



INSTITUT MEDITERRANEEN D'OCEANOLOGIE

MASTER OCÉANOGRAPHIE

Spécialité : Océanographie Physique et Biogéochimique

Anna-Maria RAMMOU

Étude numérique Lagrangienne de la connectivité en Mer Méditerranée

Rapport de Stage réalisé au sein du laboratoire :
Institut Méditerranéen d'océanologie

Sous la Direction de : *Andrea Doglioli et Anne Molcard*

Année Universitaire : 2012–2013

Remerciements

Je voudrais remercier tout d'abord Mme Anne Molcard, M. Andrea Doglioli et M. Léo Berline pour m'avoir acceptée et encadrée pendant ce stage, pour leur aide, leur patience et leurs conseils.

Ensuite, je remercie tout particulièrement Mme Anne Petrenko, Arnaud Guyennon, Jérôme Bouffard, Marion Kersalé et Francesco Nencioli de l'équipe d'océanographie physique du MIO à Marseille pour leur disponibilité et leur soutien.

Enfin je tiens à remercier l'équipe d'océanographie physique du MIO à Toulon et particulièrement Jeremy Mansui.

Table des matières

1	Introduction	3
2	Matériels et Méthodes	7
2.1	Modèles de circulation océanique et d'advection des particules	7
2.2	Influence de la position initiale et de la date du lancement des particules sur la dispersion	9
2.3	Diagnostic de Connectivité	10
2.4	Influence du nombre initial de particules et de la résolution de la grille de connectivité sur les diagnostics de connectivité	14
2.4.1	Nombre de particules	14
2.4.2	Résolution de la grille de connectivité	16
2.5	Classification Hiérarchique	18
3	Résultats	20
3.1	Régionalisation à partir de la distance océanographique et en fonction des différents liens d'agrégation	20
3.2	Bassin Ouest	27
3.3	Bassin Est	29
4	Discussion	30
5	Conclusions et Perspectives	33

1 Introduction

De nos jours, l'importance de la protection de la biodiversité et de l'arrêt de sa régression est évidente. Préserver la diversité des espèces, des gènes et des populations signifie assurer la stabilité et la productivité des écosystèmes. Etudier leur capacité d'adaptation aux conditions environnementales du milieu ainsi que les facteurs qui influencent ces conditions s'avère alors primordial. Afin d'améliorer la gestion et la conservation de la diversité biologique, il est nécessaire de mettre en lumière les processus qui affectent les interactions entre les groupes de populations d'individus d'une même espèce (métapopulations) et entre espèces.

Pour des raisons d'isolement et/ou de sélection naturelle (adaptation des espèces au milieu) certaines populations présentent des différences génétiques. L'étude de la dynamique des sources et des puits d'une région aide à comprendre comment la migration des espèces forme la structure génétique des populations. Puisque pour protéger il faut comprendre, il convient de décrire l'organisation et la répartition des organismes vivants dans l'espace (biogéographie). Par exemple, le groupement des zones en fonction de leur dynamique écologique aide à avoir une image synoptique de la distribution de biomasse marine. Le terme de biorégionalisation est employé pour la définition des ces zones géographiques spécifiques. À titre d'exemple [D'Ortenzio & Ribera d'Alcalà \(2009\)](#) ont proposé une biorégionalisation de la mer Méditerranée issue des images satellites de couleur de l'eau. À partir d'une analyse statistique, ils ont obtenu sept classes correspondant chacune à une biorégion (Fig. 1). La classification a été basée sur les similarités entre les cycles saisonniers. L'écologie du paysage est la mise en relation de cette analyse qualitative et quantitative de la répartition spatiale des communauté d'êtres vivants avec l'activité humaine.

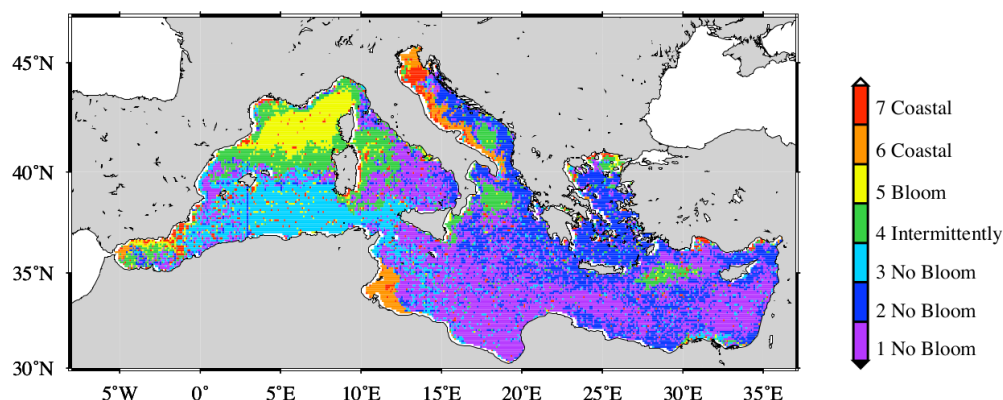


FIGURE 1 – Distribution spatiale de classes obtenues par une analyse de k-moyen de la chlorophylle de la surface. Chaque classe correspond à une biorégion. Issue de [D'Ortenzio & Ribera d'Alcalà \(2009\)](#).

Récemment, le monde de l'écologie marine a commencé à s'intéresser aux facteurs du paysage océanique qui affectent la connectivité entre les écosystèmes (Baums *et al.*, 2006; Cowen *et al.*, 2006). L'interdépendance démographique entre les populations et la variabilité des interactions entre les populations marines, qui sont séparées ou connectées dans l'espace et dans le temps, est devenu un sujet de recherche très répandu parmi les écologistes marins. La génétique du paysage océanique explore la correspondance entre la connectivité des populations et les variables suivantes : les discontinuités des habitats, la température et la salinité de la surface, la bathymétrie et le transport par les courants (Alberto *et al.*, 2011, et références incluses). Le terme connectivité désigne la probabilité qu'une particule a de se trouver au point j (destination) en partant d'un point i (source), dans un intervalle de temps donné. Une des méthodes pour étudier la connectivité consiste à créer des matrices de probabilité. Ces matrices sont notamment importantes pour les études de métapopulations (Hedrick & Kalinowski, 2000), et pour les enjeux de conservation et d'aménagement spatial (Urban & Keitt, 2001).

L'objectif de ce stage est de définir des zones d'interconnexion dans la mer Méditerranée. Dans ce cadre, nous allons développer une méthodologie pour établir une régionalisation basée sur les connexions qui s'établissent dans la mer Méditerranée. Les connexions vont être considérées comme étant uniquement établies par les courants de surface. Ce travail de stage s'insère dans la contribution du MIO (Mediterranean Institute of Oceanography) au projet européen CoCoNET (towards COast to COast NETworks of marine protected areas). La communauté scientifique européenne, fortement intéressée par la problématique de la connectivité a monté un projet qui vise à produire les lignes directrices pour la protection et la gestion de l'environnement par la mise en place d'un réseau des aires marines protégées (AMP). Le projet CoCoNET a pour but d'identifier les connexions physiques et biologiques qui éclaireront éventuellement la distribution de la biodiversité. Les résultats de la recherche dans le cadre de ce projet vont dans un premier temps vérifier si les AMP, déjà établies, sont suffisantes pour un réseau écologique et proposer ensuite des schémas de protection basée sur les échanges efficaces entre les AMP. Pour plus d'information le lecteur peut s'adresser à <http://www.coconet-fp7.eu/index.php/about-coconet>.

La connaissance de la connectivité est très importante à l'égard de la gestion de la pêche, de la compréhension des recrutements des larves et de l'élaboration des réseaux des AMP. Les AMP sont des terrains d'étude particulièrement intéressants grâce à leur grande productivité et diversité. Les populations dans et entre les AMP sont connectées par la dispersion des larves. Les larves présentent une phase planctonique dès les premiers jours de leur vie et qui peut durer de quelques jours à quelques mois (Kinlan & Gaines, 2003).

Les estimations de la dispersion des larves sont faites d'une part en appliquant des techniques empiriques (Thorrold *et al.*, 2002; Jones *et al.*, 2005) et d'autre part avec des techniques numériques (Cowen *et al.*, 2000; James *et al.*, 2002). En outre, les études *in situ* de dispersions des larves, c'est-à-dire suivre directement leurs trajectoires, sont limitées à cause des difficultés d'échantillonnage. Les larves sont de très petite taille et leur présence dans l'environnement est rare (Paris & Cowen, 2004) puisqu'il s'agit d'un stade transitoire entre l'œuf poisson et l'adulte poisson. De plus, leur présence dans un endroit dépend de l'état trophique de l'eau et du cycle de vie de l'espèce. Les mouvements des larves s'effectuent à de très petites échelles en laissant les courants océaniques déterminer leur destination (Watson *et al.*, 2010) et affecter la dynamique de populations (Gaylord & Gaines, 2000). La dispersion des larves est décrite à partir du champ des vitesses et de deux variables biologiques fondamentales (Siegel *et al.*, 2003) : la durée de la phase planctonique d'une larve et la durée qu'il lui faut pour s'installer. Ces deux périodes décrivent le temps où la larve est soumise à l'influence des processus océaniques. En considérant les larves comme des particules passives qui sont entraînées par les courants, les outils lagrangiens peuvent très bien décrire leur dispersion. Les diagnostics lagrangiens mesurent le transport le long les trajectoires des particules-contrairement aux diagnostics eulérien qui analysent des champs instantanés de vitesse. Les bouées lagrangiennes par exemple donnent la trajectoire qui permet de décrire la circulation. Les trajectoires des particules sont influencées par les courants et sont en grande partie imprévisibles car gouvernées par des processus stochastiques (Siegel *et al.*, 2008; Berkley *et al.*, 2010). Les trajectoires des particules sont également fortement influencées par la bathymétrie, les lignes des côtes, la stratification et les forçages atmosphériques. Le champ de vitesse doit alors être connu et ce jusqu'à une échelle de quelques kilomètres (mésos- et submésos-échelle). Afin d'avoir des statistiques robustes il faut un nombre d'observation très important. Or le nombre de bouées lagrangiennes qui peuvent être employées dans la zone d'étude est limité. Les études numériques s'avèrent donc être idéales pour le calcul de probabilités de la dispersion des particules. Le nombre de particules numériques lancées n'est limité que par les capacités informatiques. Les trajectoires des particules dont leurs positions initiales sont bien définies, sont prévues à l'aide des modèles lagrangiens à partir d'un champ de vitesse en ajoutant éventuellement une partie stochastique. La prédiction du transport des particules de manière quantitative est encore une question ouverte malgré les progrès des études sur la circulation océanique. La dispersion est plus précise quand elle est modélisée par des approches qui quantifient la probabilité d'une particule d'être transporté d'un endroit à l'autre dans un intervalle de temps donné (connectivité) (Pope, 2000; Mitarai *et al.*, 2003).

La dispersion larvaire varie de quelques mètres à quelques centaines de kilomètres. En générale

pour une durée de la phase planctonique importante la larve se disperse potentiellement plus loin (Siegel *et al.*, 2003). Le modèle d'isolation par la distance suggère que la différenciation génétique augmente avec la distance entre les populations. C'est un modèle robuste en milieu terrestre mais en milieu marin ce n'est pas le cas puisque la structure du champ de courants peut avoir un fort impact. Un front par exemple constitue une barrière pour des larves pélagiques et un tourbillon une zone d'agrégation. Par conséquent, la dispersion larvaire n'est pas liée à une distance géographique telle que la distance euclidienne (Weersing & Toonen, 2009). C'est extrêmement rare pour deux sites voisins qui sont séparés par un front d'avoir des échanges entre eux (Gilg & Hilbish, 2003). En revanche deux sites éloignés peuvent très bien être connectés grâce à un fort courant (Mitarai *et al.*, 2009). La distance euclidienne ne peut donc pas représenter la connectivité de la population en milieu marin (White *et al.*, 2010).

Ainsi un autre diagnostic est utilisé : celui de la distance océanographique qui peut être définie comme le minimum entre le temps de connexion moyen du point i au point j et du point j au point i (Alberto *et al.*, 2011). L'approche d'une étude d'isolation génétique par la distance océanographique est prouvée comme étant très efficace à la structure des schémas de génétique de population (White *et al.*, 2010). Prédire la connectivité entre les populations par la distance océanographique a pour avantage le fait qu'elle fournit l'information sur la direction (Alberto *et al.*, 2011). Les courants océaniques sont caractérisés par une asymétrie inhérente qui fait que le nombre de larves se dispersant d'un site à l'autre diffère en fonction de sa direction. Les termes connectivité, source et puits sont donc employés pour décrire cette asymétrie. Un aspect très important de cette asymétrie est le fait que la viabilité des métapopulations ne dépend pas du nombre de groupes distincts mais de la connectivité entre ces groupes (Vuilleumier & Possingham, 2006). Cette dernière notion renforce l'importance de la connectivité pour le contrôle et la gestion des aires marines protégées par exemple.

Dans cette étude le modèle lagrangien ARIANE sera implémenté pour une advection des particules à partir des vitesses d'un modèle océanique eulérien, NEMO-dans sa configuration MERCATOR. La partie stochastique n'est pas calculée par ARIANE mais est en partie intégrée dans le modèle de circulation océanique par la paramétrisation de la turbulence. Dans le cadre de ce travail les aspects biologiques ont été négligés et seulement l'influence des courants sur le transport des particules a été considérée. Nous allons ensuite calculer des matrices de connectivité et la distance océanographique dans la mer Méditerranée. Enfin nous allons identifier des zones d'inter-connexion. Pour cette raison nous allons grouper les zones d'inter-connexion en utilisant la classification hiérarchique (cf Annexe 1). La classification hiérarchique consiste une méthode statistique répandue dans les études climatologiques (Weber & Kaufmann, 1995) et océanographiques pour le regroupement des données hydrologiques (De Gaetano *et al.*, 2010).

2 Matériels et Méthodes

2.1 Modèles de circulation océanique et d'advection des particules

L'information sur le champ des courants est fournie par le système MERCATOR OCEAN (MO). Il s'agit d'une configuration spécifique du modèle NEMO. Le code source de la dynamique d'océan a été adapté aux besoins de MO sous la forme des cinq configurations comme par exemple celle d'Atlantique du Nord (MNATL). Le modèle NEMO a été développé par le Laboratoire d'Océanographie et du Climat (LOCEAN) et est un modèle hydrodynamique qui résout les équations primitives en faisant les approximation appropriées. Le système MO modélise l'état actuel, futur ou passé de la physique ou biogéochimie océanique avec ou sans assimilation de données. Le processus d'assimilation des données de la physique océanique du système MO est basé sur le fait que le modèle est forcé de corriger son état initial à partir des observations (satellitaires et in situ), quand celles-ci sont disponibles. L'objectif de cette correction vise l'analyse de l'état de l'océan la plus probable possible.

Les schémas de discrétisation utilisés dans MERCATOR sont les suivants :

Une grille PGN (*Native Grid*) de type Arakawa C (Mesinger *et al.*, 1976) où les variables pronostiques (les trois composantes de la vitesse, la température et la salinité- U,V,W,T,S) sont distribuées dessus. C'est une grille décalée (toutes les variables ne sont pas situées sur le même nœud), détendue et tournée (les lignes qui connectent les pôles ne correspondent pas aux méridiens géographiques). Les champs scalaires (T,S, ρ , p, divergence horizontale) sont définis au point T et les champs vectoriels aux points u,v,w (Fig. 2). La résolution horizontale est de $1/12^\circ$, c'est-à-dire variant de 8 km au Sud et 6 km au Nord dans la mer Méditerranée. Selon la verticale, le modèle utilise 50 niveaux de coordonnées curvilignes de type z ; les niveaux verticaux ne correspondent pas aux profondeurs standards mais aux niveaux verticaux du modèle.

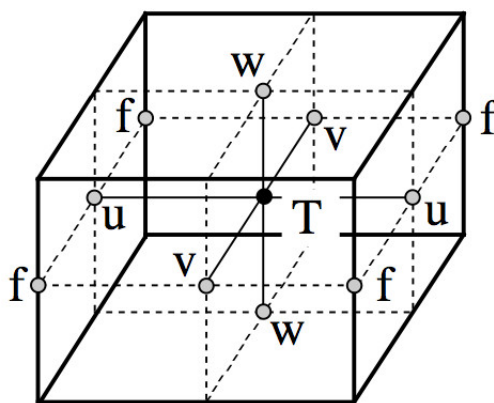


FIGURE 2 – Arrangement des variables dans une grille de type C. Les champs scalaires (T,S, ρ ,p,divergence horizontale) sont définis au point T et les champs vectoriels aux points u,v,w.

Le modèle MERCATOR nous permet de décrire la circulation de surface en mer Méditerranée (i.e. la circulation de l'eau de l'atlantique, AW) (Fig. 3 a). La bifurcation de l'AW au niveau du canal de Sicile crée deux gyres dans les bassins occidental et oriental. De ces derniers se détache principalement cinq structures ; le courant Nord, le courant Algérien, le gyre cyclonique d'Adriatique du Sud, le courant d'Asie Mineur et le courant Libyo-égyptien. Les gyres de la partie Sud des deux bassins présentent des instabilités générant des tourbillons anticycloniques qui se propagent vers le large. Le schéma de circulation moyenne calculé par le modèle est en accord avec le schéma proposé par la littérature (Fig. 3 b).

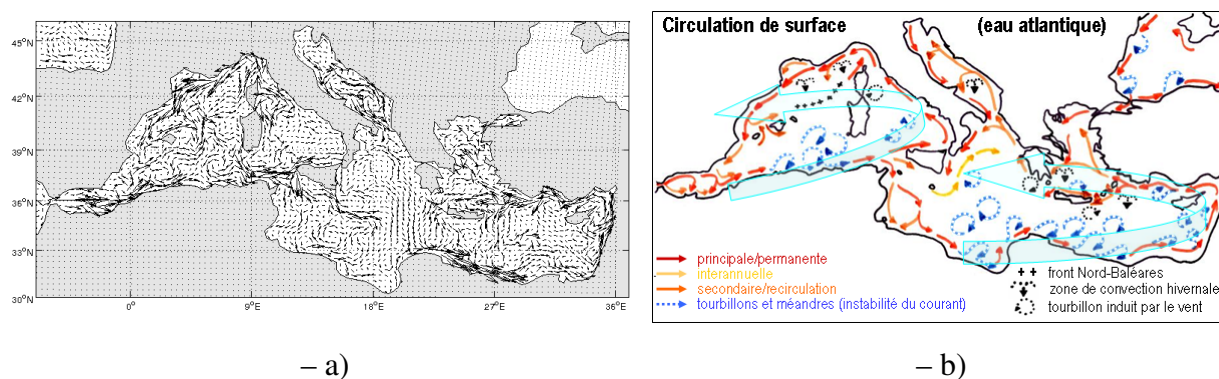


FIGURE 3 – Circulation de la surface. Moyenne sur trois ans (2007-2010) de vitesses MERCATOR (a) et d'après [Millot & Taupier-Letage \(2005\)](#) (b)

L'outil diagnostic lagrangien ARIANE ([Blanke & Raynaud, 1997](#)) développé au Laboratoire de Physique des Océans (LPO, Brest, France) a été utilisé afin d'étudier les parcours des particules numériques. Cet outil utilise les sorties des modèles de circulation océanique afin d'intégrer les trajectoires des particules numériques. ARIANE donne la possibilité de deux modes d'intégration ; en avant et au rebours du temps (*forward* et *backward*) et deux modes d'analyse ; une qualitative (trajectoires) et une quantitative (fonction de courant, flux de masse). L'étude des trajectoires est effectuée avec une intégration des champs de vitesse positive dans le temps. Le schéma d'advection est adapté à la circulation océanique en trois dimensions ([Blanke & Raynaud, 1997](#)). En ce qui concerne la vitesse verticale, ARIANE peut l'utiliser directement à partir du modèle océanique ou la calculer par continuité. Dans le cadre de ce travail, nous avons décidé de considérer *a priori* la vitesse verticale comme nulle.

Les schémas de discrétisation utilisés dans ARIANE consistent en une grille de type Arakawa C. Les mailles du modèle sont centrées par rapport à la grille de la température. Il faut donc éviter d'initialiser les particules aux sommets de la grille car la vitesse ne sera pas parfaitement définie. Concrètement, le positionnement des particules se fait en mettant des indices demi-entiers dans le fichier *initial-postions.txt*.

Après l'interpolation de la vitesse (issue du modèle de la circulation océanique) par ARIANE la particule est advectée par le courant. La discrétisation des équations primitive dans une grille C permet le calcul analytique des lignes de courants de segments successifs (Blanke & Raynaud, 1997) pour un champ de vitesse et dans une période donnée. Ce schéma d'intégration a l'avantage de respecter localement la conservation de masse. Les vitesses sont calculées aux coins des mailles en respectant localement le flux tridimensionnel et non-divergent. La non-divergence du champ de la vitesse permet d'avoir des trajectoires continues dans la maille. En faisant l'hypothèse de la variation linéaire des vitesses le long des axes, les équations élémentaires s'avèrent satisfaisantes pour décrire les trajectoires.

Des particules numériques ont été placées dans le bassin Méditerranéen selon une grille régulière avec un pas d'espace de 10 km. Une fois les positions initiales exprimées en indices d' ARIANE, le modèle est prêt à tourner.

Nous avons eu à disposition quatre ans (2007-2010) de données de courants journalières provenant du MERCATOR. Cela veut dire que nous pouvons lancer les particules pendant les trois premières années. Les particules sont intégrées pour une durée d'un an pour une étude à l'échelle du bassin.

2.2 Influence de la position initiale et de la date du lancement des particules sur la dispersion

Concernant les particules il y a trois conditions pouvant influencer leurs trajectoires. La position initiale, la date du lancement et la durée d'advection. Par exemple des particules lancées du Golfe du Lion à un temps donné peuvent se trouver au bout d'un an aussi bien dans la mer de Ligur qu'entrer dans le canal de Sicile ou aller vers Gibraltar (Fig. 4). Il en va de même pour les deux autres conditions.

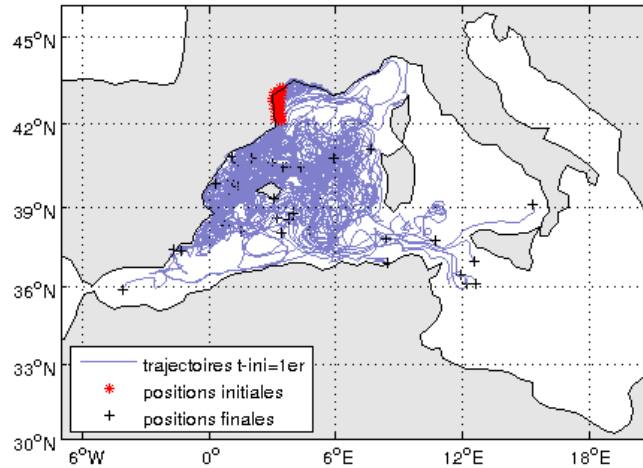


FIGURE 4 – Trajectoires lagrangiennes des particules lancées dans la partie Ouest du Golfe du Lion le 1er Janvier 2007. La durée d’advection est un an. Les croix noirs indiquent les positions finales et les points rouge les position initiales.

Cette dépendance des trajectoires aux conditions initiales indique la nature chaotique des trajectoires, surtout dans des eaux côtières et turbulentes. Par conséquent la complexité des analyses lagrangiennes est grande. Cette complexité rend évident la nécessité de quantifier toutes les informations issues de cette variabilité. Une façon de les quantifier est à partir du calcul des matrices de connectivité.

2.3 Diagnostic de Connectivité

Nous avons calculé la connectivité entre des mailles carrées de taille dl en km. Les positions le long de trajectoires sont exprimées en degrés de longitude et de latitude et transformées en indices de la grille de connectivité avec la résolution spatiale désirée (dl en km) (Fig. 5). Le nombre de particules dans des mailles carrées de dimension $dl \times dl$ est constant. Dans les mailles contenant un trait de côte le nombre diminue. Ceci est liée à la différence de résolution entre les deux grilles : les mailles de la grille de connectivité sont de taille $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$, $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ ou $1000 \text{ km} \times 1000 \text{ km}$ alors que les mailles de la grille du positionnement initial des particules sont de $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$.

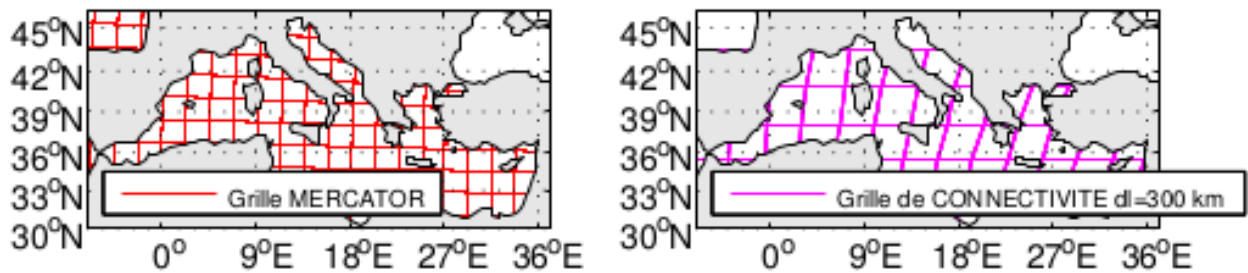


FIGURE 5 – Grilles de MERCATOR et de Connectivité dl=300 km

Matrice de Connectivité

La connectivité, selon [Mitarai et al. \(2009\)](#), est la probabilité que des particules soient advectées d'une position à une autre sur un intervalle de temps défini.

Pour chaque couple de mailles (i,j) nous avons calculé la connectivité (C) comme la probabilité de connexion entre les deux mailles en un temps égal à $t = t_{adv}$

$$C(i, j) = \frac{N t.q. \mathbf{x}(t) = i \ \& \ \mathbf{x}(t + t_{adv}) = j}{N_{tot}}$$

avec N le nombre des particules, \mathbf{x} le vecteur de la position, t est le temps de 1 janvier 2007 à 31 décembre 2009 et N_{tot} le nombre initial des particules dans une maille contenant exclusivement des points mer.

Temps de connexion moyen (MCT)

Pour chaque couple de maille (i,j) le temps de connexion moyen (MCT) est le temps moyen que met une particule à connecter la maille i à la maille j .

$$MCT(i, j) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{n=N} T_n(i, j)$$

où M le nombre de passages de i à j (ou nombre des particules qui connectent i à j), T_n est le temps que met la particule pour aller de i à j . Si la maille i n'est pas connecté à la maille j , l'étiquette 999 jours est affectée au MCT .

Comme pour la connectivité pour prendre en compte la fraction de surface mer/terre nous multiplions par la fraction des points mer de la maille.

Distance Océanographique

Pour chaque couple de mailles nous obtenons donc deux valeurs car le *MCT* pour le déplacement des particules d'un point *i* à un point *j* diffère du *MCT* pour le déplacement du point *j* au point *i*. Nous avons eu la possibilité de choisir entre la moyenne, comme [Watson et al. \(2010\)](#), ou le minimum entre ces deux temps. Nous avons choisi le minimum du temps de connexion moyen parce qu'il quantifie mieux le mélange génétique entre deux populations distinctes ([Alberto et al., 2011](#)).

Dans un premier temps nous avons divisé le bassin Méditerranéen avec un pas d'espace de $dl=1000$ km. Nous obtenons donc sept mailles (Fig. 6). Les particules appartenant à chaque maille peuvent se déplacer vers les autres mailles ou rester dans la maille initiale (Fig. 7).

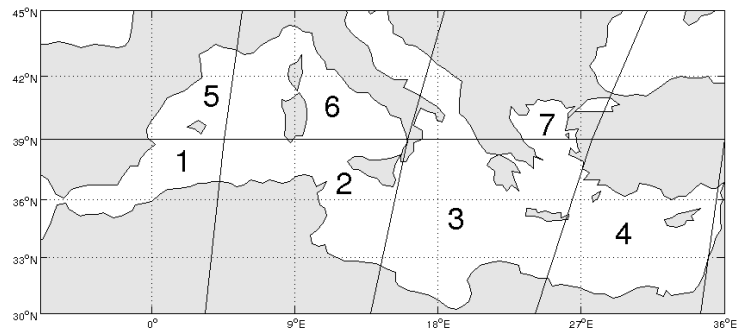


FIGURE 6 – Indices de grille de connectivité pour un $dl=1000$ km

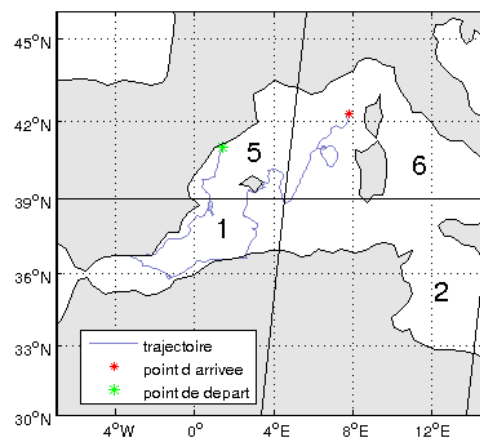


FIGURE 7 – Exemple d'une trajectoire partant de la maille 5 et terminant en maille 6 au bout d'un an, après avoir traversée dans l'ordre les mailles 5-1-5-2-6.

Nous avons ainsi comptabilisé les différentes connexions possibles entre les différents couples de mailles et avons calculé la probabilité de chaque connexion. Nous avons ainsi construit des matrices de connectivité où chaque ligne représente tout le domaine d'étude. Les différentes lignes représentent les différentes mailles initiales (sources) et les colonnes les différentes destinations possibles (puits). La matrice de connectivité (Fig. 8 a) contient toutes les informations quantitatives de connexion entre les mailles ; mais est parfois difficile à lire. Pour une représentation géographique nous devons choisir une ligne (un point source) ou une colonne (une destination) particulière de la matrice (Fig. 8 b). Toutes les particules qui ont été lancées de la maille 5 (entre longitude 0° et 7° et latitude 39° et 43°), qui correspondent à la ligne 5 de la matrice de connectivité, ont une probabilité 0,0671 de se trouver exactement un an après leur lancement dans la mer Tyrrhénienne mais une très faible probabilité (environ 0,0001) qu'elle passe dans le bassin Est (Fig. 8 b).

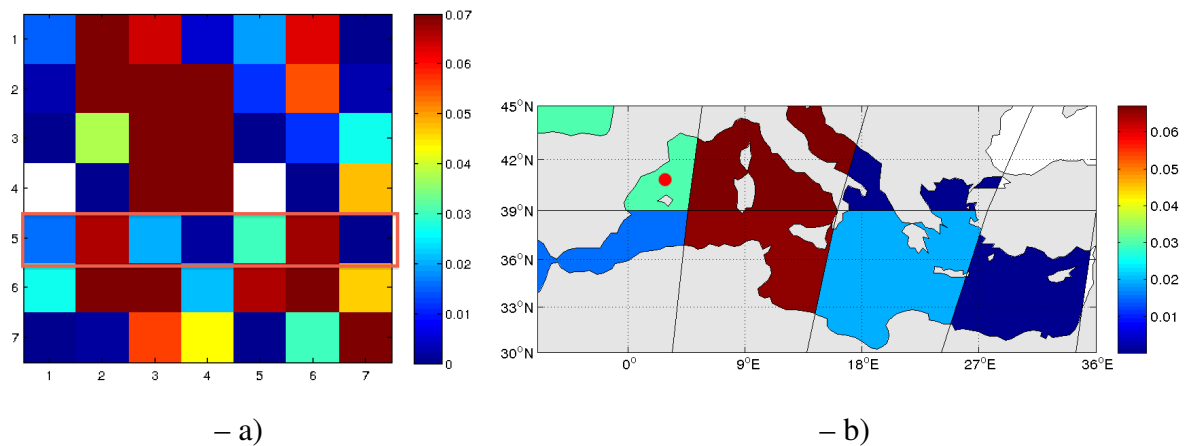


FIGURE 8 – Matrice de connectivité (a), les lignes sont les points sources (i) et les colonnes les points destinations (j). Représentation géographique de connectivité de particules initiales dans la maille 5 (point rouge) (b). Résolution de grille de connectivité $dl=1000$ km.

Ensuite nous avons calculé le temps de connexion moyen, c'est-à-dire le temps moyen nécessaire pour une particule aller d'une maille à une autre (Fig. 9 a). Cependant dans certains cas le nombre de particules est trop faible pour avoir une moyenne robuste alors nous avons introduit un seuil à partir duquel nous acceptons la valeur du temps de connexion moyen (Fig. 9 c et d). Ce seuil est un ordre de grandeur plus petit du nombre maximal de passages. Une particule issue de la maille 5 met 51 jours pour atteindre la maille 3 dans le bassin Est (Fig. 9 b).

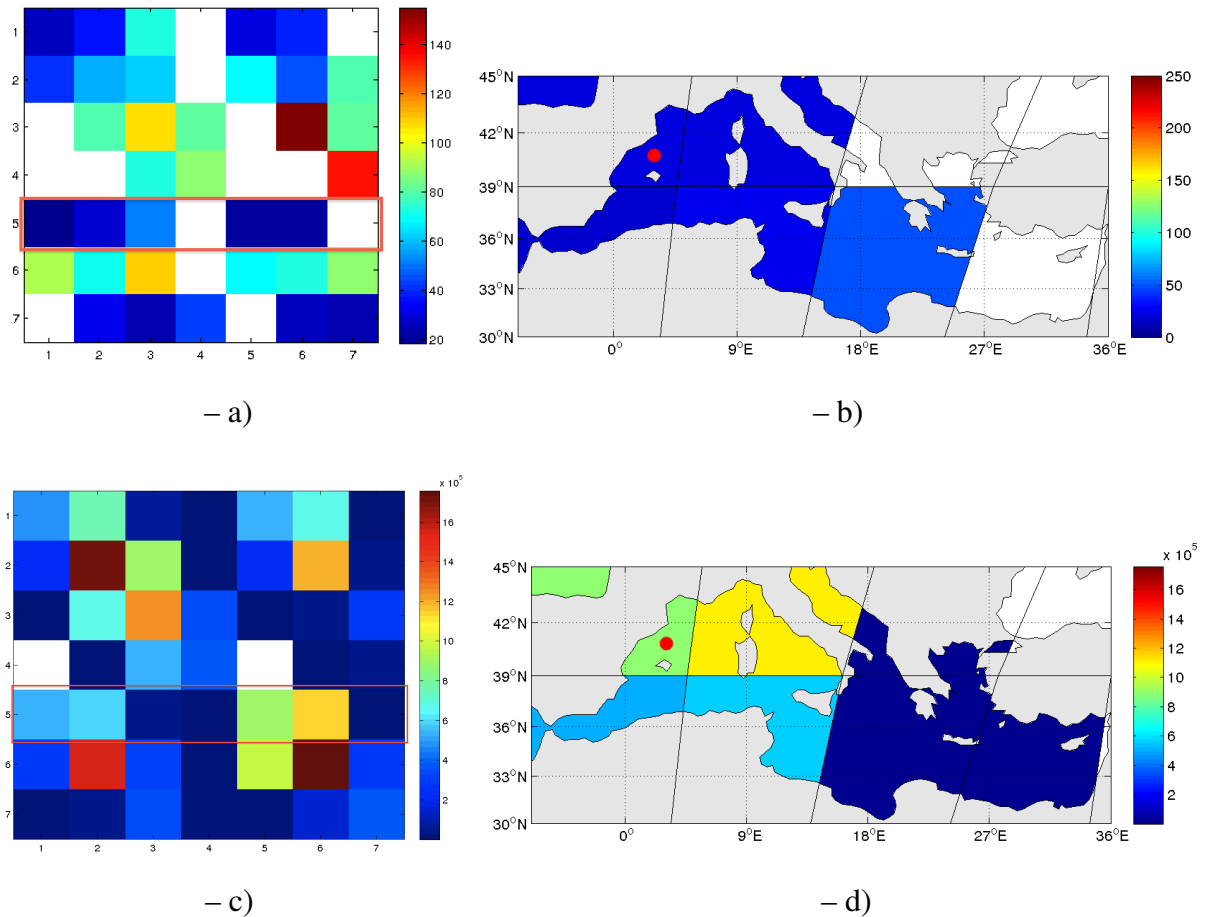


FIGURE 9 – Matrices du temps de connexion moyen (a) et du nombre de passages possibles (c). Les lignes sont les points sources (i) et les colonnes les points destinations (j). Temps de connexion moyen (b) et nombre de passages possibles (d) pour les particules initiales dans la maille 5, indiquée par le point rouge. Résolution de grille de connectivité $dl=1000$ km.

2.4 Influence du nombre initial de particules et de la résolution de la grille de connectivité sur les diagnostics de connectivité

Afin d'avoir une statistique robuste lors de la quantification des trajectoires numériques, le nombre de particules numériques optimal doit être choisi. Une fois choisi le nombre de trajectoires satisfaisantes pour notre étude, il faut définir la résolution de la grille de connectivité. Ce choix va influencer les diagnostics : une résolution fine permettra des résultats plus précis mais le nombre des particules nécessaires va augmenter considérablement pour avoir plus d'information sur les connexions.

2.4.1 Nombre de particules

La première question posée est quel est le nombre des particules (N) optimal pour le calcul de la matrice de connectivité. La réponse n'est pas simple. Il y a deux façons pour modifier le nombre de particules. Par un lancement plus intense en espace et/ou en temps. Par exemple les particules

peuvent être lancées tous les dix ou tous les quatre kilomètres, chaque mois ou chaque jour. Par contre il faut tenir compte le fait que chaque changement, ajoute une variabilité considérable, liée au fait que la dispersion est fortement influencée par les conditions initiales. Néanmoins nous cherchons un nombre de particules où la matrice de connectivité converge (commence à avoir peu de variations).

Nous avons choisi trois résolutions de la grille de connectivité : $dl=50$ km, $dl=300$ km et $dl=1000$ km, des positions initiales chaque dix kilomètres et 1 à 9 lâchers par mois, ce qui donne un nombre de particules maximale N_{max} qui varie entre 230.814 et 25.646. Nous avons pris deux ans (2007-2008) des données des courants et nous avons intégré les particules pour une durée d'un an.

La somme de la différence absolue entre deux matrices successives a été calculée, $diff_l = \sum_i \sum_j (|C^l(i, j) - C^{l-1}(i, j)|)$, avec $l=b$ à i les différents tests pour les différentes fréquences de lâcher (Tableau I). La matrice atteint la convergence quand la différence tend vers zéro (Fig. 10).

L'effet de l'augmentation du nombre des particules est pareille pour chaque dl . En augmentant deux fois le nombre de particules la diminution de différence entre les deux matrices est de l'ordre de 40 % pour $dl=50$ km, 58 % pour $dl=300$ km et 60 % pour $dl=1000$ km. En général une augmentation 100 % du nombre de particules évoque une diminution d'environ 50 %. La diminution étant plus élevée pour le cas d'une grille de plus basse résolution. Le nombre de particules, $N=230.814$, a été choisi pour être compatible avec nos capacités de calcul et de mémoire. Cependant nous avons montré que pour des $N > 179.522$ la matrice ne change pas significativement. Le nombre de particules choisi ($N=230.814$) est donc pertinent.

TABLEAU I -Les différents tests pour les différentes fréquences de lâcher

l	N_{max}	Nombre de lâchers/mois	% augmentation par rapport à l'état $l-1$
a	25.646	1	-
b	51.292	2	100
c	76.938	3	50
d	102.584	4	33
e	128.230	5	25
f	153.876	6	17
g	179.522	7	14
h	205.168	8	12
i	230.814	9	11

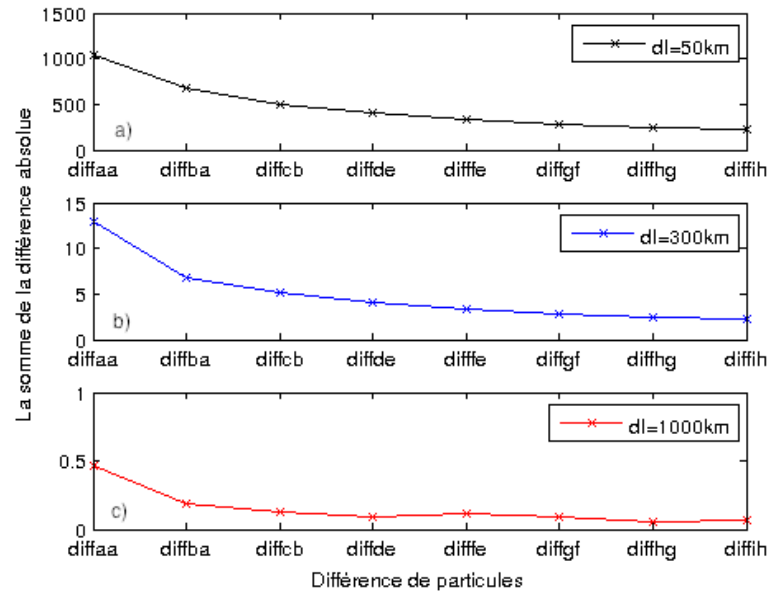


FIGURE 10 – La différence absolue entre deux matrices successives pour les différentes résolutions de grille de connectivité. Pour un $dl=50$ km la matrice n’atteint pas la convergence (a). Pour les (b) $dl=300$ km et (c) $dl=1000$ km il y a convergence à 100 %

Avec une résolution spatiale de 10 km, le nombre de positions initiales dans la mer Méditerranée est de 25.646. En choisissant neuf dates initiales de lancement par mois on obtient 324 temps initiaux. Le nombre total des particules est de 8.309.304.

2.4.2 Résolution de la grille de connectivité

Ensuite nous avons examiné l’influence de la résolution dl sur les matrices de connectivité et de temps de connexion moyen. Le nombre de particules est $N=230.814$ et les dl varient de 30 km à 100 km avec un pas de 10 km et de 200 km à 1000 km avec un pas de 100 km. La somme des indices nuls correspond au nombre de mailles non-connectées (Fig. 11). Les connexions augmentent avec le pas de grille. Le temps de connexion moyen est meilleur que la matrice de connectivité car les matrices sont plus remplies pour de dl plus petit. Le choix d’une résolution à 300 km paraît pertinent parce que c’est un bon compromis entre le nombre de mailles non vide et l’étendue de notre domaine.

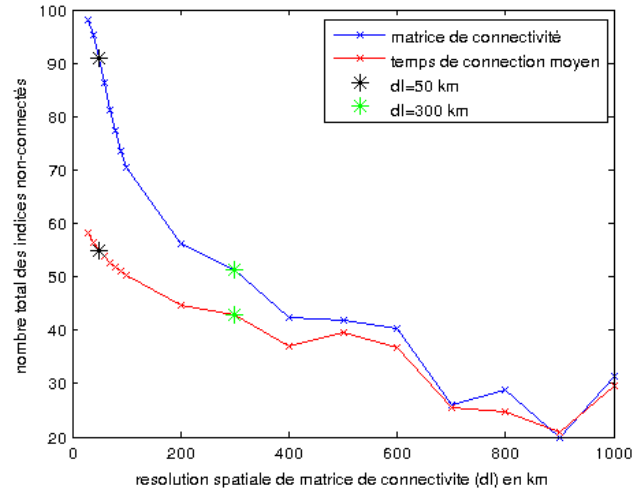


FIGURE 11 – Nombre total des indices non-connectés dans les matrices de connectivité et du temps de connexion moyen en fonction la résolution de grille de connectivité, dl .

Augmenter la résolution permet de mieux déduire les échanges entre les bassins. Cependant l'interprétation devient plus difficile car le nombre des mailles augmente. Pour une résolution de 300 km par exemple le nombre des mailles est de 55 (Fig. 12 a).

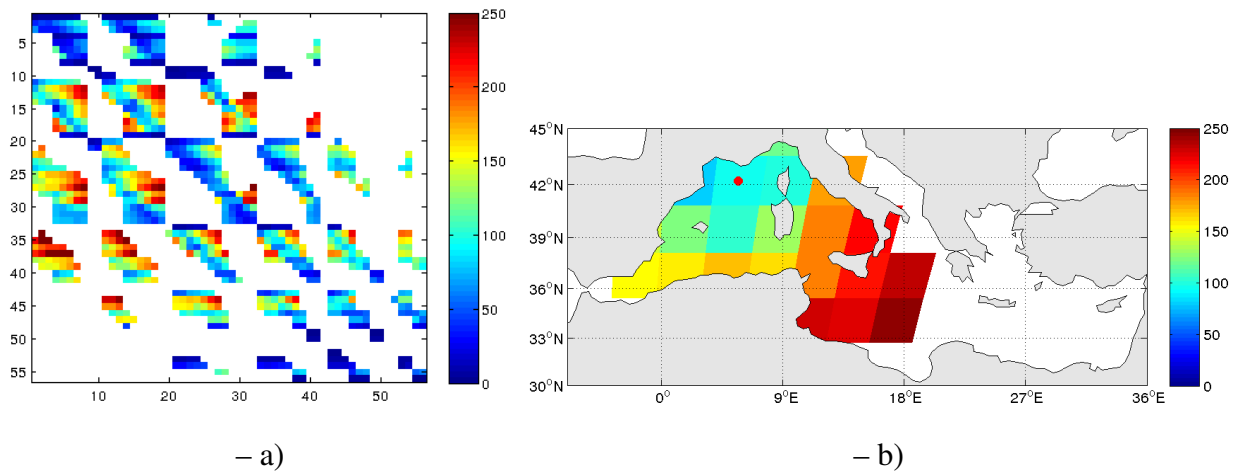


FIGURE 12 – Matrice du temps de connexion moyen (a) et sa représentation géographique pour les particules initiales dans la maille 44 indiquée par le point rouge (b). Résolution de grille de connectivité $dl=300$ km.

De plus, certaines mailles sont traversées par de la terre (la péninsule italienne coupe la maille à $12^{\circ}E$ $42^{\circ}N$ par exemple). Les résultats alors sont difficilement interprétables du point de vue océanographique. La statistique de la maille prend en compte des passages des particules par les deux côtés. Pour cette raison la résolution doit être augmenté ultérieurement ($dl=50$ km) (Fig. 13).

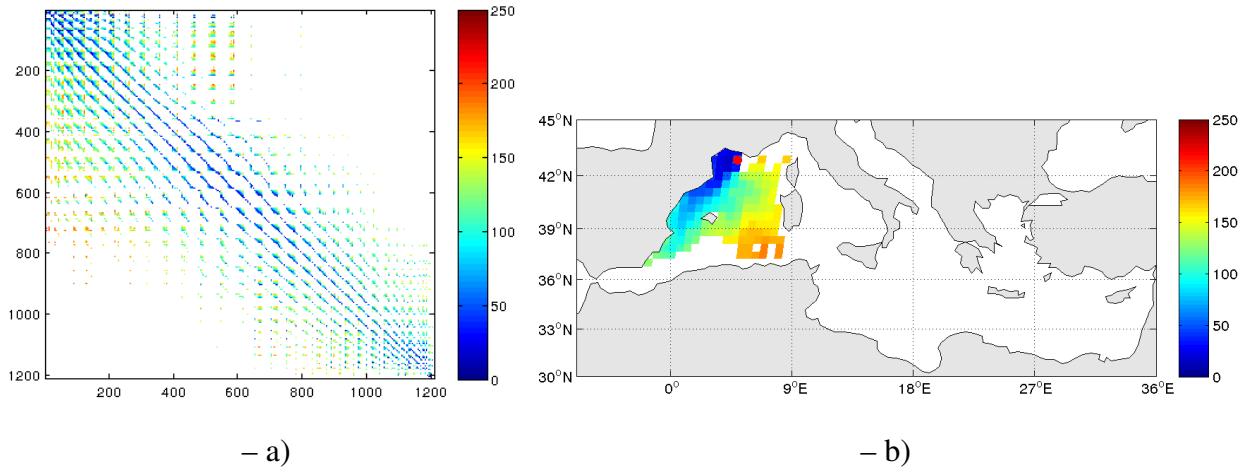


FIGURE 13 – Matrice du temps de connexion moyen (a) et sa représentation géographique pour les particules initiales dans la maille 1133 indiquée par le point rouge (b). Résolution de grille de connectivité $dl=50$ km.

Une fois caractérisé les matrices de connectivité nous les utilisons pour régionaliser le domaine d'étude.

2.5 Classification Hiérarchique

Nous allons utiliser la distance océanographique pour partitionner la mer Méditerranée par la classification hiérarchique, en sous-domaines similaires.

La classification hiérarchique est une opération qui permet d'attribuer un ensemble d'objets dans différentes classes de telle façon que chaque objet appartienne à une et à une seule sous-classe, pour la partition en question (Legendre & Rogers, 1972). Les objets sont regroupés en fonction de leur ressemblance, basée sur une distance définie. C'est-à-dire que les objets qui appartient au même groupe se ressemblent plus (sont plus proches) entre eux qu'avec les objets des autres groupes. Il faut donc définir un degré de similarité entre les objets afin de les séparer ou les regrouper. Le choix de cette distance entre les objets est critique et dépend du type des données.

Les objets se sont éventuellement séparés par cette distance et rassemblés à partir d'un critère d'agrégation. Ce critère devient la mesure de distance entre les classes et conditionne la répartition de classes hiérarchiquement. La classification par agglomération commence avec un nombre de classes égale aux observations, où chaque observation représente une classe. Les deux objets les plus proches sont identifiés et ensuite considérés comme un tout. La distance est recalculée pour que les deux nouveaux objets les plus proches soient encore identifiés et ainsi de suite jusqu'à une seule classe qui contient toutes les observations.

Les critères d'agrégation pour la formation des groupes par agglomération hiérarchique sont : le lien simple, le lien complet, le lien moyen (WPGMA¹), le lien moyen en poids proportionnels (UPGMA¹), le lien flexible, le centroïde et le médian. Les deux dernières ne sont compatibles qu'avec la distance euclidienne et ne seront pas considérées ici. Le lien simple définit la distance entre les différents couples de classes comme la distance minimale. Le lien complet choisit la distance maximale entre les objets d'un groupe. Distance qui représente la plus petite sphère qui peut englober tous les objets de la classe (Martinez & Martinez, 2001). Le critère WPGMA calcule la distance moyenne (en prenant en compte le nombre de partitions précédentes) et le critère UPGMA calcule la distance moyenne entre tous les couples de chaque classe où tous les objets ont le même poids.

Lance & Williams (1967) ont proposé un modèle générale qui englobe toutes les différentes méthodes. Les deux groupes k et l fusionnent et créent la classe m . La distance entre la classe m et une classe g est une fonction de la distance entre k et l , k et g et l et g .

$$D(m, g) = \alpha_k D(k, g) + \alpha_l D(l, g) + \beta D(k, l) + \gamma |D(k, g) - D(l, g)|$$

La méthode dépend de la valeur des différents paramètres α_k , α_l , β et γ (Tableau II).

Les résultats du groupement flexible varient selon la valeur du paramètre β . De cette manière nous pouvons obtenir tous les résultats entre la contraction du lien simple (β tend vers 1) et la dilatation du lien complet (β tend vers -1). Quand β vaut -0,25 les espaces sont conservés.

TABLEAU II - Paramètres d'expression de distance $D(m,g)$ selon les différents méthodes

Groupement	α_k	α_l	β	γ	expression
Simple	1/2	1/2	0	-1/2	$D(m,g)=\min(\text{dist}(x_k, x_l))$
Complete	1/2	1/2	0	1/2	$D(m,g)=\max(\text{dist}(x_k, x_l))$
WPGMA	1/2	1/2	0	0	$D(m, g) = \frac{D(k,g)+D(l,g)}{2}$
UPGMA	$\frac{w_k}{w_k+w_l}$	$\frac{w_l}{w_k+w_l}$	0	0	$D(m, g) = \frac{1}{w_m * w_g} \sum_1^{w_m} \sum_1^{w_g} \text{dist}(x_k, x_l)$
flexible	$\alpha_k + \alpha_l = 1 - \beta, \alpha_k = \alpha_l$				

w_k (l) est le nombre d'objets dans la classe k (l) et x_k (l) et le x^{eme} objet dans la classe k (l)

¹ Les termes proposée par Sneath & Sokal (1973) vont désormais être employé ; WPGA (*Weighted Pair Group with Arithmetic mean*) et UPGMA (*Unweigthed Pair Group Method with Arithmetic mean*)

Les dendrogrammes sont la représentation graphique des résultats de ce regroupement. Ces arbres de classification aident à l'interprétation de chacune des classes. La racine d'arbre est la classe qui contient tous les objets et la hauteur des branches représente la distance entre les deux objets regroupés. La partie supérieure d'arbre (les feuilles) sont les objets qui au début ont été représentés par une seule classe.

L'arbre de classification peut être coupé en différents endroits et ainsi produire plusieurs groupes. Étant donné que la classification dépend beaucoup des observations, de la matrice de distance et du critère d'agrégation, vérifier la validité des classes s'avère un étape important. Pour cette raison plusieurs indices qui mesurent la variance des objets de la classe autour des points représentatifs dans la classe ont été proposés. Ce point ne sera pas abordé dans le cadre de ce travail mais le lecteur pourra se référer aux travaux de [Halkidi *et al.* \(2001\)](#) par exemple.

3 Résultats

3.1 Régionalisation à partir de la distance océanographique et en fonction des différents liens d'agrégation

Afin de définir les zones d'interconnexion pour un intervalle de temps d'un an, nous avons analysé la matrice de la distance océanographique ($dl=50$ km) (Fig. 14) avec quatre techniques de classification hiérarchique. Ces quatre techniques correspondent à quatre critères d'agrégation ; lien complet, WPGMA, UPGMA, flexible.

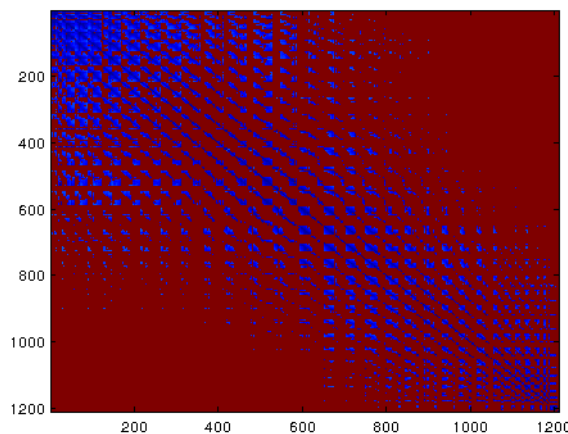


FIGURE 14 – Matrice de distance océanographique pour une résolution de la grille de connectivité 50 km. La couleur bleue correspond aux valeurs de la distance océanographique en jours. La couleur rouge indique les zones pour les quelles il n'y a pas des données, où l'étiquette 999 jours est affectée. Les lignes sont les points sources (i) et les colonnes les points destinations (j).

Les résultats de la classification avec le lien complet sont représentés dans un dendrogramme (Fig. 15 a). En coupant ce dendrogramme au premier niveau nous obtenons deux classes principales. La représentation géographique de ces classes révèle une première classe contenant tout le bassin Ouest, la mer Adriatique, la mer Ionienne et le Nord de la mer Égée (Fig. 15 b). Si nous continuons la division nous trouvons une troisième classe qui divise la plus grande des deux classes précédentes et contient l'Adriatique, la mer Ionienne et le Nord de la mer Égée (Fig. 15 c). Nous identifions une division Est/Ouest du bassin Méditerranéen au niveau du canal de Sicile. En considérant un plus grand nombre de classes (20), nous pouvons cette fois identifier sept classes dans le bassin Ouest (limite du canal de Sicile). Le bassin Est contient six classes en mer Ionienne, trois dans le Levantin et une dans le Sud de la mer Égée. La mer Adriatique et le Nord de la mer Égée sont placées dans la même classe (Fig. 15 d).

La première division du dendrogramme du lien WPGMA (Fig. 16 a) décrit deux bassins Est-Ouest dont leur limite est situé à la sortie du canal de Sicile (Fig. 16 b). Le Nord de la mer Égée est incluse au bassin Est. La troisième classe suivante est de très petite taille est situé le long les côtes de Libye et d'Égypte (Fig. 16 c). Quand les nombres des classes est égal à vingt, le bassin Ouest (limite du canal de Sicile) contient six classes, la mer Ionienne cinq classes et le Levantin trois dont une s'étendant sur une partie de la mer Égée. La mer Égée est divisée en une partie Nord et une partie Sud tandis que la mer Adriatique est une classe à elle seule (Fig. 16 d).

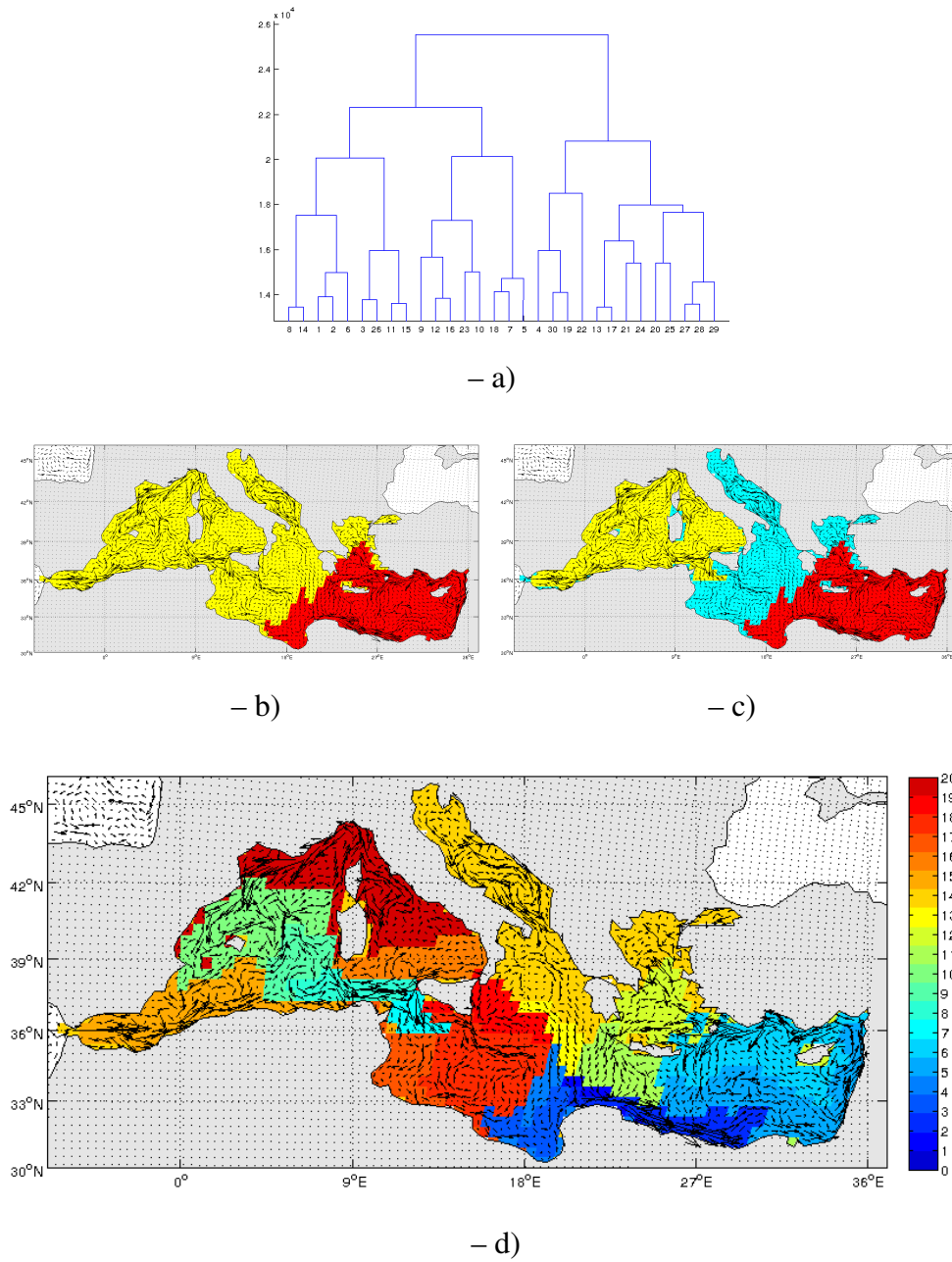
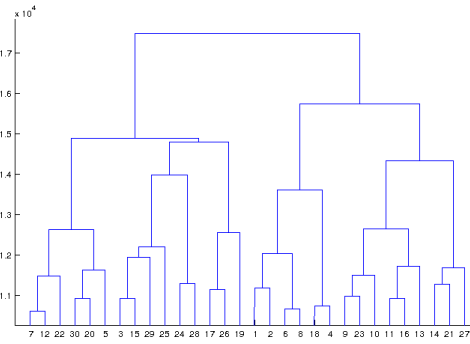
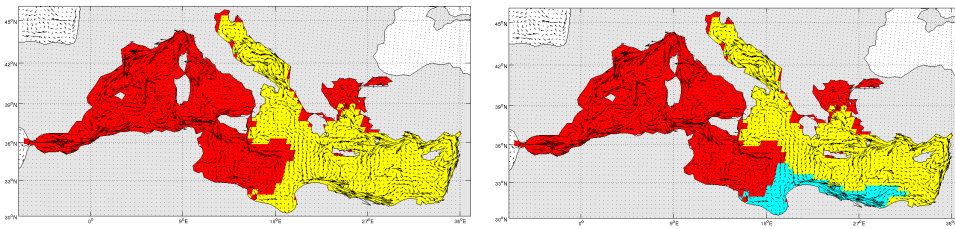


FIGURE 15 – Les classes définies avec le lien complet pour différentes divisions du dendrogramme (a). b) 2 classes, c) 3 classes et d) 20 classes.

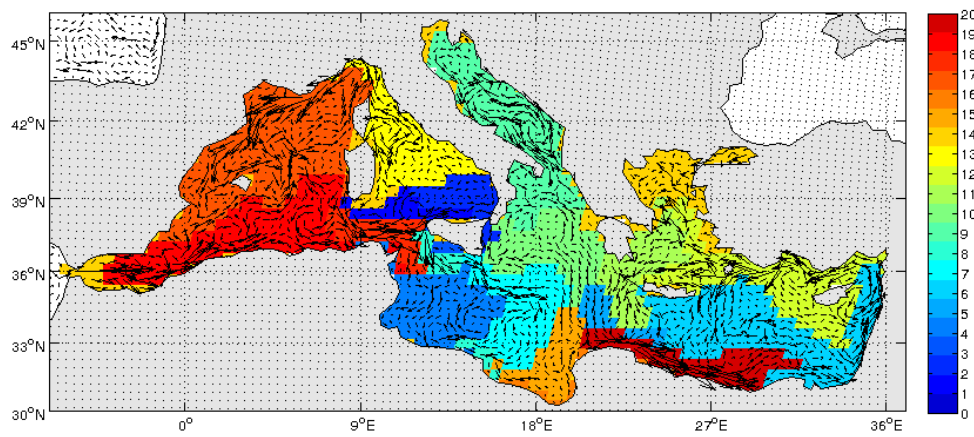


– a)



– b)

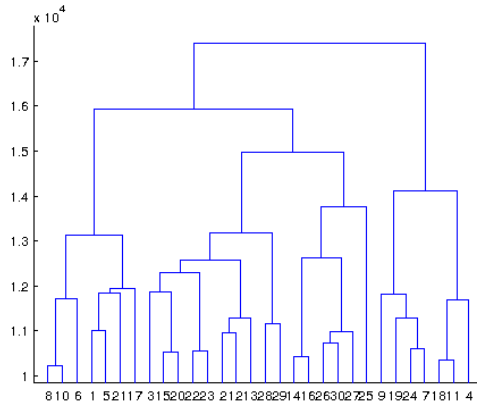
– c)



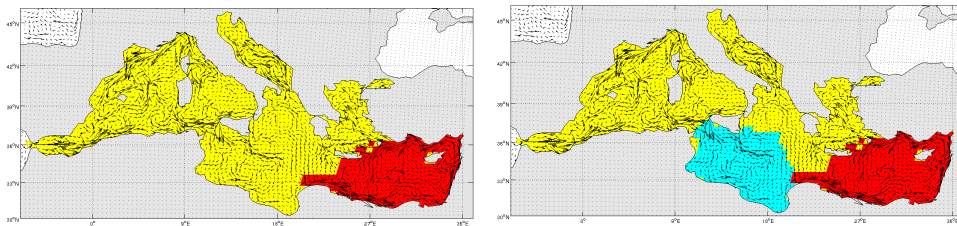
– d)

FIGURE 16 – Les classes définies avec le lien WPGMA pour différentes divisions du dendrogramme (a). b) 2 classes, c) 3 classes et d) 20 classes.

La division du dendrogramme du lien UPGMA (Fig. 17 a) révèle deux classes de taille considérablement différente où la mer Ionienne et la mer Égée sont incluses (Fig. 17 b). Une subdivision du dendrogramme suivante divise la grande classe (Fig. 17 c). Pour une division qui révèlent vingt classes le bassins Ouest contient sept classes (limite du canal de Sicile), la mer Ionienne quatre classes, le Levantin trois, la mer Égée est divisé en une partie Sud et une partie Nord, la dernière faisant partie de la classe de la mer Adriatique (Fig. 17 d).

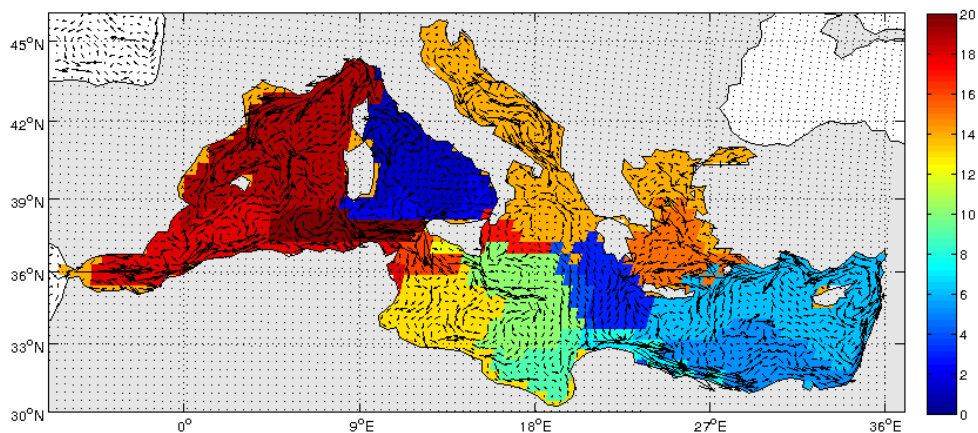


- a)



- b)

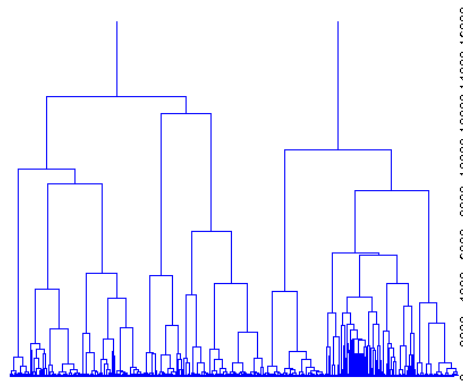
- c)



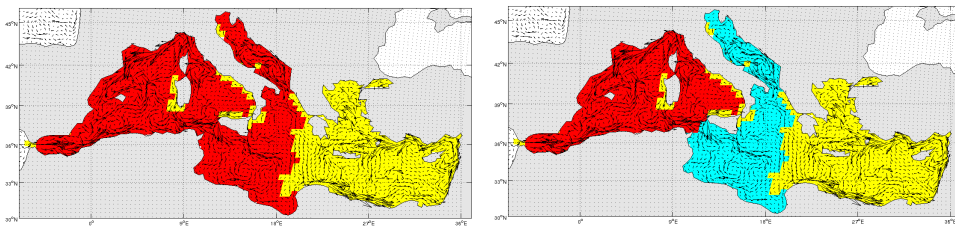
- d)

FIGURE 17 – Les classes définies avec le lien UPGMA pour différentes divisions du dendrogramme (a). b) 2 classes, c) 3 classes et d) 20 classes.

La première division du dendrogramme (Fig. 18 a), pour le lien flexible, identifie deux classes principales correspondant aux bassins Ouest et Est, la dernière contenant le mer Adriatique et la mer Ionienne (Fig. 18 b). En continuant la division nous trouvons une troisième classe qui divise la plus grande des deux classes précédentes et contient l'Adriatique et la mer Ionienne (Fig. 18 c). En considérant 15 classes, nous pouvons identifier quatre classes dans le bassin Ouest (limite du canal de Sicile), quatre dans la mer Ionienne, trois dans le Levantin et une classe autour de la Crète. La mer Égée est la mer Adriatique sont des classes différentes (Fig. 18 d).

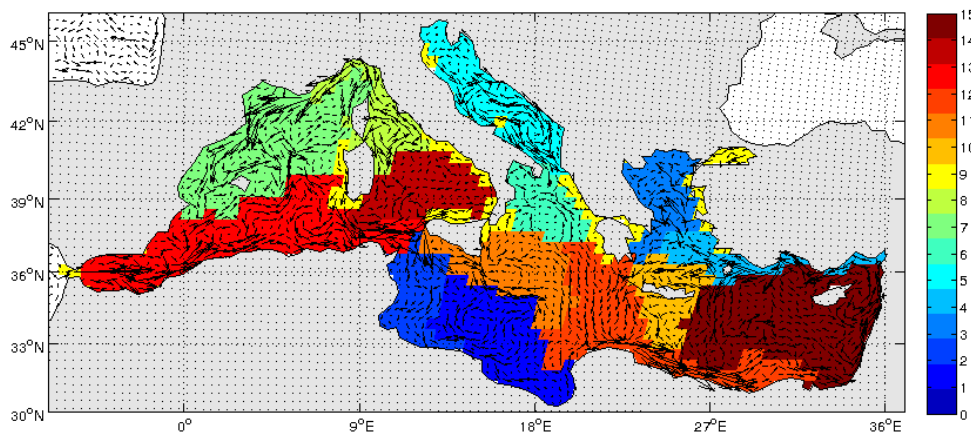


– a)



– b)

– c)



– d)

FIGURE 18 – Les classes définies avec le lien flexible pour différentes divisions du dendrogramme (a). b) 2 classes, c) 3 classes et d) 15 classes.

Tout les liens d'agrégation ont identifié deux classes principales qui divisent le bassin en deux sous bassins. La situation géographique de la frontière entre ces deux bassins varie selon les méthodes. Dans les cas où un plus grand nombre de classes est considéré (15 à 20), les classes et leurs frontières ne sont pas les mêmes. Nous pouvons cependant remarquer que certains sous-bassins sont reconnues comme sous-classes par toutes les critères. Nous noterons par exemple que le bassin Ouest est systématiquement divisé en 4 ou 5 classes, avec toujours une classe représentative du sous-bassin Tyrrhénien identifiée.

Le cas de la mer Adriatique et du Nord de la mer Égée est représentatif des limites de ces comparaisons. Ces deux régions sont notamment différentes et n'ont pas de lien, fort possible du fait de la séparation de ces deux sous-sbassins, la méthode d'agrégation devrait logiquement distinguer ces deux zones. Si le lien flexible sépare les deux zones dès la troisième division (formation de 5 classes) et le lien WPGMA dès la quatrième (formation de 6 classes), il faut compter pour le lien complet 7 divisions (formation de 24 classes) pour que les deux classes apparaissent. Par contre le lien WPGMA séparent le Nord de mer Égée du bassin Liguro-Provençal à la 7eme division qui crée 16 classes. Concernant le lien UPGMA, il faut atteindre la division qui crée 42 classes pour que la distinction ait lieu. L'incapacité d'incorporer proprement ces deux zones est certainement due à la faible représentativité spatiale des données. Il s'agit de zones côtières (les mailles concernées contiennent peu de points mer) avec très peu d'informations disponibles, et les données dans la matrice de distance qui correspondent à ces zones sont lacunaires (Fig. 14 $i > 900$ et $j < 600$).

Cela nous a conduit à mener le processus de classification sur chacun des bassins Ouest et Est afin de classifier des zones plus cohérentes.

Nous avons choisi les mailles qui correspondent aux domaines désirés et nous avons recalculé les matrices de distance océanographiques qui sont maintenant moins lacunaires (Fig. 19). Le lien flexible a été choisi pour l'analyse suivante car il décrit mieux les courants des bords Sud et Nord.

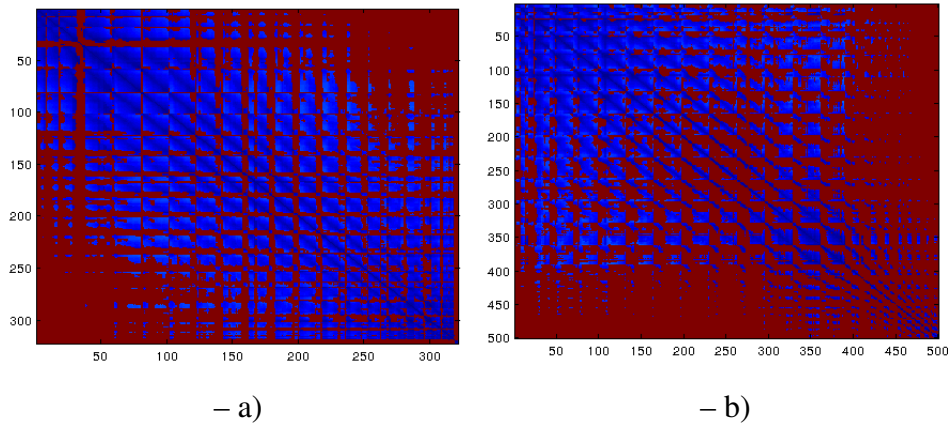


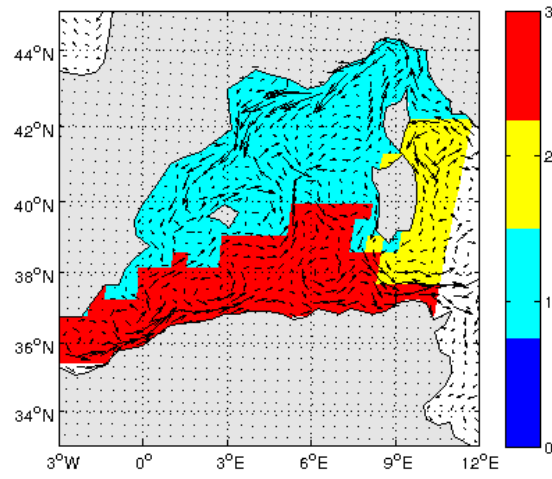
FIGURE 19 – Matrice de distance océanographique pour les bassins Ouest (a) et Est (b). Les lignes sont les points sources (i) et les colonnes les points destinations (j).

3.2 Bassin Ouest

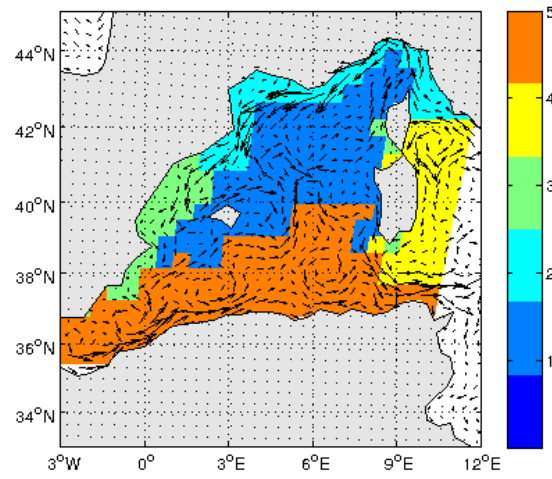
Nous avons défini le bassin Ouest de Gibraltar jusqu'au détroit de Sicile. La région de mer Tyrrhénienne a été exclue car la classe correspondante est stable.

Trois classes principales divisent le bassin : le long des côtes algériennes, à l'est de la Sardaigne et la Corse et une dernière regroupant les îles Baléares, le bassin provençal et la mer Ligure (Fig. 20 a-classe 3, 2 1 respectivement).

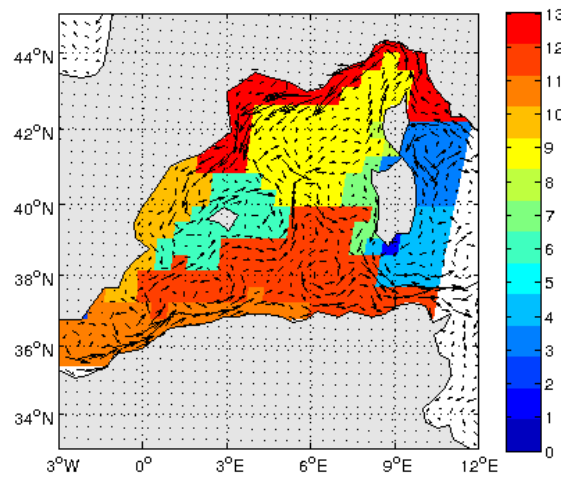
Le passage à 5 classes n'affecte que la dernière classe décrite précédemment : deux classes le long des côtes françaises et espagnoles apparaissent (Fig. 20 b). Pour 13 classes, la classe au Sud, celle au milieu du bassin et celle de la partie Est des îles Corse-Sardaigne sont divisées en 2 (classes 11 et 12, classes 6 et 9, classes 3 et 4 respectivement). Les deux classes de la côte Nord ne se divisent pas, elles sont stables (Fig. 20 c).



– a)



– b)

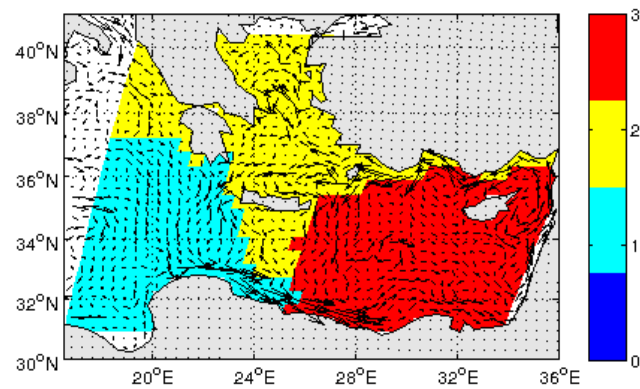


– c)

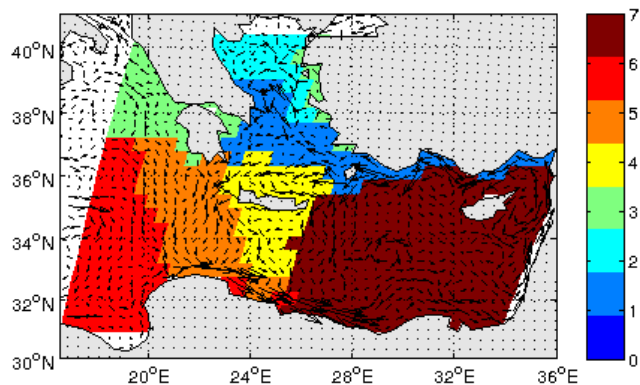
FIGURE 20 – Les différentes classes identifiées dans le bassin Ouest. a) 3 classes, b) 5 classes et c) 13 classes.

3.3 Bassin Est

Le bassin Est a été défini comme la région à l'Est de longitude 19° E. Les trois classes principales sont le sous-bassin Levantin (classe 3), la mer Égée (classe 2) et la mer Ionienne (classe 1) (Fig. 21 a). En considérant 7 classes, le sous-bassin Levantin reste stable tandis que la mer Ionienne est subdivisée en trois classes (classes 3,5 et 6) avec notamment la séparation du Nord de la mer Ionienne (classe 3) de la mer Égée (Fig. 21 b). Cette dernière se sépare aussi en deux sous-classes (classes 2 et 1). La mer Ionienne est quant à elle divisée en deux autour du méridien 20° E. La classe du sous-bassin Levantin et de la mer Égée sont présentes à chaque algorithme (figures non présentées) avec presque les mêmes frontières. Par contre la classe le long des côtes égyptiennes, précédemment identifiée (Fig. 18 d-classe 12) lorsque le domaine complet était considéré n'est plus identifiable pour le lien flexible appliqué au seul bassin Est.



– a)



– b)

FIGURE 21 – Les différentes classes identifiées dans le bassin Est. a) 3 classes et b) 7 classes.

4 Discussion

Les classes identifiées précédemment découlent d'une classification hiérarchique. Il s'agit maintenant de vérifier la pertinence de ces résultats. Afin de les valider, nous allons nous appuyer dans un premier temps sur la courantologie puis, dans un second temps, sur la comparaison avec les résultats d'une autre méthode de regroupement.

Sachant que notre étude est basée sur la quantification des trajectoires des particules, et que celles-ci sont soumises au mouvement des courants, il convient de mettre en corrélation nos résultats avec la circulation générale du bassin méditerranéen. En observant le bassin Ouest, nous avons identifié trois classes principales qui séparent le bassin en une partie Nord (Liguro-Provençal), une partie Sud et une partie Est (Tyrrhénien). Ces classes correspondent bien à la circulation spécifique du milieu. En effet, la classe au Sud décrit l'entrée de l'AW par le détroit de Gibraltar : il s'agit d'une classe qui comprend les tourbillons générés par le courant Algérien et qui se propagent vers le large en restant bloqués par les îles de Sardaigne et la Corse. De plus, elle décrit le parcours cyclonique d'AW jusqu'au niveau du canal de Sicile où l'AW bifurque. La classe à l'Est est donc créée. Cette classe comprend un tourbillon à l'Est de la Corse et de la Sardaigne. C'est une classe très stable. La classe au Nord, quand elle est divisée en trois, décrit bien le talus continental qui se sépare du large par le Courant Nord ainsi que les zones de redistribution d'énergie du Courant Nord. La séparation en deux sous-classes au niveau du bassin Catalan peut être attribuée à la bifurcation du courant dans cet endroit en créant une troisième classe correspondant à la partie centrale du gyre. Dans le bassin Est, le sous-bassin Levantin se présente comme une classe assez stable : cette région correspond à la zone d'accumulation des tourbillons du Levantin Ouest (Millot & Taupier-Letage, 2005). De cette classe deux sous-classes se détachent : une qui décrit le courant Libyo-Égyptien et une le courant d'Asie Mineure qui longe les côtes Sud de Turquie jusqu'à la mer Égée.

Nous pouvons donc observer la correspondance entre les classes identifiées et la circulation. Cependant il existe toujours une variabilité des résultats dépendante des critères d'agrégation. C'est pourquoi il semble intéressant de comparer les résultats de cette méthode de classification avec une méthode de regroupement différente qui ne fait pas appel à des critères d'agrégation.

Une méthode assez robuste est K-médoïdes (Reynolds *et al.*, 2006), qui minimise la distance entre les objets d'une classe et le point central. Le nombre de classe est choisi *a priori*. Tout d'abord la division de l'ensemble des données en deux classes, par cet algorithme, a montré la séparation de la mer Méditerranée en deux bassins Est et Ouest. La limite Est du bassin Ouest est à environ 18°E, équivalente pour tous les autres critères (sauf UPGMA). Les frontières entre les bassins Ouest et Est

sont situées au niveau du canal de Sicile. Il s'agit d'un endroit où une partie de l'eau de la surface (AW) suit le gyre cyclonique vers la mer Tyrrhénienne et l'autre traverse le canal entrant dans la mer Ionienne.

Un groupement du bassin en quatorze sous-classes (avec le K-médoïdes algorithme) divise le bassin Ouest en cinq classes. Cela nous montre que les cinq sous-classes identifiées avec la classification hiérarchique dans le bassin Ouest sont plutôt stables (cf (Fig. 20 b p.27)).

Les deux méthodes (classification hiérarchique et K-médoïdes) ont montré entre autres la présence de deux zones particulières. Celle de la mer Adriatique et celle de la mer Égée, notamment le Nord. Ces deux régions ont été trouvées dans le même groupe par tous les algorithmes, principalement dû au faible nombre des données disponibles. Ce manque de données remet en question l'analyse de l'Adriatique et de la mer Égée. Par exemple, l'Adriatique comporte quelques spécificités notables : la présence du gyre cyclonique au Sud où les eaux denses se forment, les eaux très peu profondes au Nord, ainsi que l'embouchure du Pô. Nous pourrions donc imaginer pour cette région l'application d'un modèle côtier à plus haute résolution.

Au vu du nombre d'apparition de certaines classes, de la cohérence de ces classes avec la courantologie et de l'identification de ces classes par une autre méthode de regroupement, la classification proposée semble pertinente. Les classes sont donc géographiquement bien localisées. Il s'agit du bassin Liguro-Provençal, du courant Algérien, de la mer Tyrrhénienne, du sous-bassin Levantin, du courant Libyo-Egyptien, du courant d'Asie Mineure, du Nord et du Sud de la mer Égée, de l'Adriatique et de l'ensemble des classes de la mer Ionienne. Les classes principales identifiées sont en accord avec les structures de la circulation moyenne. Cependant en faisant les moyennes temporelles des sorties d'un modèle eulérien la variabilité et les structures transitoires, sont filtrées. En revanche une étude lagrangienne prend en compte tous les différentes échelles. Ainsi les sous-classes peuvent révéler ses structures. À titre d'exemple les deux sous-classes nées de la classe du partie Nord (cf (Fig. 20 b p. 27)) du bassin Ouest (Liguro-Provençal) mettent en évidence la bifurcation du courant qui laisse une veine continuer vers le Sud-Ouest et l'autre tourner vers l'est en créant une boucle.

Après avoir étudié la pertinence de nos résultats, nous pouvons nous interroger sur leur utilisation. La classification proposée pour la mer Méditerranée relève des zones d'interconnexion. L'identification des régions qui sont proches, non pas géographiquement mais en termes de connexion océanographique nous permet de mieux comprendre les distributions spatiales des différents compartiments de l'écosystème marin. En particulier les distributions des populations planctoniques, passivement transportées par les courants. Les régions peuvent mettre en lumière des schémas de transport et la connectivité entre les populations planctoniques.

Les populations planctoniques sont en premier lieu sensibles à leur environnement et les distributions sont déterminées par des contraintes liées aux caractéristiques du milieu (d'Ovidio *et al.*, 2010, et références incluses). Autrement dit la présence et la domination de certains types phytoplanctoniques dans différentes régions dépend des caractéristiques physiques et chimiques du milieu, la température et l'abondance de nutriments notamment. En ce qui concerne notre domaine d'étude : le bassin Ouest est plus productif (mésotrophe) et présente des plus faibles températures et de plus faibles salinités, le bassin Est est moins productif (oligotrophe) et présente des plus hautes températures et de plus hautes salinités. Ce concept de niche écologique occupant un espace caractérisé par une condition environnementale (Hutchinson, 1957) a été récemment complété par le concept de frontières hydrodynamiques qui deviennent des frontières faunistiques (Gaylord & Gaines, 2000). Les éléments biogéochimiques et les différents types dominants phytoplanctoniques, par exemple, se sont organisés dans des structures par les courants à meso-échelle et se sont séparés par des frontières physiques induites par le brassage horizontal d'où la génération du terme niches avec une dynamique de fluide (d'Ovidio *et al.*, 2010).

La régionalisation de la mer Méditerranée proposée dans ce travail vient compléter l'analyse de D'Ortenzio & Ribera d'Alcalà (2009). Ces auteurs ont effectué une régionalisation basée sur la concentration de chlorophylle de surface (proxy de la biomasse phytoplanctonique). Ils suggèrent que l'intensité d'accumulation de la biomasse phytoplanctonique dépend de la structure du cycle saisonnier, par exemple la présence ou l'absence d'une floraison dans l'année. En effet, le phytoplancton est largement déterminé par l'apport vertical en nutriment provenant des couches profondes. Les zones de fortes biomasses de phytoplancton correspondent donc aux zones de mélange verticale intense, conforme au modèle de Sverdrup (1953). Cependant, la classification proposée ici basée seulement sur le transport horizontal de particules présente quelques similarités avec celle de D'Ortenzio & Ribera d'Alcalà (2009). Dans le bassin Ouest notamment, nous retrouvons les classes du Liguro-Provençal, du courant Algérien et celui de la mer Tyrrhénienne. Nous nous accordons également sur le fait que le bassin Est est plus uniforme que le bassin Ouest et que la mer Égée et l'Adriatique se distinguent de la mer Ionienne et du sous-bassin Levantin.

Finalement, la régionalisation en fonction de la distance océanographique est une méthode légitime et pertinente qui peut apporter des éclairages complémentaires à d'autres études scientifiques, notamment dans le domaine de l'écologie. Trop peu appliquée au modèle méditerranéen, il nous semble qu'elle mérite d'être valorisée. En effet, il s'agit d'une méthode récente qui peut être améliorée, permettant ainsi d'imaginer de nouvelles perspectives.

5 Conclusions et Perspectives

Ce stage vise à contribuer aux travaux du projet européen CoCoNET qui a eu pour but entre autres de comprendre la connectivité en mer Méditerranée. Dans un premier temps, nous avons développé et testé une méthode en analysant ses limites de validité et sa sensibilité aux paramètres. Nous avons proposé, dans un deuxième temps, une régionalisation du bassin basée uniquement sur ses caractéristiques hydrodynamiques. L'analyse lagrangienne, bien que compliquée dans sa mise en œuvre, permet d'avoir une vue d'ensemble sur la dynamique de la circulation et de traiter les problématiques de transport et de connexion. De plus, la prise en compte d'un modèle de comportement biologique nécessaire pour la poursuite de cette étude, est facilement réalisable dans le cadre lagrangien.

Perspectives à court terme

1. Dans un premier temps les résultats vont être comparés aux données d'espèces de phytoplancton et zooplancton afin de vérifier si les régions d'interconnexion déterminées par cette méthode correspondent effectivement à des aires de répartitions. Ces données devront être fournies dans le cadre du projet CoCoNET.

2. Dans notre étude les particules numériques ont été déployées à la surface. Les informations concernant la connectivité ne concernent donc que la surface. Il conviendrait d'examiner différentes profondeurs (aux niveaux épipélagique et mésopélagique) afin de prendre en compte les caractéristiques spécifiques de chaque famille de larve.

3. Une fois les classes obtenues, il s'agira de tester la stabilité des classes avec des outils statistiques comme précédemment mentionné.

4. Les résultats obtenus sont calculés à partir des données journalières du champ de vitesse sur trois ans et pour une intégration d'un an. Il reste à vérifier si la sensibilité de la méthode aux paramètres peut être surmontée en augmentant les années de simulation.

Perspectives à moyen terme

D'une part une étude de cas devrait s'effectuer en se focalisant sur des espèces d'intérêt particulière en introduisant de la physiologie et du comportement. Il est possible, par exemple, d'introduire un taux de mortalité puis des variables comme la prédation, la croissance de population etc.

D'autre part il est possible d'améliorer la configuration du modèle ARIANE en imposant, par exemple, une vitesse verticale pour prendre en compte le déplacement nyctémérale de zooplancton. La migration verticale s'avère être non négligeable en termes d'auto-recrutement et de modification de connectivité (Paris *et al.*, 2007).

Il faut prendre aussi en compte la durée de la phase planctonique des espèces choisies. Dans le cas des larves, il serait plus pertinent d'imposer le PLD (Planktonik Larval Duration).

Perspectives à long terme

En fin la connectivité est également déterminée par des processus à petite échelle (mésos et submésos- échelle, 1-100 km). Par exemple, il a été prouvé que la présence des tourbillons au large de l'île d'Hawaï augmente la connectivité et impact le recrutement entre populations dans la région (Vaz *et al.*, 2013). Pour étudier ces effets, les endroits notamment de grande convergence et divergence, nous pouvons utiliser le calcul des exposants des Lyapunov (FSLE²) qui permettrait d'estimer les structures lagrangiennes cohérentes (LCS³). Pour une intégration en avant en temps et des faibles valeurs de FSLE les LCS décrivent des endroits de grande convergence (accumulation des particules). Les FSLE sont calculés à partir du temps que deux particules, initialement séparées par une distance d_0 , mettent pour qu'elles parcourent une distance d_f . Une petite variation de LCS peut conduire aux grandes variations sur le transport des particules et leur connectivité.

² *Finite Size Lyapunov Exponents*, ³ *Lagrangian Coherent Structures*

Références

- Alberto, F., P. T. Raimondi, D. C. Reed, J. R. Watson, D. A. Siegel, S. Mitarai, N. Coelho, and E. A. Serrão. 2011. Isolation by oceanographic distance explains genetic structure for *macrocystis pyrifera* in the santa barbara channel. *Molecular Ecology*, **20** (12), 2543–2554.
- Baums, I. B., C. B. Paris, and L. M. Chérubin. 2006. A bio-oceanographic filter to larval dispersal in a reef-building coral. *Limnology and Oceanography*, **51** (5), 1969–1981.
- Berkley, H. A., B. E. Kendall, S. Mitarai, and D. A. Siegel. 2010. Turbulent dispersal promotes species coexistence. *Ecology letters*, **13** (3), 360–371.
- Blanke, B. and S. Raynaud. 1997. Kinematics of the Pacific Equatorial Undercurrent : An Eulerian and Lagrangian approach from GCM results. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 1038–1053.
- Cowen, R., C. Paris, and A. Srinivasan. 2006. Scaling of connectivity in marine populations. *Science*, **311** (5760), 522–527.
- Cowen, R. K., K. M. Lwiza, S. Sponaugle, C. B. Paris, and D. B. Olson. 2000. Connectivity of marine populations : open or closed ? *Science*, **287** (5454), 857–859.
- De Gaetano, P., M. Burlando, A. Doglioli, and A. Petrenko. 2010. Wind forcing effects on coastal circulation and eddy formation around a cape. *Ocean Science Discussions*, **7**, 207–249.
- D’Ortenzio, F. and M. Ribera d’Alcalà. 2009. On the trophic regimes of the mediterranean sea : a satellite analysis. *Biogeosciences*, **6**, 139–148.
- d’Ovidio, F., S. De Monte, S. Alvain, Y. Dandonneau, and M. Lévy. 2010. Fluid dynamical niches of phytoplankton types. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107** (43), 18,366–18,370.
- Gaylord, B. and S. D. Gaines. 2000. Temperature or transport ? range limits in marine species mediated solely by flow. *The American Naturalist*, **155** (6), 769–789.
- Gilg, M. R. and T. J. Hilbish. 2003. The geography of marine larval dispersal : coupling genetics with fine-scale physical oceanography. *Ecology*, **84** (11), 2989–2998.
- Halkidi, M., Y. Batistakis, and M. Vazirgiannis. 2001. On clustering validation techniques. *Journal of Intelligent Information Systems*, **17** (2-3), 107–145.

- Hedrick, P. W. and S. T. Kalinowski. 2000. Inbreeding depression in conservation biology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 139–162.
- Hutchinson, G. E.. 1957. Concluding remarks. In Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, vol. 22, Cold Spring Harbor Laboratory Press, vol. 22, pp. 415–427.
- James, M. K., P. R. Armsworth, L. B. Mason, and L. Bode. 2002. The structure of reef fish metapopulations : modelling larval dispersal and retention patterns. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, **269** (1505), 2079–2086.
- Jones, G. P., S. Planes, and S. R. Thorrold. 2005. Coral reef fish larvae settle close to home. *Current Biology*, **15** (14), 1314–1318.
- Kinlan, B. P. and S. D. Gaines. 2003. Propagule dispersal in marine and terrestrial environments : a community perspective. *Ecology*, **84** (8), 2007–2020.
- Kinlan, B. P., S. D. Gaines, and S. E. Lester. 2005. Propagule dispersal and the scales of marine community process. *Diversity and Distributions*, **11** (2), 139–148.
- Lance, G. N. and W. T. Williams. 1967. A general theory of classificatory sorting strategies 1. hierarchical systems. *The computer journal*, **9** (4), 373–380.
- Legendre, P. and D. J. Rogers. 1972. Characters and clustering in taxonomy : a synthesis of two taximetric procedures. *Taxon*, 567–606.
- Martinez, W. L. and A. R. Martinez. 2001. Computational statistics handbook with MATLAB, vol. 2. Chapman and Hall/CRC.
- Mesinger, F., A. Arakawa, and A. Kasahara. 1976. Numerical methods used in atmospheric models, vol. 1. World Meteorological Organization, International Council of Scientific Unions.
- Millot, C. and I. Taupier-Letage. 2005. Circulation in the mediterranean sea. In The Mediterranean Sea, Springer, pp. 29–66.
- Mitarai, S., J. Riley, and G. Kosály. 2003. A lagrangian study of scalar diffusion in isotropic turbulence with chemical reaction. *Physics of Fluids*, **15** (12), 3856–3866.
- Mitarai, S., D. Siegel, J. Watson, C. Dong, and J. McWilliams. 2009. Quantifying connectivity in the coastal ocean with application to the southern california bight. *Journal of Geophysical Research : Oceans (1978–2012)*, **114** (C10).

- Paris, C. B., L. M. Chérubin, and R. K. Cowen. 2007. Surfing, spinning, or diving from reef to reef : effects on population connectivity. *Marine Ecology Progress Series*, **347**, 285–300.
- Paris, C. B. and R. K. Cowen. 2004. Direct evidence of a biophysical retention mechanism for coral reef fish larvae. *Limnology*, **49** (6), 1964–1979.
- Pope, S. B.. 2000. Turbulent flows. Cambridge university press.
- Reynolds, A., G. Richards, B. De La Iglesia, and V. Rayward-Smith. 2006. Clustering rules : a comparison of partitioning and hierarchical clustering algorithms. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, **5** (4), 475–504.
- Siegel, D., B. Kinlan, B. Gaylord, and S. Gaines. 2003. Lagrangian descriptions of marine larval dispersion. *Marine Ecology Progress Series*, **260**, 83–96.
- Siegel, D., S. Mitarai, C. Costello, S. Gaines, B. Kendall, R. Warner, and K. Winters. 2008. The stochastic nature of larval connectivity among nearshore marine populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105** (26), 8974–8979.
- Sneath, P. H. and R. R. Sokal. 1973. Numerical taxonomy. *San Francisco*.
- Sverdrup, H.. 1953. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *Journal du Conseil*, **18** (3), 287–295.
- Thorrold, S. R., G. P. Jones, M. E. Hellberg, R. S. Burton, S. E. Swearer, J. E. Neigel, S. G. Morgan, and R. R. Warner. 2002. Quantifying larval retention and connectivity in marine populations with artificial and natural markers. *Bulletin of Marine Science*, **70** (Supplement 1), 291–308.
- Urban, D. and T. Keitt. 2001. Landscape connectivity : a graph-theoretic perspective. *Ecology*, **82** (5), 1205–1218.
- Vaz, A., K. Richards, Y. Jia, and C. Paris. 2013. Mesoscale flow variability and its impact on connectivity for the island of hawaii. *Geophysical Research Letters*.
- Vuilleumier, S. and H. P. Possingham. 2006. Does colonization asymmetry matter in metapopulations ? *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, **273** (1594), 1637–1642.
- Watson, J., S. Mitarai, D. Siegel, J. Caselle, C. Dong, and J. McWilliams. 2010. Realized and potential larval connectivity in the southern california bight. *Marine Ecology Progress Series*, **401**, 31–48.

- Weber, R. O. and P. Kaufmann. 1995. Automated classification scheme for wind fields. *Journal of Applied Meteorology*, **34** (5), 1133–1141.
- Weersing, K. and R. J. Toonen. 2009. Population genetics, larval dispersal, and connectivity in marine systems. *Marine Ecology Progress Series*, **393** (1), 12.
- White, C., K. A. Selkoe, J. Watson, D. A. Siegel, D. C. Zacherl, and R. J. Toonen. 2010. Ocean currents help explain population genetic structure. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, **277** (1688), 1685–1694.

Abstract

This study has been carried out as part of the European project CoCoNET that aims to produce a set of guidelines concerning the design, the management and monitoring of a network of protected areas within the Mediterranean Sea. We established a method that only takes into consideration the connections made by the current's horizontal movements in order to identify the connected zones in the mediterranean basin. This method aims to complete the work already carried out by others as only a few studies have been done regarding the influence of physical properties on the connectivity. A regionalization of the mediterranean basin, resulting from a cluster analysis, was proposed in order to gain a better understanding of the established connections. The classification was made according to the oceanographic distance. For this reason we calculated connectivity matrices from the trajectories resulting from the Lagrangian model ARIANE. The four year velocity field information was provided by the ocean circulation model NEMO (in his MERCATOR configuration). The identified clusters agree with the mean circulation patterns and the smaller scale phenomena brought out by the Lagrangian model and the trajectories.

Resumé

Le programme CoCoNET a pour objectif de produire les lignes directrices pour la protection et la gestion de l'environnement par la mise en place d'un réseau d'aires marine protégées dans la mer Méditerranée. Ce travail effectué dans ce cadre a eu pour but d'établir une méthodologie afin de répondre aux questions ouvertes sur les zones de connexions dans la mer Méditerranée. La méthodologie proposée prend en compte les connexions résultantes uniquement des mouvements horizontaux et elle vient à compléter les recherches sur la connectivité, celles basées sur l'influence des propriétés physiques étant peu nombreuses. Afin de mieux comprendre alors les connexions dans le bassin méditerranéen nous avons proposé une régionalisation par la classification hiérarchique. Les régions ont été classifiées en fonction de la distance océanographique. Pour cette raison nous avons calculé des matrices de connectivité à partir des trajectoires issues du modèle lagrangien ARIANE, sur quatre ans de données de champ de vitesse fournies par le modèle de la circulation océanique NEMO (dans sa configuration MERCATOR). Les classes sont d'une part en accord avec le schéma de la circulation moyenne et d'autre part avec les phénomènes de plus petite échelle mis en évidence par le modèle lagrangien et les trajectoires.

ANNEXE

