

MASTER 2

SPECIALITÉ
Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes Marins
(FOGEM)

Co-habilitation entre l'Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO) et l'Université des Sciences et Technologies de Lille – Lille 1 (USTL)

Année 2010-2011

Distribution spatiale du mésozooplancton en Manche orientale et au sud de la Mer du Nord en relation avec les paramètres hydrobiologiques durant l'hiver 2008.



Alice Delegrange

Encadrante : Dr Elvire Antajan

 Ifremer

Centre Manche-Mer du Nord
Boulogne-sur-Mer

REMERCIEMENTS

La première personne que je souhaite remercier est Elvire Antajan, de m'avoir permis de réaliser ce stage, de m'avoir encadrée tout au long de ces six mois. Merci Elvire d'avoir su répondre à mes questions et de m'avoir guidée durant ce stage. Merci aussi pour ta bonne humeur et ta patience surtout lors de la rédaction de ce rapport.

Je remercie Dominique Godefroy et Alain Lefebvre de m'avoir accueillie au laboratoire Environnement Ressources du Centre Manche Mer du Nord de l'Ifremer.

Je tiens aussi à remercier Christophe et Sandrine pour leur aide lors des analyses statistiques sous R. Merci Franck d'avoir débrouillé mes résultats sous Access.

Ensuite je remercie les Ifremeriennes notamment Marie et Sophie. Sans vous ça n'aurait pas été pareil... et les ifremeriens de la bibliothèque Axel, Gauthier, Rémi.

Et tout l'équipage de la *Thalassa* pour sa joie de vivre !!

Merci à Tacfa de m'avoir supportée six mois dans le même bureau. Allez maintenant tu peux le dire... je suis insupportable et Benoit qui était là pendant la rédaction.

Je remercie aussi les M1 du camping pour les petites soirées barbecue, fondue, pizzas et d'autres.

Merci aux amis de M2, Micky, JB, Adeline...

Aux ZB

Et merci Fabien de me soutenir quoi qu'il arrive...

PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL :

L'Ifremer est l'Institut Français pour l'Exploitation de la Mer. Il a été créé en 1984. Etablissement public à caractère industriel et commercial (EPOC), l'Ifremer est placé sous la tutelle conjointe des ministères chargés de la recherche, de l'agriculture et de la pêche, de l'équipement, des transports et du logement et de l'environnement. Ses missions sont : (i) connaître, évaluer et mettre en valeur les ressources des océans et de permettre leur exploitation durable, (ii) améliorer les méthodes de surveillance, de prévision d'évolution, de protection et de mise en valeur du milieu marin et côtier, (iii) favoriser le développement économique du monde maritime.

Pour atteindre ces objectifs, l'Ifremer concentre son action dans les domaines suivants :

- la recherche
- l'expertise d'intérêt public (surveillance de l'environnement littoral et contrôle de la qualité des produits de la mer)
- la mise à disposition de moyens (flotte océanographique et développement technologique)
- le transfert vers les entreprises et la valorisation de ses activités.

L'Ifremer participe activement aux travaux de l'Union Européenne ; il est aussi membre des organisations internationales dans son domaine de compétence et il contribue aux programmes internationaux de recherche.

Les travaux menés par le centre Manche Mer du Nord sont développés selon trois grands thèmes :

- le Laboratoire Environnement Ressources (LER) dont la principale mission est l'observation de la qualité des eaux et productions aquacoles du littoral. C'est au sein de ce laboratoire que ce stage d'est déroulé.
- le service Hydrodynamique et Océano-météo (Bassin d'essais) dépend du département Essais et Recherches Technologiques (ERT) et mène des recherches sur l'hydrodynamisme des engins sous-marins et les nouveaux concepts off-shore.
- Le laboratoire Ressources Halieutiques (RH) : le suivi de ces ressources permet de conseiller les partenaires régionaux, nationaux ou européens sur les activités de pêche en Mer du Nord et en Manche, au large et dans la bande côtière. Les principales espèces commerciales font l'objet d'évaluations annuelles. Les indicateurs obtenus peuvent être utilisés pour la régulation des pêcheries dans le cadre de gestions régionales et européennes. Il s'intéresse plus particulièrement à la gestion des pêcheries de la Manche et de la Mer du Nord, à la connaissance des pêcheries profondes de l'est Atlantique, à la mise en valeur de la mer côtière en Manche orientale et du sud de la Mer du Nord et l'étude des mécanismes de fonctionnement de ces écosystèmes.

Présentation de la structure d'accueil :

L'Ifremer est l'Institut Français pour l'Exploitation de la Mer. Il a été créé en 1984. Etablissement public à caractère industriel et commercial (EPOC), l'Ifremer est placé sous la tutelle conjointe des ministères chargés de la recherche, de l'agriculture et de la pêche, de l'équipement, des transports et du logement et de l'environnement. Ses missions sont : (i) connaître, évaluer et mettre en valeur les ressources des océans et de permettre leur exploitation durable, (ii) améliorer les méthodes de surveillance, de prévision d'évolution, de protection et de mise en valeur du milieu marin et côtier, (iii) favoriser le développement économique du monde maritime.

Pour atteindre ces objectifs, l'Ifremer concentre son action dans les domaines suivants :

- la recherche
- l'expertise d'intérêt public (surveillance de l'environnement littoral et contrôle de la qualité des produits de la mer)
- la mise à disposition de moyens (flotte océanographique et développement technologique)
- le transfert vers les entreprises et la valorisation de ses activités.

L'Ifremer participe activement aux travaux de l'Union Européenne ; il est aussi membre des organisations internationales dans son domaine de compétence et il contribue aux programmes internationaux de recherche.

Les travaux menés par le centre Manche Mer du Nord sont développés selon trois grands thèmes :

- le Laboratoire Environnement Ressources (LER) dont la principale mission est l'observation de la qualité des eaux et productions aquacoles du littoral. C'est au sein de ce laboratoire que ce stage d'est déroulé.
- le service Hydrodynamique et Océano-météo (Bassin d'essais) dépend du département Essais et Recherches Technologiques (ERT) et mène des recherches sur l'hydrodynamisme des engins sous-marins et les nouveaux concepts off-shore.
- Le laboratoire Ressources Halieutiques (RH) : le suivi de ces ressources permet de conseiller les partenaires régionaux, nationaux ou européens sur les activités de pêche en Mer du Nord et en Manche, au large et dans la bande côtière. Les principales espèces commerciales font l'objet d'évaluations annuelles. Les indicateurs obtenus peuvent être utilisés pour la régulation des pêcheries dans le cadre de gestions régionales et européennes. Il s'intéresse plus particulièrement à la gestion des pêcheries de la Manche et de la Mer du Nord, à la connaissance des pêcheries profondes de l'est Atlantique, à la mise en valeur de la mer côtière en Manche orientale et du sud de la Mer du Nord et l'étude des mécanismes de fonctionnement de ces écosystèmes.

SOMMAIRE

I.	Introduction	1
A	Importance du zooplancton dans les océans	1
B	Les méthodes d'étude du mésozooplancton	2
C	Contexte de l'étude et objectifs du stage	3
II.	Matériels et Méthodes	5
A	La zone d'étude	5
B	Collecte des échantillons	6
C	Traitement des échantillons mésozooplanctoniques	7
D	L'analyse des données	10
III.	Résultats	14
A	Les fichiers d'apprentissage	14
B	Les paramètres hydrologiques	17
C	Le phytoplancton et les ciliés	19
D	Le mésozooplancton	22
IV.	.Discussion	27
A	Les fichiers d'apprentissage	27
B	Les assemblages mésozooplanctoniques	29
V.	Conclusion	32

I. Introduction

A Importance du zooplancton dans les océans

Le zooplancton est défini comme l'ensemble des formes animales vivant en suspension dans la colonne d'eau sans mouvement propre suffisant pour lutter efficacement contre le mouvement des masses d'eau (Dussart 1964). Il existe deux grandes catégories d'organismes zooplanctoniques : le plancton permanent ou holoplancton composé des organismes dont tous les stades de vie (de l'œuf à l'adulte) sont planctoniques, ces organismes sont par exemple des copépodes, des flagellés hétérotrophes ou des ciliés. Et le plancton temporaire ou méroplancton dont seule une partie du cycle de vie se déroule à l'état planctonique. Le méroplancton comprend surtout des larves de crustacés ou de mollusques, des œufs et larves de poissons (ichthyoplancton) mais aussi des formes reproductrices d'organismes fixés comme par exemple certains cnidaires (Seguin & Braconnot 1997). Le zooplancton est composé d'organismes dont la taille peut varier de quelques nanomètres à quelques centimètres, à l'exception de certains siphonophores et méduses acalèphes qui peuvent dépasser un mètre. La plupart des phylums invertébrés sont représentés dans le zooplancton, regroupant environ 36 000 espèces (Lenz 2000). Le zooplancton joue un rôle primordial dans le maintien de l'équilibre des différents écosystèmes marins. Son rôle charnière entre la production primaire et les niveaux trophiques plus élevés (figure 1) est maintenant clairement démontré (Banse 1995, Lenz 2000, Stibor *et al.* 2004). D'un point de vue économique et de par ce rôle charnière, le zooplancton a une grande importance parce que c'est l'aliment de beaucoup de larves de poissons et aussi de certains poissons adultes que nous consommons (Heath 2007).

D'autre part un grand nombre d'espèces du zooplancton ont une durée de vie relativement courte et peuvent avoir des taux de croissance élevés les rendant particulièrement

sensibles aux perturbations environnementales (ponctuelles ou à long terme). Cela se traduit par des modifications de l'abondance, de la structure et de la répartition spatiale des communautés zooplanctoniques. Du fait de ces caractéristiques, le zooplancton est un excellent indicateur biologique des changements de l'environnement comme l'effet du réchauffement global (Beaugrand *et al.* 2002 et 2003, Beaugrand & Reid 2003, Bonnet & Frid 2004), ainsi que les effets anthropiques liés à la surpêche et à la pollution (Richardson *et al.* 2009, Gucu 2002).

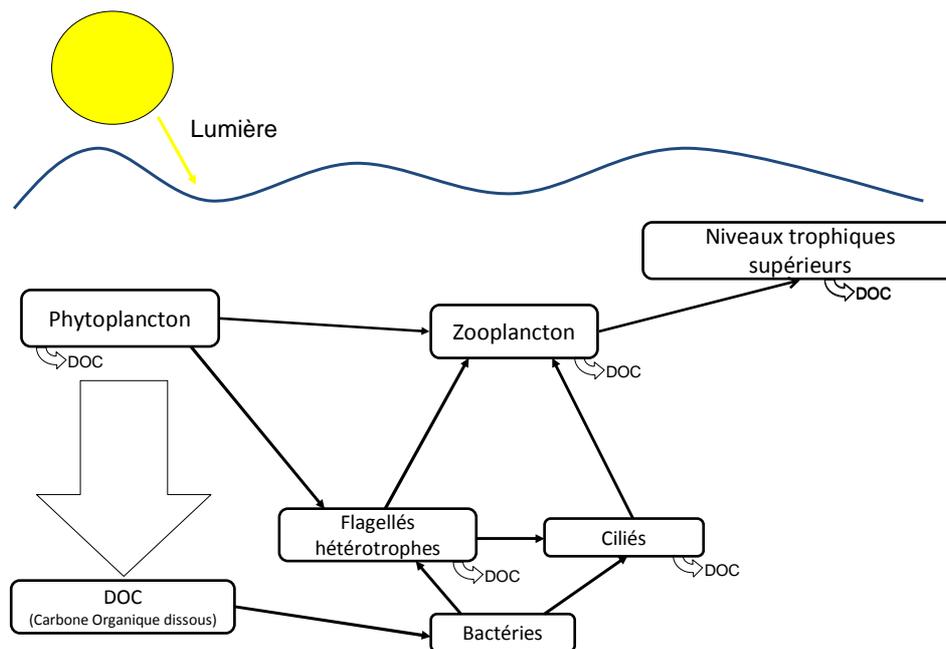


Figure 1 : Représentation des premiers niveaux trophiques océaniques (Adapté de Redden *et al.* 2009).

B Les méthodes d'étude du mésozooplancton

Traditionnellement, le mésozooplancton (regroupant les individus dont la taille est comprise entre 0,2 et 20 mm) est collecté en mer à l'aide de filets à plancton. Ensuite, les études menées sur les échantillons ont pour but l'identification taxonomique, l'estimation de la distribution spatiale, de l'abondance et parfois de la distribution de taille ou de la biomasse des organismes. Pour ce faire, la méthode la plus répandue et la plus ancienne est l'observation visuelle à la binoculaire qui permet l'identification taxonomique précise, le dénombrement et la mesure de la taille des organismes zooplanctoniques. Cependant c'est une méthode qui demande beaucoup de temps et des connaissances poussées en taxonomie du zooplancton. En raison de la durée du traitement et du manque d'experts en

taxonomie, cette méthode n'est pas satisfaisante pour le traitement d'un grand nombre d'échantillons (Benfield *et al.* 2007).

L'analyse d'image est considérée comme une alternative possible à l'analyse sous loupe binoculaire pour permettre le comptage rapide, exhaustif, non destructeur et automatisé d'échantillons fixés de mésozooplancton (Grosjean *et al.* 2004, Gorsky *et al.* 2010). Afin d'accélérer le traitement des échantillons et ainsi améliorer la résolution spatiale et/ou temporelle des études zooplanctoniques, des systèmes d'imagerie numérique ont été mis au point. C'est dans ce contexte que le ZooScan a été développé au Laboratoire Océanographique de Villefranche-sur-Mer (www.zooscan.com). Basé sur le principe de la reconnaissance automatique des objets à partir de l'analyse d'image, il permet d'obtenir plus rapidement que le traitement visuel classique et plus précisément que les compteurs optiques tels que le *Laser Optical Plankton Counter* qui comptent et mesurent les particules présentes dans un échantillon qu'elles soient vivantes ou non (Schultes & Lopes 2009), des informations quant à la composition taxonomique et la taille des organismes d'un échantillon fixé de zooplancton (Grosjean *et al.* 2004). L'utilisation de l'analyse d'image pour le traitement des échantillons est donc un bon compromis entre la résolution d'une étude, la précision de la détermination des organismes et le temps passé au laboratoire.

C Contexte de l'étude et objectifs du stage

La France participe depuis 1976 au programme *International Bottom Trawl Survey* (IBTS ou campagne internationale au chalut de fond) qui permet d'estimer l'abondance et la distribution spatiale des principales espèces de poissons commerciaux exploitées en Mer du Nord (merlan, morue, églefin, tacaud norvégien, hareng, sprat, maquereau et plie). Ces campagnes sont organisées sous l'égide du CIEM (Conseil International pour l'Exploitation de la Mer) auquel participent outre la France, les Pays-Bas, l'Allemagne, le Danemark, la Suède, la Norvège, l'Ecosse et l'Angleterre. La zone d'échantillonnage allouée à la France concerne la moitié sud de la Mer du Nord et depuis 2007, la Manche orientale. En effet, dans les évaluations de la plupart des stocks de poissons, et notamment celui du hareng, la Manche orientale est associée à la Mer du Nord, les interactions et les échanges entre ces deux bassins étant importants (IBTSWG 2010).

Afin de valoriser le temps passé en mer et d'intégrer la gestion des pêches dans une approche écosystémique, d'autres études sont menées en parallèle par l'Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) pendant les campagnes IBTS hivernales : la caractérisation des zones et habitats de ponte des poissons, la distribution spatiale de l'ichtyoplancton (larves de poissons) et l'étude des assemblages d'invertébrés benthiques. Enfin, depuis 2008, en plus de la température et de la salinité, d'autres paramètres hydrologiques (sels nutritifs, oxygène, pH...) et biologiques (chlorophylle a, phytoplancton et zooplancton) sont également collectés afin de mieux caractériser les conditions environnementales hivernales de la zone prospectée (Vérin 2011).

Dans ce contexte, le but de ce travail est de mettre au point et d'utiliser un protocole d'analyse des échantillons mésozooplanctoniques collectés pendant les campagnes IBTS par le biais du ZooScan et d'initier par son application des recherches sur la distribution spatiale du mésozooplancton en Manche orientale et au sud de la Mer du Nord. La caractérisation de la composition et de la répartition des espèces mésozooplanctoniques en Manche et Mer du Nord s'inscrit également dans le cadre du projet Interreg IVA – CHARM III (*Channel integrated Approach for marine Resource Management*), qui a pour but d'avoir une approche écosystémique de la gestion des ressources marines en Manche et au sud de la Mer du Nord.

En réalité, l'objectif de ce travail est triple :

- 1- Réaliser un fichier d'apprentissage spécifique raisonnablement détaillé et optimisé à la série d'échantillons des campagnes IBTS afin de permettre une reconnaissance automatique des taxa avec un taux d'erreur acceptable (moins de 20% d'erreur).
- 2- Utiliser les techniques d'analyse d'image et ce fichier d'apprentissage pour identifier, caractériser et cartographier la distribution des communautés mésozooplanctoniques en Manche orientale et au sud de la Mer du Nord.
- 3- Analyser les relations entre la distribution des assemblages mésozooplanctoniques identifiés et celles des assemblages phytoplanctoniques et des paramètres hydrobiologiques également collectés lors des campagnes IBTS.

II. Matériels et Méthodes

A La zone d'étude

La Manche orientale et le sud de la Mer du Nord (figure 2) constituent une des zones où le trafic maritime est le plus intense du monde. C'est aussi un secteur très riche pour la pêche professionnelle car on y trouve de nombreuses espèces commerciales, des zones de nurseries et de frayères (pente) et des voies de migration, liées à des conditions environnementales caractéristiques (Carpentier *et al.* 2009).

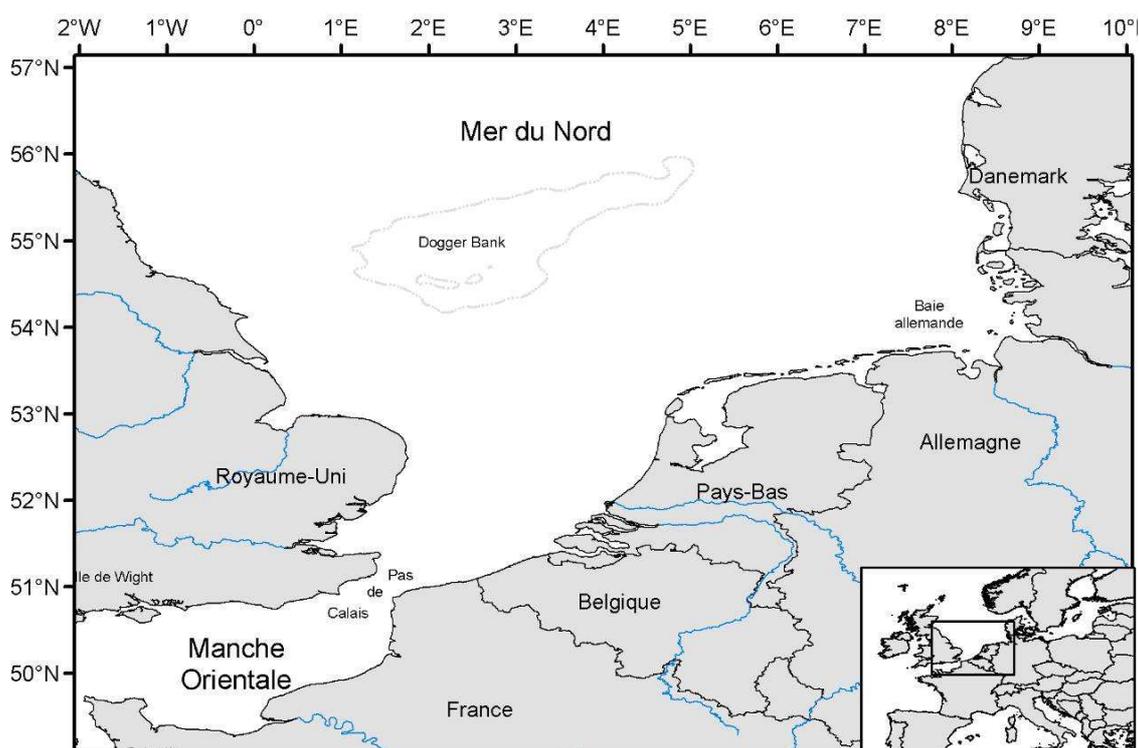


Figure 2 : Carte de la Manche orientale et du sud de la Mer du Nord. En gris : le Dogger Bank qui constitue la limite Nord de la zone d'étude et en bleu : les principaux fleuves européens débouchant en Manche orientale et en Mer du Nord)

La Manche orientale est une mer épicontinentale, qui s'étend de la Baie de Seine jusqu'au détroit du Pas-de-Calais. Sa physionomie en « entonnoir » (goulet d'étranglement) présente une largeur de plus de 100 km sur sa limite Ouest jusqu'à 35 km au niveau du détroit. La Manche orientale est soumise à un fort hydrodynamisme et à un régime marégraphique de type mégatidal (Anonyme 1988) avec un marnage pouvant atteindre 8 m en vives-eaux pour des fonds côtiers ne dépassant pas 50 m. Les courants instantanés induits par la marée y sont très forts, de l'ordre de 120 à 150 cm.s^{-1} en vives-eaux. Ces courants de marée sont alternatifs (courant de flot portant vers le Nord-est, et courant de jusant vers le Sud-ouest) et parallèles aux côtes (Brylinski 1993). Il en résulte une dérive résiduelle vers la Mer du Nord d'une vitesse de 2,7 milles par jour (Salomon & Breton 1993).

Concrètement, il faut 2 à 4 mois à une masse d'eau passant au centre de la Manche pour arriver dans le détroit du Pas-de-Calais (Guéguéniat *et al.* 1993).

Le sud de la Mer du Nord s'étend du détroit du Pas-de-Calais au Sud-ouest à la baie allemande à l'Est et au Dogger Bank au Nord. Par sa situation géographique il bénéficie d'apports d'eau variés : les eaux atlantiques salées pénètrent par le Nord et par le Sud-est via la Manche et le détroit du Pas-de-Calais, elle est en connexion avec les eaux saumâtres de la Mer Baltique et reçoit une grande quantité d'eau douce par les grands fleuves européens comme par exemple le Rhin, l'Escaut et la Tamise.

La configuration (bathymétrie, trait de côte,...) de la Manche orientale et du sud de la Mer du Nord contribue à la création de structures particulières (fronts, gyres,...) qui vont contrôler l'advection, la dispersion des organismes vivants mais aussi des polluants, etc. Une connaissance approfondie de cette zone maritime est donc nécessaire afin de préserver ce fragile écosystème qui est soumis à de fortes pressions anthropiques (Otto *et al.* 1990).

B Collecte des échantillons

Les échantillons de mésozooplancton ont été collectés lors de la campagne IBTS 2008 qui s'est déroulée du 27 janvier au 21 février 2008 à bord du Navire Océanographique *Thalassa* (figure 3A). Le choix des stations est fixé par la localisation des traits de chalut le jour et des filets à larves (filet Method Isaac Kid - MIK) la nuit. Des rectangles statistiques mesurant un degré de longitude sur un demi degré de latitude, ce qui correspond à environ 30x30 miles nautiques, ont été définis par le CIEM. Dans chaque rectangle, deux traits de MIK et un trait de chalut sont effectués et il faut que chaque trait (MIK ou chalut) soit distant d'au minimum 10 milles d'un autre trait (IBTSWG 2010) (figure 3B).

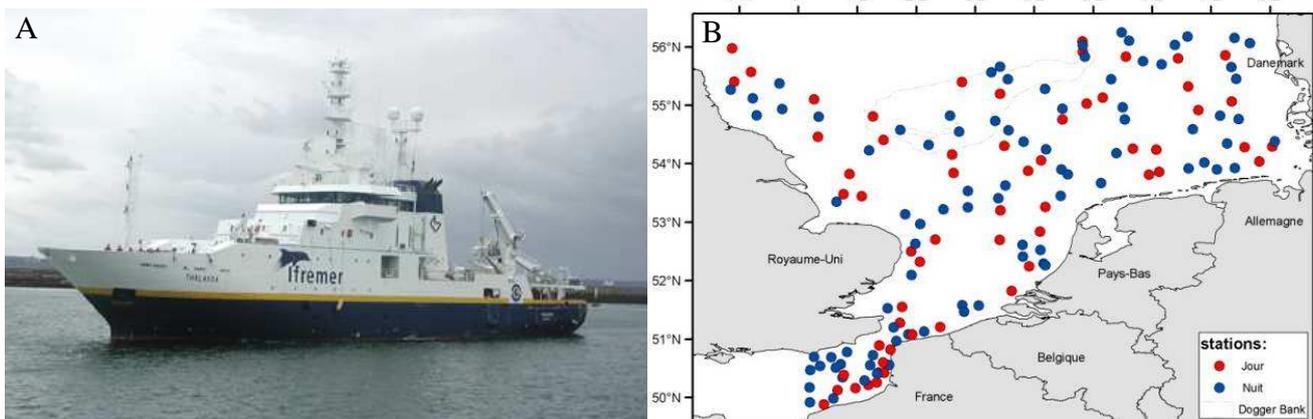


Figure 3 : A : Le Navire Océanographique *Thalassa*, B : carte des stations de prélèvement de jour (Chalut) et de nuit (MIK) de la campagne hivernale IBTS 2008.

Les prélèvements mésozooplanctoniques ont été collectés à l'aide d'un filet à plancton de type WP2 (ouverture 0,25 m², hauteur 261 cm, cylindro-conique, vide de maille 200 µm – Tranter & Smith 1968). Le filet est descendu de manière oblique jusqu'à environ trois mètres au dessus du fond puis est ramené à la surface à une vitesse de 1 m.s⁻¹. Un

volucompteur est attaché à l'entrée du filet WP2 afin de connaître précisément le volume d'eau filtré. Les échantillons ont été fixés et conservés dans une solution à 1% de formol (Mastail & Bataglia 1978). En tout, 147 échantillons mésozooplanctoniques ont été collectés en 2008.

En plus des prélèvements de mésozooplancton, la salinité et la température ont été mesurés en continu, et de l'eau a été prélevée à l'aide d'une bouteille Niskin à chaque station afin d'identifier et de dénombrer le phytoplancton, et de mesurer les concentrations de matière en suspension (organique et minérale), chlorophylle a, phéopigments, ammonium (NH_4^+), nitrates (NO_3^{2-}), nitrites (NO_2^-), phosphates (PO_4^-), et silicates (SiOH). Ces échantillons hydrobiologiques ont été analysés au retour de la mission par le Laboratoire Environnement littoral et Ressources aquacoles du centre Ifremer de Boulogne-sur-Mer. Au cours de ce stage, les données ont été validées dans une base de données Access et cartographiées afin de servir de support à l'interprétation de la distribution du mésozooplancton.

C Traitement des échantillons mésozooplanctoniques

1 Description du ZooScan

Le ZooScan est un scanner protégé dans une cuve étanche et piloté par ordinateur qui permet l'acquisition d'images haute résolution de 2400 dpi (*dot per inch* = points par pouce, soit 10,56 μm par pixel) et 256 000 niveaux de gris (16 bits), d'échantillons de zooplancton en milieu liquide. Les images ainsi acquises sont traitées numériquement par le programme *ZooProcess* fonctionnant à partir du logiciel ImageJ. Le traitement numérique des images obtenues avec le ZooScan permet d'énumérer et d'individualiser les particules de l'image scannée (dite 'brute'), et de mesurer automatiquement 51 paramètres représentant des attributs de taille, de niveaux de gris, de forme et de texture (annexe 1) sur chacune des particules. Une vignette individuelle de chaque particule ainsi qu'un fichier contenant tous les paramètres de chaque particule sont sauvegardés et référencés dans un répertoire correspondant à l'échantillon analysé. Les données recueillies pour chaque particule de chaque image brute serviront à élaborer les procédures d'apprentissage supervisé et l'identification automatique d'objets numérisés dans le programme *Plankton Identifier*. Un des avantages de cette technique d'imagerie est qu'elle permet de stocker des images et des échantillons numérisés dans des bases de données susceptibles d'être partagées et conservées à très long terme sans risque de perte et de dégradation de l'information (Warembourg 2005).

Le Zooscan est un appareil inventé et développé par l'équipe du Dr Gorsky au Laboratoire Océanologique de Villefranche-sur-mer (LOV) et breveté par le CNRS (Centre National de Recherche Scientifique) et l'UPMC (Université Pierre et Marie Curie). Le programme *ZooProcess* (www.zooscan.com) est développé par Marc Picheral, l'ingénieur du LOV et l'interface *Plankton Identifier* (http://www.obs-vlfr.fr/~gaspari/Plankton_Identifier/) est développée par les Drs Stephane Gasparini (LOV) et Elvire Antajan (Ifremer).

2 Préparation des échantillons et utilisation du ZooScan

Au laboratoire et avant toute manipulation les échantillons ont été rincés à l'eau douce afin d'éliminer toute trace de formol. Ensuite la concentration des organismes diminuant lorsque leur taille augmente et pour permettre une bonne représentation des organismes de grande taille dans les images, chaque échantillon a été divisé en deux fractions à l'aide d'un tamis de 500 µm de vide de maille :

- Fraction A, contenant les objets de taille comprise entre 200 et 500 µm
- Fraction B, contenant les objets de taille supérieure à 500 µm.

Pour que la séparation des objets sur la cellule du ZooScan de 11 x 24 cm soit possible et éviter le chevauchement des objets, il faut que les fractions scannées contiennent environ 1500 organismes pour la fraction A et 500 à 800 organismes pour la fraction B (Grosjean *et al.* 2004 et Warembourg 2005). Chaque fraction a donc été divisée au besoin à l'aide d'une boîte de Motoda (Motoda 1959). Les sous-fractions (A et B) obtenues ont ensuite été scannées. Les différentes étapes de l'acquisition et du traitement des images sont résumées dans la figure 4. Chaque jour, un blanc a été scanné afin de permettre un traitement optimal des images des échantillons obtenues (Picheral 2009). Une fois l'échantillon scanné, il est récupéré, reconditionné et formolé en vue de son archivage.

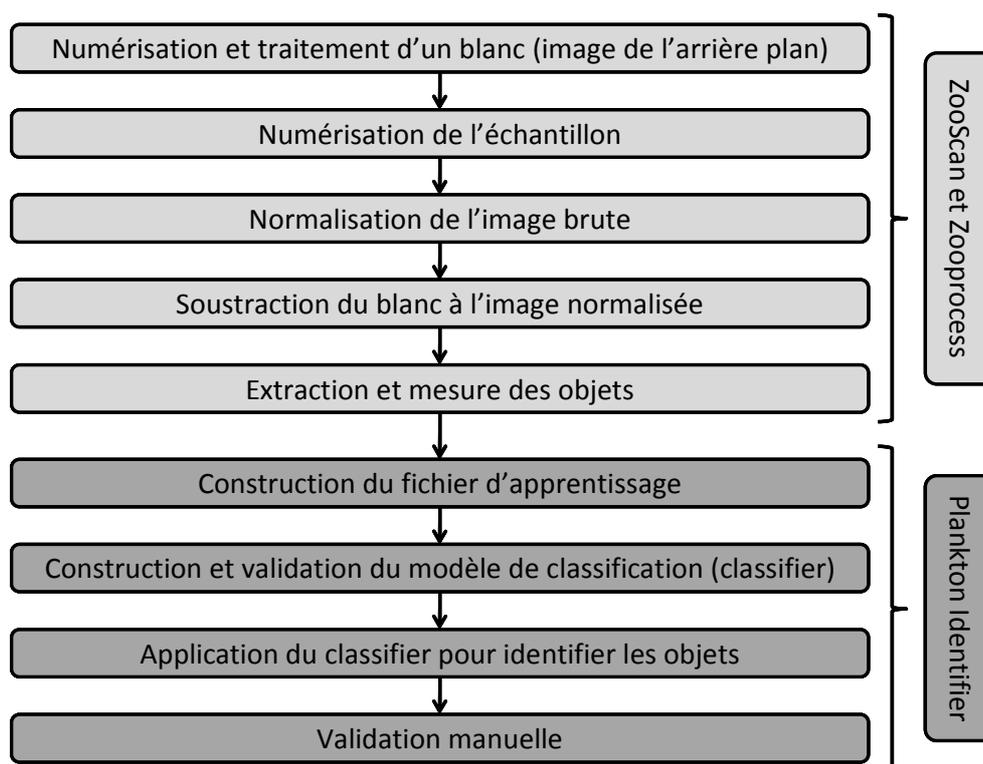


Figure 4 : les étapes de l'acquisition et du traitement des images à l'aide du ZooScan et de sa suite de logiciels (Adapté de Gorsky *et al.* 2010).

3 Le fichier d'apprentissage

Les méthodes d'apprentissage supervisé ont besoin d'un sous ensemble d'objets déjà identifiés par un expert (fichier d'apprentissage) pour produire un modèle de classification (ou classifieur). À l'aide du logiciel *Plankton Identifier*, des vignettes peuvent être triées manuellement en différents groupes taxonomiques. Ces groupes sont définis par le manipulateur mais aussi selon l'identification la plus précise possible qui peut être faite sur les vignettes. Le fichier d'apprentissage proprement dit est alors créé, il contient les paramètres mesurés sur chaque objet retenu ainsi que l'identification qui en a été faite. La méthode d'apprentissage supervisé choisie pour construire le classifieur est la méthode *Random Forest* (ou forêt aléatoire – Breiman 2001) basée sur le principe des arbres de décision car c'est la méthode qui donne les meilleurs résultats pour l'étude des échantillons de zooplancton (Gorsky *et al.* 2010, Lelièvre 2010). Cette méthode construit une 'forêt' d'arbres de décision pour lesquels la variable discriminante à chaque nœud de l'arbre est choisie parmi un sous-ensemble aléatoire de toutes les variables (les 51 paramètres mesurés par *ZooProcess*) afin d'introduire une variation aléatoire dans chaque arbre décisionnel (Reid 2004). La taille du sous-ensemble est un paramètre de l'algorithme, elle correspond à la partie entière de $\log_2(J) + 1$ où J est le nombre total de variables. Lorsque l'ensemble des arbres est créé (100 par défaut dans *Plankton Identifier*), chacun étant capable de produire une réponse (classe d'appartenance) lorsqu'on lui présente les paramètres décrivant un individu, le choix de la classe définitive d'appartenance correspond à la réponse la plus fréquente.

La performance du classifieur est testée selon la procédure de validation croisée. Dans cette procédure le fichier d'apprentissage est divisé aléatoirement en deux sous-fichiers de tailles égales. Le premier est utilisé pour l'élaboration du classifieur qui est alors testé sur le deuxième fichier, puis inversement, le deuxième est utilisé pour l'apprentissage et testé sur le premier fichier. Les deux matrices de confusion sont rassemblées en une seule qui est alors analysée. Ainsi, dans la validation croisée, tous les individus du fichier d'apprentissage ont à la fois servi d'apprentissage et de test mais jamais simultanément, ce qui permet d'avoir une estimation non biaisée des performances du classifieur. Pour plus de robustesse, cette procédure est répétée cinq fois avec *Plankton Identifier* et la matrice de confusion finale représente la somme des cinq matrices de confusion produites. À partir de la matrice de confusion obtenue, deux indices importants ont été calculés (annexe 2) :

- le taux de bonne reconnaissance des objets (ou taux de vrais positifs) : nombre d'objets correctement identifiés dans une classe du fichier d'apprentissage divisé par le nombre d'objets de cette classe.
- L'imprécision de l'identification (ou taux de faux positifs) : nombre d'objets incorrectement identifiés dans une classe prédite divisé par le nombre d'objets qui ont été identifiés comme appartenant à cette classe.

Une fois le fichier d'apprentissage terminé et le classifieur validé, le logiciel *Plankton Identifier* a permis d'effectuer une prédiction du groupe d'appartenance de chaque objet contenu dans chaque échantillon scanné. Ensuite, les prédictions ont été validées et au besoin corrigées manuellement afin d'obtenir un classement le plus juste possible d'où le terme d'identification 'semi-automatique' parfois utilisé (Gorsky *et al.* 2010, Lelièvre 2010). Pour chaque échantillon (station), deux fichiers indiquant le classement des objets et leurs caractéristiques morphométriques ont donc été obtenus : un pour la fraction A (200-500 µm) et l'autre pour la fraction B (>500 µm).

4 Le calcul des abondances

Avant tout calcul d'abondance, les objets identifiés comme multiples ont été identifiés visuellement afin de prendre en compte tous les organismes scannés. Ensuite, l'abondance de chaque taxon à chaque station a été calculée comme suit :

- Le volume filtré (V en m^3) par le filet WP2 a été calculé selon la formule (1) avec T le nombre de tours du volucompteur, C le facteur de conversion communiqué par le fabricant du volucompteur (ici $C=0,3$) et D le diamètre du filet ($D=0.57$ m).

$$(1) V = T \times 0,3 \times \left[\pi \times \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right]$$

- L'abondance (Ab en individus par m^3) peut être calculée avec la formule (2) où N est le nombre d'individus identifiés et F la fraction de l'échantillon scannée.

$$(2) Ab = \left(\frac{N_A}{F_A} + \frac{N_B}{F_B} \right) \times V$$

D L'analyse des données

1 La cartographie.

Les paramètres physicochimiques ont été cartographiés grâce aux géostatistiques (Vaz *et al.* 2005) à l'aide du logiciel *GenStat* (*GenStat* version 7.1 2004). Elles permettent notamment l'estimation d'une variable donnée en des points non échantillonnés. La première étape est la constitution du variogramme (figure 5). Le variogramme est une fonction qui mesure la variance entre les observations prises deux à deux en fonction de la distance et de la direction qui les sépare. Lorsqu'une variable présente une structure spatiale, la variance augmente généralement de façon monotonique avec la distance jusqu'à se stabiliser à un palier correspondant à une variance maximale. La distance de séparation entre les stations à laquelle le palier est atteint marque la limite de la dépendance spatiale et est appelée la portée. Généralement, le variogramme a une intersection positive avec l'axe des ordonnées qui est appelée la pépité. Cela peut provenir d'erreurs de mesures mais le plus souvent, cela découle de l'existence de variations à une échelle plus petite que le pas d'échantillonnage. Parfois, le variogramme peut être totalement plat. Il est alors appelé pure pépité et montre l'absence de structure

spatiale ou du moins qu'à l'échelle de l'étude aucune structure spatiale n'est observée. La majorité des variogrammes ont des formes simples qui peuvent être décrite par des modèles simples. Ces modèles doivent rendre compte des principales caractéristiques du variogramme : la pépité, la portée, le palier et la forme de l'accroissement monotonique. L'ajustement du modèle au variogramme se fait par une méthode statistique d'approximation et le modèle choisi doit être celui ayant le meilleur ajustement statistique et visuel.

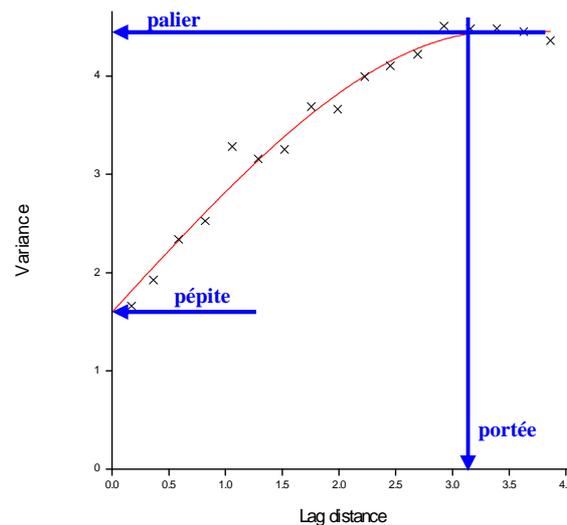


Figure 5 : Le variogramme, ses paramètres (en bleu) et l'ajustement du modèle (en rouge).

Le modèle du variogramme et les paramètres qui lui sont propres (la pépité, la portée, le palier et la forme de l'accroissement monotonique) sont essentiels pour réaliser le krigeage. Le krigeage est une méthode d'interpolation produisant des valeurs estimées optimales en prenant compte la façon dont la variable varie dans l'espace pour prédire sa valeur à des points non échantillonnés et qui pourront être cartographiés. C'est une méthode de moyenne pondérée basée sur le modèle du variogramme de la variation spatiale. Les poids des observations sont dérivés à partir du variogramme de façon à minimiser l'erreur d'estimation. Généralement, les observations les plus proches de la valeur estimée ont un poids plus grand et celles les plus éloignées un poids faible (Vaz *et al.* 2005).

Les grilles de points obtenues sous *GenStat* ont été importées dans le logiciel *ArcMap* (ESRI) et à nouveau interpolées à l'aide de l'extension *Spatial Analyst* de façon à créer un raster continu de 0,09 degrés décimaux de résolution (Martin *et al.* 2007).

La température et la salinité étant mesurées en continu à bord du bateau (toutes les 15 secondes), les valeurs ont été moyennées sur 30 minutes, et placées aux coordonnées moyennes de la position du bateau lors de ces 30 minutes. Pour les autres paramètres (sels nutritifs, pigments chlorophylliens et matière en suspension), les données proviennent de l'analyse des échantillons prélevés aux stations d'échantillonnage.

2 Le zooplancton et le phytoplacton

Tous les traitements statistiques concernant le zooplancton ont été réalisés à l'aide du logiciel *R* (R development core team 2003).

Afin de classer les stations et de caractériser les groupements obtenus par les taxons les plus représentatifs, une Analyse en Composantes Principales (ACP) non normée (*i.e.* centrée et non réduite) suivie d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les principales composantes de l'ACP ont été réalisées. Pour cela, les données d'abondances des différents taxons ont été log-transformées ($\log_{10}(x+1)$) afin de diminuer l'asymétrie de la distribution, puis centrées en soustrayant la moyenne de l'abondance de chaque taxon dans la zone d'étude. Cela revient à placer l'origine de la distribution des stations à zéro.

L'applicabilité de l'ACP a été testée à l'aide d'une Analyse des Correspondances Détendancée (ACD). Cette analyse mesure la longueur des gradients et permet de caractériser les relations entre les abondances des différents taxons. Si la longueur du gradient est inférieure à 3 SD (Standard Deviation), alors la réponse linéaire semble la plus adéquate et une ACP pourra être utilisée. Si la longueur du gradient est supérieure à 4 SD, on postule que les taxons ont un préferendum, le modèle unimodal devient une bonne approximation et on s'orientera plutôt vers une analyse factorielle ou canonique des correspondances (AFC ou CCA). L'ACD a été réalisée avec le logiciel *CANOCO* et a montré que la longueur des gradients obtenus sur nos données était comprise entre 1,3 et 2,8 sur les quatre premiers axes de l'ACD. L'utilisation de l'ACP se trouve donc tout à fait justifiée dans notre cas.

Dans le cadre de cette étude, le choix de l'ACP présente l'avantage de donner de l'importance aux abondances totales plutôt qu'aux profils des stations, c'est-à-dire à l'abondance relative comme dans une AFC. Ainsi l'abondance totale devient une caractéristique propre à chaque station. L'ACP non normée donne du poids aux taxons présentant de fortes variances entre les stations, permettant de caractériser les différents groupes par la présence ou non de certains taxons (Champely 2005).

La CAH a été réalisée sur l'ensemble des stations, décrites non plus par les abondances des différents taxons mais par leurs coordonnées sur les principales composantes de l'ACP expliquant au moins 70 à 80% de l'inertie totale. Le fait d'abandonner les dernières composantes revient à lisser les données en éliminant les fluctuations aléatoires, ce qui en général améliore la partition en produisant des classes plus homogènes (Lebart *et al.* 2004). La métrique qui a été utilisée pour la CAH est la distance euclidienne (car c'est aussi celle de l'ACP) et le critère d'agrégation qui a été utilisé est le critère de Ward qui consiste à agréger les individus qui font le moins varier l'inertie intra-classe (Legendre & Legendre 1998, Lebart *et al.* 2004). L'algorithme procède par agrégations successives, partant de la partition la plus fragmentaire, une classe par station, jusqu'à la partition triviale, le regroupement de toutes les stations dans une et une seule classe.

Le nombre de groupes significatifs a été déterminé à l'aide de la corrélation de Spearman. Cette technique consiste à comparer la matrice originale des distances à la matrice binaire calculée à partir de la section du dendrogramme aux différents niveaux de partition. C'est le niveau de partition auquel la corrélation entre les deux est la plus grande qui est retenu (Brocard *et al.* 2011).

La caractérisation des classes a été faite en calculant la valeur indicatrice (*IndVal*) de Dufresne & Legendre (1997) pour chaque taxon de chaque classe retenue. L'indice *IndVal* tient compte à la fois de l'abondance moyenne d'un taxon et de sa fréquence dans une classe donnée. Il se calcule selon la formule (3) suivante pour une espèce *i* dans une classe *j* :

$$(3) \text{IndVal}_{ij} = A_{ij} \times B_{ij}$$

où

$$(4) A_{ij} = \frac{\text{nombre d'individus}_{ij}}{\text{nombre d'individus}_i}$$

et

$$(5) B_{ij} = \frac{\text{nombre de sites}_{ij}}{\text{nombre de sites}_j}$$

Un grand *IndVal* d'un taxon dans une classe donné traduit la combinaison entre une fréquence relative (A_{ij}) importante de ce taxon dans cette classe (spécificité) et une présence de ce taxon dans la majorité des stations de la classe (B_{ij}) (fidélité).

III. Résultats

A Les fichiers d'apprentissage

La distribution des objets dans les fichiers d'apprentissage des fractions A (200-500 μm) et B (>500 μm) est présentée figures 6A et 7A. Le fichier d'apprentissage de la fraction A est composé de 4452 vignettes triées en 26 groupes et celui de la fraction B est composé de 6510 objets classés dans 52 groupes. Les taux de reconnaissance et d'imprécision obtenus pour chacun de ces groupes sont présentés figures 6B et 7B.

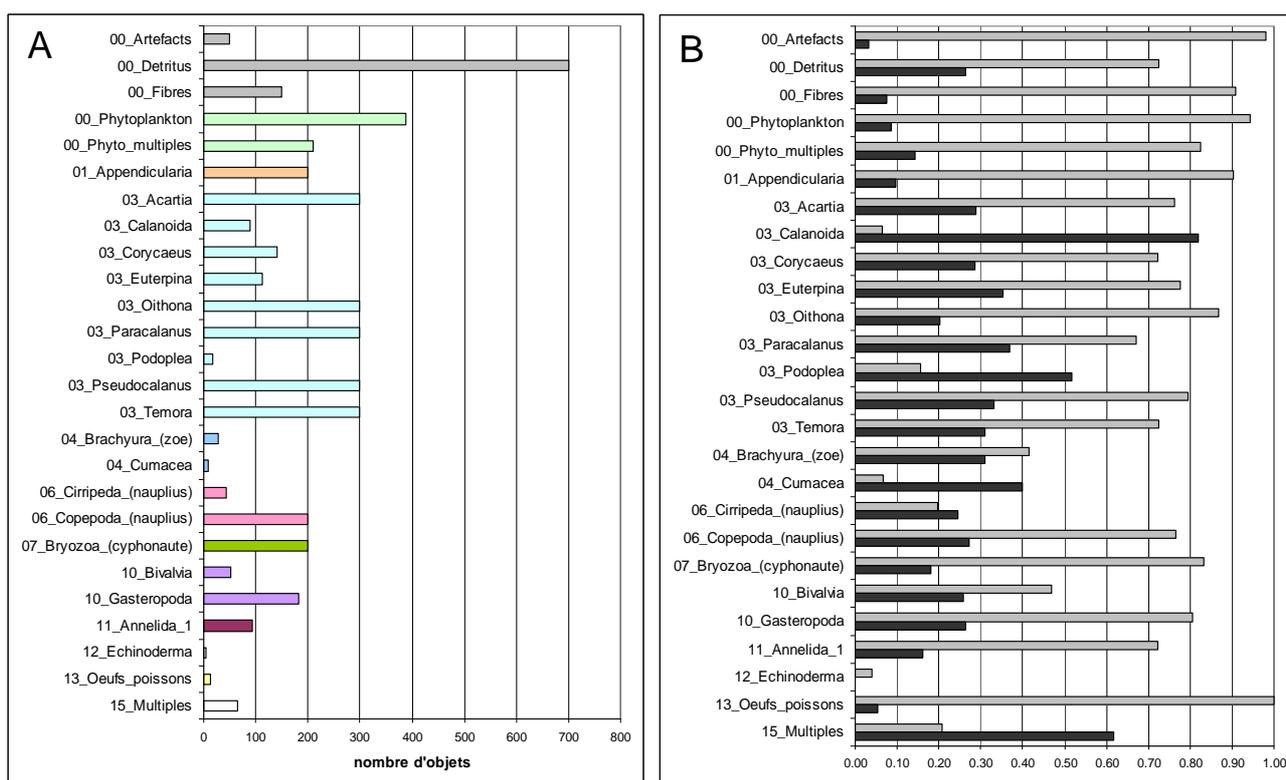


Figure 6 : A : composition du fichier d'apprentissage de la fraction A (200-500 μm), B : taux de bonne reconnaissance (en gris) et d'imprécision (en noir).

Les détritiques ont été répartis en quatre groupes (artefacts, détritiques, bulles et fibres) pour permettre d'améliorer leur reconnaissance tout en diminuant la confusion avec d'autres groupes. Les **détritiques** sont dans l'ensemble bien identifiés (80 à 85%) pour une imprécision inférieure à 20%. La plus grande confusion venant du groupe 'détritiques' qui est aussi le plus diversifié en forme, taille et niveaux de gris. Les deux groupes '**phytoplancton**' regroupent les cellules de *Coscinodiscus* spp. (isolées ou en multiples de deux ou trois) qui étaient parfois très abondantes dans nos échantillons, en particulier dans la fraction A. Ce groupe ne pose pas de problème d'identification (90 à 95%) et les confusions se font surtout avec le groupe des 'détritiques' (voir le détail des matrices de confusion en annexe 2). Les **appendiculaires** ont un taux de bonne reconnaissance de 85 à 90% selon la fraction. Bien que les deux genres *Oikopleura* sp. et *Fritillaria* sp. aient

été observés dans les échantillons, ils n'ont pas été traités séparément dans ce travail préliminaire.

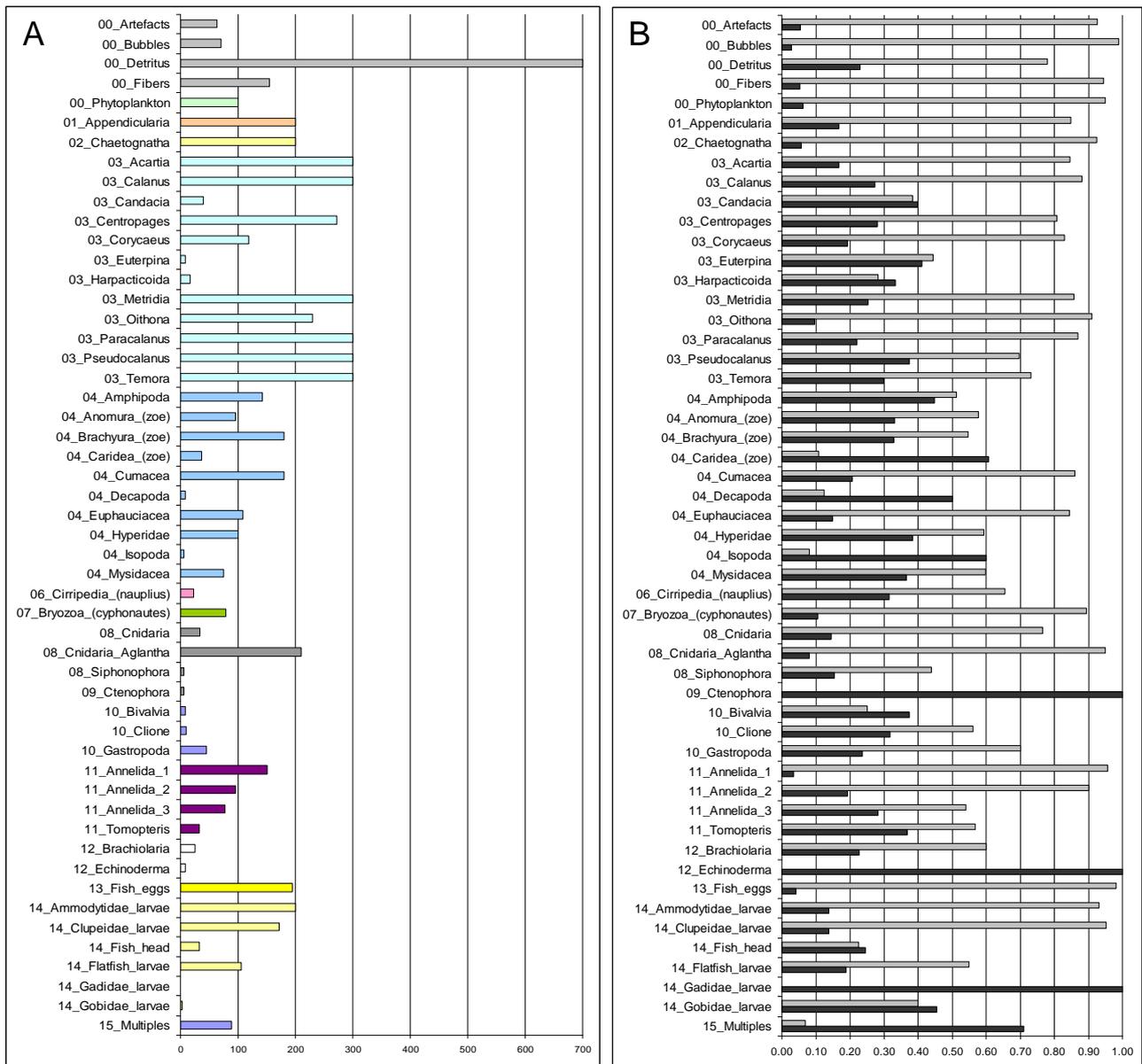


Figure 7 : A : composition du fichier d'apprentissage des grands objets, B : taux de vrais positifs en gris et d'imprécision (faux positifs) en noir.

Les **chaetognathes** ne sont représentés que dans la fraction B et ont un taux de bonne reconnaissance de 92% pour une imprécision inférieure à 6%.

Les **copépodes**, qui étaient le groupe mésozooplanctonique le plus abondant dans nos échantillons, sont dans l'ensemble bien identifiés par le classifieur (>95%). Huit genres de copépodes calanoides (*Acartia*, *Calanus*, *Candacia*, *Centropages*, *Metridia*, *Paracalanus*, *Pseudocalanus* et *Temora*), deux genres de copépodes cyclopoïdes (*Corycaeus* et *Oithona*) et une espèce de copépode harpacticoïde (*Euterpina acutifrons*) ont été identifiés. Même si beaucoup de confusion existe entre ces groupes, certains étaient suffisamment bien représentés dans les fichiers d'apprentissage pour permettre des taux

de bonne reconnaissance > 80%, notamment dans la fraction B. En effet dans la fraction A, qui regroupe surtout les stades copépodites, les confusions entre certains genres (notamment *Paracalanus* et *Pseudocalanus*) étaient plus importantes. L'identification visuelle des images n'a pas toujours permis de trancher entre deux genres, dans ce cas le copépode a été identifié au niveau taxonomique supérieur qui pouvait lui être attribué avec certitude (Calanoida, Cyclopoida, Harpacticoida ou Podoplea). Ces groupes étant moins bien représentés dans les fichiers, ils ont des taux de reconnaissance assez faibles et entraînent beaucoup de confusion avec les autres groupes de copépodes.

Dix groupes de crustacés appartenant à la classe des **Malacostraca** ont été distingués : deux groupes d'amphipodes (dont les hypéridés), quatre groupes de décapodes (dont les zoés d'anomoures, de brachyours et de caridés), les cumacés, les euphausiacées, les isopodes et les mysidacées. Seuls les cumacés et les euphausiacées ont des taux de reconnaissance et d'imprécision acceptables (respectivement >80% et <20%). Il y a confusions entre les larves de décapodes et avec certains calanoïdes. De plus certains groupes, comme les isopodes et les caridés sont sous représentés (<100) dans le fichier d'apprentissage ce qui peut expliquer les mauvais indices de performance obtenus pour ces groupes. Toutefois ces groupes sont suffisamment caractéristiques pour pouvoir être bien corrigés par le manipulateur lors de l'étape de validation.

Quatre groupes de **zooplancton gélatineux** ont été distingués sur la fraction B. Les siphonophores et les cténaires bien que facilement reconnaissables étaient trop peu abondants (respectivement 5 et 6 individus) pour obtenir des taux de reconnaissance fiables. Par contre, deux groupes de cnidaires ont pu être identifiés avec succès, *Aglantha* sp. et une leptomeduse (cf. *Clytia* sp., à confirmer, correspond au groupe 'Cnidaria' dans le fichier B).

Une meilleure connaissance de la distribution de l'**ichtyoplancton** (œufs et larves de poisson) pouvant être utile dans l'évaluation du recrutement, un effort particulier a été fait pour distinguer différents groupes. Les oeufs sont bien identifiés tout comme les larves d'ammodytidés et de clupéidés (>90%), les larves de ces deux groupes se confondant parfois avec les chaetognathes et les appendiculaires. Les autres larves de poissons sont mal identifiées car sous représentées dans le fichier.

Enfin, certaines **larves méroplanctoniques** sont bien identifiées par le classifieur, comme les larves d'annélides, de gastéropodes et les larves cyphonautes de bryozoaires. Pour d'autres comme les bivalves, les nauplii de cirripèdes et les larves d'échinodermes, la performance du classifieur est insuffisante et nécessite un travail de validation *a posteriori* plus important pour obtenir une estimation fiable de leur abondance.

B Les paramètres hydrologiques

La figure 8 présente les différents paramètres hydrologiques mesurés dans la zone d'étude.

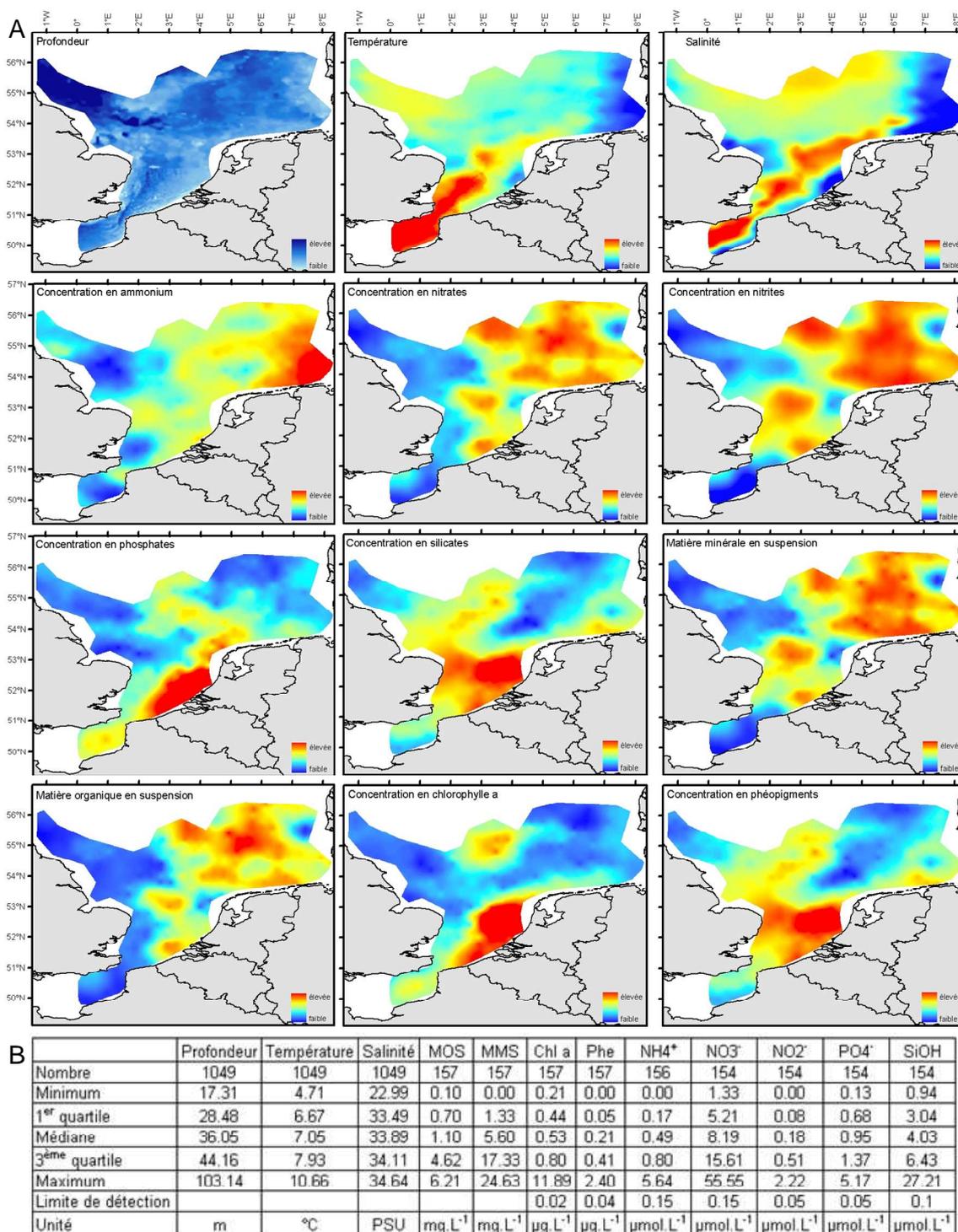


Figure 8 : A : cartographie des paramètres hydrologiques, B : tableau synthétique des mesures des paramètres hydrologiques.

1 La profondeur

Dans la zone d'étude, la profondeur varie entre 17 et 103 m, les plus fortes profondeurs se situant au nord-ouest. En Manche orientale, les côtes britanniques plongent de manière plus abrupte que les côtes françaises. La profondeur est d'environ 40 m au centre du détroit du Pas-de-Calais. Au centre nord de la zone d'étude se trouve une zone de faible profondeur (~25 m au dessus des fonds environnants) correspondant au Dogger Bank.

2 La température et la salinité

En 2008, la température et la salinité mesurées en continu pendant la campagne hivernale ont varié entre 4,7 et 10,6°C et la salinité entre 23 et 34,6 PSU (Practical Salinity Unit). Dans la Manche orientale et le détroit du Pas-de-Calais, la température et la salinité étaient plus élevées que dans le reste de la zone d'étude. De faibles températures et une dessalure ont été observées dans la baie allemande et le long des côtes danoises. De faibles salinités ont également été observées le long des côtes françaises, belges et néerlandaises reflétant l'influence des embouchures de la Seine, la Somme, l'Authie, la Canche et l'Escaut.

3 La matière en suspension

La matière organique représentait environ 20% de la totalité de la matière en suspension. La matière en suspension, qu'elle soit minérale ou organique se trouvait en concentrations plus grandes dans la partie est de la Mer du Nord et devant l'estuaire de l'Escaut. Dans la Manche et le nord-ouest de la Mer du Nord, les concentrations étaient plus faibles.

4 Les sels nutritifs

Les plus fortes concentrations en ammonium ont été mesurées dans la baie allemande avec un maximum de 5,64 $\mu\text{mol.L}^{-1}$. Les nitrates représentaient en moyenne 91% des composés azotés et 97% de l'azote oxydé (nitrates + nitrites). Les concentrations en composés azotés oxydés étaient plus importantes dans la partie est de la zone d'étude. Les phosphates étaient plus concentrés en Manche et dans la Mer du Nord le long des côtes belges et néerlandaises, et les silicates étaient plus fortement concentrés dans la baie sud de la Mer du Nord.

5 La chlorophylle a et les phéopigments

Les fortes concentrations en chlorophylle étaient situées au large des côtes belges et néerlandaises (maximum 11,89 $\mu\text{g.L}^{-1}$) ainsi qu'au niveau du Dogger Bank et dans une moindre mesure dans la Manche. Les concentrations en phéopigments, produits de dégradation de la chlorophylle avaient la même distribution que celles de la chlorophylle mais plus dispersées.

C Le phytoplancton et les ciliés

Le phytoplancton total regroupe les diatomées (ou Bacillariophyta), les dinoflagellés (ou Myzozoa) et les autres flagellés (surtout des nanoflagellés). Des abondances élevées de phytoplancton ont été observées au niveau du Dogger Bank ainsi que le long des côtes belges et néerlandaises (figure 9).

La cartographie des abondances relatives des quatre groupes (diatomées, dinoflagellés, autres flagellés et ciliés) montre que dans la baie allemande les communautés phytoplanctoniques étaient dominées par les flagellés alors que dans le reste de la zone d'étude les diatomées étaient dominantes (figure 9).

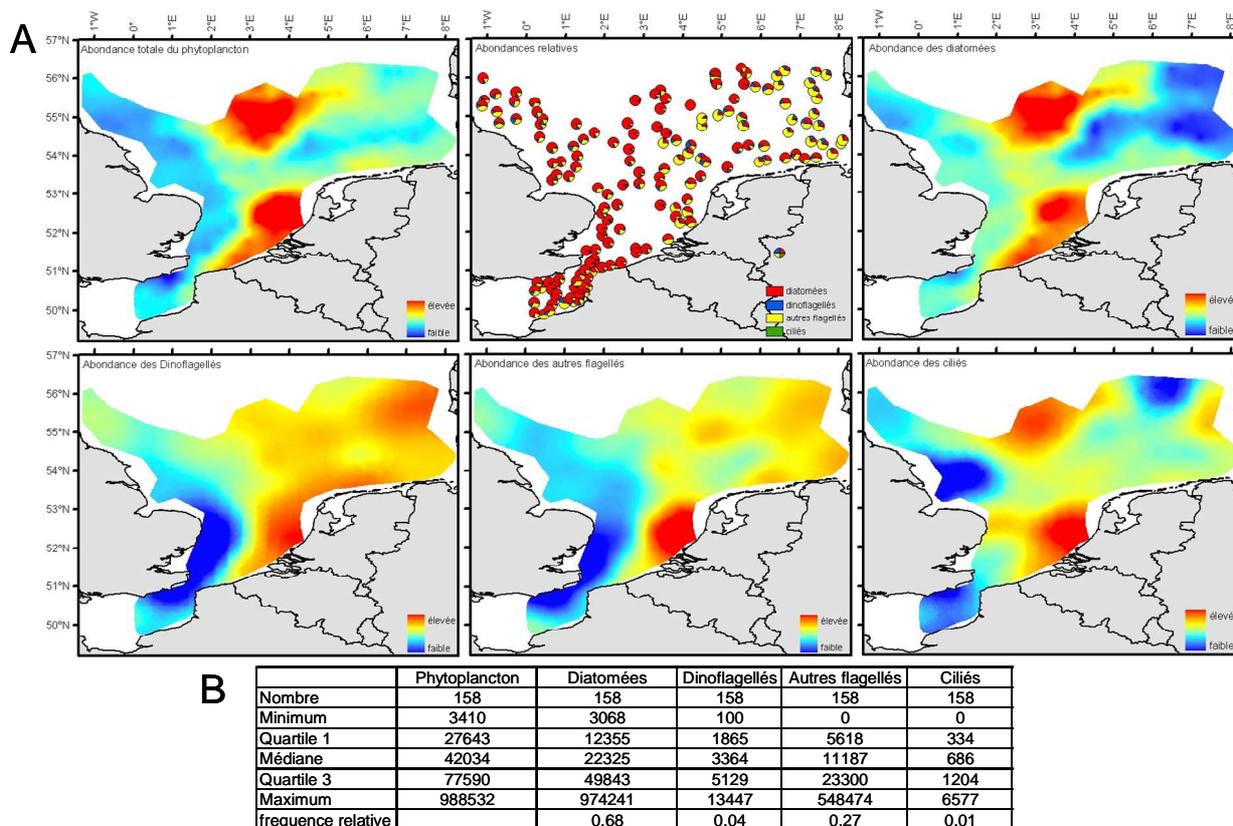


Figure 9 : A : cartes d'abondance du phytoplancton total, de l'abondance relative des différents groupes, de l'abondance diatomées, des dinoflagellés, des autres flagellés et des ciliés, B : tableau synthétique des abondances mesurées de phytoplancton et de ciliés (abondances en cellules par litre).

1 Les diatomées

Des abondances élevées en diatomées ont été observées au niveau du Dogger Bank et des côtes belges et néerlandaises. Au niveau du Dogger Bank a été identifié une efflorescence de l'espèce *Skeletonema costatum* qui constituait 80% du phytoplancton compté dans cette zone. Le long des côtes belges et néerlandaises de fortes abondances de *Chaetoceros socialis* ont été observées, en association avec la prymnesiophycée *Phaeocystis globosa*.

2 Les dinoflagellés

Les dinoflagellés étaient abondants dans toute la partie est de la zone d'étude et de manière plus importante au large du Danemark et des Pays-Bas. Par contre, ils sont très peu abondants dans le sud-ouest de la Mer du Nord et dans la Manche orientale.

3 Les autres flagellés

Les autres flagellés présentaient la même distribution que les dinoflagellés, abondants dans la partie est de la Mer du nord, au niveau de la baie allemande et au large des Pays-Bas, et peu abondants dans la partie ouest et dans la Manche orientale.

4 Les ciliés

Les plus fortes abondances de ciliés ont été observées au niveau du Dogger Bank, dans la partie sud de la Mer du Nord et plus modérément le long des côtes danoises et allemandes. Par contre les abondances de ciliés étaient très faibles le long des côtes anglaises et écossaises et dans la Manche orientale.

5 Distribution et caractérisation des assemblages phytoplanctoniques (ciliés inclus)

La CAH a été réalisée à partir des coordonnées des stations sur les 16 premiers axes de l'ACP non normée effectuée sur les abondances des taxons phytoplanctoniques (ciliés inclus). Ces 16 premiers axes représentaient 71,41% de la variance totale du nuage de points (annexe 3A). Le reste des axes, correspondant à la fluctuation aléatoire des données (valeurs propres très petites), n'ont pas été retenus pour la CAH.

D'après la corrélation de Spearman, la partition du dendrogramme en cinq classes était la meilleure (52,1%). La distribution de ces cinq classes dans la zone d'étude et leur caractérisation par les taxons phytoplanctoniques présentant une valeur indicatrice significative ($p < 0,01$) est présentée figure 10. La zone d'étude est d'abord divisée en deux sous-zones : le Nord (au dessus de 53°N de latitude) et le Sud (Manche orientale et baie sud de la Mer du Nord). Ensuite, le Sud est scindé en deux classes : la Manche orientale (P2) caractérisée par la présence des diatomées du genre *Navicula* et des dinoflagellés du genre *Amphidinium*, et la baie sud de la Mer du Nord (P5) dont les espèces indicatrices sont en majorité des petites diatomées formant des chaînes (*Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros socialis*, et *Asterionellopsis glacialis*), mais aussi des diatomées plus larges des genre *Guinardia*, *Rhizosolenia* et *Thalassiosira*. Cette classe est également caractérisée par la prymnesiophycée *Phaeocystis globosa*.

Le nord de la zone d'étude quant à lui est d'abord divisé en deux : la baie allemande (P3) et l'ouest de la Mer du Nord. Le groupement des stations P3 est caractérisé par la présence des diatomées Mediophyceae indéterminées, de dinoflagellés appartenant aux Gymnodiniaceae et de nanoflagellés non identifiés.

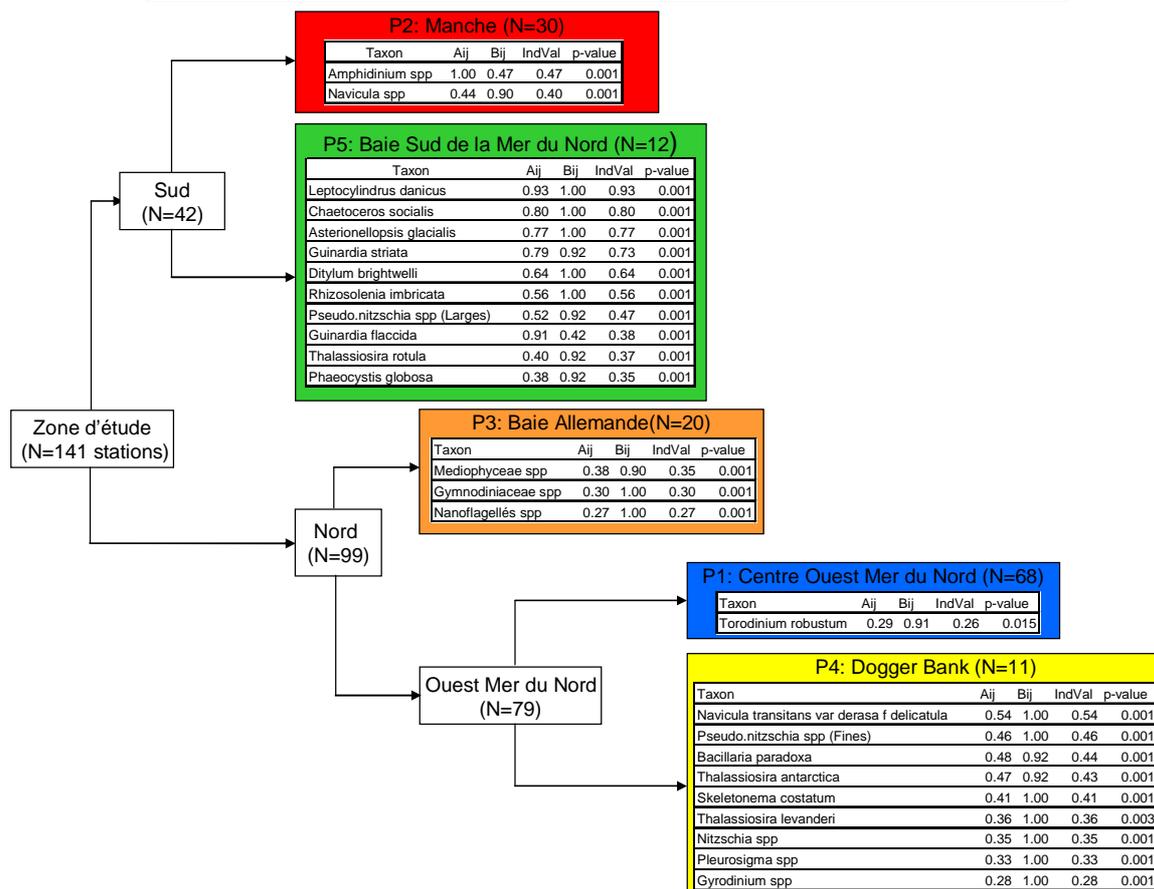
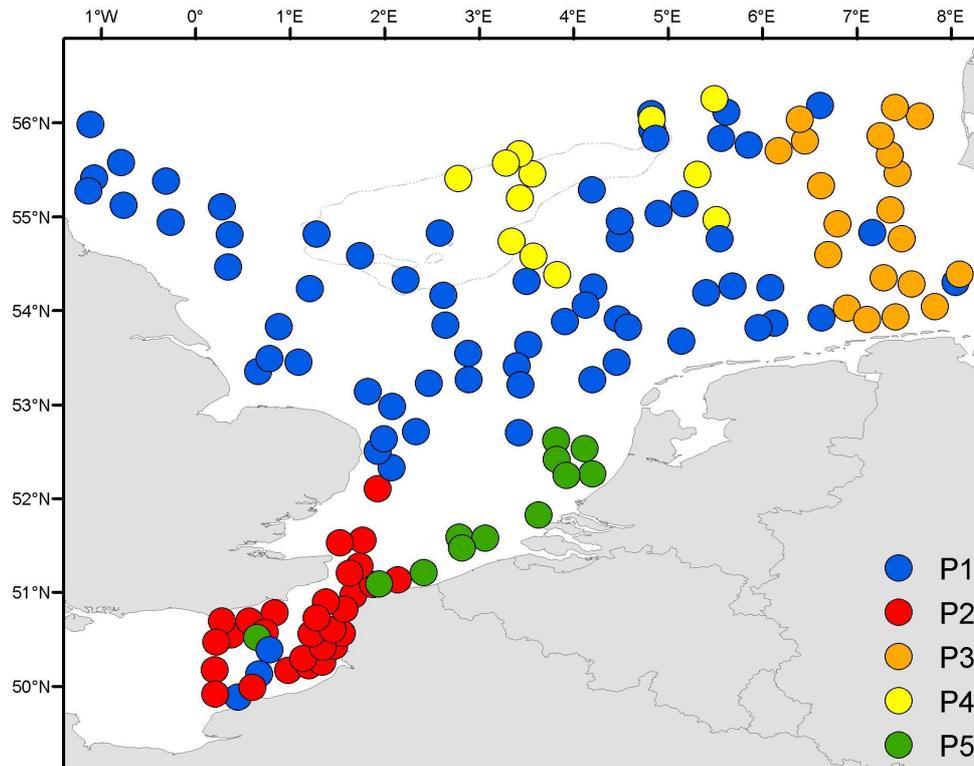


Figure 10 : A : distribution des assemblages phytoplanctoniques, B : schéma simplifié du dendrogramme montrant les taxons phytoplanctoniques caractéristiques de chaque assemblage (les taxons sélectionnés sont ceux pour lesquels la valeur indicatrice (*IndVal*) était significative ($p < 0,01$) et supérieure à 0,25).

Enfin, la partie ouest de la Mer du Nord est divisée en deux classes : le centre ouest de la Mer du Nord (P1) et le Dogger Bank (P4). Le centre ouest de la Mer du Nord n'a qu'une seule espèce indicatrice, le dinoflagellé *Torodinium robustum*. Le Dogger Bank, malgré le faible nombre de stations que cette classe comporte ($N=11$), a de nombreuses espèces de diatomées indicatrices, notamment des Bacillariophyceae (*Navicula transitans*, et des petites *Pseudo-nitzschia*), des Mediophyceae (*Thalassiosira antarctica*, *T. levanderi* et *Skeletonema costatum*) et des dinoflagellés du genre *Gyrodinium*.

D Le mésozooplancton

Les abondances mésozooplanctoniques étaient plus importantes dans la partie est de la baie sud de la Mer du Nord (maximum 3376 ind.m^{-3}), ainsi que dans la baie allemande, sauf dans son extrémité Sud-est où la plus faible abondance a été observée (85 ind.m^{-3} – figure 11). Les côtes anglaises de la Manche orientale et de la Mer du Nord étaient caractérisées par de très faibles abondances mésozooplanctoniques.

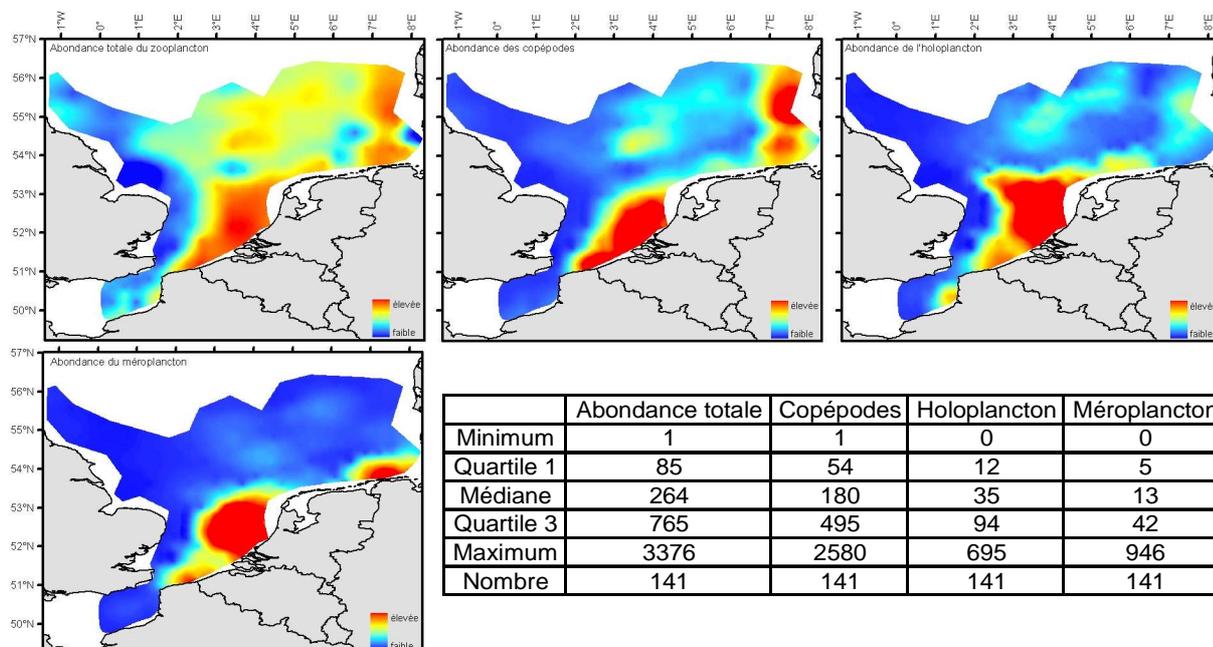


Figure 11 : Cartes d'abondances interpolées du mésozooplancton total, de l'holoplancton (hors copépodes présentés à part) et du méropiancton et tableau synthétique des abondances mésozooplanctoniques (en individus par m^3).

Les copépodes, qui représentaient en moyenne 73% du zooplancton total, ont la même distribution que celui-ci, avec toutefois de plus faibles abondances dans la zone centrale de la Mer du Nord. Le reste de l'holoplancton était plus abondant dans la baie sud de la Mer du Nord et devant l'estuaire de la Somme. Les larves méropianctoniques étaient également plus abondantes à l'Ouest de la baie sud de la Mer du Nord et le long des côtes allemandes caractérisées par de fortes abondances de larves cyphonautes de bryozoaires

1 Distribution et caractérisation des assemblages mésozooplanctoniques

La CAH a été réalisée à partir des coordonnées des stations sur les six premiers axes de l'ACP non normée effectuée sur les abondances des taxons mésozooplanctoniques identifiés par le ZooScan et validés. Ces six premiers axes représentaient 79,65% de la variance totale du nuage de points (annexe 3B). Le reste des axes, correspondant à la fluctuation aléatoire des données (valeurs propres très petites) n'ont pas été retenues pour la CAH.

Comme pour le phytoplancton, la corrélation de Spearman a montré qu'une partition du dendrogramme en cinq classes était la meilleure (62,65%). La distribution de ces cinq classes dans la zone d'étude et leur caractérisation par les taxons zooplanctoniques présentant une valeur indicatrice significative ($p < 0,01$) est présentée figure 12.

La première partition du dendrogramme a permis de séparer les côtes anglaises de la Manche orientale et de la Mer du Nord du reste de la zone d'étude (Z2). Cette classe est caractérisée par la présence des euphausiacées au Nord et des isopodes en Manche orientale (figure 13), mais aussi par les faibles abondances du mésozooplancton total (figure 11).

La seconde partition du dendrogramme a permis de distinguer le centre de la Mer du Nord (Z3) des zones côtières situées à l'Est. La zone Z3 recouvre en partie le Dogger Bank. Cette classe est caractérisée par des taxons dont la spécificité ($B_{ij} > 0,9$) et la fidélité ($A_{ij} > 0,6$) sont élevées, comme les Cyclopoïdes représentés à 99% par le genre *Oithona* (figure 13), et les calanoides des genres *Metridia* et *Calanus* ainsi que des stades copépodites non identifiés (Copepoda). Les cnidaires du genre *Aglantha* et les chaetognathes sont également très caractéristiques de cette zone.

La troisième partition a permis de séparer les stations situées le long des côtes françaises de la Manche (Z1), de celles situées sur la côte est de la Mer du Nord. Une seule espèce a un *IndVal* significatif pour cette zone, les larves de poissons (trop petites pour être correctement identifiées) dont la fidélité est relativement faible ($B_{ij} = 0,53$).

Enfin, la dernière partition significative du dendrogramme a permis de distinguer la baie sud de la Mer du Nord (Z4) de la baie allemande (Z5). L'assemblage des stations Z4 est caractérisé par le groupe des Annelida_1 regroupant toutes les larves trocophores et métatrocophores d'annélides polychètes, les calanoides *Temora longicornis* et *Paracalanus parvus* et les appendiculaires qui ont tous une fidélité maximale pour cette classe ($B_{ij} = 1$), c'est-à-dire qu'ils sont présents sur toutes les stations de cette classe. De même, dans la baie allemande six taxons présentent une fidélité maximale, les larves cyphonantes de bryozoaires dont près de 80% ($A_{ij} = 0,78$) de l'abondance totale se situe dans la baie allemande, les copépodes *Corycaeus*, *Pseudocalanus*, *Acartia*, *Centropages* et les Calanoida non identifiés. Les larves d'ammodytidées sont aussi caractéristiques de la baie allemande avec 86% de l'abondance totale.

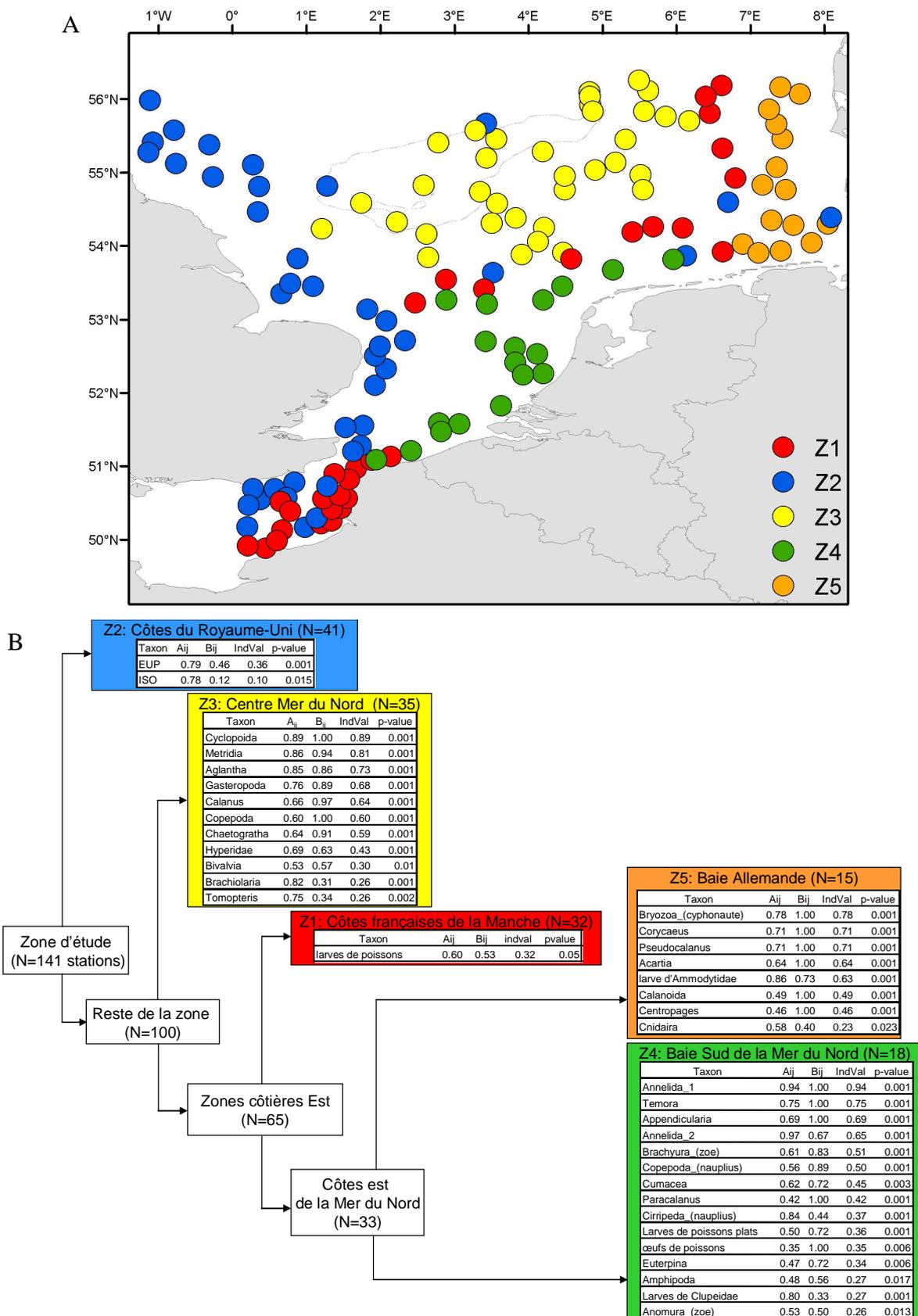


Figure 12 : A, distribution des assemblages mésozooplanctoniques ; B, schéma simplifié du dendrogramme montrant les taxons mésozooplanctoniques caractéristiques pour chaque assemblage (les taxons sélectionnés sont ceux pour lesquels la valeur indicatrice (*IndVal*) était significative ($p < 0,01$)).

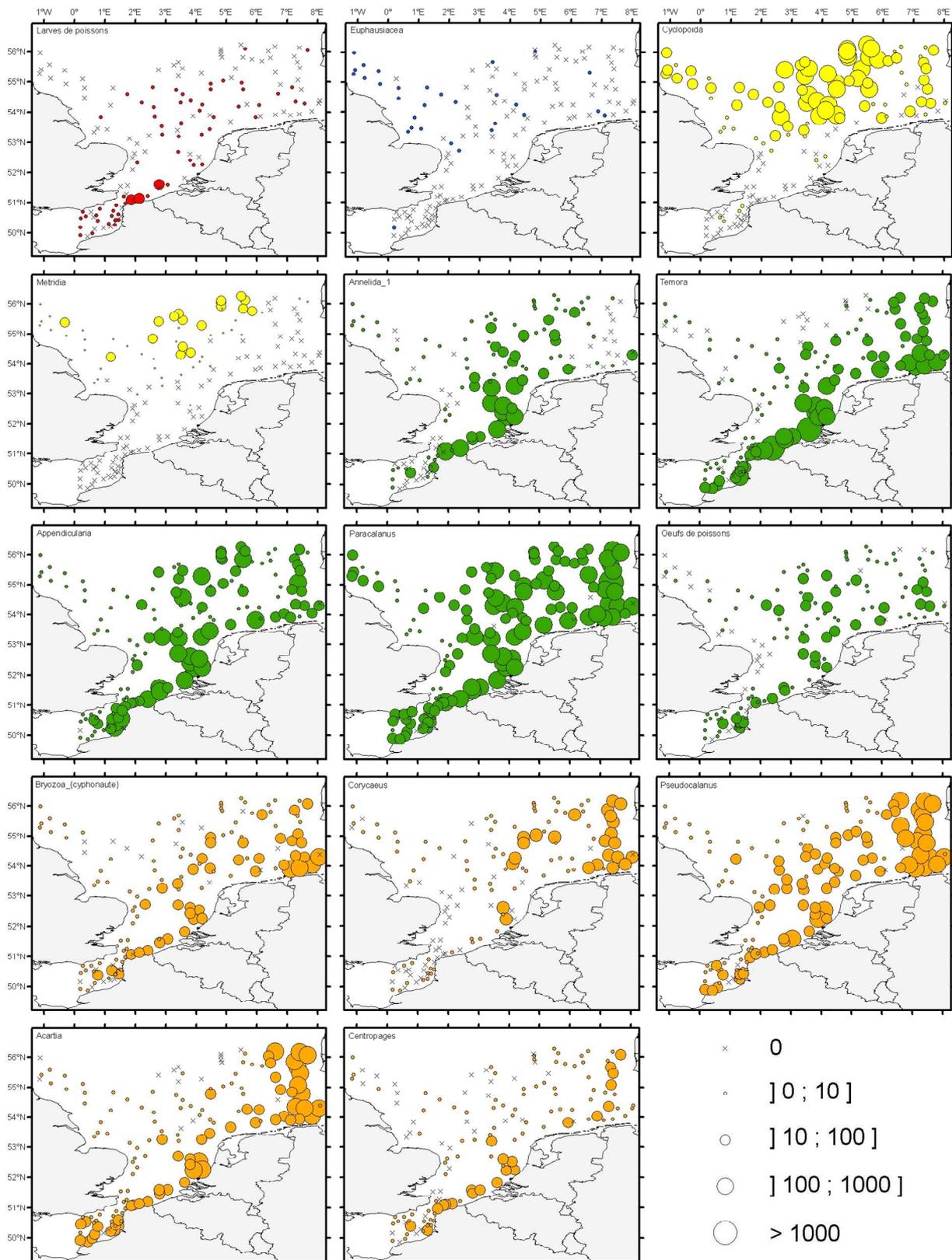


Figure 13 : Distribution des abondances (ind. m⁻³) des principaux taxons mésozooplanctoniques caractéristiques de chaque assemblage (Z1 en rouge, Z2 en bleu, Z3 en jaune, Z4 en vert et Z5 en orange)

2 Relation entre les assemblages mésozooplanctoniques et le phytoplancton.

Les trois premières composantes principales résultant de l'ACP non normée effectuée sur les abondances de mésozooplancton totalisaient 70,09% de l'inertie totale du nuage de points (annexe 3B). La position des stations sur les deux premiers plans factoriels (axes 1-2 et axes 1-3) est présentée sur la figure 14. Chaque station a été reliée au centroïde de sa classe d'appartenance (Z1 à Z5) définie par la CAH. Les positions des centroïdes ont simplement été projetées dans les plans factoriels comme variables supplémentaires sans participer à leur construction. Les centroïdes des cinq classes définies par la CAH sur les abondances phytoplanctoniques (P1 à P5) ont également été projetés comme variables supplémentaires dans les deux plans factoriels.

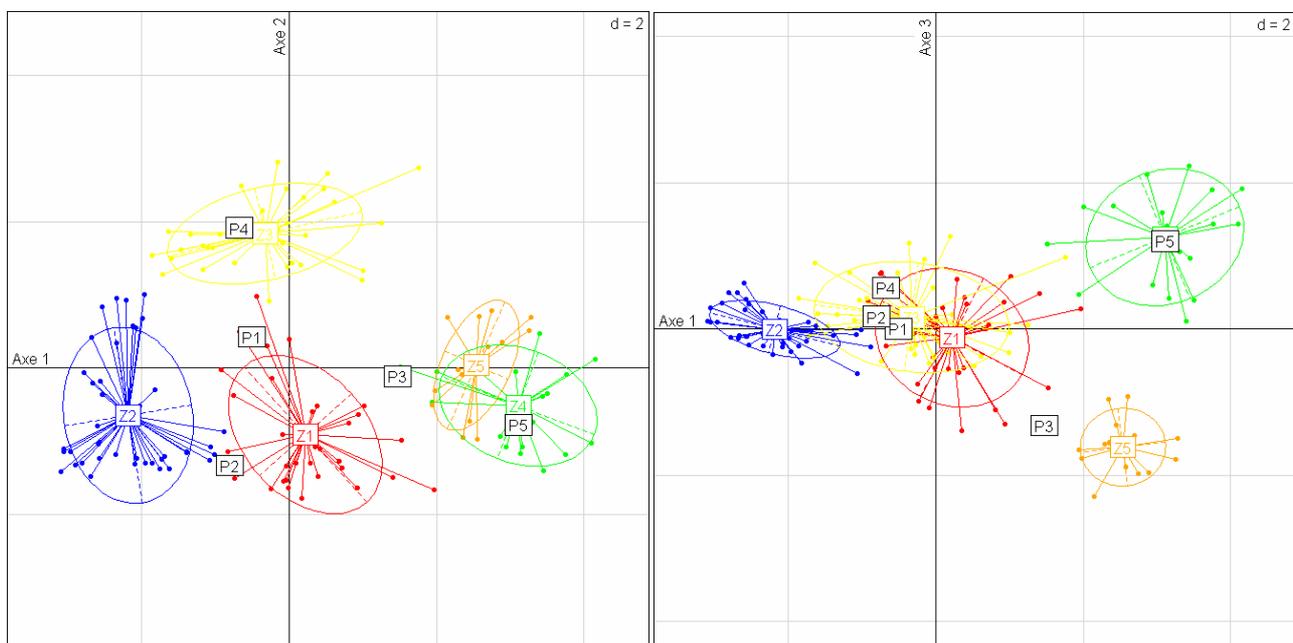


Figure 14 : représentation des stations, reliées aux centroïdes des cinq classes définies par la CAH (Z1 à Z5), sur les deux premiers plans factoriels de l'ACP non normée sur les abondances mésozooplanctoniques (les ellipses comprennent 80% des stations d'une classe donnée). Les centroïdes P1 à P5 des cinq classes définies par la CAH sur les abondances phytoplanctoniques ont également été projetés sur ces plans.

On observe que l'axe 1 de l'ACP permet de différencier les zones de fortes abondances mésozooplanctoniques de la baie sud de la Mer du Nord et de la baie allemande (Z4 et Z5), des faibles abondances des côtes britanniques (Z2). Sur l'axe 2 de l'ACP se trouve corrélés les centroïdes Z3 et P4 qui correspondent au centre de la Mer du Nord et au Dogger Bank. Enfin, l'axe 3 permet de distinguer la baie sud de la Mer du Nord (Z4 et P5) de la baie allemande (Z5 et P3).

IV. .Discussion

A Les fichiers d'apprentissage

Le système *ZooScan* et ses logiciels dédiés *ZooProcess* et *Plankton Identifier* utilisés lors de cette étude ont permis une analyse des 141 échantillons de mésozooplancton prélevés lors de la campagne IBTS 2008 dans le but de cartographier l'abondance des différents taxons présents dans la Manche orientale et le sud de la Mer du Nord. L'élaboration et la construction des fichiers d'apprentissage initiaux sur 22 stations choisies au hasard dans toute la zone d'étude ont permis l'identification de 47 taxons zooplanctoniques. Une fois tous les échantillons scannés identifiés et validés, les fichiers d'apprentissage initiaux ont été modifiés dans le but d'améliorer les performances de classification. La composition des fichiers d'apprentissage doit rendre compte de la composition des échantillons en organismes vivants et en objets non vivants (détritiques) car chaque objet rencontré dans un échantillon qu'il soit vivant ou non sera identifié et classé par la méthode de classification supervisée (ici *Random Forest*) dans un des groupes qui compose le fichier d'apprentissage. Pour améliorer les performances des fichiers d'apprentissage, il est nécessaire d'homogénéiser le nombre d'objets dans les groupes pouvant présenter un risque de confusion afin d'éviter le sur-apprentissage d'un groupe par rapport à un autre ayant des caractéristiques morphométriques proches (Antajan *et al.* 2011). De même le nombre d'objets dans chaque groupe doit pouvoir représenter raisonnablement la variabilité naturelle de ce groupe (en terme de taille, forme, niveau de gris,...). Il semble que des groupes de 300 à 400 objets soient nécessaires pour que la reconnaissance des objets soit optimale (Gorsky *et al.* 2004, Antajan *et al.* 2011). Cet objectif n'est pas encore atteint pour chaque groupe des fichiers d'apprentissage et notamment certains taxons de copépodes, de malacostracés ou d'organismes gélatineux (cnidaires et cténares) par exemple. Pour ces groupes là, le nombre d'objets qui composent les fichiers d'apprentissage correspond à la totalité des organismes scannés pour l'année 2008. Ils devront donc être complétés avec les analyses des échantillons des années suivantes.

Les groupes mésozooplanctoniques majeurs ont globalement bien été identifiés de manière automatique par le classifieur avec plus de 85% de bonne reconnaissance pour les appendiculaires, les chaetognathes, les copépodes, les cumacés, les euphausiacés, les annélides, les cnidaires, les larves d'ammodytidés et de clupéidés et les oeufs de poisson. Toutefois, il est possible d'améliorer la reconnaissance de certains groupes et d'étendre l'identification à un niveau taxonomique plus précis via l'approche semi-automatique de validation *a posteriori*. Ainsi 12 groupes de copépodes et 10 groupes de malacostracés ont pu être identifiés et cartographiés avec succès. Antajan *et al.* (2011) ont démontré que l'on obtenait de meilleurs résultats en identifiant dans un premier temps les oeufs d'une espèce de poisson sans différenciation des stades de développement et dans un deuxième temps en identifiant les stades de développement pour chaque espèce prise

individuellement. La même procédure pourrait être appliquée aux copépodes par exemple. Les copépodes seraient d'abord identifiés en tant que groupe taxonomique, puis une deuxième identification sur ce groupe se ferait avec un fichier d'apprentissage dédié aux différents genres de copépodes.

Afin de limiter la différence intra-groupes et d'augmenter celle inter-groupes, les échantillons ont été divisés en deux fractions (200-500 μm et $>500 \mu\text{m}$). Cela a permis par exemple de séparer la majorité des copépodites, pour lesquels les différences interspécifiques sont moins bien reconnues par le classifieur, des copépodes adultes pour lesquels on a un meilleur taux de reconnaissance. Cela a permis aussi d'avoir une meilleure estimation de l'abondance des taxons plus larges (comme les larves de poisson, les cnidaires ou les malacostracés) qui sont souvent moins abondant dans les échantillons que les taxons de tailles plus petites (comme le phytoplancton, les larves de bryozoaires et les larves de copépodes (nauplii et copépodites)).

Une autre approche pour améliorer les performances du classifieur serait de procéder à une sélection des paramètres du ZooScan servant à construire le classifieur. En effet, une ACP normée sur les 51 paramètres mesurés sur les objets par le ZooScan (figure 15) montre clairement que certains attributs utilisés pour l'identification des objets sont étroitement corrélés. Cela signifie qu'ils apportent deux fois la même information morphométrique sur un objet donné. C'est notamment le cas pour les attributs de forme (en vert) rendant compte de la symétrie verticale ou horizontale d'un objet en tenant compte de toute l'image (*symetriev* et *symetrieh*) ou en appliquant un masque qui seuil les niveaux de gris à 25% de l'histogramme cumulatif de ceux-ci (*symetrievc* et *symetriehc*). Ces attributs sont redondants et donnent plus de poids aux paramètres de symétrie par rapport à l'attribut de niveaux de gris rendant compte de la différence entre le niveau de gris maximal et le niveau de gris minimal d'un objet (*range*) par exemple. L'application d'une méthode de sélection de variables telle que la méthode d'analyse discriminante pas à pas (*stepwise discriminant analysis* – Klecka 1980) permettrait de sélectionner les variables les plus pertinentes pour construire le classifieur et nous aiderait à comprendre les liens de causalité entre les descripteurs (caractères morphométriques) et les taxons du fichier d'apprentissage.

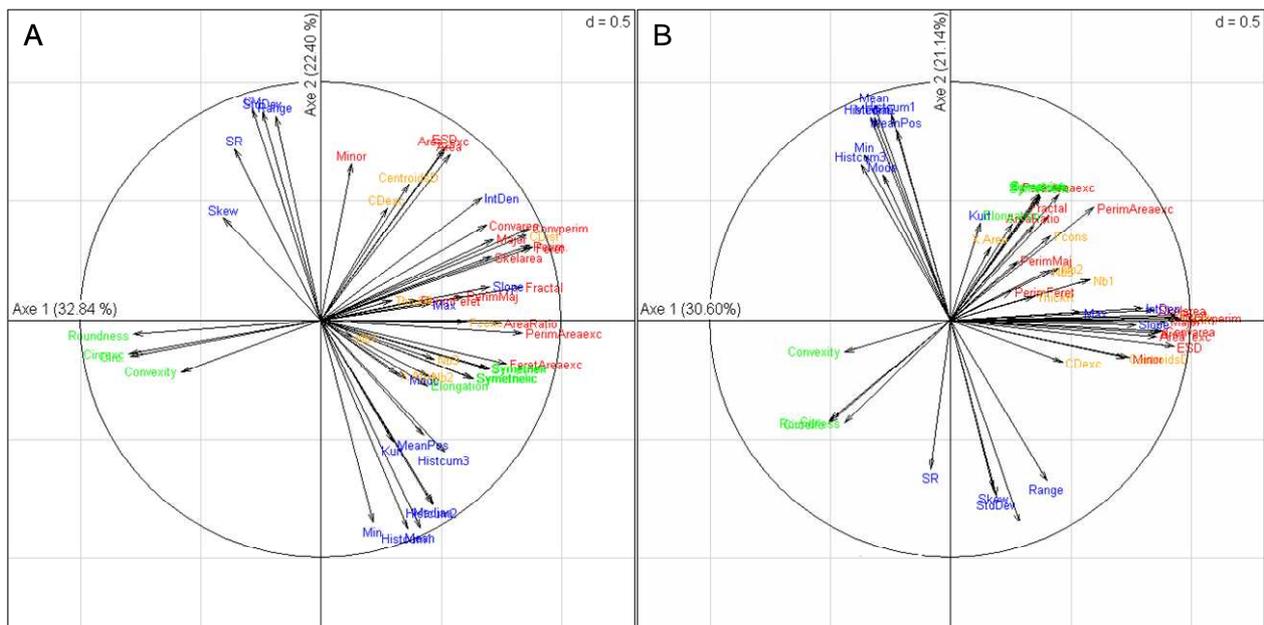


Figure 15 : Représentation dans le plan factoriel principal des ACP pour les fractions A (200-500µm) et B (>500µm) des fichiers d'apprentissage mésozooplanctoniques des 51 paramètres du ZooScan dans leur cercle de corrélation. En rouge les paramètres de taille, en bleu les paramètres de niveaux de gris, en vert les paramètres de forme et en orange les paramètres de texture (voir annexe 1 pour la descriptions des paramètres).

B Les assemblages mésozooplanctoniques

L'étude des communautés mésozooplanctoniques en Manche orientale et dans le sud de la Mer du Nord en hiver 2008 a permis de diviser la zone d'étude selon deux gradients :

- Nord-sud, en distinguant la Manche et la baie sud de la Mer du Nord du reste de la zone.
- Est-ouest ou permettant de séparer la baie allemande, le Dogger Bank, et les côtes anglaises.

La corrélation de ces assemblages avec les assemblages phytoplanctoniques doit nous aider à mettre en évidence la coexistence de certaines espèces prédatrices et de leurs proies potentielles.

Les **zones côtières de l'est de la Mer du Nord** (est de la baie sud de la Mer du Nord, baie allemande et côtes danoises) sont caractérisées par de faibles salinités et des températures relativement peu élevées en comparaison avec le reste de la zone d'étude. Les copépodes *Corycaeus anglicus*, *Centropages hamatus*, *Temora longicornis* et les *Pseudo-Paracalanus spp.* sont des espèces côtières communes en hiver dans cette zone et dans la proche Mer de Wadden où la salinité est globalement plus faible qu'en pleine mer (Fransz *et al.* 1991). Lors de cette étude ces copépodes ont été définis comme espèces indicatrices de ces zones (Z5 et Z4). Dans ces mêmes zones côtières, et plus particulièrement dans la baie allemande, les communautés phytoplanctoniques sont dominées par les flagellés (dino- et nanoflagellés ; cf. figure 9). De plus, les espèces phytoplanctoniques indicatrices de ces zones sont soit des petites diatomées formant des

chaînes (*Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros socialis*, *Asterionellopsis glacialis*) soit des flagellés (Gymniodiniaceae et nanoflagellés). Selon plusieurs études, les petits copépodes, et notamment *Temora longicornis* et *Centropages hamatus*, s'alimentent de petites diatomées formant des chaînes mais aussi de microorganismes hétérotrophes comme par exemple les ciliés ou les flagellés (Gasparini *et al.* 2000, Antajan 2004, Vincent 2001 et 2002). Donc la présence des petits copépodes côtiers concorderait avec celle de leurs proies potentielles. Il faut aussi noter la présence dans cette zone de la prymnésiofycée *Phaeocystis globosa* qui contrairement aux autres proies potentielles ne semble pas constituer une proie intéressante pour ces copépodes (Antajan 2004, Nejstgaard *et al.* 2007).

Le **centre de la Mer du Nord** (incluant le Dogger Bank) se caractérise par une communauté zooplanctonique bien distincte composée des copépodes *Oithona similis*, *Metridia lucens*, *Calanus* sp. et leurs stades copépodites. Ce sont des taxons caractéristiques de la pénétration des eaux atlantiques salées dans la Mer du Nord jusqu'au niveau du Dogger Bank en hiver (Otto *et al.* 1990, Williams *et al.* 1993). Ces taxons sont présents simultanément avec les chaetognathes. Les chaetognathes sont des prédateurs potentiels des copépodes et notamment de leurs stades larvaires (copépodites) (Pearre 1982). De plus, dans la même zone sont présents les annélides polychètes du genre *Tomopteris*. Rakusa-Suszczewski (1968) suggère que *Tomopteris* est un prédateur du chaetognathe *Parasagitta elegans* en Mer Celtique et en Manche. Le fait de retrouver *Tomopteris* et les chaetognathes dans la même zone laisse donc à penser que cette interaction trophique démontrée dans des zones adjacentes de la Mer du Nord se reproduirait dans le centre de la Mer du Nord.

Cependant, si ces zones (côtes est et centre de la mer du Nord) sont clairement identifiées par la présence de taxons indicateurs de mésozooplancton et de phytoplancton, d'autres zones sont plus difficilement caractérisables par des espèces indicatrices.

C'est le cas notamment des **côtes anglaises** qui sont caractérisées par la présence de deux taxons (les euphausiacées et les isopodes). Or les cartes d'abondance de ces deux taxons montrent qu'ils ne sont pas simultanément présents : les euphausiacées sont présents au nord de la zone et les isopodes en Manche orientale. Le facteur qui a joué sur la distinction de cette classe par le biais de la CAH est sûrement l'abondance totale du mésozooplancton qui est plus faible le long des côtes britanniques que dans le reste de la zone d'étude. Fransz *et al.* (1991) dans leur article de synthèse affirment que les petits copépodes sont rares au large de la Grande Bretagne en février, période de l'année sur laquelle porte cette étude. De plus, Lelièvre (2010) ont montré que les œufs de poissons sont globalement absents de cette zone durant la période de l'étude. Cela concorde avec les résultats obtenus.

La Manche forme une classe à part entière via l'étude des communautés phytoplanctoniques. Ce n'est pas le cas via celle du mésozooplancton. L'étude des

communautés mésozooplanctoniques donne la Manche divisée en deux parties : les côtes du Royaume-Uni qui sont reliées à la Mer du Nord et dont la caractérisation a été abordée plus haut et les côtes françaises. Les côtes françaises de la Manche orientale sont identifiées par la présence de larves de poissons non identifiées. Ces larves correspondent en fait aux jeunes larves de poissons (Clupeidae et Ammodytidae) qui n'ont pu être identifiées à l'aide du ZooScan et dont la taille est inférieure à 15 mm. Lelièvre (2010) montre que les frayères pour ces espèces se situent sur les côtes françaises de la Manche au niveau des estuaires de la Somme, de l'Authie et de la Canche. Puis les jeunes larves se retrouvent au niveau des fronts formés au niveau du fleuve côtier et les stades plus âgés sont portés par les courants résiduels vers les côtes est de la Mer du Nord (Carpentier *et al.* 2009) où les larves de Clupeidae font partie des espèces indicatrices de la baie sud de la Mer du Nord et les larves d'Ammodytidae des espèces indicatrices de la baie allemande

V. Conclusion

Le but de cette étude était avant tout de mettre en place une méthode pour l'analyse des échantillons de mésozooplancton prélevés lors des campagnes IBTS hivernales. L'utilisation du ZooScan pour cette étude a permis d'analyser un grand nombre d'échantillons, et de cartographier l'abondance des principaux taxons zooplanctoniques en Manche orientale et en Mer du Nord. Cependant, le fichier d'apprentissage et la performance du classifieur peuvent encore être améliorés afin de permettre aux manipulateurs de gagner du temps lors de la validation des prédictions du classifieur. Premièrement, le nombre de vignettes dans chaque groupe des fichiers d'apprentissage devra être homogénéisé pour les taxons qui étaient sous représentés dans les échantillons de 2008. Deuxièmement des procédures de sélection de variables devront être testées pour évaluer leur efficacité à améliorer les performances du classifieur. De plus, le ZooScan permet aussi d'effectuer des mesures de taille des objets ce qui devrait nous permettre de calculer des proxies de biomasse zooplanctonique. Il pourrait être intéressant, dans une étude future de tenir compte de ces possibilités afin d'affiner les résultats préliminaires obtenus lors de cette étude.

Le second but de cette étude était de caractériser les assemblages mésozooplanctoniques hivernaux dans la zone d'étude en 2008, et de les mettre en correspondance avec les assemblages phytoplanctoniques et les paramètres hydrobiologiques de la zone. Par cette étude, cinq assemblages zooplanctoniques et cinq assemblages phytoplanctoniques ont été mis en évidence. Cela nous a permis de constater la présence simultanée dans les mêmes zones de prédateurs (chaetognathes, *Tomopteris*, copépodes) avec leurs proies potentielles qu'elles soient zooplanctoniques ou phytoplanctoniques. Ceci peut constituer une première approche simple pour appréhender les relations trophiques planctoniques dans la zone d'étude, et motiver des études plus spécifiques et/ou expérimentales sur les relations proies-prédateurs.

Cependant, les observations faites sur l'année 2008 sont à confirmer par l'étude des échantillons prélevés lors des campagnes IBTS hivernales des années suivantes. Le but final de ces études étant d'intégrer les résultats de plusieurs années dans des modèles d'habitat permettant d'évaluer la récurrence des distributions planctoniques mises en évidence dans cette étude préliminaire et d'optimiser la gestion des ressources marines vivantes en ayant une approche écosystémique du sujet (Carpentier et al. 2009).

Bibliographie

- Anonyme (1988). Courants de mare dans le Pas-de-Calais. Service Hydrographique et océanographique de la Marine, Paris.
- Antajan E (2004). Responses of calanoid copepods to changes in phytoplankton dominance in the diatoms – *Phaeocystis globosa* dominated Belgium coastal waters. Thèse. Vrije Universiteit Brussel. 142pp.
- Antajan E, Lelièvre S, Vaz S (2011). Comparison of traditional microscopy and digitalized images analysis to identify and delineate pelagic fish egg spatial distribution. *Journal of Plankton Research*.
- Banske K (1995). Zooplankton pivotal role in the control of ocean production. *ICES Journal of Marine Science* **52**:265-277.
- Beaugrand G, Brander KM, Lindley JA, Souissi S, Reid PC (2003). Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature* **426**: 661-663.
- Beaugrand G & Reid PC (2003) Long term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. *Global Change Biology* **9**:801-827.
- Beaugrand G, Reid PC, Ibanez F, Lindley JA, Edwards M (2002). Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science* **296**:1692-1194
- Benfield MC, Grosjean P, Cluverhouse PF, Irigoien X, Sieracki ME, Lopez-Urrutia A, Dam HG, Hu Q, Davis CS, Hansen A, Pilskal CH, Riseman EM, Schultz H, Utgoff PE, Gorsky G (2007). RAPID Research on automated plankton identification – *Oceanography* **20**(2):172-187.
- Bonnet D & Frid C (2004). Seven copepod species considered as indicators of water mass influence and changes. Results from Northumberland coastal station. *ICES Journal of Marine Science* **61**:485-491.
- Breiman, L. (2001). Random Forest. *Machine Learning* **45**(1): 5-32.
- Brocard D, Gillet F, Legendre P (2011). *Numerical Ecology with R*. Ed Springer. 306pp.
- Brylinski JM (1993). Ecohydrodynamique pélagique en Manche orientale. Habilitation à diriger des recherches, Université de Lille I, S.M.W., 270 pp. 292
- Carpentier A, Delpéch J-P, Martin C, Meaden G, Vaz S, 2009. Chapitre 1: La Manche orientale. In Carpentier A, Martin CS, Vaz S (Eds.). Atlas des habitats des ressources marines de la Manche Orientale, rapport final (CHARM phase II). INTERREG 3a : 626pp
- Champely S (2005). Introduction à l'analyse (factorielle) multivariée sous R. 7 septembre 2005. 57p.
- Dufrêne M & Legendre P (1997). Species assemblages and indicator species : the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* **67**(3) :345-366.
- Dussart B H (1964). Les différentes catégories de plancton – *Hydrobiologia* **26** : 72-74.
- Fransz HG, Colebrook JM, Gamble JC, Krause M (1991). The zooplankton of the North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research* **28**: 1-52.
- Gasparini S, Daro MH, Antajan E, Tackx M, Rousseau V, Parent JY, Lancelot C (2000). Mesozooplankton grazing during the *Phaeocystis globosa* bloom in the southern bight of the North Sea. *Journal of Sea Research* **43**:345-356.
- Grosjean P, Picheral M, Warembourg C, Gorsky G (2004). Enumeration, measurement, and identification of net zooplankton samples using the ZOOSCAN digital imaging system. *ICES Journal of Marine Science*, **61**: 518-525.

- Gorsky G, Ohman MD, Picheral M, Gasparini S, Stemmann L, Romagnan J-B, Cawood A, Pesant S, Garcia-Comas C, Prejger F (2010). Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *Journal of Plankton research* **32**: 285-303.
- Gucu A.C. (2002). Can overfishing be responsible for the successful establishment of *Mnemiopsis leidyi* in the Black Sea? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **54**(3):432-451
- Guegueniat P, Salomon JC, Wartel M, Cabioch L, Fraizier A (1993). Transfer Pathways and Transit Time of Dissolved Matter in the Eastern English Channel Indicated by Space-Time Radiotracers Measurements and Hydrodynamic Modelling. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **36** : 477-494.
- Heath M R (2007). The consumption of zooplankton by early life stages of fish in the North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, **64**: 1650–1663.
- International Bottom Trawl Survey Working Group (IBTSWG) (2010). Manual for the International Bottom Trawl Surveys. Revision VIII. International Council for the exploration of the Sea (ICES).
- Klecka WR (1980). Discriminant Analysis. *Sage University Paper series on Quantitative Applications in the Social Sciences*. Vol 19, Beverly Hills, CA, 73 pp.
- Lebart L, Morineau A, Piron M (2004). Statistique exploratoire multidimensionnelle. 3^{ème} édition. Ed Dunod. pp73, 170.
- Legendre P & Legendre L (1998). Numerical Ecology. Second English Edition. Elsevier, Amsterdam. 853pp.
- Lelièvre S (2010). Identification et caractérisation des frayères hivernales en Manche Orientale et la partie sud de la Mer du Nord. Thèse. Université de Nantes. 269pp.
- Lenz J (2000). Introduction. *In*: Harris R, Wiebe P, Lenz J, Skjoldal H-R, Huntley ME. ICES Zooplankton Methodology Manual. Academic Press, San Diego.
- Martin CS, Lelièvre S, Vaz, S (2007). Identification des frayères du Déroit du Pas-de-Calais et des zones marines adjacentes. Rapport final du projet ISADO, Programme Interreg IIIa. Version 2 : 114pp.
- Mastail & Bataglia (1978). Amélioration de la conservation du zooplancton.
- Nejstgaard JC, Tang KW, Steinke M, Dutz J, Koski M, Antajan E, Long JD (2007). Zooplankton grazing on *Phaeocystis* : a quantitative review and future challenges. *Biogeochemistry* **83**:147-172.
- Otto L, Zimmerman JTF, Furnes GK, Mork M, Saetre R, Becker G (1990). Review of the physical oceanography of the North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research* **26** (2-4): 16-238.
- Pearre SJ (1982). Feeding by Chaetognatha: Aspects of Inter- and Intra-Specific Predation. *Marine Ecology-Progress series* **7**: 33-45.
- Picheral M (2009). Zooprocess Manual. Version 6.11. Laboratoire d'Océanologie de Villefranche-sur-Mer.
- R development core team (2005). R : a language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. [http:// www.R-project.org](http://www.R-project.org).
- Rakusa-Suszczewski S (1968). Predation of Chaetognatha by Tomopteris Helgolandica Greff. *ICES Journal of Marine Science* **32-2**:226-231.
- Redden AM, Kobayashi T, Suthers I, Bowling L, Rissik D, Newton L, 2009. Chapitre 2: Plankton processes and the environment. In Suthers IM & Rissik D (Eds) PLANKTON: a guide to their ecology and monitoring for water quality : 256pp.

- Richardson A.J., Bakun A., Hays G.C., Gibbons M.J. (2009). The jellyfish joyride: causes, consequences and management responses to a more gelatinous future. *Trends in Ecology & Evolution* **24**(6):312-322.
- Salomon JC & Breton M (1993). An atlas of long-term currents in the Channel. *Oceanographica Acta* **16**: 439-448.
- Schultes S & Lopes RM (2009). Laser Optical Plankton Counter and Zooscan intercomparison in tropical and subtropical marine ecosystems. *Limnology and Oceanography: Methods*. **7**: 771-784.
- Seguin G & Braconnot JC (1997). Le plancton. Presses universitaires de France. Collection Que sais-je ?
- Stibor H, Vadstein O, Diehl S, Gelzleichter A, Hansen T, Hantzsche F, Katechakis A, Lippert B, Løseth K, Peters C, Roederer W, Sandow M, Sundt-Hansen L, Olsen Y (2004). Copepods act as a switch between alternative trophic cascades in marine pelagic food webs. *Ecol. Letters* **7**: 321-328.
- Tranter DJ & Smith PE (1968). Filtration performance. *In: Reviews on zooplankton sampling methods, Part I* (D. J. Tranter, ed.), p. 27-56. Monogr. Oceanogr. Methodol. 2, Zooplankton Sampling. UNESCO (United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization) Press, Paris.
- Vaz S, Martin CS, Ernande B, Coppin F, Harrop S, Carpentier A (2005). Using geostatistics to quantify annual distribution and aggregation patterns of fishes in the Eastern English Channel. ICES CM 2005/L:21 The spatial dimension of ecosystem structure and dynamics.
- Verin Y (2011). IBTS, une campagne européenne d'évaluation des ressources halieutiques en Manche Orientale et en Mer du Nord. Dossier de Presse. Ifremer.
- Vincent D (2002). Dynamique et nutrition du zooplancton en milieu lagunaire macrotidal (Bassin d'Arcachon) : flux de carbone et d'azote associés. Conséquences sur le pool nutritif et sur les organismes. Thèse. Université de la Méditerranée. 393pp.
- Vincent D & Hartmann HJ (2001). Contribution of Ciliated Microprotozoans and Dinoflagellates to the diet of three Copepod species in the Bay of Biscay. *Hydrobiologia* **443** :193-204.
- Warembourg C (2005). Analyse temporelle du mesozooplancton dans la rade de Villefranche-sur-Mer à l'aide d'un nouveau système automatique d'imagerie numérique : le ZOOSCAN. Influence des apports particuliers, de la production primaire et des facteurs environnementaux. Thèse. Université Pierre et Marie Curie. Paris VI. 223pp.
- Williams R, Lindley JA, Hunt HG, Collins NR (1993). Plankton community structure and geographical distribution in the North Sea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol* **172**:143-156.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des paramètres mesurés sur chaque objet et utilisés par le classifieur (Antajan *et al* 2011).

Attributs de taille

Area	Surface de l'objet en pixels ²
Area_exc	Surface de l'objet à l'exclusion des trous (pixels dont le niveau de gris est supérieur à celui du background)
Perim	Longueur de la bordure extérieure de l'objet
PerimArea_exc	Périmètre de la surface à l'exclusion des trous (=Perim/Area_exc)
Major	Axe primaire de la plus petite ellipse encerclant l'objet
Minor	Axe secondaire de la plus petite ellipse encerclant l'objet
Feret	Diamètre de Feret maximum (la plus grande distance entre chaque couple de points appartenant au périmètre)
FeretArea_exc	Feret pour la surface excluant les trous (=Feret/Area_exc)
PerimFeret	=Perim/Feret
PerimMaj	=Perim/Major
Fractal	Dimension fractale pour la bordure de l'objet
Skelarea	Surface du squelette en pixels ² (dans une image binaire, le squelette est obtenu par élimination successive des pixels des bords de l'objet) jusqu'à ce qu'il soit réduit à la largeur d'un seul pixel
ESD	Diamètre équivalent sphérique (= $2 \cdot \sqrt{\text{Area}/\text{Pi}}$)
Convperim	Longueur du périmètre de l'enveloppe convexe de l'objet
Convarea	Surface du polygone délimité par l'enveloppe convexe de l'objet
Arearatio	Ratio Convarea sur Area

Attributs de niveaux de gris

IntDen	Densité intégrée (somme des niveaux de gris des pixels de l'objet)(= Area*Mean)
Min	Valeur du plus petit niveau de gris d'un objet (0=noir)
Max	Valeur du plus grand niveau de gris d'un objet (255=blanc)
Mean	Moyenne des niveaux de gris d'un objet (somme des niveaux de gris de tous les pixels de l'objet divisée par le nombre de pixels)
Median	Médiane des niveaux de gris d'un objet
Mode	Mode des niveaux e gris d'un objet
StdDev	Ecart-type des niveaux de gris d'un objet utilisés pour calculer le niveau de gris moyen
CV	Coefficient de variation des niveaux de gris (=100*(StdDev/Mean))
Range	Gamme des niveaux de gris d'un objet (=Max-Min)
SR	=100*(StdDev/Range)
MeanPos	Position moyenne des niveaux de gris (= (Max-Min)/Range))
Skew	Asymétrie de l'histogramme des niveaux de gris (0=distribution normale)
Kurt	Kurtosis de l'histogramme des niveaux de gris (si l'histogramme est pointu, alors Kurt>0 et si l'histogramme est plat, alors Kurt<0)
Histcum1	Somme cumulée des premiers 25% de l'histogramme normalisé des niveaux de gris
Histcum2	Somme cumulée des premiers 50% de l'histogramme normalisé des niveaux de gris

Histcum3 Somme cumulée des premiers 75% de l'histogramme normalisé des niveaux de gris
Slope Pente de l'histogramme cumulatif normalisé des niveaux de gris

Attributs de forme

Circ Circularité = $(4\pi \cdot \text{Area}) / \text{Perim}^2$ (La valeur 1 correspond au cercle parfait et plus la valeur est proche de 0, plus l'objet est allongé)
Circ_exc Circularité = $(4\pi \cdot \text{Area_exc}) / \text{Perim}^2$
Elongation = Major/Minor
Symetriev Symétrie de l'objet par rapport à l'axe vertical
Symetrieh Symétrie de l'objet par rapport à l'axe horizontal
Symetrievc Symétrie de l'objet par rapport à l'axe vertical quand le niveau de gris de 25% des pixels les plus foncés est ramené à 0
Symetriehc Symétrie de l'objet par rapport à l'axe horizontal quand le niveau de gris de 25% des pixels les plus foncés est ramené à 0
Convexity = Convperim/Perim
Roundness = Area/Convperim²

Attributs de texture

%area Pourcentage de la surface de l'objet comprise dans les trous
Nb1 Nombre d'objets restant quand le seuil des niveaux de gris est fixé à Histcum1
Nb2 Nombre d'objets restant quand le seuil des niveaux de gris est fixé à Histcum2
Nb3 Nombre d'objets restant quand le seuil des niveaux de gris est fixé à Histcum3
Fcons Mesure de contraste basée sur le descripteur caractéristique de la texture (Amadasun & King 1989)
ThickR Relation entre l'épaisseur maximale et l'épaisseur moyenne en excluant le maximum d'un objet
CentroidD Distance entre le centroïde de l'objet et le centroïde des niveaux de gris de l'objet
Cdexc = CentroidD²/Area_exc
Cdist Distance entre le centroïde de l'objet et le centroïde des niveaux de gris de l'objet après avoir rehaussé le contraste par la fonction Gama au niveau 5

Annexe 2 : les matrices de confusion.

- Définition et aide à l'interprétation

Une matrice de confusion est une matrice montrant la classification réelle versus la classification prédite par le modèle de classification (classifieur). Une matrice de confusion est de taille $k \times k$, où k est le nombre de classes.

La matrice de confusion suivante est pour $k = 5$ classes:

	Taxon 1	Taxon 2	Taxon 3	Taxon 4	Taxon 5	somme	TVP	TFP
Taxon 1	14	0	1	5	0	20	0.70	0.00
Taxon 2	0	59	1	0	0	60	0.98	0.26
Taxon 3	0	12	45	3	0	60	0.75	0.08
Taxon 4	0	4	2	33	1	40	0.83	0.20
Taxon 5	0	5	0	0	55	60	0.92	0.02
somme	14	80	49	41	56	240		

En bleu : réelle distribution des objets dans le fichier (240 objets répartis en 5 classes)

En vert : prédiction de la distribution des objets dans le même fichier d'après le modèle

En rouge : les objets sur la diagonale sont ceux correctement identifiés par le modèle ; les objets hors de la diagonale ont été mal identifiés par le modèle, et permettent de voir entre quelles classes il peut y avoir confusion.

TVP = Taux de Vrais Positifs : c'est le taux de bonne reconnaissance d'une classe du fichier.

Ex : $TVP_{(\text{Taxon } 4)} = 33/40$, soit 0,75.

75% des individus appartenant au taxon 4 ont bien été identifiés.

TFP = Taux de Faux Positifs : c'est le taux d'imprécision ou de contamination dans une classe prédite.

Ex : $TFP_{(\text{Taxon } 4)} = (5+3)/41$, soit 0,20.

20% des individus qui ont été prédit comme appartenant au taxon 4 n'appartiennent en réalité pas à ce taxon.

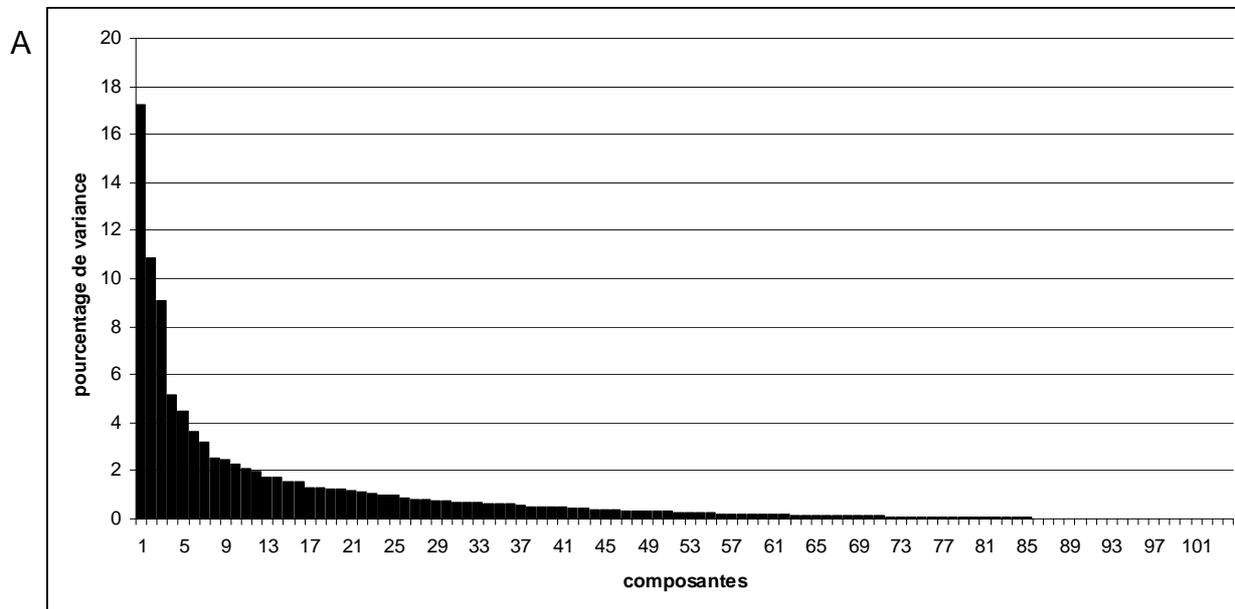
Ainsi, dans cet exemple, le modèle est capable d'identifier correctement 70% des individus appartenant au taxon 1 et les individus identifiés comme appartenant à ce taxon le sont tous. En d'autre terme avec ce modèle on peut être sûr que tous les individus qui seront identifiés comme appartenant au taxon 1, le seront effectivement, par contre il est possible que l'on sous-estime leur abondance de 30%. De même, pour le taxon 2, si la quasi-totalité des individus appartenant à ce taxon seront bien identifiés, il y a un risque de sur-estimation de l'abondance de 26%, c'est-à-dire de contamination par d'autres taxons que le 2.

- Matrice de confusion du fichier d'apprentissage de la fraction A

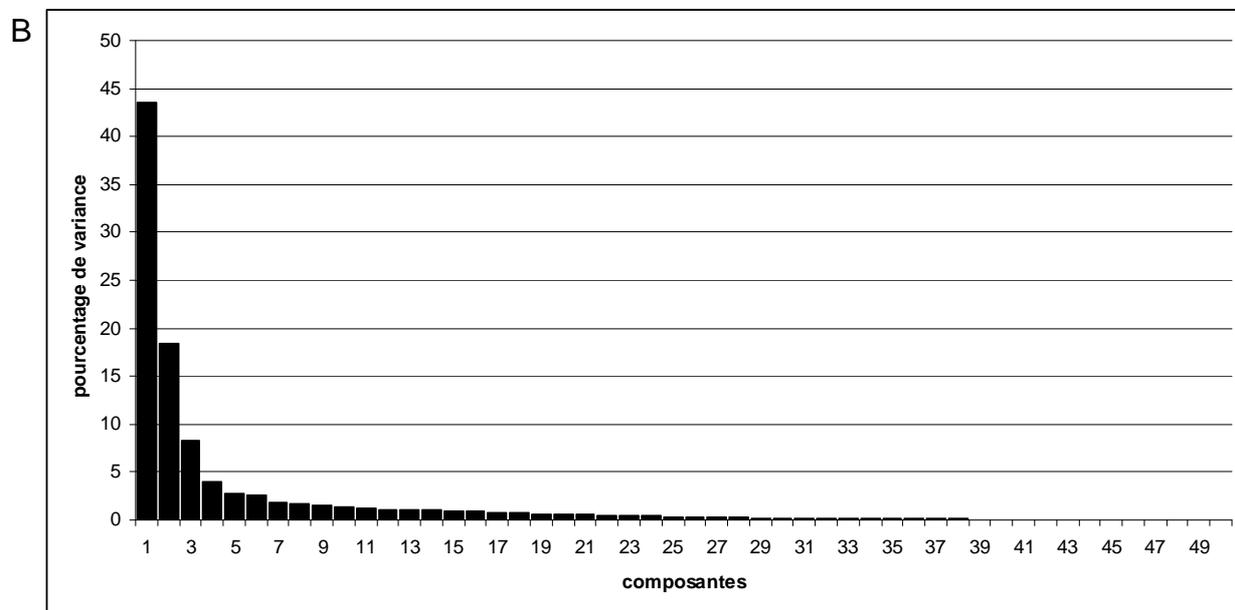
Error rate = 0.2516

Values prediction			Confusion matrix																														
Value	Recall	1-Precision	00_Artefacts	00_Detritus	00_Fibers	00_Phytoplankton	00_Phyto_multiples	00_Unknown_1	00_Unknown_2	00_Unknown_3	01_Appendicularia	03_Acartia	03_Calanoidea	03_Corycaeus	03_Euterpina	03_Metridia	03_Oithona	03_Paracalanus	03_Podoplea	03_Pseudocalanus	03_Temora	04_Brachyura_(zoe)	04_Cumacea	06_Cirripeda_(nauplius)	06_Copepoda_(nauplius)	07_Bryozoa_(cyphonaute)	10_Bivalvia	10_Gasteropoda	11_Annelida_1	12_Echinoderma	13_Fish_eggs	15_Multiples	Sum
00_Artefacts	0.91	0.06	82	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90
00_Detritus	0.76	0.31	3	2097	49	109	145	1	15	1	40	3	9	6	2	0	39	57	0	10	49	3	0	0	3	26	1	10	14	0	0	63	2755
00_Fibers	0.84	0.13	2	63	340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	405
00_Phytoplankton	0.96	0.08	0	66	0	1858	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	1	0	0	0	0	0	1935
00_Phyto_multiples	0.86	0.16	0	138	0	1	907	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1055
00_Unknown_1	0.60	0.07	0	23	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90
00_Unknown_2	0.18	0.57	0	51	0	2	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	65
00_Unknown_3	0.00	1.00	0	29	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
01_Appendicularia	0.85	0.14	0	45	0	0	3	1	0	0	322	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	380
03_Acartia	0.37	0.46	0	31	0	0	0	0	0	0	0	119	19	0	0	0	82	49	0	21	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	325
03_Calanoidea	0.13	0.71	0	12	0	0	0	0	0	0	0	37	57	0	0	0	10	165	0	89	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	430	
03_Corycaeus	0.43	0.31	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	56	16	0	0	30	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	130	
03_Euterpina	0.27	0.52	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	26	0	0	19	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95	
03_Metridia	0.00	1.00	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	
03_Oithona	0.91	0.17	0	62	0	0	0	2	0	0	0	17	1	0	0	0	1003	12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1099	
03_Paracalanus	0.79	0.33	0	26	0	0	0	0	0	0	0	28	32	5	4	0	23	1383	0	41	193	0	0	0	0	0	0	6	0	0	2	1743	
03_Podoplea	0.00	1.00	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	
03_Pseudocalanus	0.53	0.51	0	4	0	0	0	0	0	0	0	9	37	0	4	0	0	82	0	194	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	365	
03_Temora	0.78	0.29	0	14	0	0	1	0	0	0	0	0	26	5	2	0	12	211	0	22	1133	0	0	0	8	0	0	7	0	0	9	1450	
04_Brachyura_(zoe)	0.09	0.57	0	8	0	0	0	0	0	0	1	2	4	0	0	0	0	0	0	10	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	7	35	
04_Cumacea	0.00	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
06_Cirripeda_(nauplius)	0.00	1.00	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	6	2	0	0	3	0	0	25	
06_Copepoda_(nauplius)	0.33	0.37	0	37	0	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0	60	21	0	3	9	0	1	180	
07_Bryozoa_(cyphonaute)	0.74	0.21	0	45	0	31	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	12	267	0	2	0	0	0	360	
10_Bivalvia	0.00	1.00	0	27	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	
10_Gasteropoda	0.18	0.52	0	57	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	16	5	0	0	90	
11_Annelida_1	0.76	0.12	0	54	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	33	0	0	10	0	0	0	3	4	0	2	357	0	0	470	
12_Echinoderma	0.00	1.00	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
13_Fish_eggs	0.30	0.00	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	10	
15_Multiples	0.45	0.45	0	92	0	0	10	0	0	0	11	6	2	4	0	0	2	17	0	7	21	0	0	0	3	0	0	0	0	0	143	318	
Sum			87	3026	391	2017	1074	58	28	1	374	222	195	81	54	0	1203	2073	0	398	1595	7	0	0	95	339	2	33	404	0	3	260	14020

Annexe 3 : histogramme de la variance expliquée par chaque composante de l'ACP non normée et tableau des pourcentage et pourcentage cumulé pour les 20 premières composantes. A, pour le phytoplancton et B, pour le mésozooplancton.

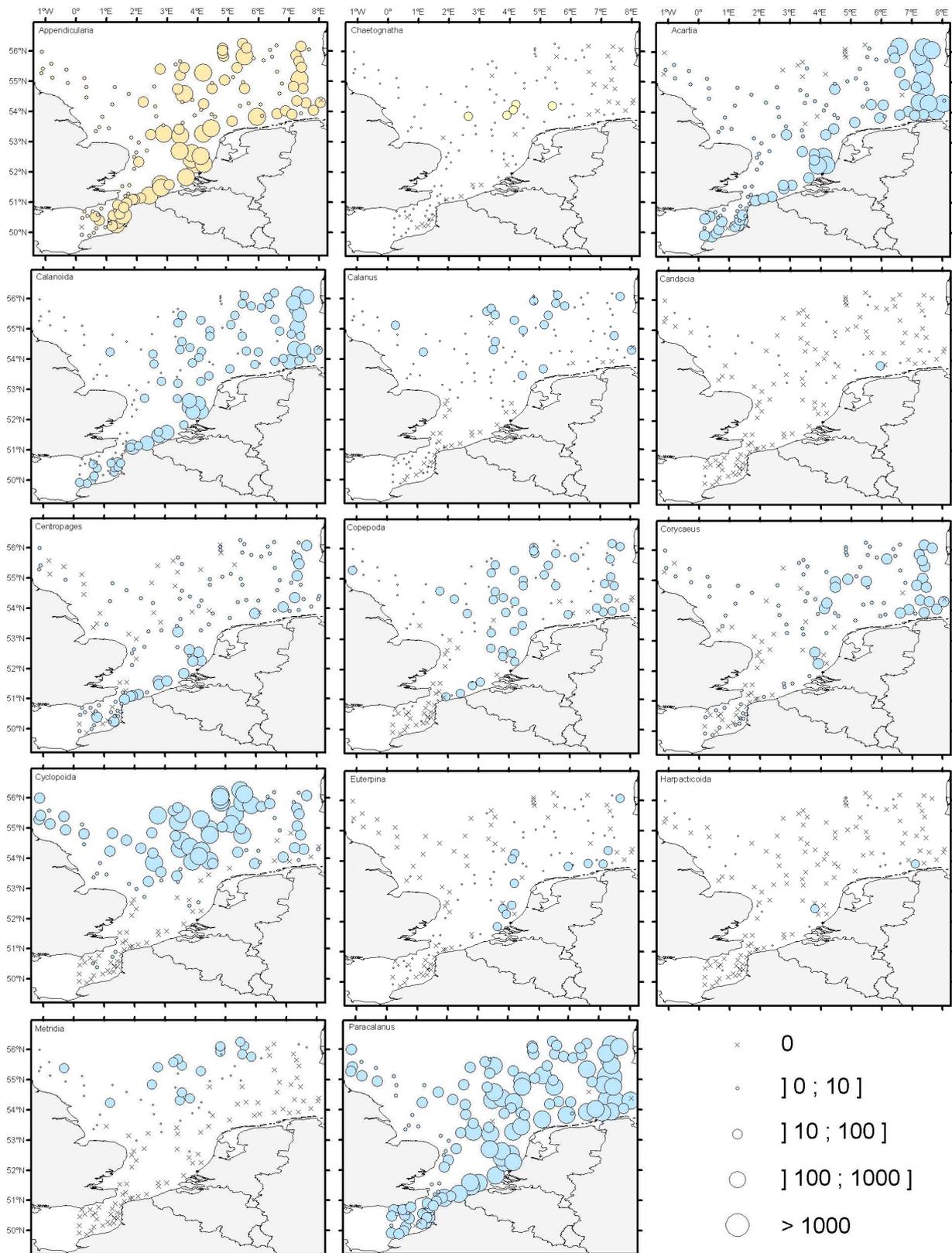


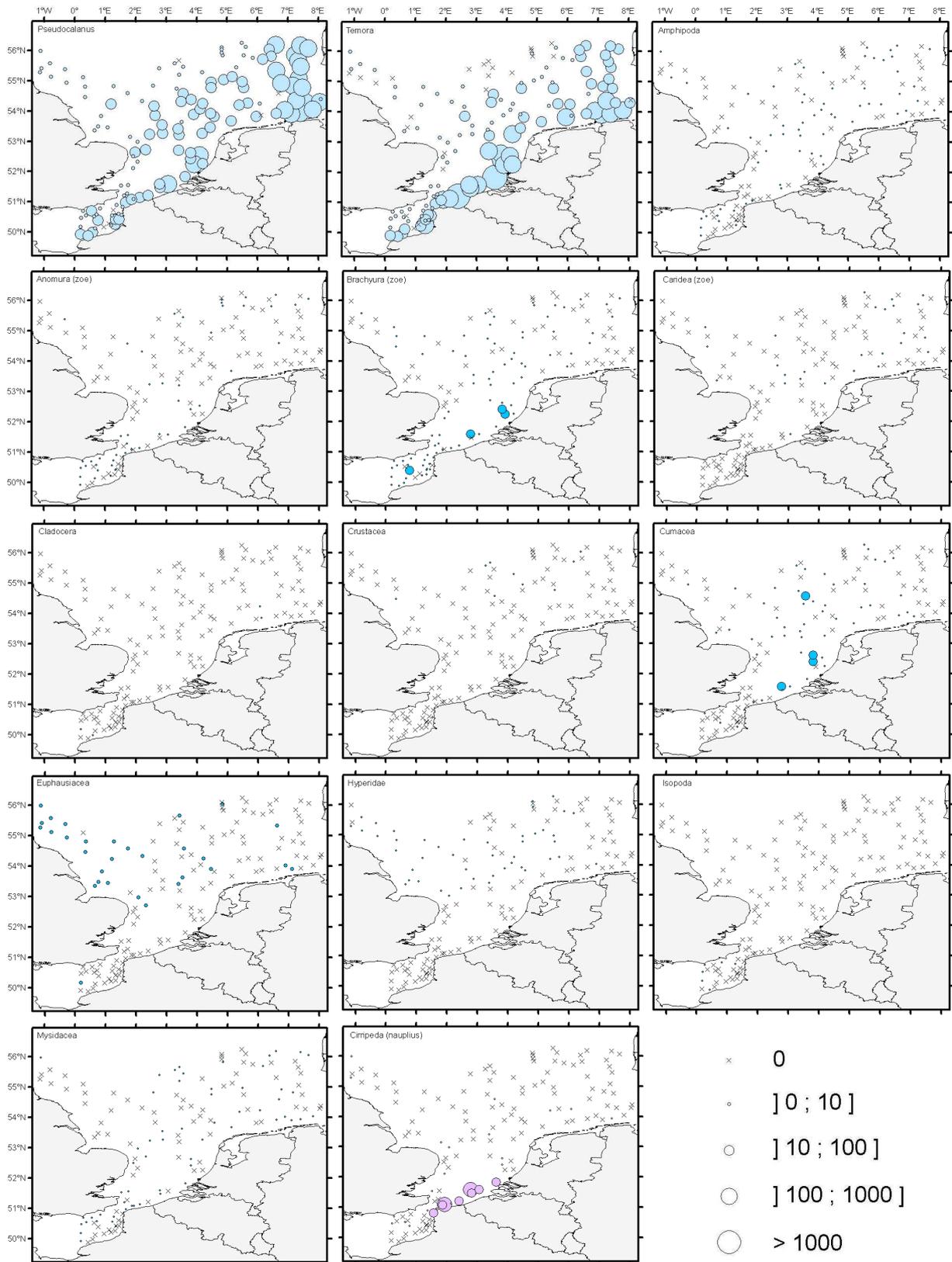
Composante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
% de variance	17.25	10.87	9.09	5.18	4.51	3.61	3.19	2.49	2.48	2.25	2.07	1.95	1.71	1.70	1.54	1.52	1.32	1.28	1.25	1.20
% cumulé	17.25	28.13	37.22	42.40	46.91	50.52	53.71	56.20	58.68	60.93	63.00	64.95	66.66	68.37	69.91	71.43	72.74	74.02	75.27	76.47

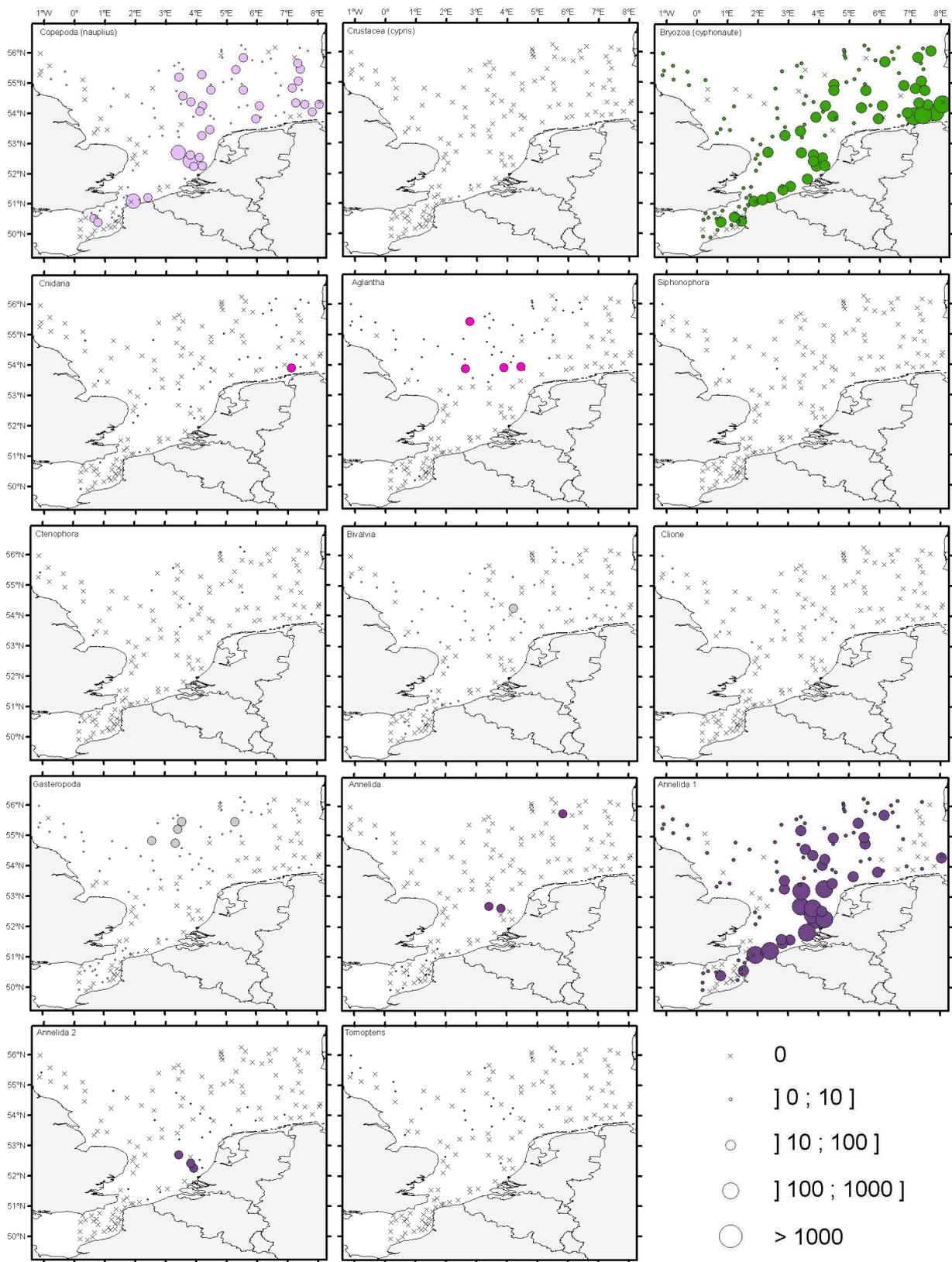


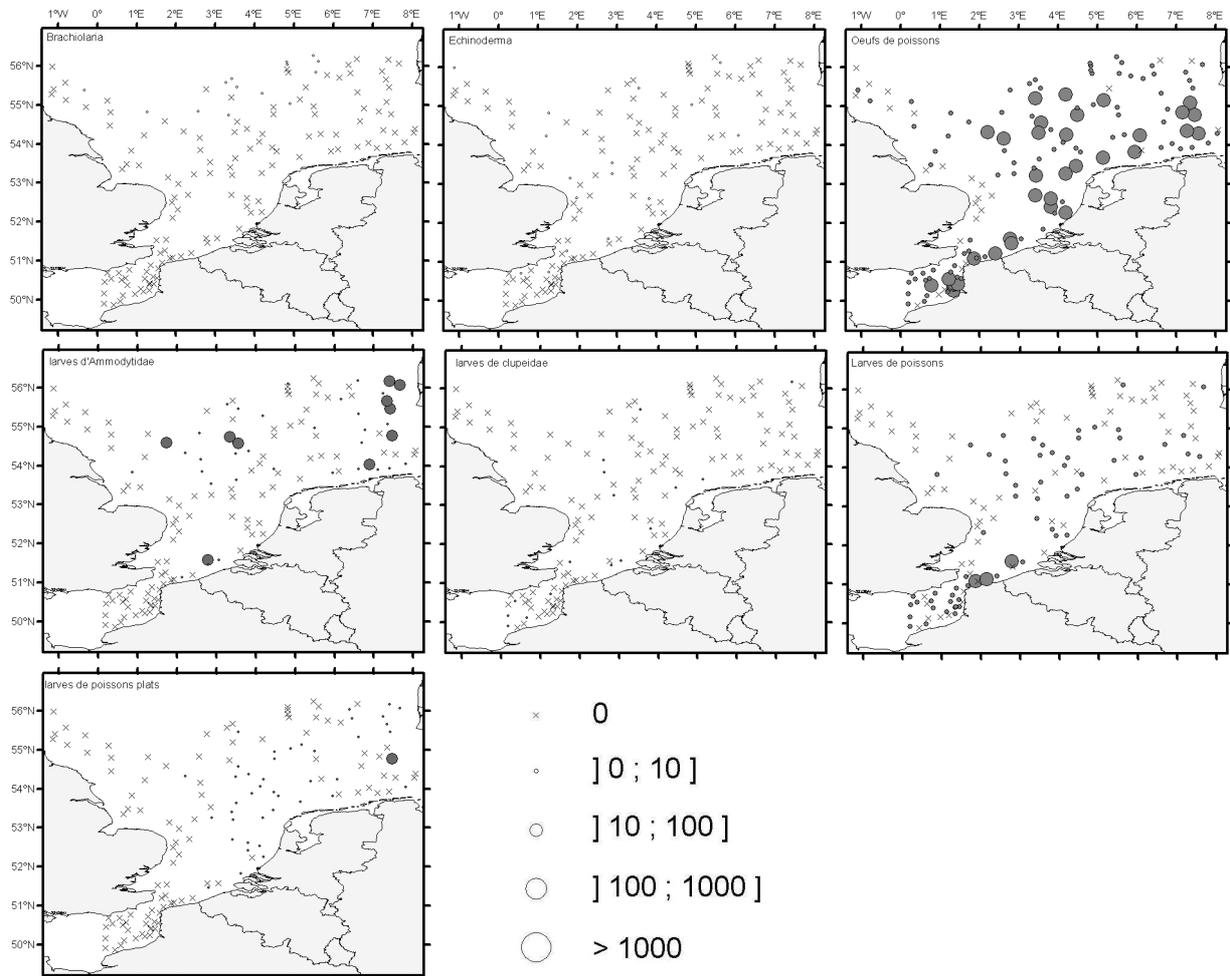
Composante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
% de variance	43.52	18.33	8.24	3.98	2.80	2.57	1.88	1.73	1.51	1.44	1.29	1.11	1.06	1.00	0.90	0.85	0.79	0.75	0.66	0.58
% cumulé de variance	43.52	61.85	70.09	74.07	76.87	79.45	81.33	83.06	84.57	86.01	87.30	88.41	89.47	90.47	91.37	92.22	93.01	93.76	94.42	95.00

Annexe 4 : Cartographie de l'abondance brute des taxons mésozooplanctoniques identifiés









RÉSUMÉ

Le but de ce travail était de mettre en place une méthode d'analyse d'image utilisant le ZooScan et sa suite logicielle associée pour le traitement en routine des échantillons mésozooplanctoniques prélevés lors des campagnes IBTS (*International Bottom Trawl Survey* ou campagne internationale au chalut de fond) hivernales. Cette méthode a été utilisée pour identifier, caractériser et cartographier la distribution des communautés mésozooplanctoniques en Manche orientale et au sud de la Mer du Nord. Le fichier d'apprentissage a permis d'obtenir une bonne identification des principaux taxons zooplanctoniques (*i. e.* copépodes, malacostracés, ichtyoplancton, appendiculaires, chaetognathes...). Cependant, pour des niveaux plus spécifiques, la validation de l'identification par un expert en taxonomie est nécessaire. La distribution spatiale de cinq assemblages a été mise en évidence et caractérisée avec les espèces indicatrices, les assemblages phytoplanctoniques correspondants et les paramètres hydrobiologiques.

Mots clés : communautés mésozooplanctoniques, Manche orientale, Mer du Nord, espèces indicatrices, analyse d'image.

ABSTRACT

This study was aimed to develop an image analysis procedure using ZooScan and its dedicated softwares for routine treatment of mesozooplankton samples from winter IBTS (*International Bottom Trawl Survey*) and use this procedure in order to identify, characterize and cartography mesozooplanktonic communities range in eastern English Channel and in the southern North Sea. The learning set obtained with the treatment of samples from winter 2008 allows a good automatical recognition (above 85%) for main mesozooplankton taxa (*i. e.* copepoda, malacostraca, ichthyoplankton, appendicularia, chaetognatha...) For a deeper specific identification, a validation procedure by a taxonomic expert is needed to improve and correct identification. The spatial distribution of five mesozooplankton assemblages was identified and characterized with indicator species, corresponding phytoplankton assemblages and hydrobiological parameters.

Key words : mesozooplankton assemblages, eastern English Channel, southern North Sea, indicator species, image analysis.