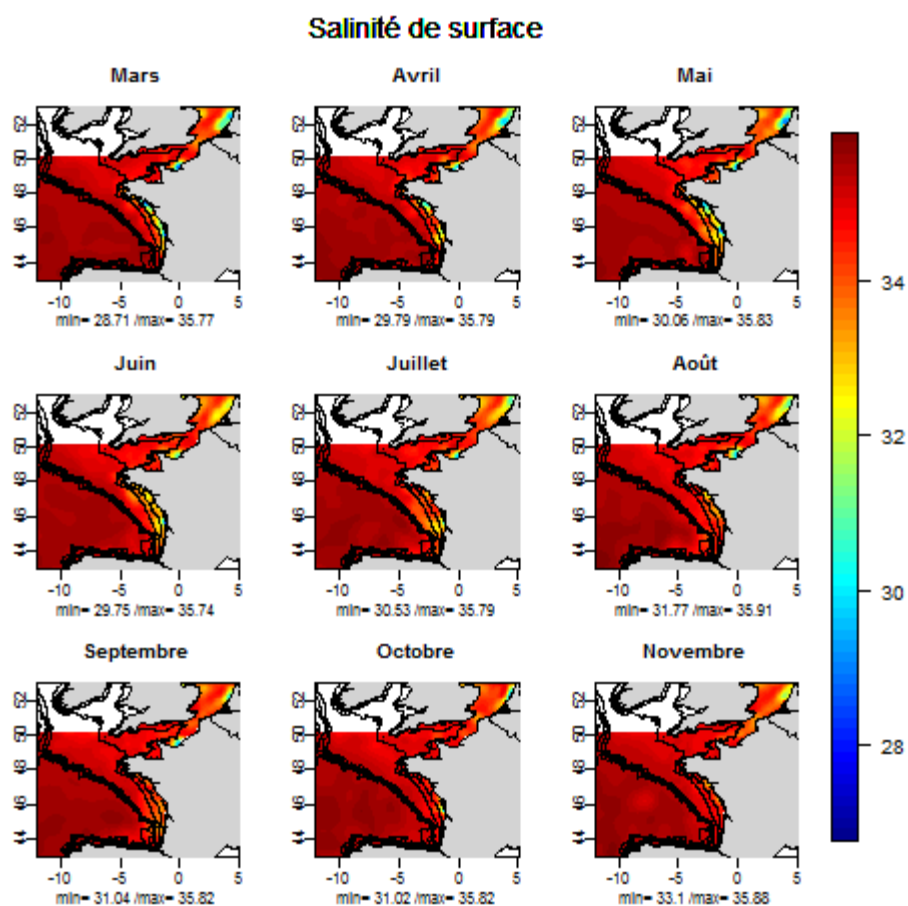


Figure 2. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : salinité de surface

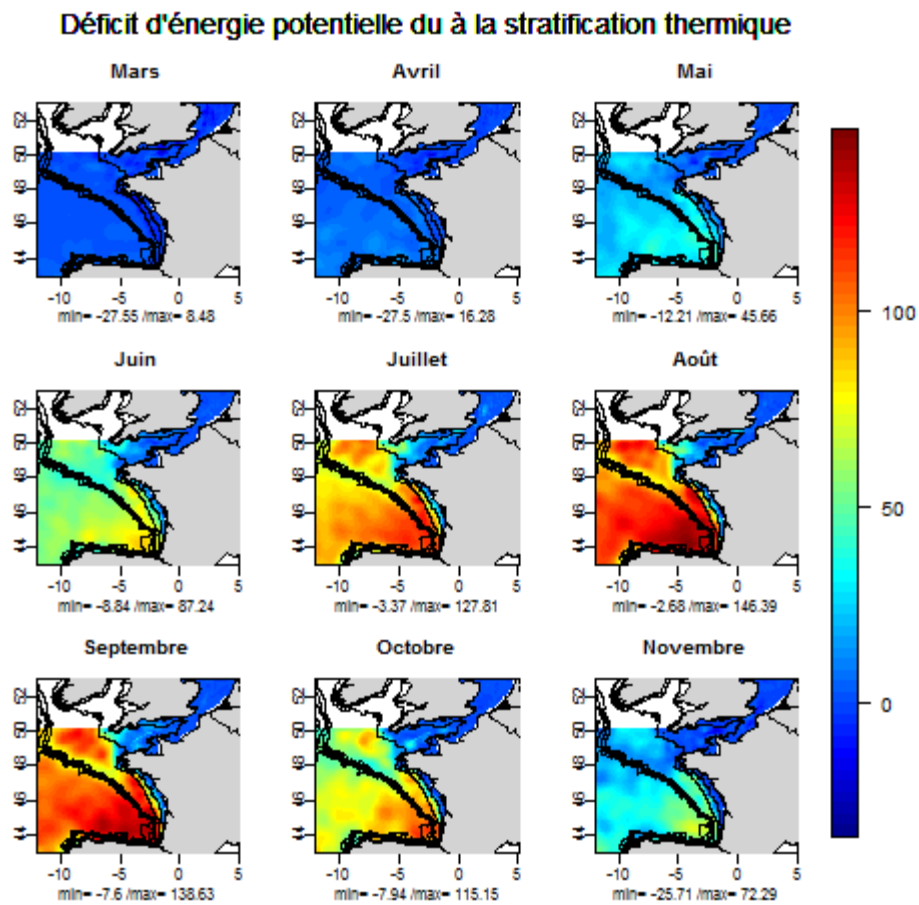


Figure 3. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : déficit d'énergie potentielle du à la stratification thermique ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ )

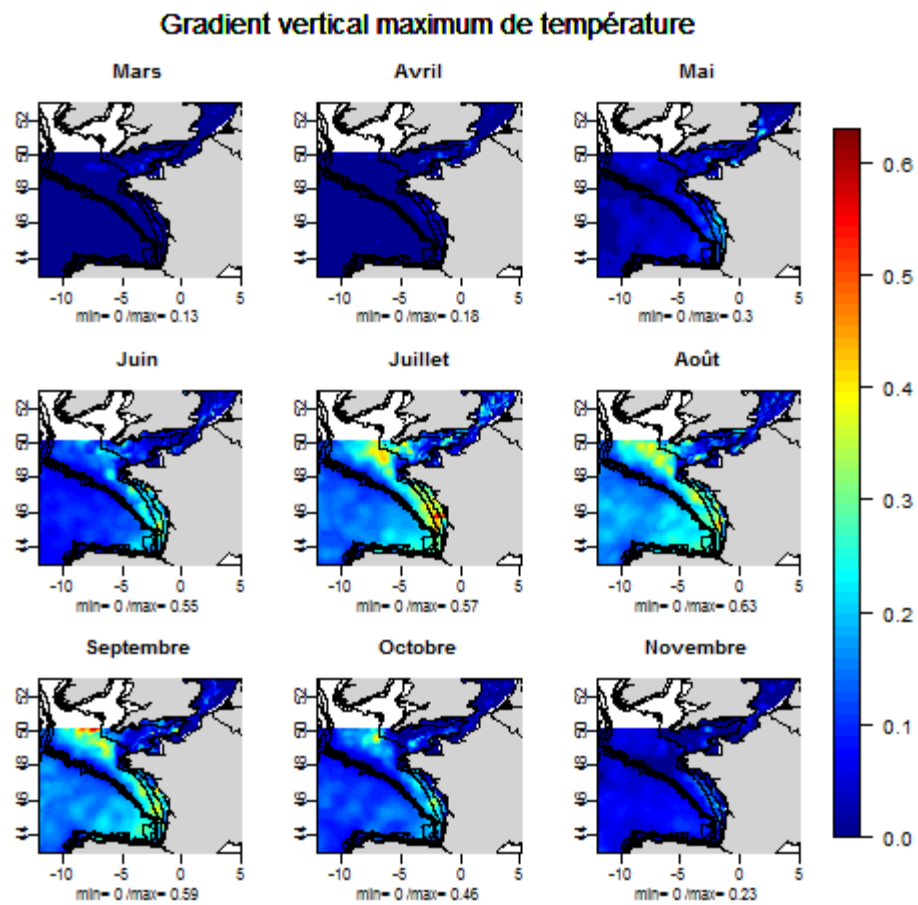


Figure 4. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : gradient vertical maximum de température ( $^{\circ}\text{C}.\text{m}^{-1}$ )



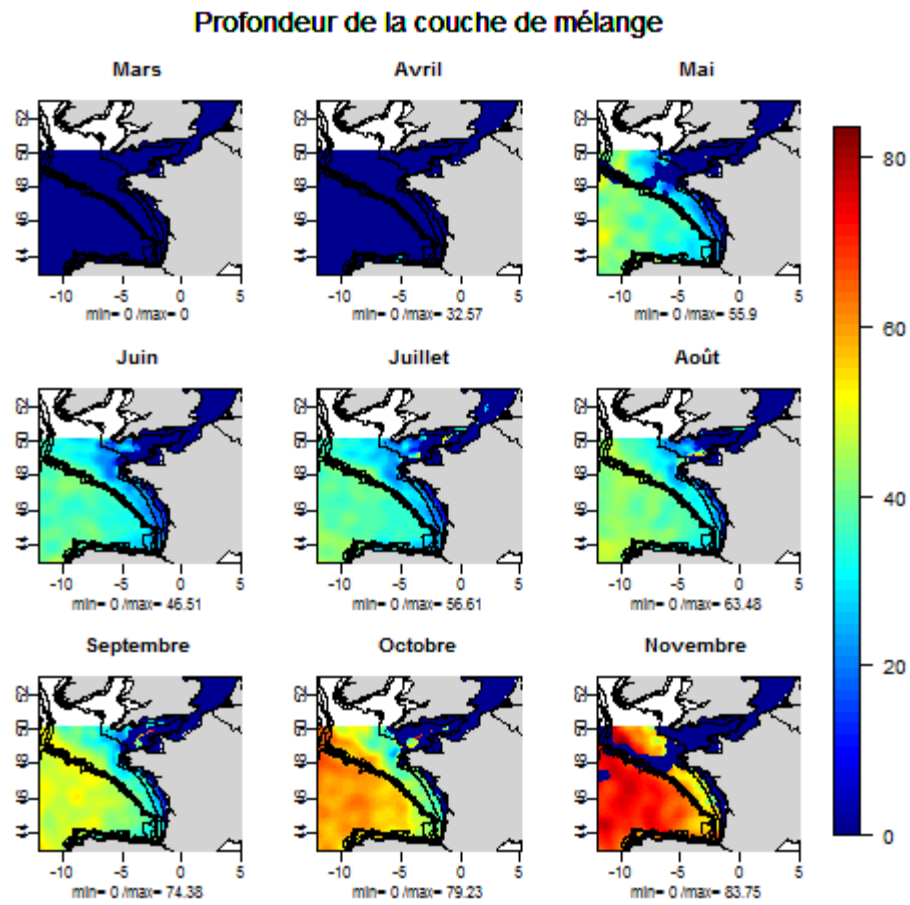


Figure 5. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : profondeur de la thermocline (m)

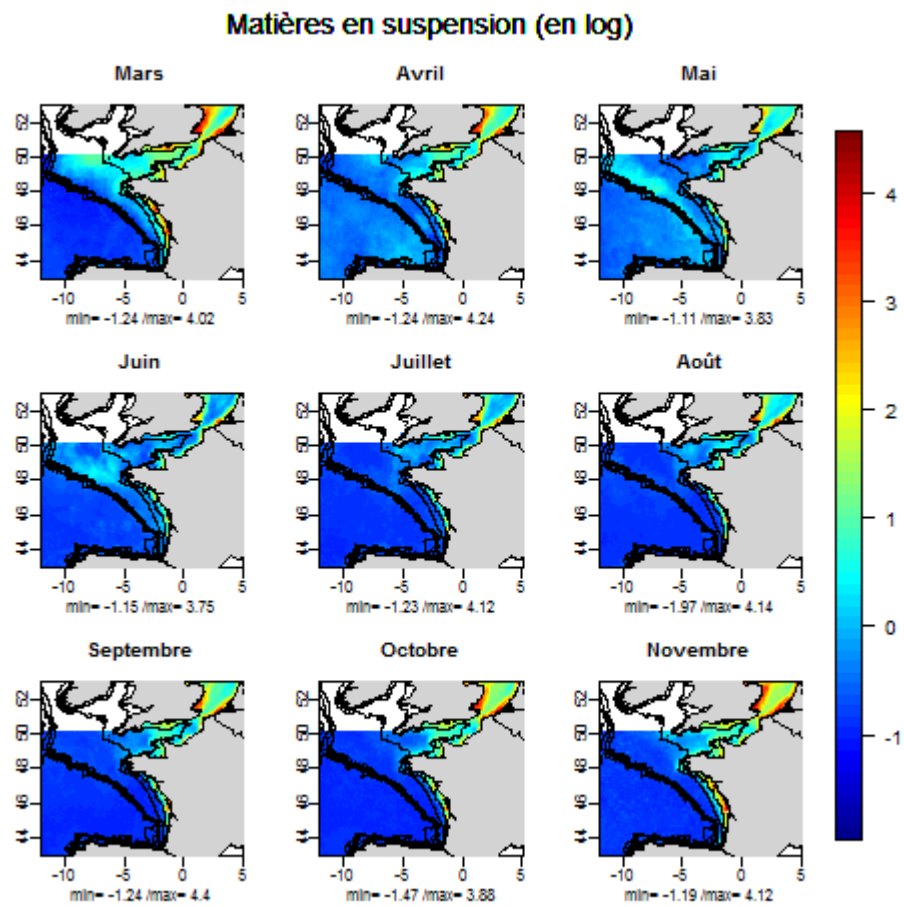


Figure 6. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : concentration ( $\text{g.m}^{-3}$ ) log-transformée en matières en suspension dans la couche de surface

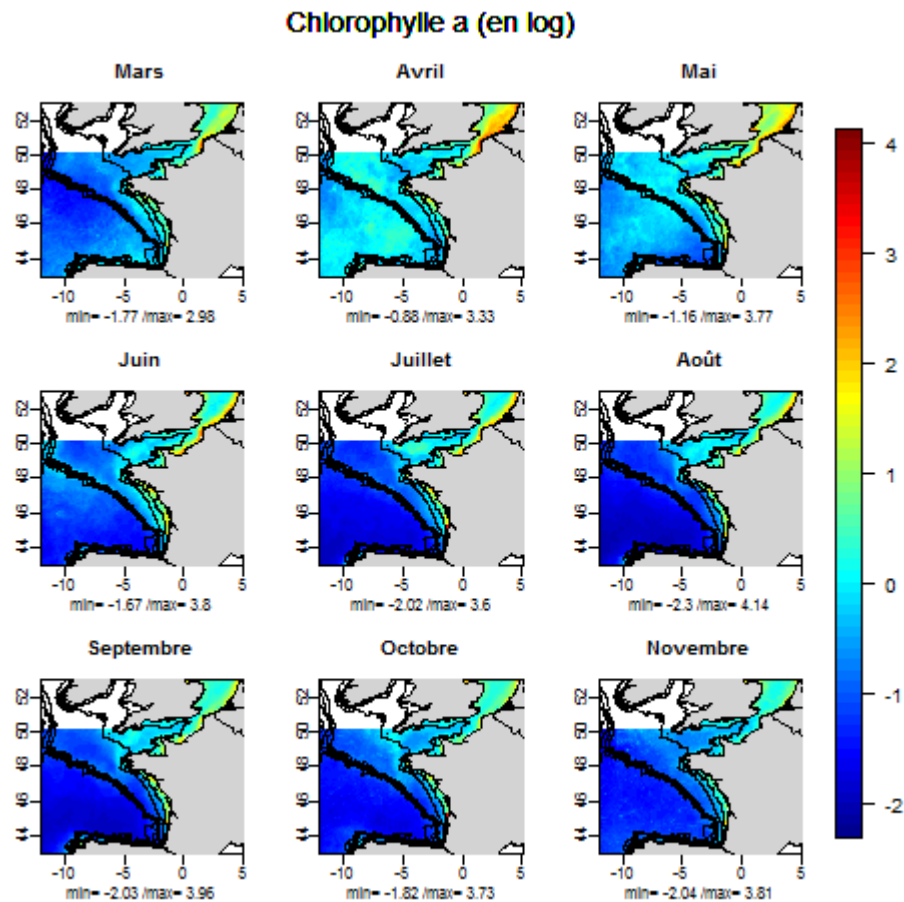


Figure 7. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : concentration ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) log-transformée en chlorophylle *a* dans la couche de surface

#### 4.1.2. Evolution annuelle des paysages hydrologiques

L'ACP a été réalisée sur la matrice rassemblant en lignes les 9 tables des indices hydrologiques (BT, SS, PhiT, GradTmax, Zm, MES) calculés pour les mois de mars à novembre. La concentration en chlorophylle *a* dans la couche de surface a été introduite en variable supplémentaire.

90% de l'inertie initiale sont expliqués par les 4 premières composantes principales. Le cercle des corrélations entre variables montrent globalement une opposition entre les variables couleur de l'eau et les indices hydrologiques. Seule la température de fond n'est corrélée avec aucune variable : elle est corrélée positivement avec les variables couleur de l'eau sur l'axe 1 mais sa contribution sur cet axe est relativement faible. Elle est en revanche fortement corrélée avec l'axe 3 de l'ACP (figure 8).

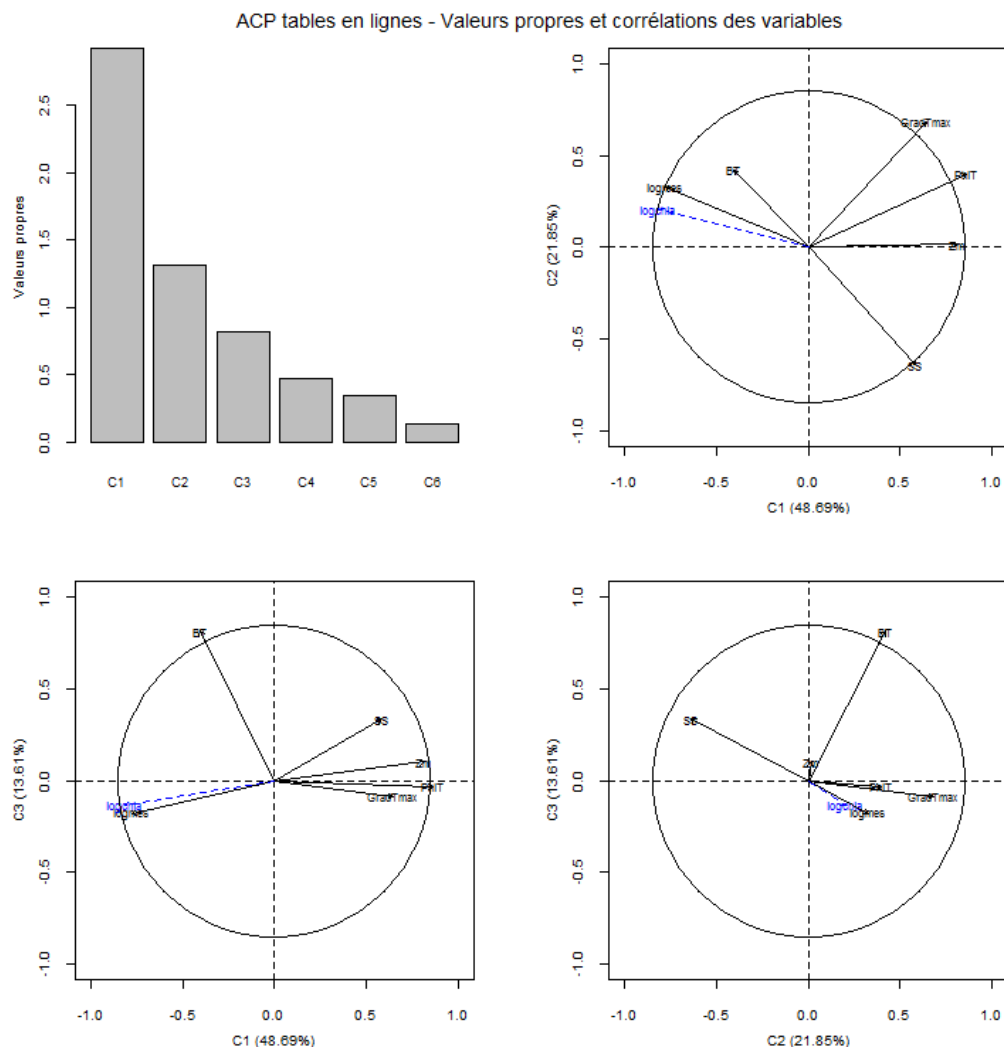


Figure 8. Représentation du diagramme en bâtons des valeurs propres et des corrélations des variables de l'ACP des tables empilées en lignes.

Des classifications *k-means* sont réalisées sur les coordonnées des individus pixels/mois sur la 4 premières composantes principales, pour un nombre pré-défini de classes variant de 2 à 10. Le choix de la meilleure partition est basé sur le rapport variance intergroupes/variance totale et sur l'index de Davies Bouldin's (rapport distances intracluster / distance inter clusters). Sur la base de l'examen de ces deux indices calculés pour chaque partition, la classification aboutissant à 9 groupes a été retenue (figure 9).

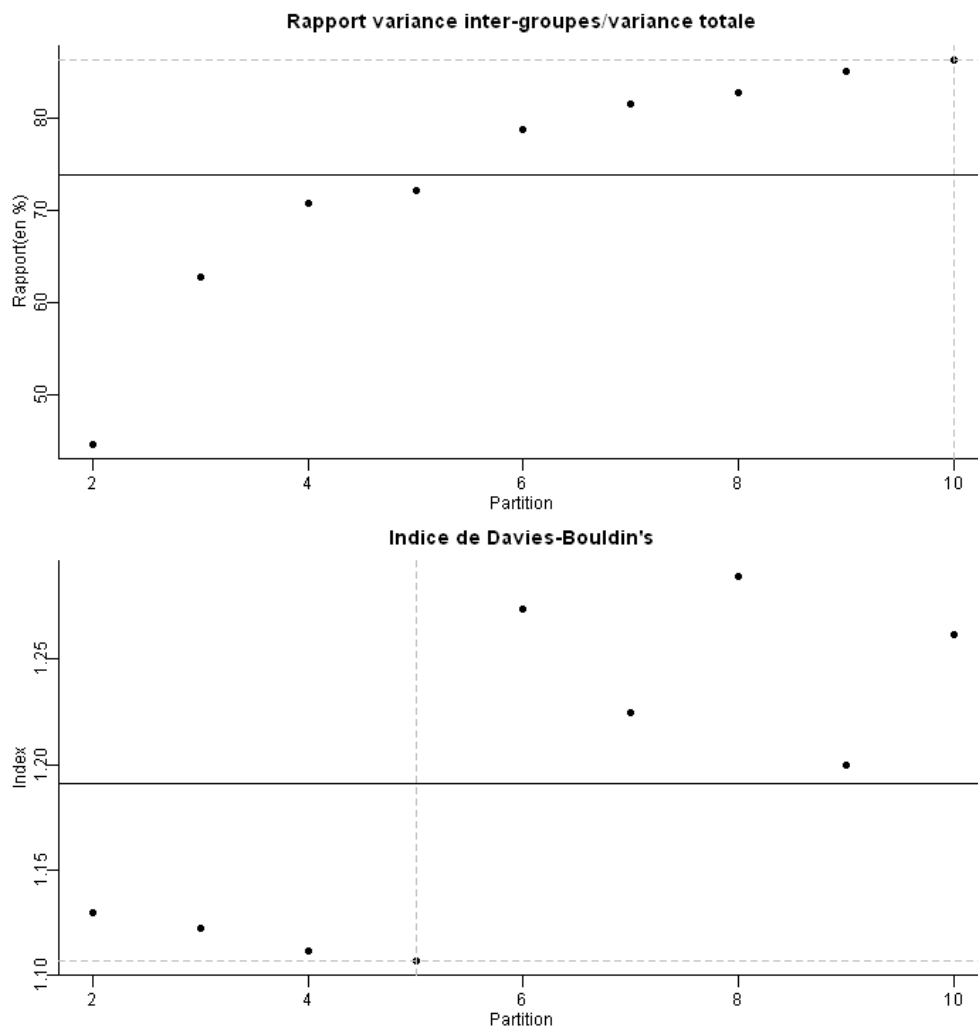


Figure 9. Indices permettant de d'évaluer la qualité des classifications réalisées pour un nombre de groupes pré-défini de 2 à 10

Le choix de la meilleure partition est basé sur le rapport variance inter-groupes/variance totale (à maximiser) et sur l'index de Davies-Bouldin's (rapport distances intraclusters/distances interclusters, à minimiser). Les lignes horizontales représentent les moyennes des deux indices.

L'examen de ces deux indices nous a conduit à retenir la partition à 9 groupes.

La représentation des 9 groupes d'individus pixels identifiés par la classification *K-means* dans les trois premiers plans factoriels de l'ACP montrent une opposition entre :

- les pixels présentant des fortes concentrations en matières en suspension en surface (groupes 8 et 9, coordonnées négatives sur l'axe 1)
- et les pixels présentant des valeurs élevées de déficit d'énergie potentielle, de gradient maximum vertical de température et de profondeur de la couche de mélange (groupes 2, 3, 5).

L'axe 2 oppose quand à lui les groupes du large à salinité de surface élevée (1,2 et 3, coordonnées négatives) aux groupes plus côtiers avec des salinités de surface réduites (groupes 4 et 5).

Enfin, le troisième axe permet de discriminer les groupes à fortes valeurs de température de fond (groupes 7 et 9) de groupes présentant des valeurs plus faibles pour cette variable (groupes 6 et 8) (figure 10).

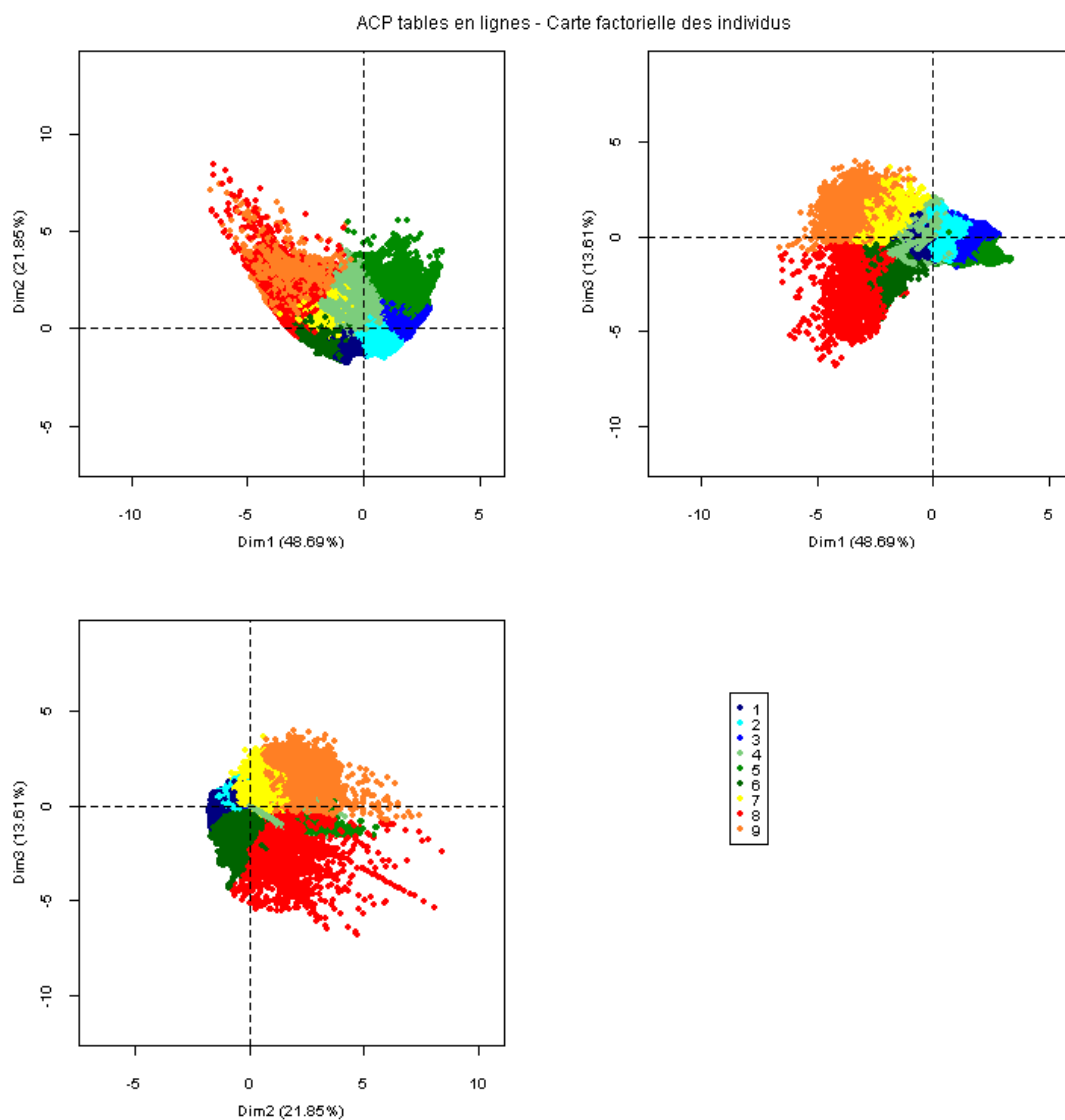


Figure 10. Représentation des individus/pixels dans les 3 premiers plans factoriels de l'ACP. Les couleurs indiquent les 9 groupes identifiés par la classification *k-means*

Les statistiques descriptives des groupes identifiés par la classification sont présentées tableau 1.

	SS	BT (°C)	PhiT (kg.m <sup>-3</sup> .s <sup>-2</sup> )	GradTmax (°C)	Zm (m)	MES (g.m <sup>-3</sup> )	CHLA (mg.m <sup>-3</sup> )
<b>Manche/Atlantique</b>	<b>35.46</b>	<b>11.68</b>	<b>28.54</b>	<b>0.07</b>	<b>29.33</b>	<b>0.52</b>	<b>0.51</b>
<b>1</b>	<b>35.59</b>	<b>11.66</b>	<b>4.27</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.58</b>	<b>0.7</b>
<b>2</b>	<b>35.6</b>	<b>11.65</b>	<b>40.57</b>	<b>0.07</b>	<b>41.9</b>	<b>0.47</b>	<b>0.37</b>
<b>3</b>	<b>35.63</b>	<b>11.63</b>	<b>92.93</b>	<b>0.15</b>	<b>43.52</b>	<b>0.41</b>	<b>0.21</b>
<b>4</b>	<b>35.13</b>	<b>11.99</b>	<b>31.33</b>	<b>0.14</b>	<b>22.78</b>	<b>0.85</b>	<b>0.93</b>
<b>5</b>	<b>35.18</b>	<b>11.62</b>	<b>108.25</b>	<b>0.26</b>	<b>31.34</b>	<b>0.43</b>	<b>0.34</b>
<b>6</b>	<b>35.11</b>	<b>10.36</b>	<b>0.07</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1.67</b>	<b>1.1</b>
<b>7</b>	<b>35.12</b>	<b>14.33</b>	<b>1.57</b>	<b>0.04</b>	<b>0</b>	<b>1.45</b>	<b>1.1</b>
<b>8</b>	<b>33.99</b>	<b>10.81</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>8.42</b>	<b>3.11</b>
<b>9</b>	<b>34.69</b>	<b>16.7</b>	<b>0.67</b>	<b>0.03</b>	<b>0</b>	<b>3.46</b>	<b>1.97</b>

Tableau 1 : médiane des indices hydrologiques des différents paysages hydrologiques

Légende : SS : salinité de surface – BT : Bottom Temperature – PhiT : Déficit d'énergie potentielle due à la température – GradTmax : Gradient vertical maximum de température – Zm : Profondeur de la thermocline – MES et CHLA : respectivement concentrations en matières en suspension et en chlorophylle *a* dans la couche de surface.

La figure 11 décrit la distribution spatio-temporelle des 9 groupes identifiés par la classification, présents à différentes périodes de l'année, et caractérisés par des conditions hydrologiques homogènes. Les caractéristiques de ces «paysages hydrologiques» sont présentées tableau 2.

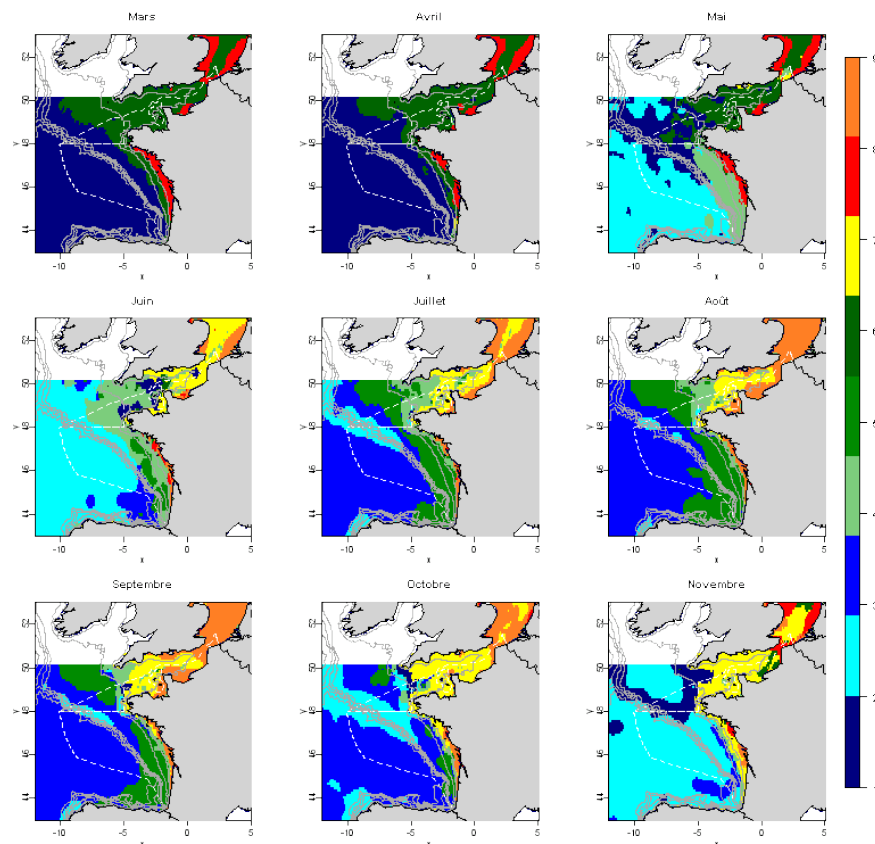


Figure 11. Distribution spatio-temporelle des paysages hydrologiques identifiés par l'analyse

<b>Grp 1</b>	Zone du large (au delà des 100m), très peu influencée par les panaches dessalés et non stratifiée, présente uniquement l'hiver et en début de printemps, jusqu'en mai sur le talus au nord du Golfe de Gascogne. Ce paysage hydrologique est également présent en novembre sur le talus, pour lequel la rupture de stratification est la plus rapide, avec des températures de fond froides
<b>Grp 2</b>	Eaux du large aux mois de mai, juin et novembre, ainsi que de juillet à octobre sur le nord du talus. C'est un habitat avec une stratification encore peu intense en début de saison, ou dont la stratification s'atténue en novembre, ou encore ayant une stratification limitée en été sous l'effet du mélange au talus et dans l'upwelling de Galice. La production primaire y est limitée, même si elle peut être relativement élevée au talus l'été.
<b>Grp 3</b>	Eaux du large au cœur de l'été jusqu'en octobre, avec une stratification forte, une thermocline marquée et relativement profonde, et une absence de production phytoplanktonique.
<b>Grp 4</b>	Zone du plateau en fin de printemps et aux alentours du front de Ouessant l'été, encore faiblement stratifiée, avec une couche de mélange peu profonde et des valeurs de chlorophylle élevées, témoins du bloom printanier ou d'un mélange permanent pour la zone du front.
<b>Grp 5</b>	Zone large du plateau dans le sud du golfe et du milieu de plateau dans le nord, ainsi qu'en entrée de Manche, présentant la stratification la plus forte au cours de l'été, du fait d'un réchauffement important et d'eaux relativement dessalées en surface en comparaison au groupe 3 du large.
<b>Grp 6</b>	Bande côtière entre les isobaths 50m et 100m en fin d'hiver, faiblement dessalée, avec des concentrations en MES conséquentes du fait de l'apport par les panaches et de la remise en suspension hivernale.
<b>Grp 7</b>	Bande côtière présente en été en Manche est et à l'automne, faiblement dessalée en raison de débits plus faibles à cette saison, non stratifiée, et encore chaude suite au réchauffement estival.
<b>Grp 8</b>	Habitat des panaches, donc étendu au printemps, période des débits les plus élevés, avec des températures de fond faibles en moyenne. Les concentrations en MES sont très élevées, ainsi qu'en chlorophylle, témoignant de forts blooms printaniers dans cet habitat.
<b>Grp 9</b>	Étroite bande côtière présente surtout l'été, période de débits plus faibles, puis se réduisant progressivement en automne. Eaux cependant assez dessalées et relativement riches en MES et chlorophylle.

Tableau 2 : caractéristiques des paysages hydrologiques



### 4.1.3. Paysages hydrologiques présentant une variabilité annuelle similaire

Pour cette deuxième analyse, les 6 indices hydrologiques de chaque mois (9 mois) sont considérés comme des variables indépendantes (54 variables). Comme pour l'analyse précédente, la concentration en chlorophylle a est introduite en variable supplémentaire.

Les 10 premières composantes principales expliquent plus de 90% de l'inertie totale.

Cette analyse permet de mettre en évidence des corrélations entre variables différentes selon le mois. Si l'opposition entre les indices hydrologiques SS, PhiT et Zm et les variables couleur de l'eau observée lors de l'analyse précédente se retrouve globalement ici, le gradient vertical maximum de température et la température de fond présentent des corrélations avec les autres variables différentes selon le mois. Le gradient de température, non contributif dans l'analyse et non corrélé avec les autres variables au printemps et en été, devient corrélé positivement avec le déficit d'énergie potentielle en fin d'été et à l'automne. La température de fond pour les mois d'été et d'automne est quant à elle corrélée positivement avec les variables couleur de l'eau (mais peu contributive) ou corrélée positivement avec les autres indices hydrologiques au printemps (figure 12).

La partition retenue après examen du rapport variance inter groupes / variance totale et de l'index de Davies-Bouldin's identifie 10 groupes de paysages hydrologiques présentant une variabilité intra-annuelle des conditions hydrologiques similaire (figure 13).

La représentation des 10 groupes d'individus « compromis » identifiés par la classification *K-means* dans les 3 premiers plans factoriels de l'AFM montre une opposition entre (figure 14) :

- les pixels présentant des fortes concentrations en matières en suspension en surface toute l'année (groupes 2, 3, 6 et 9, coordonnées négatives sur l'axe 1)
- et les pixels présentant des valeurs plus élevées de déficit d'énergie potentielle et de profondeur de la couche de mélange, notamment en été (groupes 1, 4, 5, 8 et 10).

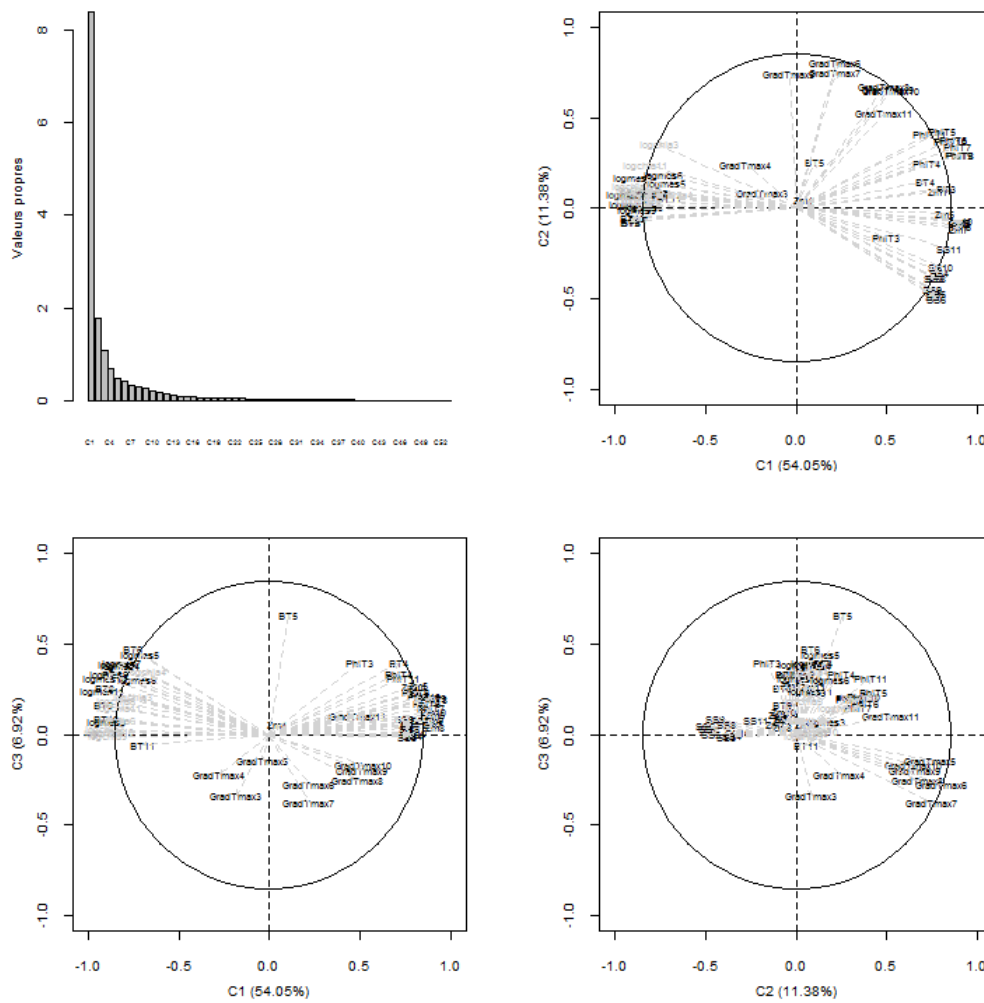


Figure 12. Représentation du diagramme en bâtons des valeurs propres et des corrélations des variables de l'analyse globale de l'AFM .

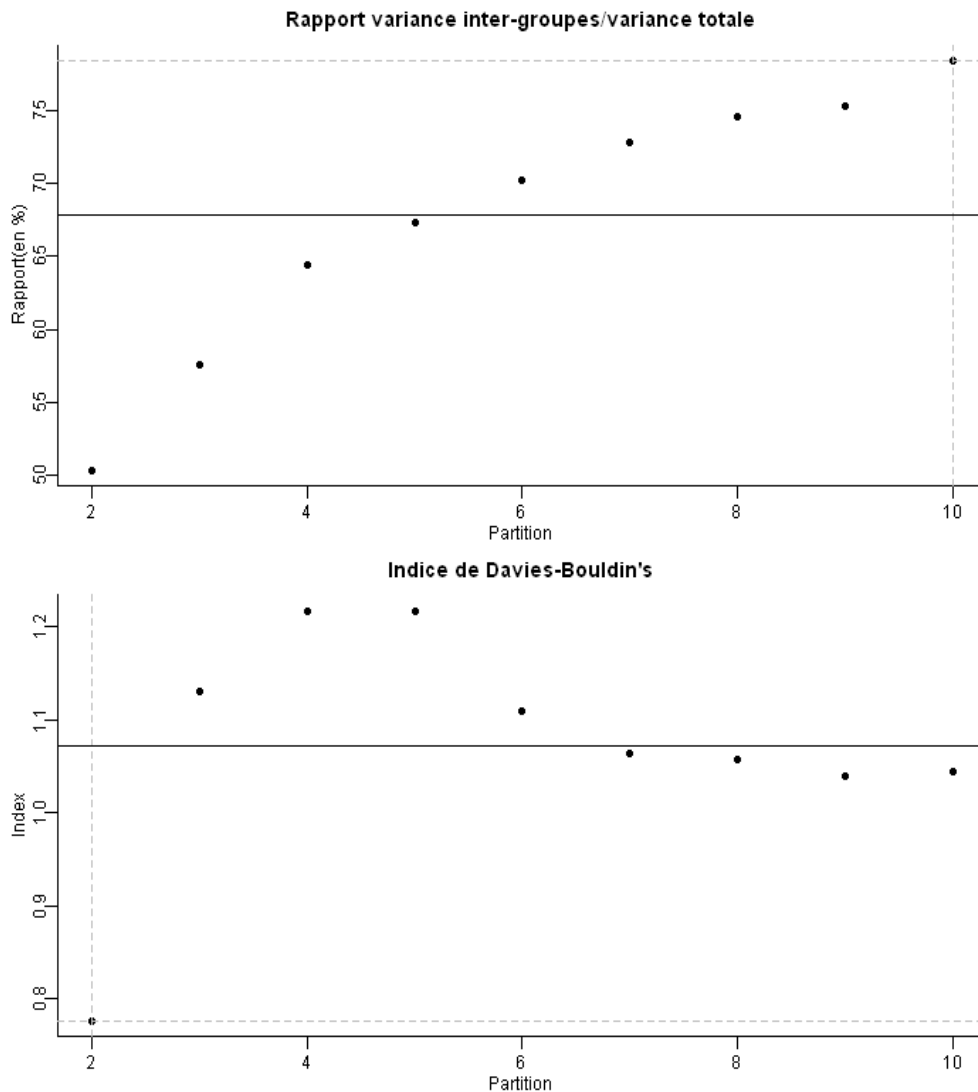


Figure 13. Indices permettant de d'évaluer la qualité des classifications réalisées pour un nombre de groupes pré-défini de 2 à 10

Le choix de la meilleure partition est basé sur le rapport variance inter-groupes/variance totale (à maximiser) et sur l'index de Davies-Bouldin's (rapport distances intraclusters/distances interclusters, à minimiser). Les lignes horizontales représentent les moyennes des deux indices.

L'examen de ces deux indices nous a conduit à retenir la partition à 10 groupes.

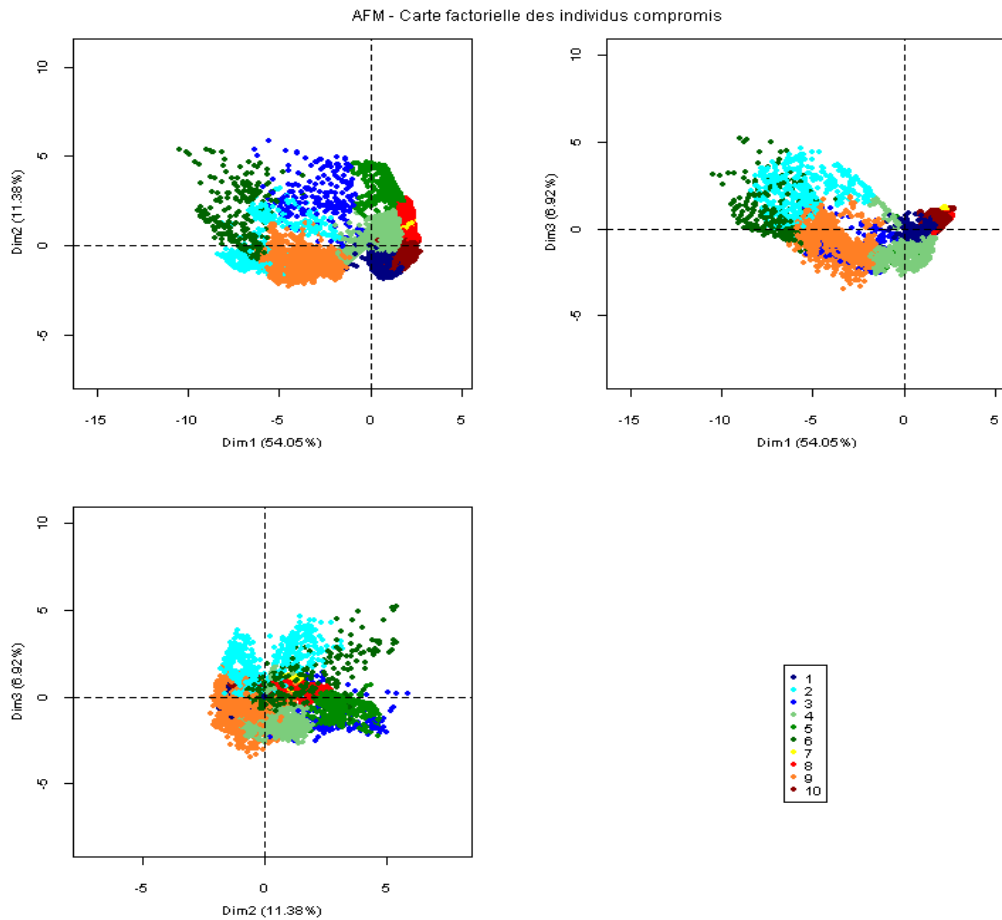


Figure 14 . Représentation des individus/pixels de l'ACP dans les 3 premiers plans factoriels. Les couleurs indiquent les 9 groupes identifiés par la classification *k-means*

La distribution spatiale des 10 groupes identifiés est présentée figure 15. Cette classification distingue d'une part les habitats côtiers (groupe 9 en Manche et 3 dans le golfe) et très côtiers (2), de faible (3, 9) à très faible (2) profondeur et fortement mélangés toute l'année sous l'influence de la marée (groupes 2, 9) et/ou influencés par les fleuves (3,6), et d'autre part les habitats montrant une stratification saisonnière. Cette stratification thermique saisonnière est décalée dans le temps, et plus ou moins intense, du sud vers le nord (8, 7, 10, 5 et 4). Le groupe 1 se distingue le long du talus au nord, et le long des côtes espagnoles au sud, avec une moindre stratification saisonnière du fait du mélange par les ondes internes dans le premier cas, et des upwellings dans le second cas. L'habitat 7 individualise le banc Le Danois au cœur d'un habitat stratifié saisonnièrement au sud (groupe 8). Cet habitat apparaît un peu moins stratifié mais avec des gradients verticaux de température maxima plus élevés en été.

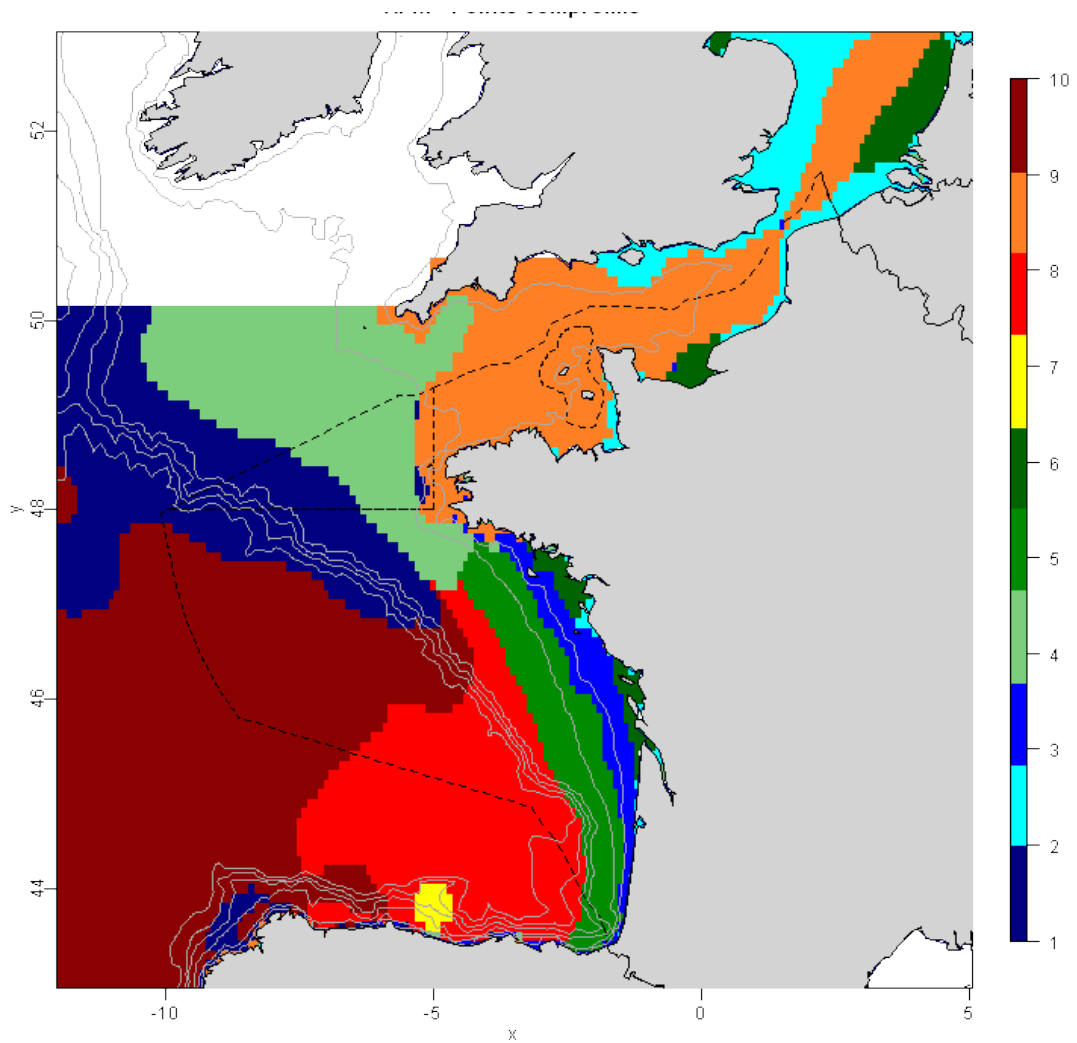


Figure 15. Distribution spatiale des paysages hydrologiques identifiés par l'AFM

## 4.2. Distribution des paysages hydrologiques dans le bassin méditerranéen

La qualification des données disponibles dans la climatologie MEDATLAS (1998-2001) permet de disposer d'estimations de qualité. Cette climatologie ne permet pas d'obtenir d'indicateur de confiance associé aux estimations.

Aussi, les choix opérés pour l'analyse en Manche-Atlantique n'apparaissent pas justifiés ici. L'ensemble des mois sont conservés, et le déficit d'énergie potentielle est calculé à partir de la densité (il intègre les estimations de température et de salinité).

### 4.2.1. Cartographie des indices hydrologiques sélectionnés

Les cartes ci-dessous présentent la distribution spatio-temporelle des indices hydrologiques sélectionnés pour l'ensemble de la zone d'analyse.

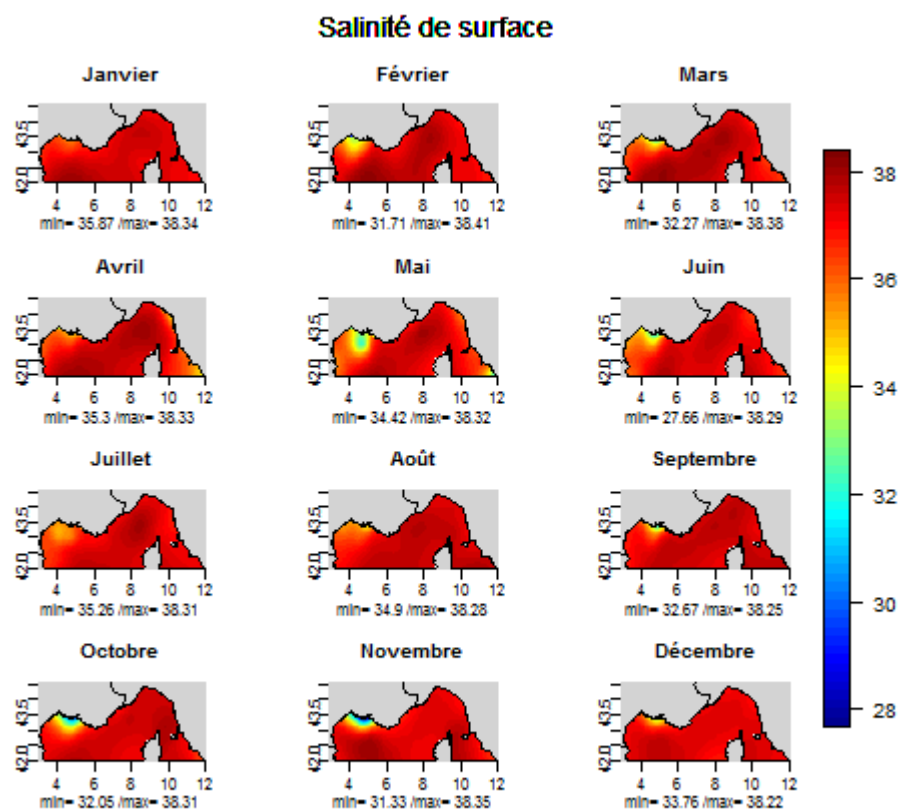


Figure 16. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : salinité de surface

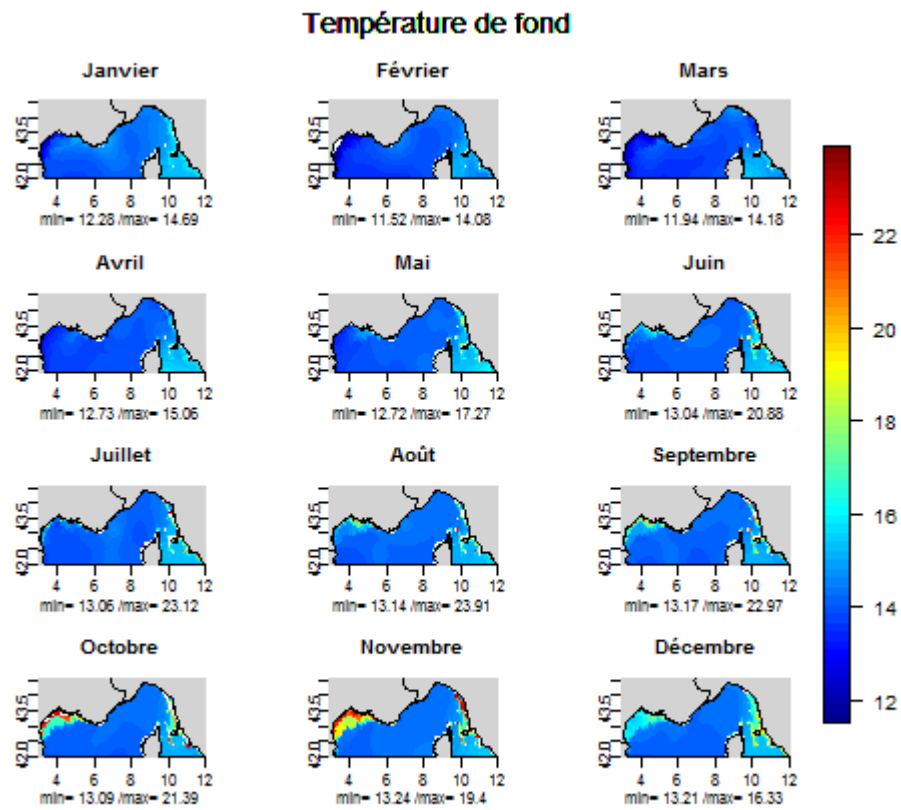


Figure 17. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : température de fond (°C)

### Déficit d'énergie potentielle

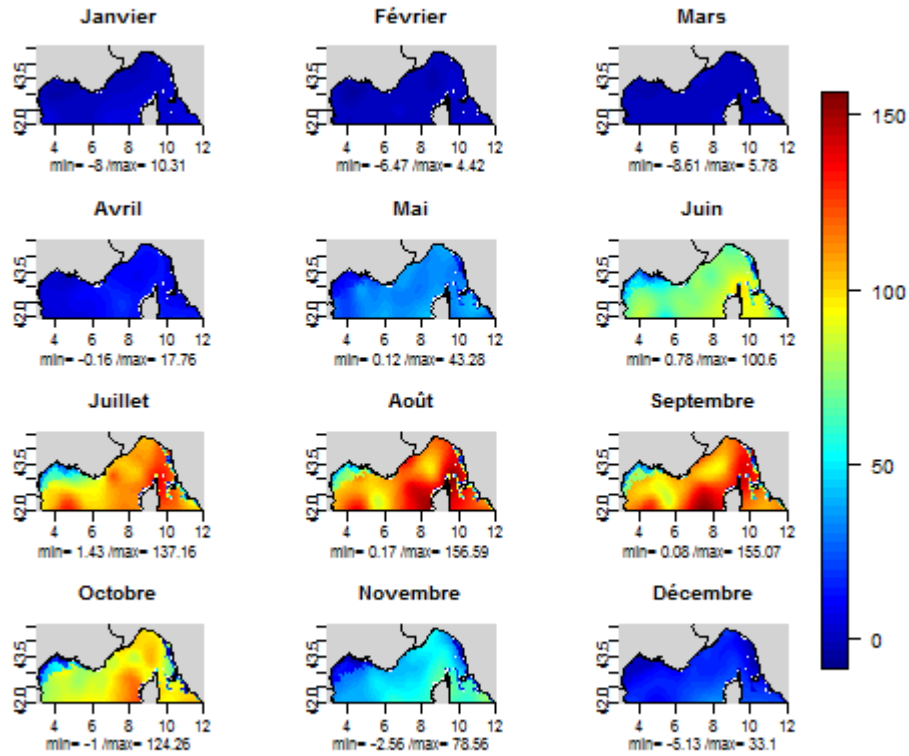


Figure 18. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : déficit d'énergie potentielle du aux stratifications thermique et haline ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ )



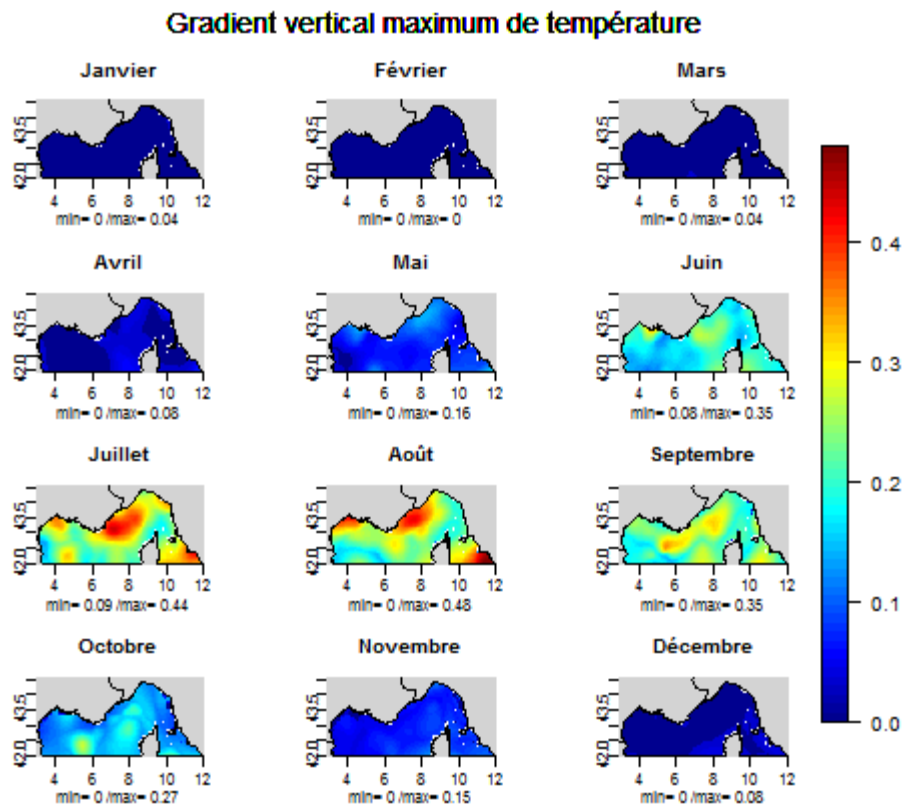


Figure 19. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : gradient vertical maximum de température ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ )

## Profondeur de la couche de mélange

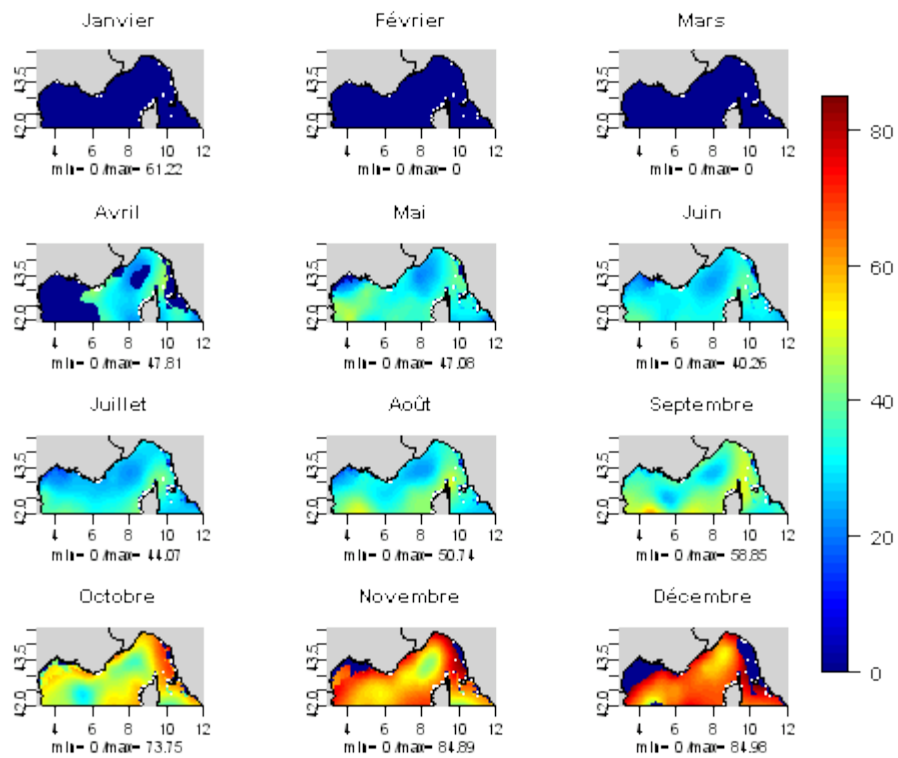


Figure 20. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : profondeur de la thermocline (m)

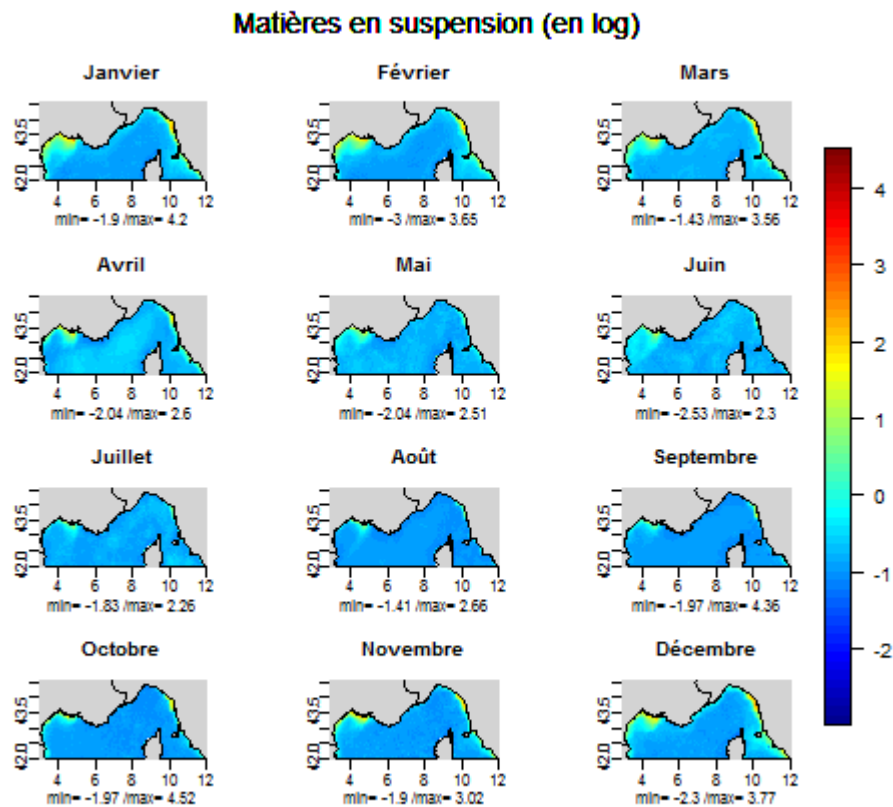


Figure 21. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : concentrations ( $\text{g.m}^{-3}$ ) log-transformées en matières en suspension dans la couche de surface

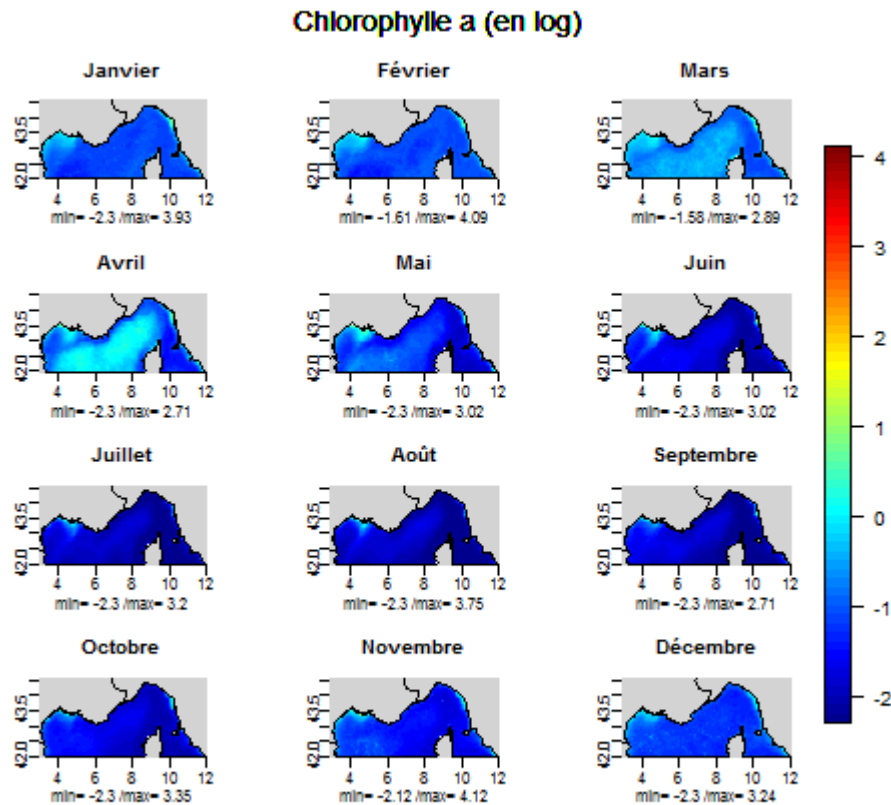


Figure 22. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : concentrations ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) log-transformées en chlorophylle *a* dans la couche de surface

#### 4.2.2. Choix des indices hydrologiques

Les deux analyses préalablement définies et mises en œuvre sur la façade Manche-Atlantique ont été reproduites dans le Golfe du Lion.

Les résultats obtenus se sont révélés moins pertinents que pour la première zone d'analyse (nombre inférieur de paysages hydrologiques discriminés, variables peu corrélées avec les axes des analyses...). Au vu de ces résultats, le choix des indices introduits dans l'analyse a été ré-examiné. La température de fond (figure 17), très homogène sur toute la zone, n'a pas été prise en compte. De même, le gradient vertical maximum de température et la profondeur de la couche de mélange, indices présentant de fortes discontinuités (figures 19 et 20), ont été retirés.

En revanche, la température de surface, non prise en compte dans l'analyse Manche-Atlantique, en raison de la corrélation marquée de cette variable avec la latitude et de sa forte influence sur la discrimination des structures identifiées, a été intégrée dans le Golfe du Lion. Cette variable est issue du traitement des images satellitales (figure 23).

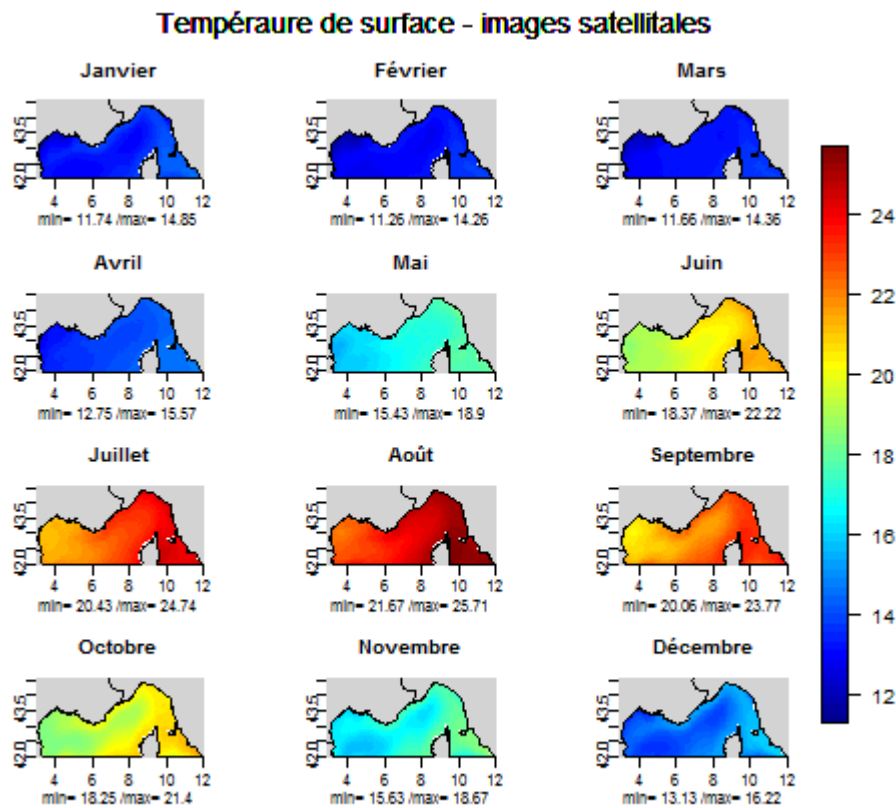


Figure 23. Exemple de cartes mensuelles d'indices hydrologiques sélectionnés pour l'analyse statistique : température de surface

De même, la concentration en chlorophylle *a* dans la couche de surface, très fortement corrélée avec la concentration en MES en Manche-Atlantique et introduite en variable supplémentaire dans cette zone, a ici participé en variable active à l'analyse. L'introduction de la concentration en chlorophylle *a* dans l'analyse n'a pas pour objectif d'intégrer une information directe sur la biologie, mais est motivée, suite à expertise, par les informations sur les structures hydrologiques qui semblent associées cette variable seule et que les autres paramètres ne permettent pas de capturer.

Les indices introduits en variables actives dans l'analyse pour le Golfe du Lion sont donc les suivants :

- Salinité de surface (données MEDATLAS), Température de surface (images satellitales), déficit d'énergie potentielle induit par la stratification thermique et la stratification haline (calculé à partir des données de température et de salinité de la climatologie MEDATLAS), concentration en MES et en chlorophylle *a* dans la couche de surface (MES et CHLA, images satellitales).

Ces paramètres n'ont pas permis de décrire finement l'évolution intra-annuelle des structures hydrologiques, aussi seuls les résultats de l'AFM sont présentés ici.

### 4.2.3. Paysages hydrologiques présentant une variabilité annuelle similaire

L'analyse factorielle multiple a été réalisée sur la matrice présentant les 5 indices sélectionnés pour chaque mois (12 mois) (60 variables).

Les 10 premières composantes principales expliquent plus de 90% de l'inertie totale.

Les variables couleur de l'eau log-transformées (logmes et logchla) et les variables physiques (SS, SST et Phi) s'opposent sur le premier axe, le deuxième axe permettant de distinguer le rôle des concentrations en MES (coordonnées positives) de celui des concentrations en CHLA (coordonnées négatives) d'une part, ainsi que l'influence de la salinité (coordonnées négatives) et de la température (coordonnées positives) (figure 24).

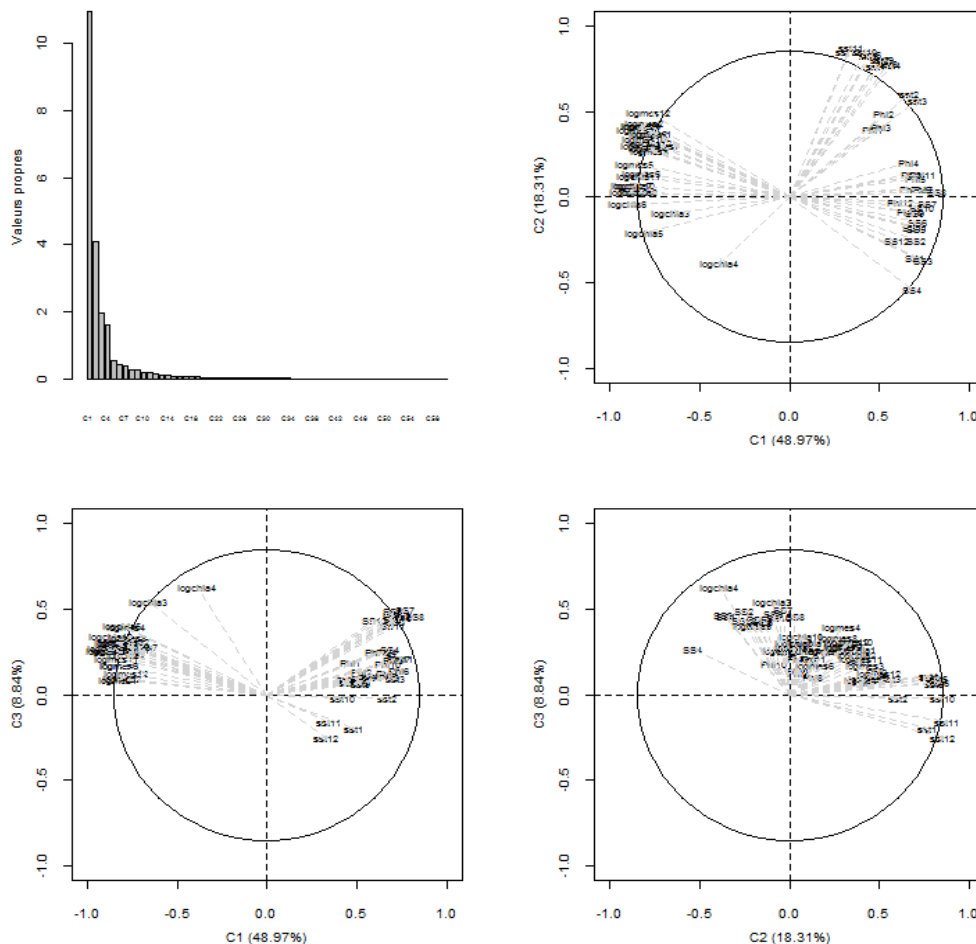


Figure 24. Représentation du diagramme en bâtons des valeurs propres et des corrélations des variables de l'analyse globale de l'AFM .

La partition retenue après examen du rapport variance inter groupes / variance totale et de l'index de Davies-Bouldin's identifie 10 groupes de paysages hydrologiques présentant une variabilité intra-annuelle des conditions hydrologiques similaire (figure 25).

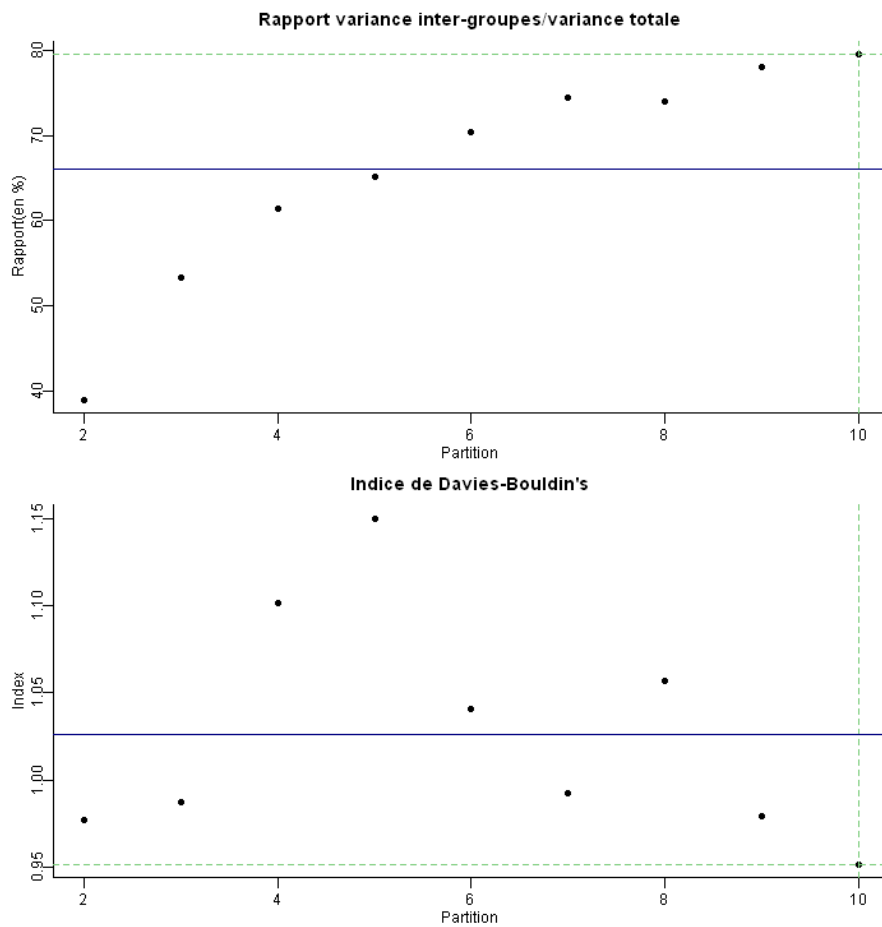


Figure 25. Indices permettant de d'évaluer la qualité des classifications réalisées pour un nombre de groupes pré-défini de 2 à 10.

Le choix de la meilleure partition est basé sur le rapport variance inter-groupes/variance totale (à maximiser) et sur l'index de Davies-Bouldin's (rapport distances intraclusters/distances interclusters, à minimiser). Les lignes horizontales représentent les moyennes des deux indices.

L'examen de ces deux indices nous a conduit à retenir la partition à 10 groupes.

La représentation des 10 groupes d'individus « compromis » identifiés par la classification *K-means* dans les 3 premiers plans factoriels de l'AFM montre une opposition entre (figure 26) :

- les pixels présentant des fortes concentrations en matières en suspension et en chlorophylle *a* en surface toute l'année (groupes 1, 2, 3, 4 et 8, coordonnées négatives sur l'axe 1),
- et les pixels présentant des valeurs plus élevées de salinité de surface, de température de surface et de déficit d'énergie potentielle (groupes 5, 6, 7, 9 et 10).

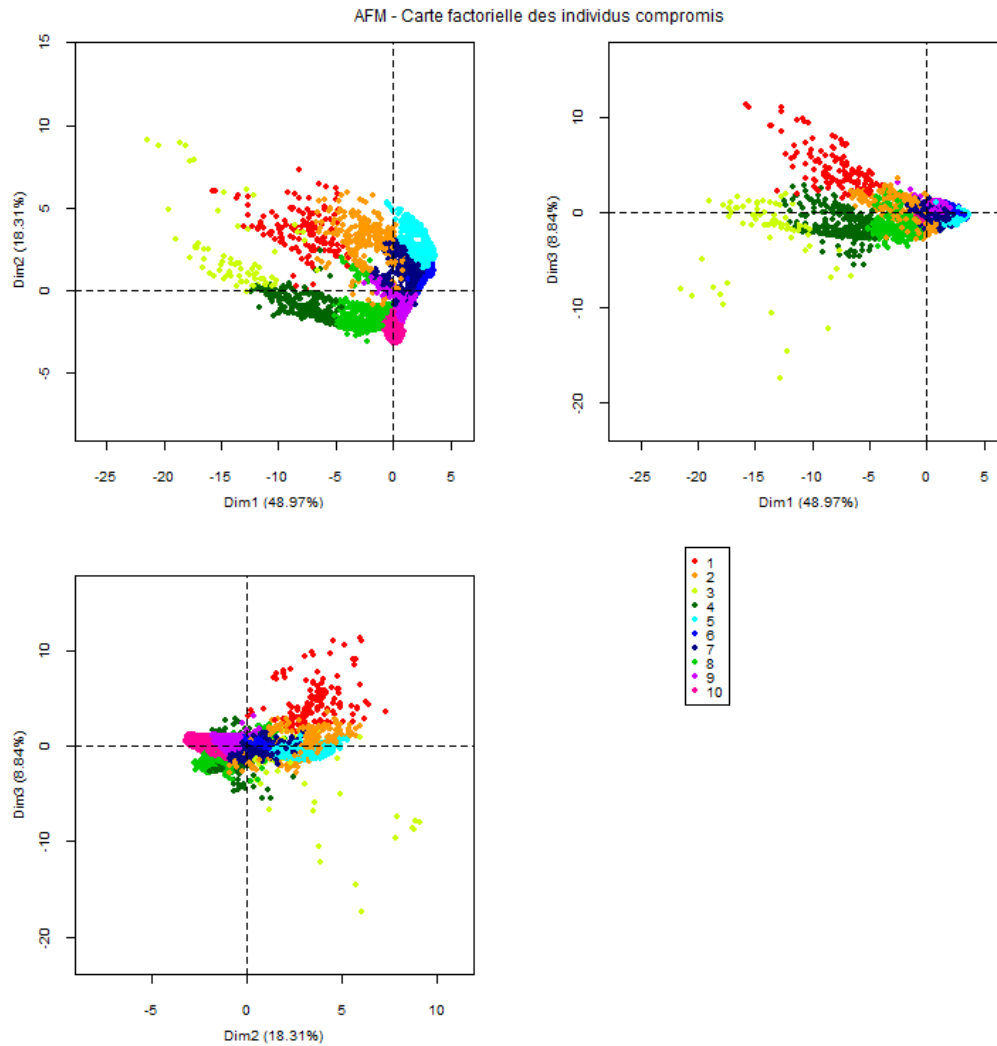


Figure 26. Représentation des individus/pixels de l'ACP dans les 3 premiers plans factoriels. Les couleurs indiquent les 10 groupes identifiés par la classification *k-means*

La figure 27 décrit la variabilité temporelle de la médiane des indices hydrologiques ayant permis de discriminer ces paysages hydrologiques.



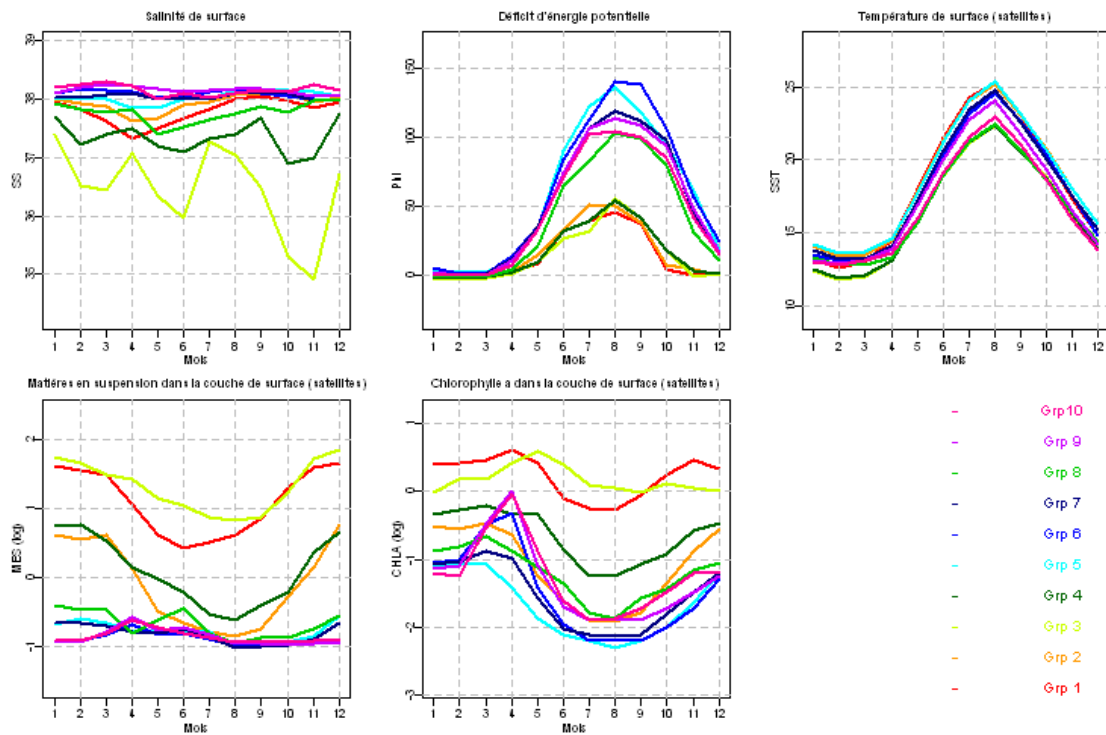


Figure 27. Variabilité saisonnière des médianes des paramètres introduits dans l'analyse

La distribution spatiale des 10 groupes identifiés est présentée figure 28. Le tableau 3 résume les principales caractéristiques des 10 paysages hydrologiques identifiés.

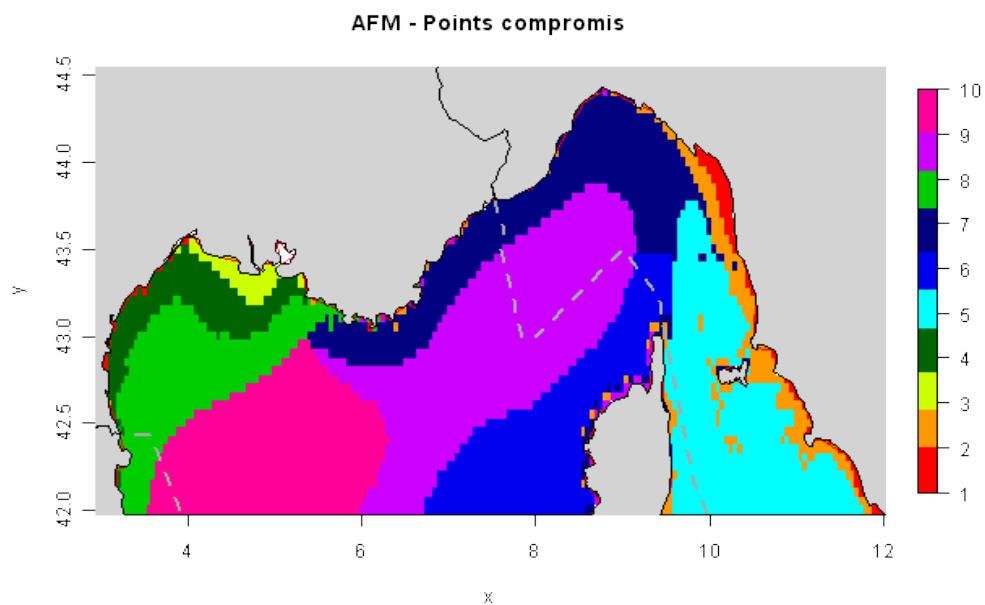


Figure 28. Distribution spatiale des paysages hydrologiques identifiés par l'AFM

<b>Grp 1</b>	Biotope très côtier, très peu représenté dans la sous-région DCSMM,
--------------	---

	principalement présent le long de la côte italienne en face de Libourne. Habitat très peu profond, caractérisé par une faible dessalure uniquement au printemps, les températures de surface les plus importantes et des valeurs fortement élevées de chlorophylle <i>a</i> et MES.
<b>Grp 2</b>	Biotope très côtier proche du groupe 1, et également très peu présent dans la sous-région DCSMM. Cet habitat présente des caractéristiques similaires au groupe 1 avec une dessalure au printemps moins marquée et des valeurs importantes en MES en hiver, mais moins élevées que dans le premier groupe.
<b>Grp 3</b>	Biotope du panache du Rhône dans le golfe du Lion, avec des dessalures importantes au printemps mais surtout en automne, des MES élevées tout l'hiver, et des concentrations en chlorophylle élevées en moyenne, avec un pic en mai. Malgré la présence d'un panache et d'une stratification haline, la stratification de la colonne d'eau dans cette zone est facilement rompue sous l'influence du Mistral.
<b>Grp 4</b>	Biotope du plateau du golfe du Lion, zone de dilution du panache, présentant des dessalures relatives, peu stratifié et également moins riche en MES et chlorophylle que le panache (groupe 3) lui-même.
<b>Grp 5</b>	Biotope au large de la côte est de la Corse, donc peu représenté à l'intérieur de la sous-région DCSMM. Habitat très stratifié et fortement oligotrophe.
<b>Grp 6</b>	Biotope du large à l'ouest de la Corse. Proche du groupe 5, il est également très fortement stratifié, jusque tard dans la saison, et oligotrophe malgré la présence d'un léger bloom au printemps.
<b>Grp 7</b>	Biotope sous influence du courant Nord, issu de la convergence des groupes 5 et 6. Ce groupe est présent le long de la Côte d'Azur pour ce qui concerne la sous-région marine DCSMM, il est relativement chaud et peu productif en phytoplancton et se distingue des groupes 5 et 6 par une stratification saisonnière moins marquée.
<b>Grp 8</b>	Proche du groupe 7, ce biotope au large du golfe du Lion présente de faibles dessalures (sous l'influence des eaux du panache du Rhône) et des températures de surface plus froides (sous l'influence du Mistral et de la Tramontane) que le groupe 7.
<b>Grp 9</b>	Ce biotope, avec le groupe 10, constitue la zone centrale de convection hivernale, tous les deux caractérisés par une stratification relativement forte en été et un bloom élevé au printemps. Le biotope 9, moins soumis au forçage des vents pendant l'été, présente des températures légèrement plus élevées et une stratification plus forte l'été que le groupe voisin 10.
<b>Grp 10</b>	Ce groupe très proche du groupe 9 se distingue par des températures moins élevées et une stratification légèrement plus faible l'été, sous l'influence du Mistral et de la Tramontane.

Tableau 3 : caractéristiques des paysages hydrologiques

## 5. Discussion

Les paysages hydrologiques identifiés dans cette étude représentent des zones géographiques homogènes au plan des indices hydrologiques sélectionnés, et constituent un niveau de structuration des biocénoses supérieur vis-à-vis des variables physiques brutes, telles que la température et la salinité. Ces structures hydrologiques homogènes peuvent constituer des entités géographiques favorables au développement de certaines communautés pélagiques.

Les indices hydrologiques ont été sélectionnés pour leur importance dans la structuration spatio-temporelle des communautés pélagiques (phyto- et zooplancton, poissons) dans leur ensemble, sur la base d'études antérieures (19, 23, 24). Le choix de ces indices a également été conditionné par la disponibilité de données, aux échelles spatiales et temporelles pertinentes pour la DCSMM. D'autres indices, concernant en particulier la concentration en nutriments dans la zone euphotique, le vent, les courants de marée, ou encore l'irradiance, pourraient utilement être intégrés dans l'analyse, au regard de leur rôle prépondérant sur la distribution de certaines communautés, notamment phytoplanctoniques. De tels indices n'étaient pas disponibles aux échelles spatio-temporelles de l'analyse et dans les délais impartis.

Afin notamment de répondre aux attentes de la DCSMM, cette étude a utilisé les données *in situ* disponibles sur les zones géographiques concernées. Elle montre la pertinence de jeux de données tels que les climatologies BOBYCLIM et MEDAR/MEDATLAS. Mais cette étude met également en lumière les difficultés méthodologiques liées à ces sources d'information. La faible densité de mesures en période hivernale et le nombre important de données manquantes qui en découle selon l'intervalle de confiance fixé dans BOBYCLIM a notamment justifié en partie la non prise en compte des mois de décembre, janvier et février pour la zone Manche-Atlantique. En Méditerranée, la résolution verticale et les intervalles de profondeurs irréguliers des estimations pourraient en partie expliquer la faible contribution des indices hydrologiques (gradient maximum vertical de température et thermocline).

L'utilisation de modèles hydrodynamiques [25], bénéficiant d'une résolution spatiale et temporelle fine, pourrait représenter une alternative intéressante pour compléter les résultats obtenus. Malgré l'incertitude de ces modèles, ils permettraient notamment d'évaluer la stabilité des structures hydrologiques identifiées et leur variabilité inter-annuelle. Ils permettraient aussi de décrire des phénomènes hydrologiques à une échelle temporelle plus fine que le mois. Cette variabilité et ces événements de type méso-échelle pourraient alors rentrer dans la classification des paysages hydrologiques.

Les méthodes statistiques utilisées ici ont permis d'obtenir une typologie des structures hydrologiques sur la base de paramètres physiques et de décrire l'évolution intra-annuelle de ces structures dans la zone Manche-Atlantique. Cette approche s'inscrit dans la même démarche que les classifications génériques des habitats pélagiques, telles que la classification Eunis. Cependant, à la différence de cette dernière, les critères utilisés pour distinguer les habitats dans notre étude sont des critères statistiques, objectifs, et de ce fait d'autant plus génériques car ne dépendant pas de valeurs de paramètres établies sur des zones définies. Si les méthodes utilisées ici ne permettent pas d'adapter facilement les critères selon les connaissances des experts dans le domaine pélagique, en revanche, elles

rendent possible une automatisation des procédures (notamment en cas d'actualisation des données).

Par ailleurs, l'application des critères proposés dans la classification Eunis sur les mêmes données et sur les zones d'intérêt de la DCSMM montre ses limites, celle-ci apparaissant bien moins discriminante dans ces régions, que l'on sait par ailleurs hétérogènes d'un point de vue hydrologique. Cette moindre discrimination concerne en particulier les zones du large (4 groupes contre 10 groupes pour l'AFM, cf. figure 15) (figure 29).

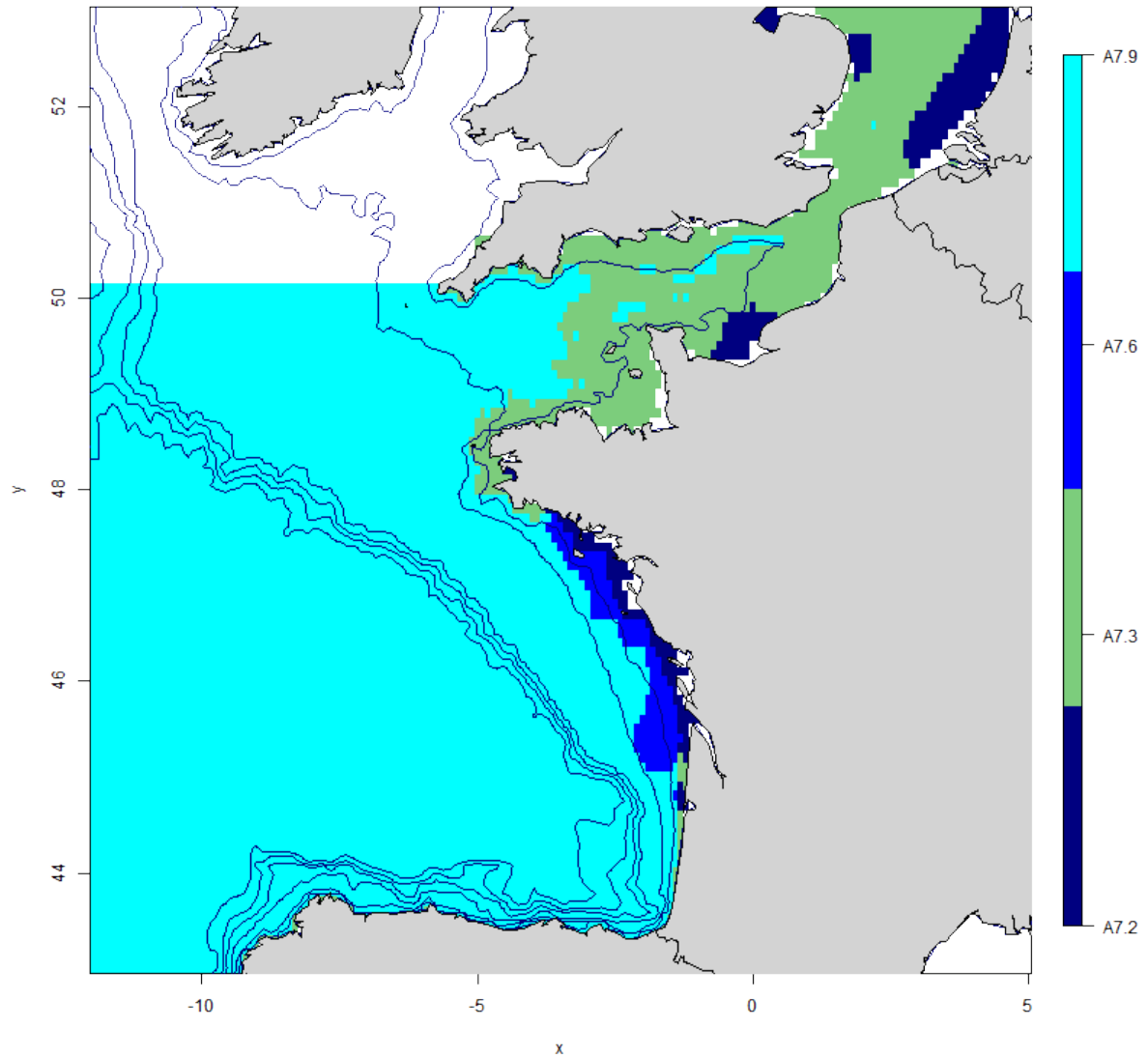


Figure 29. Typologie obtenue sur la base des critères de la classification Eunis.

- A7.2 : Completely mixed water column with reduced salinity
- A7.3 : Completely mixed water column with full salinity
- A7.6 : Vertically stratified water column with reduced salinity
- A7.9 : Vertically stratified water column with full salinity

L'identification d'entités géographiques homogènes sur la base de critères hydrologiques apporte des éléments pertinents dans le contexte des connaissances sur la biogéographie des communautés pélagiques. De telles approches peuvent également présenter un intérêt pour orienter et/ou justifier les limites géographiques proposées pour la mise en œuvre de mesures de protection et de surveillance de l'environnement marin, à l'instar des sous-régions marines de la DCSMM.

En outre, la typologie présentée dans cette étude pourra servir de base à la structuration d'entités homogènes au sein desquelles il sera par la suite possible de qualifier l'état écologique demandé par la DCSMM. Pour ce deuxième exercice, la description des principales communautés ou espèces typiques associées aux paysages pourrait être un élément pertinent. Il conviendra alors d'identifier des indicateurs synthétiques permettant de décrire la biodiversité des espèces pélagiques. Ce complément pourra notamment se baser sur les différentes contributions de l'évaluation initiale concernées, notamment celles relatives à la description des caractéristiques biologiques des communautés associées aux habitats pélagiques (phytoplanctoniques, zooplanctoniques et ichtyologiques).

Un tel travail à l'échelle annuelle, sur l'ensemble des zones concernées, et pour toutes les espèces pélagiques clefs d'une région donnée nécessite de disposer d'une description des distributions des espèces pélagiques dominantes, à des échelles temporelles (sur toute l'année) et spatiales fines, ainsi qu'à plusieurs périodes de leur cycle de vie en ce qui concerne les poissons. Or, si des études spécifiques sur les distributions dans les sous-régions concernées sont disponibles, elles ne concernent que des zones limitées, essentiellement côtières pour le phytoplancton et le zooplancton, et des périodes de l'année ponctuelles pour le poisson. L'utilisation des résultats de modélisation biogéochimique [26, 27] ou du traitement d'images satellitales pourrait, dans ce contexte, apporter des éléments pertinents et palier aux « lacunes » de données biologiques, notamment dans les zones situées au large.

## 6. Références

- [1] Report of the Working Group on Marine Habitat Mapping (WGMHM) (2006).
- [2] Biodiversité en environnement marin. Synthèse et recommandations en sciences environnementales et sociales. Rapport à l'Ifremer de l'expertise collective en biodiversité marine. Version au 25 août 2010, 138 p. Available online at : <http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/104000458/0000.pdf>
- [3] Foster-Smith B., Connor D. et Davies J. (2007). *MESH Guide to Habitat Mapping*, MESH Project, 2007, JNCC, Peterborough. Available online at: <http://www.searchmesh.net/default.aspx?page=1900>
- [4] Connor D.W., Gilliland P.M., Golding N, Robinson P., Todd D. et Verling E. (2006). UKSeaMap: the mapping of seabed and water column features of UK seas. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.JNCC. Available online at: <http://jncc.defra.gov.uk/page-2117>
- [5] Report of the Working Group on Marine Habitat Mapping (WGMHM) (2008).
- [6] Gregr E.J. et Bodtker K.M (2007). Adaptive classification of marine ecosystems : Identifying biologically meaningful regions in the marine environment. *Deep-Sea Research I*, 54, 385-402.
- [7] Hobday A.J., Young J.W., Moeseneder C. et Dambacher J.M. (2011). Defining dynamic pelagic habitats in oceanic waters off eastern Australia. *Deep-Sea Research II*, 58, 734-745.
- [8] Lehodey P., Senina I. et Murtugudde R. (2008). A spatial ecosystem and populations dynamics models (SEAPODYM) – Modelling of tuna and tuna-like populations. *Progress in Oceanography*, 78, 304-318.
- [9] Coastal and Marine Ecological Classification Standart: Version 3.1 (Working Draft). FGDC Document Number XX (2010).
- [10] Davies C., Moss D. et O Hill M. (2004). Eunis habitat classification revised 2004, 310p.
- [11] Planque B., Loots C., Petitgas P., Lindstrom U. et Vaz S. (2011). Understanding what controls the spatial distribution of fish populations using a multi-model approach. *Fisheries Oceanography*, 20:1, 1-17.
- [12] Planque B., Bellier E. et Lazure P. (2007). Modelling potential spawning habitat of sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay. *Fisheries Oceanography*, 16:1, 16-30.

- [13] Ciannelli L., Fauchald P., Chan K.S., Agostini V.N. et Dingsor G.E. (2008). Spatial fisheries ecology: Recent progress and future prospects. *Journal of Marine Systems*, 71:223–236.
- [14] Loots C., Vaz S., Koubbi P., Planque B., Coppin F. et Verin Y. (2010). Inter-annual variability of North Sea plaice spawning habitat. *Journal of Sea Research*, 64, 427-435.
- [15] Perry R.I., Cury Ph., Brander K., Jennings S., Möllmann C. et Planque B. (2010). Sensitivity of marine systems to climate and fishing: Concepts, issues and management responses. *Journal of Marine Systems*, 79, 427-435.
- [16] Shumchenia E.J. et King J.W. (2010). Comparison of methods for integrating biological and physical data for marine habitat mapping and classification. *Continental Shelf Research*, 30, 1717-1729.
- [17] Hewit J.E., Thrush S.F., Legendre P., Funnell G.A., Ellis J. et Morrison M. (2004). Mapping of marine soft-sediment communities: integrated sampling for ecological interpretation. *Ecological Applications*, 14(4), 1203-1216.
- [18] Huret M., Struski C., Léger F., Petitgas P., Lazure P. et Sourisseau M. (2009). Modélisation couplée physique-biogéochimie du golfe de Gascogne sur la période 1971-2007. R.INT.DOP/EMH/ 2009-01
- [19] Planque B., Lazure P. et Jegou AM. (2006). Typology of hydrological structures modelled and observed over the Bay of Biscay shelf. *Scientia Marina*, 70S1: 43-50.
- [20] Saulquin B., Gohin F. et Garello R. (2011). Regional Objective Analysis for Merging High-Resolution MERIS, MODIS/Aqua, and SeaWiFS Chlorophyll-a Data From 1998 to 2008 on the European Atlantic Shelf, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 49, 143-154.
- [21] Planque B., Lazure P. et Jegou AM. (2004). Detecting hydrological landscapes over the Bay of Biscay continental shelf in spring. *Climate Research*, 28:41-52
- [22] Lazure, P. et Jégou, A. M. (1998). 3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes in the Bay of Biscay continental shelf. *Oceanologica Acta*, 21: 165–177.
- [23] Albaina A. et Irigoien X. (2007). Zooplankton communities and oceanographic structures in a high-resolution grid in the south-eastern corner of the Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 75, 433-446.
- [24] Zarauz L., Irigoien X. et Fernandez J.A. (2008). Modelling the influence of abiotic and biotic factors on plankton distribution in the Bay of Biscay, during three consecutive years (2004-06). *Journal of Plankton Research*, 30, 857-872.

[25] Lazure P. et Dumas F. (2008). An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*. 31: 233-250.

[26] Dussauze M. (2011). Utilisation du modèle ECO-MARS 3D pour évaluer le bon état écologique de la façade Manche-Atlantique au regard du descripteur 5 "Eutrophisation" de la DCSMM - Phase 2. Available online at: <http://archimer.ifremer.fr/doc/00061/17206/>

[27] Huret M., Sourisseau M., Petitgas P., Struski C., Léger F. et Lazure P. (2012). A multi-decadal hindcast of a physical-biogeochemical model and derived oceanographic indices in the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*. 10.1016/j.jmarsys.2012.02.009.