



LABORATOIRE  
SCIENCES POUR  
L'ENVIRONNEMENT  
UMR 6134 SPE



Rapport de Stage de 2<sup>ème</sup> année de Master

**Mention Science de la Mer**  
**Parcours Écologie Marine et Halieutique (EMaH)**

Année 2021-2022

**Étude de la dispersion larvaire et connectivité chez  
le crabe bleu (*Callinectes sapidus*) invasif en  
Méditerranée**

Théo LA PIANA

UMR : UMR SPE 6134

Projet : ITEM

Encadrement :

Céline BARRIER [BARRIER\_C@univ-corse.fr]

Éric DURIEUX [durieux\_e@univ-corse.fr]

## **Remerciements**

En premier lieu je tiens à remercier mon encadrante de stage Céline Barrier pour ses précieux conseils au quotidien, sa disponibilité, sa patience et pour avoir facilité mon intégration au sein de l'équipe du laboratoire. Vanina Pasqualini et Éric Durieux pour le suivi du stage lors de réunions régulières et l'Université de Corse pour l'accueil durant ce stage.

Également toutes les personnes avec qui j'ai pu collaborer, échanger lors de réunions et dont j'ai reçu des informations précieuses comme Marie Garrido (Office de l'Environnement de la Corse), Lysel Garavelli (Pacific Northwest National Laboratory), Guillaume Marchessaux (Université de Palerme) et Pascal Romans (Pôle-relais lagunes méditerranéennes).

Je remercie également les enseignants/responsables du Master d'Écologie Marine et Halieutique de l'ULCO pour la qualité de l'enseignement offert, notamment Mme Lasram qui a partagé l'offre de stage à notre promotion.

Un grand merci à ma mère, mon père, mon oncle et mon amie Oryane, pour leurs conseils, ainsi que pour leur soutien inconditionnel et pour la relecture de ce rapport.

## Table des matières :

1/ Synthèse bibliographique : utilisation des modèles biophysiques pour l'étude de la dispersion larvaire d'espèces marines .....	1
1.1) Dispersion larvaire et connectivité.....	1
1.2) Les méthodes d'étude de la dispersion larvaire et de la connectivité marine .....	3
1.3) Approches numériques pour l'étude de la dispersion larvaire et de la connectivité .	5
1.4) Les outils de transport lagrangiens pour l'étude de la dispersion larvaire et de la connectivité .....	6
2/ Introduction.....	7
2.1) Le crabe bleu ( <i>Callinectes sapidus</i> ) .....	7
2.2) La situation d'espèce invasive en Méditerranée.....	8
2.3) Objectifs et questions scientifiques .....	8
3/ Matériel et méthodes .....	9
3.1) Sources de données.....	9
3.2) La zone d'étude .....	9
3.3) Les modèles hydrodynamiques.....	10
3.3.1 MARS3D.....	10
3.3.2 Med MFC physical reanalysis product.....	11
3.4) L'outil de transport lagrangien : Ichthyop.....	11
3.5) Paramètres de simulation .....	12
4/ Résultats.....	14
4.1) Etude temporelle des trajectoires de dispersion du crabe bleu en Méditerranée Nord-Occidentale .....	14
4.2) Connectivité inter lagunes.....	16
4.3) Impact de la migration verticale sur la dispersion et la connectivité.....	17
4.4) Ouverture sur une plus grande emprise .....	19
5/ Discussion .....	21
5.1) Dynamique spatiotemporelle de l'invasion de <i>Callinectes sapidus</i> en Méditerranée nord-occidentale et connectivité inter-lagunes .....	21
5.2) Impact de la migration verticale sur la dispersion et la connectivité.....	22
5.3) Ouverture de l'étude au-delà de la Méditerranée nord-occidentale .....	22
6/ Conclusions et perspectives .....	24
7/ Bibliographie.....	25

# 1/ Synthèse bibliographique : utilisation des modèles biophysiques pour l'étude de la dispersion larvaire d'espèces marines

## 1.1) Dispersion larvaire et connectivité

Le transport larvaire est le déplacement des larves entre deux points localisés. Il résulte du transport physique, c'est-à-dire de l'advection, qui est le transport d'une particule en suspension avec les flux de l'eau (les courants), eux-mêmes caractérisés par une vitesse moyenne et une direction. Ce transport dépendra également de la diffusion, qui ne nécessite pas d'apport d'énergie et se produit dans toutes les directions. Il pourra également être modifié par le comportement de nage des larves. La dispersion larvaire fait, quant à elle, référence à la propagation des larves d'une source de frai à un site de peuplement (Begon et al, 2020). Elle inclue la ponte, le transport larvaire, la survie larvaire, puis la sédentarisation des larves à l'issue de leur durée de vie larvaire.

La connectivité des populations a été définie comme l'échange d'individus entre des populations géographiquement séparées. Elle est considérée comme un processus clé pour la reconstitution des populations, la génétique, la propagation des espèces envahissantes et d'autres processus écologiques (Cowen et al, 2006). Selon cette définition, si l'échange est mesuré au moment de la fixation, la connectivité représentera donc la dispersion larvaire d'une population à une autre (Webster et al, 2002). Néanmoins, toutes les larves arrivées à destination ne vont pas forcément survivre, donc la connectivité est fréquemment mesurée à un moment donné après la colonisation, une fois que les colons survivent pour entrer ou recruter dans la population juvénile. Pour cette étude, focalisée sur le modèle crabe bleu (*Callinectes sapidus*), la connectivité sera mesurée au moment où les larves arriveront en face des lagunes, habitats préférentiels de cette espèce dans son aire de répartition d'origine (Rosas et al, 1994), représentant donc un potentiel habitat où se développer.

La dispersion larvaire et la connectivité sont des processus complexes et très importants dans la dynamique des populations marines. Néanmoins, ce sont également des phénomènes encore mal compris étant donnée l'hétérogénéité de cette phase en fonction de l'espèce considérée (Young, 2020). Les larves peuvent être très différentes en termes de morphologie, de comportement, de taille, de durée de vie et de régime trophique. Le stade larvaire est une phase cruciale pour les espèces possédant un cycle benthopélagique. Chez ces espèces, les juvéniles et les adultes seront benthiques, alors que les larves auront une vie pélagique.

La dispersion d'une larve s'effectue en quatre étapes, desquelles dépendra sa réussite. Ces phases dépendront de facteurs biotiques et abiotiques. La figure 1 décrit les principaux facteurs agissant sur chaque étape de la connectivité, capturant ainsi la complexité biophysique de ce processus pour les espèces marines à cycle de vie benthopélagique. Lors de la première étape, c'est-à-dire l'initiation de l'émigration, les facteurs importants seront ceux liés à une plus grande production de larve. Cela dépendra de paramètres biologiques tels que : l'abondance des adultes matures, leur fécondité, du nombre et de la qualité des œufs. Par ailleurs, la disponibilité d'habitats favorables à la ponte sera aussi un élément important dans cette étape. La seconde étape concerne le transport larvaire : une phase cruciale dans le contexte d'invasions biologiques. Elle va principalement dépendre de l'advection et la turbulence potentielles des courants marins, puisque chez de nombreuses espèces, les larves ont des capacités de nage horizontale limitées. Elles vont donc être portées par les courants pour un temps qui dépendra de la durée de leur phase larvaire. Le comportement des larves influencera également leur transport. Par exemple, si nous considérons la compétence de migration verticale, les larves ne seront pas transportées par des courants de même intensités ou directions en fonction de la profondeur. Enfin, des paramètres comme l'abondance de prédateurs influenceront sur le taux de survie des larves. Ce taux de survie sera par conséquent souvent très bas, car la plupart des

larves vont mourir avant d'arriver dans un habitat favorable. La 3<sup>ème</sup> étape du processus sera l'établissement dans un habitat favorable. Elle marquera la fin de la phase de dispersion. Lors de cette étape les juvéniles s'installeront activement. Cette phase dépendra fortement des fenêtres de compétence d'établissement des larves. Par exemple, si les individus arrivent trop tôt dans un habitat, ils ne seront pas forcément assez développés pour s'établir. La dernière étape sera celle du recrutement. Il est défini par la capacité des juvéniles à survivre jusqu'à leur maturité, leur permettant de se reproduire au niveau de l'habitat dans lequel ils se sont implantés. Cela pourra être leur site natal (autorecruitment), un site non natal (migration) ou bien un nouveau site (colonisation). Ensemble, ces quatre étapes capturent toute la complexité biophysique des processus déterminant la connectivité des populations. Lors de cette phase larvaire, plusieurs issues seront alors possibles :

- Si les larves ne sont pas emportées sur de grandes distances par les courants, elles reviendront possiblement sur leur lieu de ponte, dans la population parentale. On appelle ce processus la rétention (Botsford et al, 2009). Les larves permettront alors de maintenir la population parentale grâce à de l'autorecruitment.
- Si les larves sont transportées sur de grandes distances, loin de la population parentale, alors elles rejoindront soit une autre population implantée, c'est le phénomène de migration, soit elles coloniseront un nouvel habitat favorable pour fonder une nouvelle population (c'est le cas des invasions biologiques).
- Enfin, dans la grande majorité des cas, les larves n'accéderont pas à un habitat favorable avant la fin de leur durée de vie larvaire et vont mourir (White et al, 2014).

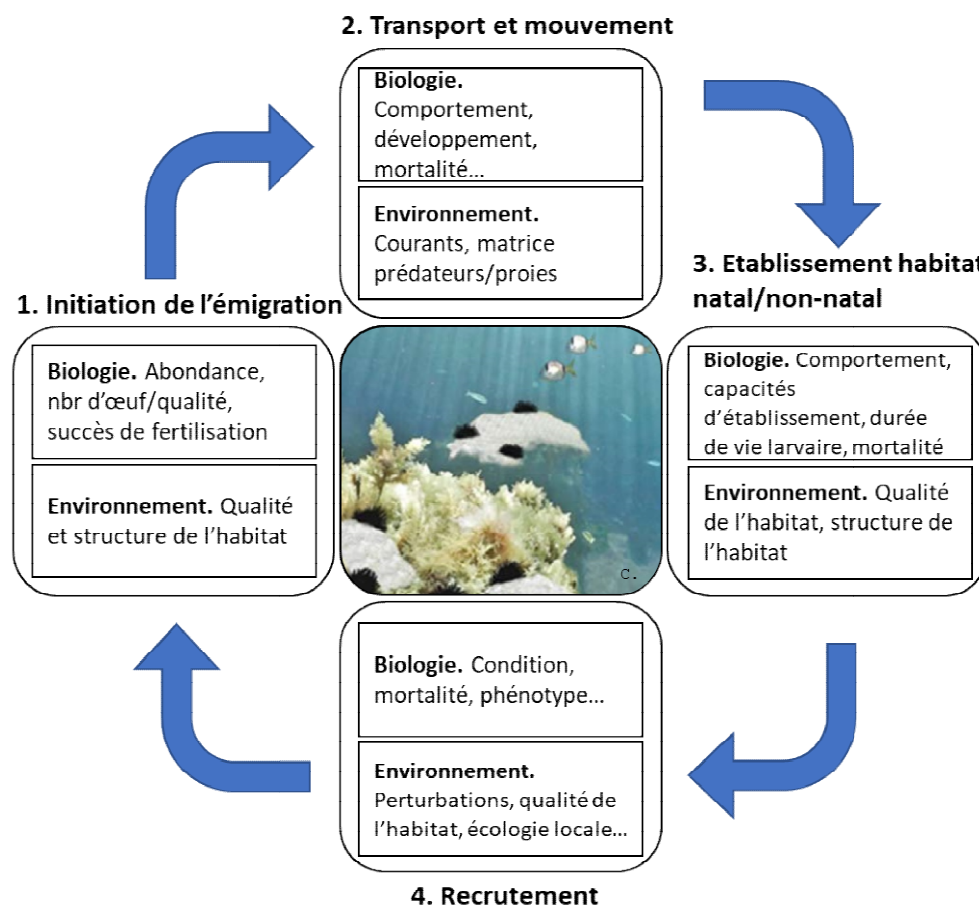


Figure 1 : Les quatre étapes de la dispersion larvaire résultant en une connectivité chez les populations marines à cycle de vie benthopélagique (modifié à partir de Treml et al, 2015 et Swearer et al, 2019).

## 1.2) Les méthodes d'étude de la dispersion larvaire et de la connectivité marine

La dispersion larvaire et la connectivité vont beaucoup influencer la dynamique des populations des espèces et sont donc des processus importants à comprendre pour appliquer des mesures de protection adéquates comme la gestion des stocks des espèces exploitées ou la mise en place d'Aires Marines Protégées (AMP). Par exemple, dans l'étude de Guizien et al (2012) des simulations dans le golfe du Lion sur la dispersion larvaire de deux modèles d'espèces benthiques ayant 2 phases sédentaires (juvénile et adulte) et une phase larvaire pélagique ont permis de mettre en évidence que certaines zones, qui n'étaient alors pas protégées, étaient importantes dans leur cycle de vie. Différentes méthodes ont été explorées par les scientifiques au cours de l'histoire. Tout d'abord, il existe des approches directes comme dans l'étude d'Olson (1985) dans laquelle les larves d'une espèce d'ascidie (*Didemnum molle*) ont été suivies par des plongeurs jusqu'à ce qu'elles se fixent à un support ou soient perdues. Cette étude a néanmoins été rendue possible uniquement parce que cette espèce a une durée de vie larvaire (PLD pour *larval pelagic duration*) très courte (environ 2 heures) et que les larves sont assez grandes pour être facilement observées à l'œil nu. Avec une échelle spatio-temporelle qui peut être très large pour certaines espèces, ces méthodes sont souvent rares et coûteuses.

Afin de pallier à ces limites, les approches indirectes sont plus fréquemment utilisées. Parmi ces dernières, il y a les méthodes biogéochimiques (analyses de structures calcifiées comme les otolithes, marquage artificiel d'œufs à l'aide de colorants fluorescents, d'éléments rares ou encore par radio-marquage). Ces approches indirectes ont permis d'avoir une première preuve de rétention larvaire chez les poissons grâce à une étude (Jones et al, 1999) dans laquelle 10 millions d'œufs de poisson-demoiselle (*Pomacentrus amboinensis*) ont été marqués avec le composé fluorescent tétracycline. En examinant 5000 juvéniles à la même localisation que le lâché des œufs, la proportion d'individus marqués a permis d'estimer la rétention larvaire entre 15% et 60% pour ce cas d'étude. Une limite de cette méthode reste qu'avec un taux de dispersion *in vivo* très élevé, il est nécessaire de marquer un nombre conséquent d'embryons pour avoir des résultats significatifs, un défi scientifique souvent difficilement réalisable. Ainsi, les marqueurs naturels seront privilégiés, avec des concentrations variant en fonction du régime alimentaire des larves et/ou des conditions environnementales des masses d'eau (voir tableau 1). Les individus évoluant dans ce milieu tout au long de leur vie, il est alors possible de reconstituer l'histoire de la dispersion larvaire.

Tableau 1 : Exemple d'une approche indirecte pour l'étude de la dispersion larvaire : éléments traces utilisés pour déduire les caractéristiques environnementales des structures carbonatées comme les otolithes (modifié à partir de Levin, 2006).

Facteurs	Éléments utilisés	Références
Température	Sr, Mg, $^{18/16}\text{O}$ , $^{88/87}\text{Sr}$	Kalish (1989)
Salinité	Sr, Ba, U	Fowler et al (1995)
Proximité avec la terre	Sr, Mg, Pb, Mn, Ba	Swearer et al (1999)
Conditions de l'estuaire	Mg, Mn, Sr, Ba, Li	Thorrold et al (1998)
Au large ou Côtier	Ba, Sr	Thorrold et al (1997)
Polluants	Cu, Sn, Pb	Pitts and Wallace (1994)
Hypoxie	Mn	Thorrold and Shuttleworth (2000)
Upwelling	Ba, Cd	Segovia-Zavala et al (1998)
Tempête	Cd	
Régime alimentaire	$\delta^{13}\text{C}$	Herzka et al (2002)

L'étude de Shima et Swearer (2016) dans laquelle la dispersion larvaire du triplefin commun (*Forsterygion lapillum*) a été étudiée en Nouvelle-Zélande grâce à l'analyse de 12 éléments traces (Li, B, Mg, P, S, K, Mn, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb) de leurs otolithes, est un autre exemple d'approche indirecte mettant en jeu l'utilisation de marqueurs biochimiques.

Ces approches seront possibles chez des espèces modèles conservant leurs structures calcifiées lors du passage de l'état d'embryon à l'état juvénile. Chez la plupart des poissons, cette méthodologie est simple à mettre en place. Chez les invertébrés les cas d'applications seront réduits car la plupart des espèces ne possèdent pas de structures équivalentes à celles des otolithes. DiBacco et Levin (2000) ont utilisé cette méthode pour étudier les origines des larves d'une espèce de crabe (*Pachygrapsus crassipes*) grâce à leurs exosquelettes calcifiés. Ce type d'étude sur les invertébrés et notamment sur les crabes reste tout de même rare, en raison de leurs mues (qui peuvent être successives comme chez *Callinectes sapidus*) empêchant la reconstitution de leur histoire, jusqu'à leur vie larvaire et l'origine de leur ponte.

Les approches génétiques sont une autre catégorie de démarches permettant de mesurer la connectivité entre les populations en quantifiant cette fois les flux de gènes entre elles. Ils peuvent être estimés par une variété de méthodes directes et indirectes. Les techniques indirectes estiment le flux de gènes à partir des différences génétiques entre les populations en supposant que ces populations ont atteint l'équilibre (Slatkin, 1993). Ce type de méthode a par exemple permis de mettre en évidence une dispersion des larves de poissons sur des centaines de kilomètres en Papouasie-Nouvelle-Guinée (Almany et al, 2017). Les méthodes directes, quant à elles, regardent les différences entre les juvéniles avec les populations proches pour connaître à laquelle ils appartiennent. Cette démarche est notamment utilisée pour valider des modèles numériques de dispersion larvaire (par exemple Bode et al, 2019). Ces approches directes et indirectes utilisant la génétique permettent d'étudier des phénomènes différents. Les méthodes indirectes estiment la connectivité sur des échelles de temps évolutives mais sont incapables d'estimer les échanges démographiques contemporains. Les techniques directes excellent dans l'estimation de la connectivité ou de la rétention sur une ou

quelques générations. Ce sont ces dernières qui seront les plus utiles pour des études de dispersion larvaire.

La mise en place des procédés précédemment décrits reste coûteuse. C'est principalement pour cette raison que les méthodes numériques se sont largement développées. En effet, elles permettent de simuler la dispersion des larves à différentes échelles spatio-temporelles. Les simulations de suivis de particules utilisent la sortie d'un modèle hydrodynamique pour fournir la température, la salinité et la vitesse des courants permettant de calculer la vitesse des particules. Ces données physiques sont couplées avec les informations sur la biologie de l'espèce étudiée qui vont influencer sur la dispersion de cette dernière comme les phénomènes de nage active, de migrations verticales, la mortalité et la croissance (par exemple les différentes mues pour le cas de *Callinectes sapidus*).

### 1.3) Approches numériques pour l'étude de la dispersion larvaire et de la connectivité

Une recherche bibliométrique a été effectuée sur la base de données Web of Science en avril 2022 en utilisant les mots-clés suivants : (larv\* OR propagul\* OR egg\*) AND (transport\* OR retention OR dispers\* OR connectivity OR 'residence time\*') AND (hydrodynamic\* OR numerical OR biophysical OR Lagrangian) AND (model\* OR simulation\*). Il en est ressorti 1730 références dont 1683 articles scientifiques. La figure 2 représente la répartition de ces publications au cours du temps. On peut voir que l'intérêt pour les modèles de dispersion larvaire augmente rapidement depuis 2000 (en passant d'une vingtaine de publications par an à plus de 120 au cours de l'année 2020), notamment grâce à l'augmentation de la puissance de calcul.

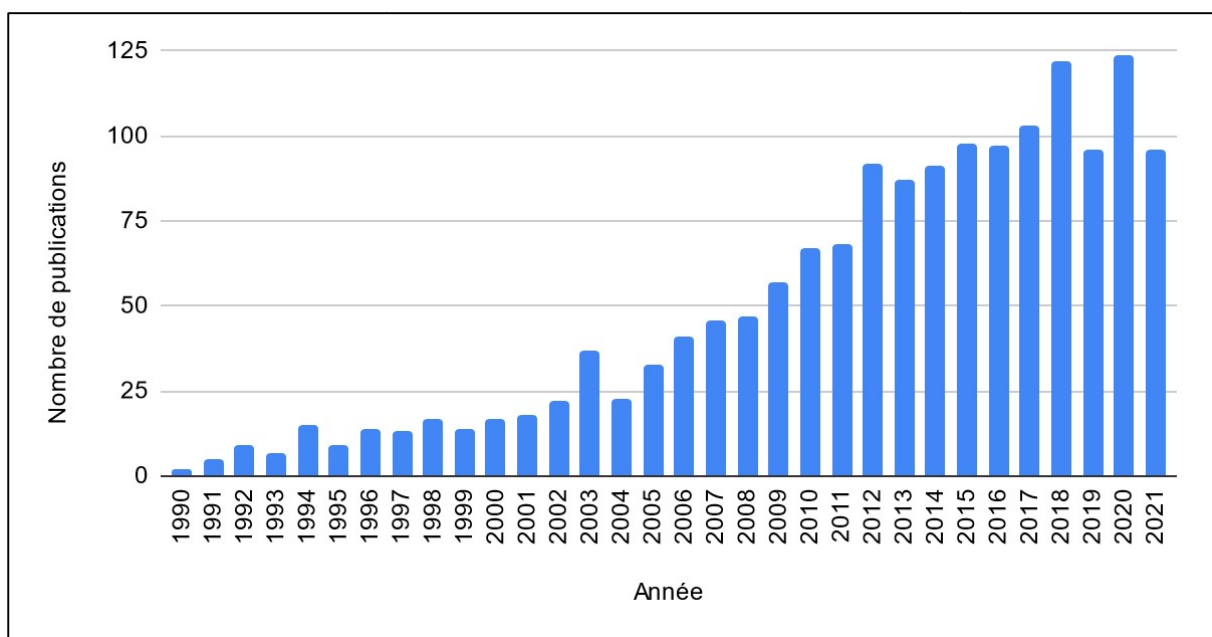


Figure 2 : Evolution temporelle du nombre de publications utilisant comme méthodologie un outil numérique de simulation de dispersion larvaire.



#### 1.4) Les outils de transport lagrangiens pour l'étude de la dispersion larvaire et de la connectivité

Il y a deux façons de décrire le mouvement d'un fluide : la description lagrangienne, dans laquelle on suit toutes les particules se comportant comme un fluide en décrivant les variations autour de chaque particule, le long de sa trajectoire et la description eulérienne, dans laquelle les variations sont décrites pour toutes les stations fixes en fonction du temps. Dans la seconde, différentes particules passeront par même station, à des moments différents (Patankar et al, 2001).

Les approches lagrangiennes modéliseront donc les interactions entre les larves et leur environnement en utilisant des modèles biologiques basés sur l'individu (IBM pour *individual-based models* ou modèles individus-centrés) (DeAngelis et al, 2005). Ces IBM simulent des populations ou des systèmes de populations comme étant composés d'organismes individuels discrets. Chaque individu a un ensemble de variables d'état ou d'attributs et de comportements. Les variables d'état peuvent inclure l'emplacement spatial, les traits physiologiques et les traits comportementaux. Ces attributs varient selon les individus et peuvent changer au fil du temps. Les comportements peuvent inclure la croissance, la reproduction, la sélection de l'habitat, la recherche de nourriture et la dispersion. Un avantage des IBM par rapport aux modèles traditionnels est qu'ils peuvent incorporer n'importe quel nombre de mécanismes au niveau individuel. Chaque particule est ainsi suivie le long de sa trajectoire par un bilan des forces s'exerçant sur elle. La modélisation intervient donc au niveau de la spécification des forces s'exerçant sur une particule plongée dans un écoulement fluide, et éventuellement des collisions possibles avec d'autres particules. Il existe de nombreux outils de transport lagrangiens utilisés pour la dispersion larvaire comme Ichthyop (Lett et al, 2008), CMS (*Connectivity Modeling System*) (Paris et al, 2013) ou LTRANS (Schlag et al, 2008).

Au départ, Ichthyop a été développé pour étudier le transport des larves d'espèces de poissons, il est donc normal que ces derniers soient les plus représentés. Néanmoins, la figure 3 montre que ce n'est pas le seul groupe étudié avec cet outil, car la plupart des taxa possédant une phase larvaire y sont représentés. Il est par exemple utilisé dans l'étude de Meerhoff et al (2020) pour étudier la connectivité chez les crabe-taupes (*Emerita brasiliensis*) sur les côtes uruguayennes. Ichthyop est aussi utilisé pour modéliser des particules inorganiques comme les plastiques ou d'autres formes de pollutions.

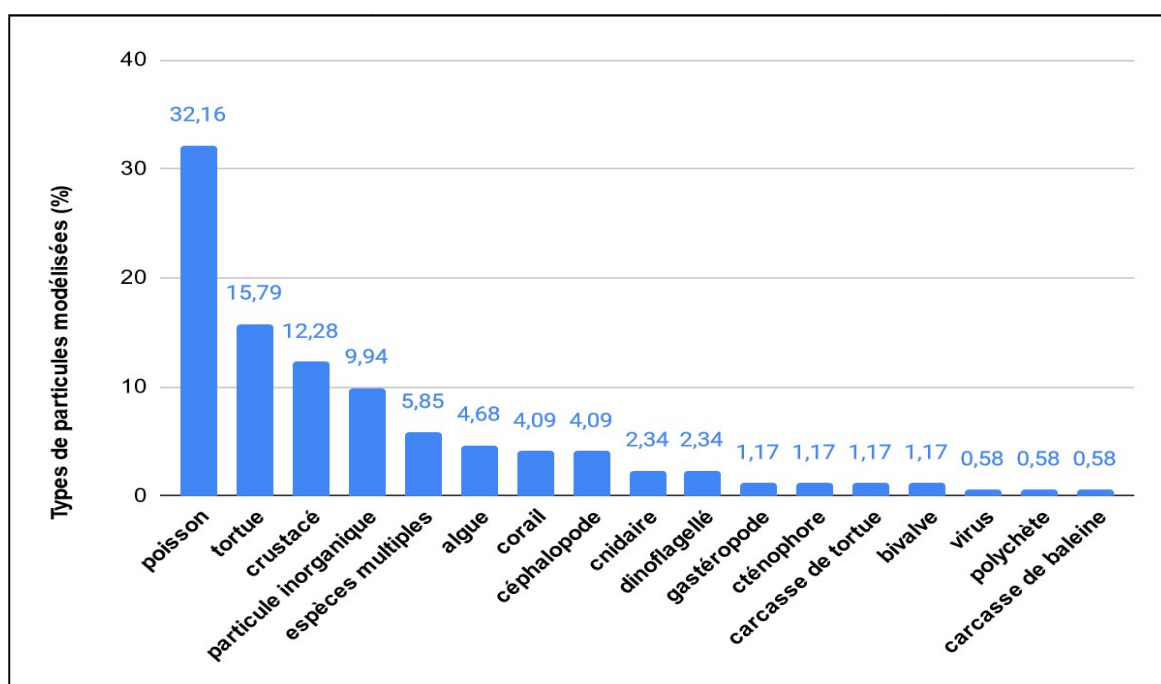


Figure 3 : Type de particule étudiée dans les publications utilisant Ichthyop (en pourcentage) jusqu'en Avril 2022.

## 2/ Introduction

### 2.1) Le crabe bleu (*Callinectes sapidus*)

*Callinectes sapidus* est une espèce de crabe originaire de la partie ouest de l'océan Atlantique. Il est présent sur les côtes de la Nouvelle-Écosse jusqu'en Uruguay, où il vit principalement dans les estuaires. Les mâles peuvent tolérer des salinités extrêmement faibles et peuvent être trouvés dans de nombreux plans d'eaux douces influencées par les marées tandis que les femelles se trouvent généralement plus proches de la mer, dans les eaux à salinité plus élevée. Chez ces crabes, l'accouplement va s'effectuer dans la partie moyenne/haute des estuaires donc en milieux oligohalin (c'est-à-dire de 0.5 à 3 de salinité) et mésohalin (de 3 à 16 psu). La femelle va alors stocker le sperme et procéder à une fécondation interne des œufs (Jivoff et al, 2007). L'accouplement se déroule dans la partie de l'estuaire où la salinité est trop faible pour les larves (Costlow et Bookhout, 1959). Une fois fécondées, les femelles inséminées vont migrer vers des zones de plus fortes salinités. Cette migration se fait en deux phases, durant la première, les femelles migreront vers l'embouchure de l'estuaire où va se produire la fécondation des œufs. Ensuite, les femelles devenues « grainées » (car elles maintiennent les œufs au niveau de leur abdomen) vont sortir de l'estuaire en utilisant les marées (Forward et al, 2003) pour libérer les larves dans l'océan côtier.

Durant sa période larvaire, le crabe bleu va passer par de multiples stades dont la durée va varier selon les conditions environnementales (Costlow, 1967). Cette période comprend 7 stades zoés, capables de se maintenir sous la surface grâce à une nage active (Epifanio, 1995). Puis, juste avant de devenir des juvéniles, les larves zoés vont passer à un stade mégalope, capable d'effectuer des migrations verticales (figure 4). Quel que soit le stade, la vitesse de nage des larves de *Callinectes sapidus* demeure plus lente que la vitesse des courants de surface. Ainsi, la nage active horizontale ne semble pas avoir d'importance dans leur dispersion (Epifanio et Garvine, 2001). Néanmoins, la migration verticale permettra de faciliter le retour des larves à l'entrée de l'estuaire, dans des habitats tels que les herbiers marins, les macroalgues ou les récifs d'huîtres, permettant à ces dernières et aux juvéniles de se nourrir et de se protéger des prédateurs (Hovel et Fonseca, 2005).

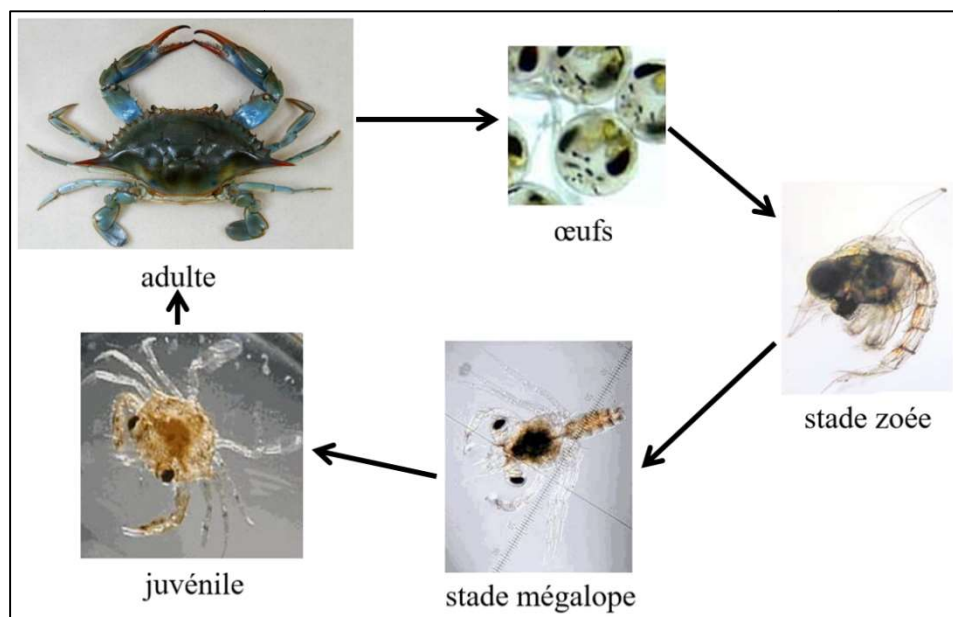


Figure 4 : Les différents stades de vie du crabe bleu *Callinectes sapidus* (figure modifiée à partir des photographies de Thomas Schafer, UNC Wilmington et Alicia Young-Williams, Smithsonian Environmental Research Center).

## 2.2) La situation d'espèce invasive en Méditerranée

Les premiers crabes bleus en Méditerranée auraient été observés en 1949 et probablement dès 1935 (Veyssière et al, 2022). Son introduction serait due aux eaux de ballast de navires provenant de son aire de répartition d'origine et de l'introduction volontaire de l'espèce à des fins aquacoles (Nehring et al, 2011). Après cette première vague d'apparitions, les observations ont considérablement diminué. Puis, les signalements ont réapparu dans les années 2010 (Labruno et al, 2019), cette fois-ci en plus grande quantité, notamment dans le delta de l'Ebre. Aujourd'hui, le crabe bleu est présent presque partout sur les côtes nord de Méditerranée (figure 5).



Figure 5 : Carte des présences de *Callinectes sapidus* en Méditerranée (modifiée à partir de Box et al, 2020).

L'étude de Clavero et al (2022) a caractérisé les impacts de l'invasion de crabe bleu sur l'écosystème du delta de l'Ebre lors de son installation en 2012, mais surtout de sa rapide expansion à partir de 2016. Cette étude a montré que l'augmentation de ce dernier dans cette zone coïncidait avec le déclin voire l'effondrement de plusieurs espèces, dont des espèces déjà en danger et des espèces commerciales, probablement à cause de sa capacité à consommer une grande variété de proies. De plus, sa capacité à influencer la structure des communautés a déjà été démontrée (Kneib, 1982). Parmi les nombreuses espèces affectées par cette invasion, le plus spectaculaire déclin est celui du crabe vert, qui n'est quasiment plus pêché depuis 2018. Cette exclusion par l'invasion du crabe bleu est en accord avec d'autres observations effectuées par Kampouris et al (2019) en Grèce. À différents sites en Méditerranée, l'invasion du crabe bleu a provoqué des déclins locaux des populations de crabes verts, provoquant de grands changements dans les communautés de crabes côtiers de la Méditerranée et de l'Atlantique nord-est (Farrée et al, 2021).

## 2.3) Objectifs et questions scientifiques

Dans un contexte d'expansion rapide de *Callinectes sapidus* en mer Méditerranée et du manque de connaissances disponibles sur la biologie de l'espèce dans cette partie du monde, il semble important de s'intéresser à la dynamique de ses populations pour pouvoir prédire plus facilement ses potentiels impacts dans le futur. Cette étude tente de répondre à plusieurs questions : comment les crabes bleus se sont dispersés dans toute la Méditerranée nord-occidentale ? D'où viennent les individus observés en Corse ? Ce travail va donc avoir plusieurs objectifs, le premier sera de s'intéresser à la dynamique

spatio-temporelle de l'espèce en Méditerranée nord-occidentale en étudiant sa dispersion larvaire sur une période d'une dizaine d'année (de 2010 à 2019). Le deuxième sera de voir la connectivité sur cette même période, c'est-à-dire les échanges de larves entre les différents habitats dans lesquels le crabe bleu est observé en Méditerranée (principalement des lagunes), tout en regardant si de la variabilité est observable, qu'elle soit saisonnière ou annuelle. Ensuite, l'objectif sera de faire une comparaison entre des simulations de dispersion larvaire réalisée avec et sans migration verticale au stade mégalope, étant donné que ce paramètre est mal ou pas estimé encore en Méditerranée compte-tenu des conditions environnementales très différentes de l'aire de répartition d'origine du crabe (marées, salinité, etc.). Enfin, le dernier objectif de cette étude sera d'élargir l'emprise du modèle hydrodynamique afin d'observer les trajectoires de dispersion à l'échelle de la Méditerranée et étudier la connectivité interbassins.

### **3/ Matériel et méthodes**

#### **3.1) Sources de données**

Ce travail est réalisé avec un outil de modélisation lagrangienne (Ichthyop), le modèle hydrodynamique MARS3D pour la partie Nord-Occidentale ainsi que Mercator3D pour l'ouverture sur toute la Méditerranée. Les données biologiques sont issues des études passées/en cours et des observations réalisées par différents partenaires scientifiques ou professionnels de la mer (Pôle-relais lagunes méditerranéennes, Office de l'Environnement de la Corse, DREAL de Corse, pêcheurs, clubs de plongée, etc.). Des échanges réguliers avec les équipes étudiant cette espèce dans son aire de répartition d'origine (Lysel Garavelli, Pacific Northwest National Laboratory, Seattle, Washington) ont été réalisés dans le but de mieux comprendre les différences de traits d'histoire de vie du crabe dans sa nouvelle niche écologique.

#### **3.2) La zone d'étude**

La mer Méditerranée est une mer quasiment fermée, dans laquelle le bilan hydrique est négatif, c'est-à-dire avec des apports en eau en provenance des fleuves et des précipitations inférieures à la perte en eau due à l'évaporation. Il y aura donc une compensation de cette perte par une entrée d'eaux atlantiques, moins salées et donc moins denses que les eaux méditerranéennes au niveau du détroit de Gibraltar (environ 1 million de  $m^3.s^{-1}$ ). Cette eau atlantique va déterminer la circulation générale des courants de surface. Avec la force de Coriolis, cette circulation principale va se faire dans le sens antihoraire dans les 2 bassins (figure 6). La Méditerranée présente un littoral complexe, de nombreuses îles, petits tourbillons et courants locaux, qui ensemble constituent sa courantologie générale. Les marées peuvent être importantes en amplitude notamment dans le golfe de Gabès et le nord de l'Adriatique. Elles ajoutent un niveau de complexité aux courants d'environnements complexes et étroits, comme par exemple le détroit de Messine. Néanmoins, d'une manière générale, les marées en Méditerranée demeurent d'amplitude faible. Le marnage est généralement inférieur à 40cm près des côtes, et est principalement liée à la météo (variations de pressions, vents, houles, etc.) plutôt qu'à la position des astres dans le ciel. En Corse, le marnage est de 20cm en vives eaux et de 10cm en mortes eaux.

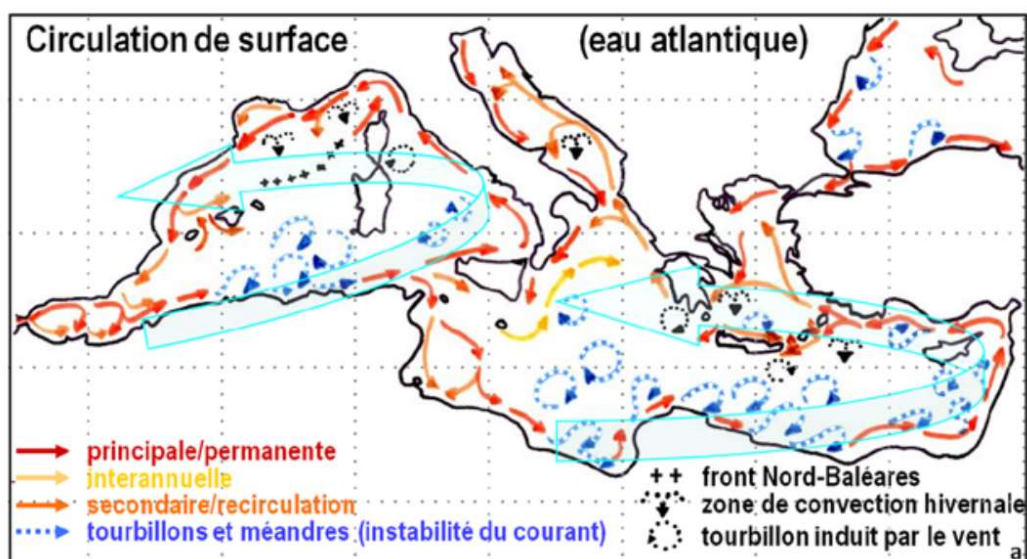


Figure 6 : Circulation générale de surface en mer Méditerranée (Millot et Taupier-Letage, 2005).

### 3.3) Les modèles hydrodynamiques

#### 3.3.1 MARS3D

MARS3D (Model for Application at Regional Scales 3D) est l'un des modèles hydrodynamiques choisis dans cette étude pour répondre à nos objectifs. C'est un outil de modélisation numérique pour l'océan côtier développé par l'IFREMER. Sa description complète est disponible dans Lazure et Dumas (2008). Ce code de calcul possède la particularité de séparer les modes barotrope (qualificatif utilisé en météorologie, océanographie physique etc. pour décrire des gaz ou liquides dont les propriétés ne varient pas avec l'épaisseur, un fluide barotrope est donc un fluide dont les lignes d'égale pression sont parallèles à celles d'égale densité) et barocline (on dit qu'on a affaire à un fluide barocline, lorsque les lignes d'égale pression (isobares) croisent celles d'égale densité (isopycnes) dans celui-ci). Dans MARS3D, ces modes sont résolus au même pas de temps. Par ailleurs, les masses d'eau sont maillées à l'aide d'une triple grille de type « Arakawa-C » (Arakawa et Lamb, 1977), constituée de trois matrices tridimensionnelles HO, HX et HY liées entre elles. Ce maillage utilise une discrétisation horizontale décentrée « forward-backward » qui permet de calculer l'élévation de la surface libre et des traceurs au centre de la maille, alors que les composantes méridiennes et zonales du courant sont décalées d'une demi-maille. La discrétisation verticale utilise quant à elle les coordonnées sigma. Elle est indépendante de la profondeur et divise la colonne d'eau en couches d'épaisseurs variables suivant la topographie du fond. Ces niveaux seront concentrés en surface afin d'obtenir une meilleure résolution (figure 7). MARS a d'abord été utilisé sous différentes configurations, tout d'abord pour la modélisation de la façade atlantique française, puis plus récemment en Méditerranée, sous sa configuration menor1200, que nous utilisons pour cette étude. Cette dernière englobe toute la Méditerranée nord-occidentale jusqu'à la Sardaigne. Des études

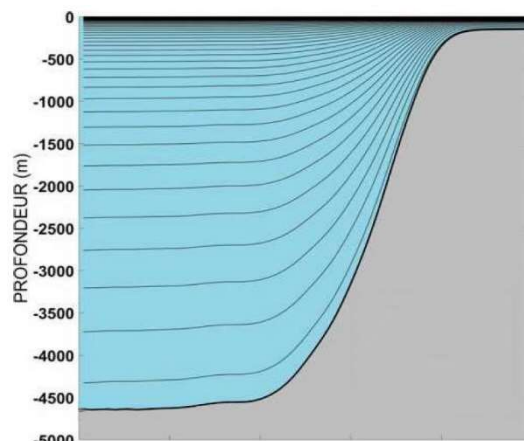


Figure 7 : Schéma de la répartition des niveaux sigmas dans un modèle type MARS3D (modifié à partir d'Oms, 2019).

couvrant différents champs de recherche scientifique ont été menées avec ce modèle comme une étude sur la contamination des microplastiques dans la baie de Marseille (Gérigny et al, 2022) ou un travail portant sur la connectivité et la variabilité du recrutement chez l'anchois européen (*Engraulis encrasicolus*) pour la partie nord-ouest de la Méditerranée (Ospina-Alvarez et al, 2015). Ces études ont montré la capacité de MARS à reproduire de façon satisfaisante la circulation hydrodynamique à différentes échelles spatio-temporelles.

### 3.3.2 Med MFC physical reanalysis product

Pour notre étude sur une grande emprise incluant toute la Méditerranée, le modèle MEDSEA (Escudier et al, 2020), développé à partir du modèle NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) est utilisé. La résolution de ce modèle est de  $1/24^\circ$  (environ 4-5 km), sur 141 niveaux sigmas. Par rapport aux simulations réalisées avec le modèle menor1200, englobant la partie nord-occidentale de la Méditerranée, 4 polygones ont été rajoutés sur le modèle global (Trapani, Mazaro, Bizerte et dans le golfe de Gabes, figure 8), afin de modéliser les signalements et pontes éventuelles de crabe dans ces nouvelles zones, et d'identifier la dispersion et connectivité interbassins.

### 3.4) L'outil de transport lagrangien : Ichthyop

Ichthyop est un modèle individu-centré de suivi des particules qui, à la base, a été créé pour étudier la dispersion des larves de poissons par Lett et al, (2008). Il intègre les processus les plus importants impliqués pendant la vie larvaire comme le frai, la croissance, la mortalité, les potentiels déplacements verticaux et/ou horizontaux et le recrutement. Pour modéliser cette dispersion, Ichthyop utilise les données de courants, température et salinité d'un modèle hydrodynamique auquel il est couplé pour suivre des particules qui peuvent représenter des larves, des œufs, des carcasses ou des microplastiques.

### 3.5) Paramètres de simulation

Tableau 2 : Paramètres des simulations réalisées avec Ichthyop pour l'étude de la dispersion larvaire du crabe bleu.

Paramètres	Valeurs	Commentaires et références
Nombre de particules	2 millions	
Date des lâchés	15/04 et 15/09 pour chaque année	
Durée de la simulation	55(+7j) au printemps 40(+7j) en automne	La durée de la phase larvaire va dépendre des conditions environnementales, elle a été estimée à partir de l'étude de Costlow (1967) à laquelle on a ajouté 7 jours de dérive potentielle avant la mort de la larve (Veyssiere et al, 2022).
Pas de temps	1200 secondes (menor1200) et 3600 secondes (MEDSEA)	
Comportement à la côte	<i>Bouncing</i>	Les particules vont "rebondir" en rencontrant une barrière physique. Lett et al (2008)
Schéma numérique du processus d'advection	Runge Kutta 4	
Taux de dissipation	$10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}^3$	Peliz et al (2007)
Profondeur de lâchés des œufs	0-35m	Aguilar et al (2005)
Zones de lâchés	13 zones + 3 pour la grande emprise	(Figure 8), les zones se situent en face des lagunes, dans l'emprise du modèle.
Zones de Recrutements		
Flottabilité	$0.9\text{g}/\text{cm}^3$	Sert à « forcer » les particules à rester proche de la surface, sachant que les larves aux stades zoées restent dans les 2 mètres supérieurs de la colonne d'eau (Epifanio, 1995).
Nage horizontale	Non	La vitesse de nage des larves zoées varie selon le stade de développement de 0,5 à 2,0 cm par seconde (Sulkin et al, 1980 ; Forward, 1986) et 5cm par seconde pour le stage mégaloïde (Luckenbach et Orth,1992) ce qui reste bien inférieur à la vitesse des courants en Méditerranée.
Migration verticale (si activée)	Age minimum 40j au printemps 30j en automne	Tout comme la PLD, l'âge du passage de stade zoée au stade mégaloïde va dépendre des conditions environnementales, cet âge a été estimé à partir de l'étude de Costlow (1967).
	Profondeur de jour 30m	Cette profondeur correspond à une profondeur moyenne pour les crustacés effectuant des migrations verticales (Ospina-Alvarez et al, 2018) et cela correspond aussi à la matrice de distribution des larves de crabe bleu dans son aire de répartition d'origine (Criales et al, 2019).
	Profondeur de nuit 1m	

Les polygones pour les lâchés et le recrutement des larves ont été placés dans l'emprise du modèle hydrodynamique qui malheureusement n'inclue pas les lagunes, se situant à trop faible bathymétrie. Ces polygones ont donc été placés en face des zones lagunaires, dans une aire favorable à la ponte des œufs pour *Callinectes sapidus*, c'est-à-dire où la profondeur ne dépasse pas 35 mètres (Figure 8).

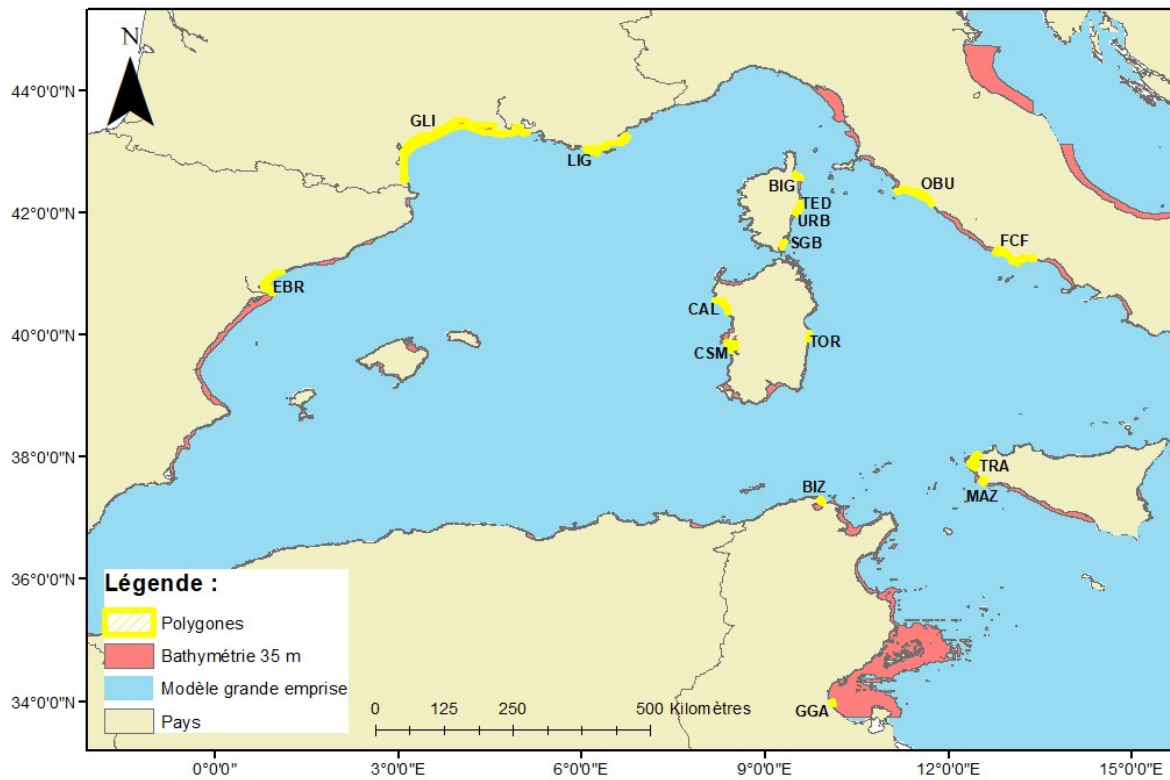


Figure 8 : Carte des polygones de lâchés et de recrutement réalisée avec le logiciel arcGIS (EBR : Delta de l'Èbre, GLI : Golfe du Lion, BIG : Biguglia, TED : Terrenzana et Diane, URB : Urbino, SGB : Santa Giulia et Balista, LIG : Mer Ligure, OBU : Orbetello et Burano, FCF : Fogliano, Caprolace et Fondi, TOR : Tortoli, CSM : Cabras, S'Ena Arrubia et Marceddi, CAL : Calich, BIZ : Bizerte, TRA : Trapani, MAZ : Mazzaro, GGA : Golfe de Gabes).



## 4/ Résultats

### 4.1) Etude temporelle des trajectoires de dispersion du crabe bleu en Méditerranée Nord-Occidentale

Les figures 9 et 10 montrent les trajectoires et les points d'arrivées des larves lâchées dans le golfe du Lion aux deux saisons de pontes sur la période 2010-2019. Quelle que soit la saison, ces cartes mettent en évidence une variabilité interannuelle avec certaines années pour lesquelles les larves vont demeurer proches de leur lieu de pontes, et d'autres pour lesquelles la distance de dispersion sera plus importante. Concernant la variabilité saisonnière, les larves semblent avoir tendances à moins être dirigées vers l'est au printemps (figure 9) et davantage aller vers l'Ebre et les Baléares.

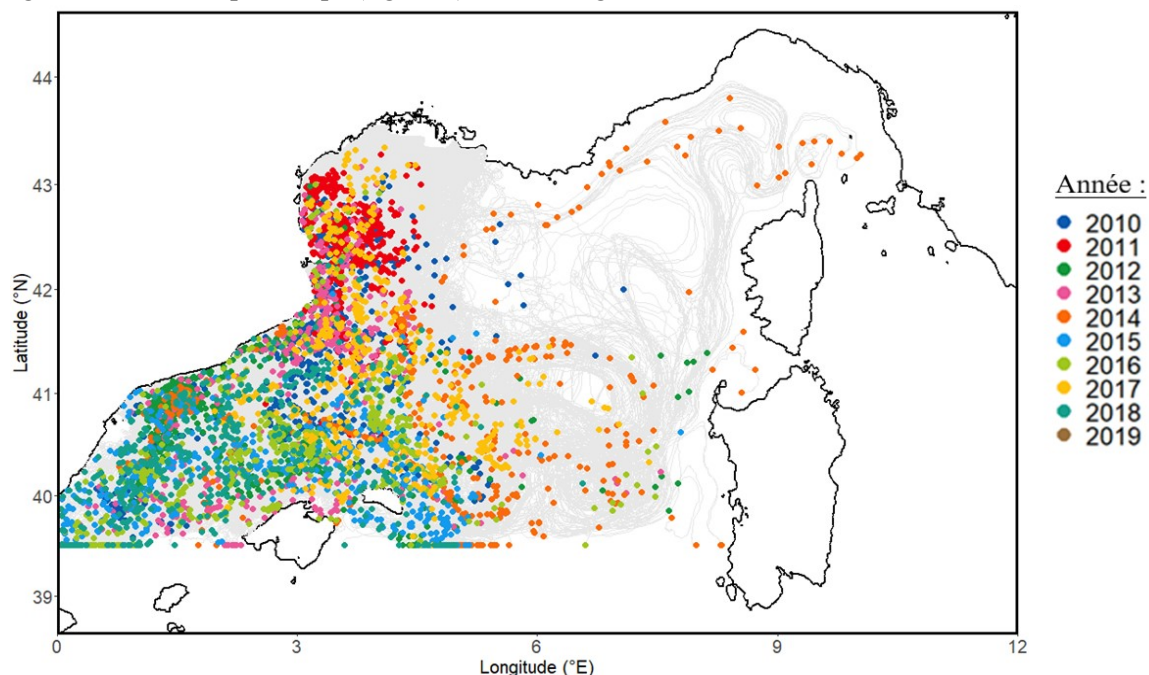


Figure 9 : Trajectoires des larves lâchées au printemps dans le golfe du Lion pour la période 2010-2019.

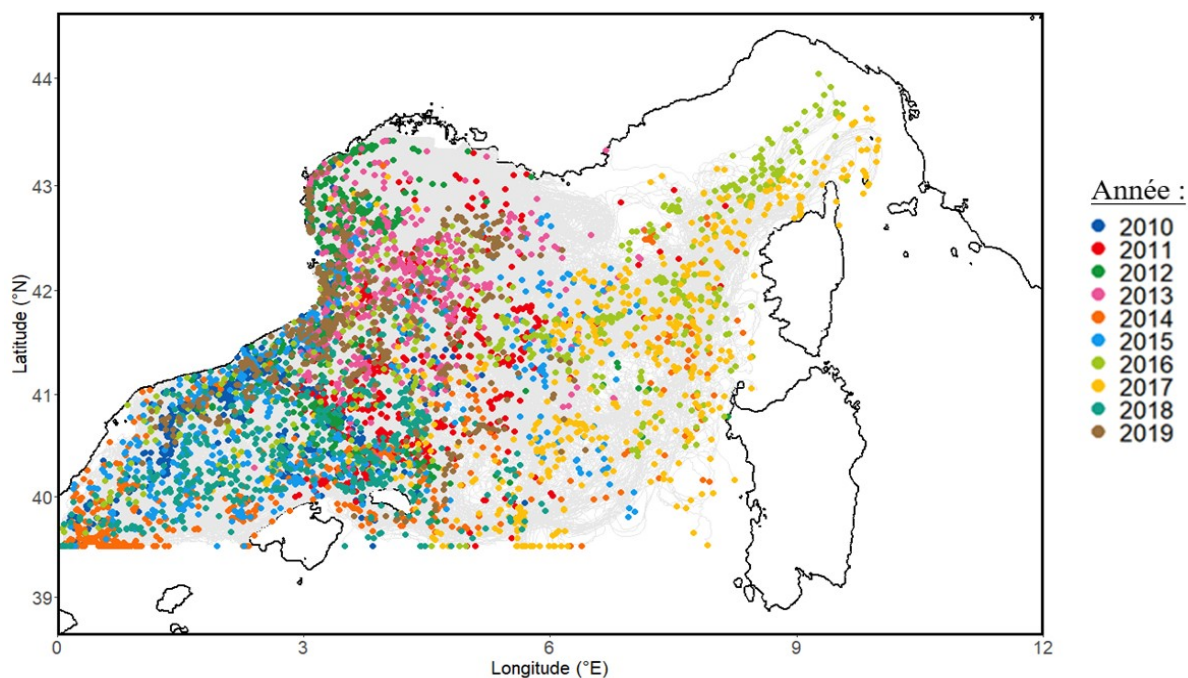


Figure 10 : Trajectoires des larves lâchées en automne dans le golfe du Lion pour la période 2010-2019.

Les cartes de la figure 11 sont des densités de trajectoires de dispersion des larves en automne, le gradient de couleur permet de mettre en évidence les trajectoires les plus empruntées, une échelle logarithmique a été choisie afin de pouvoir visualiser les extrêmes, et notamment les trajectoires plus fines et très peu fréquentées. En automne, la dispersion dépendra en grande partie de l'année considérée, avec certaines d'entre elles pour lesquelles les larves vont plutôt stationner dans le golfe du Lion (2012) (figure 11 A), et d'autres où leur dispersion se fera dans la même direction qu'au printemps (2014) (figure 11 B), et enfin certaines encore pour lesquelles les larves vont se retrouver à l'est au niveau des côtes ouest de la Corse et de la Sardaigne (figure 11 C). Sur ces cartes, on peut aussi voir qu'au niveau du sud de l'Ebre et à l'est des Baléares, les larves sont « bloquées » par l'emprise du modèle mais semblent être transportées plus au Sud, mettant en évidence une limite méthodologique.

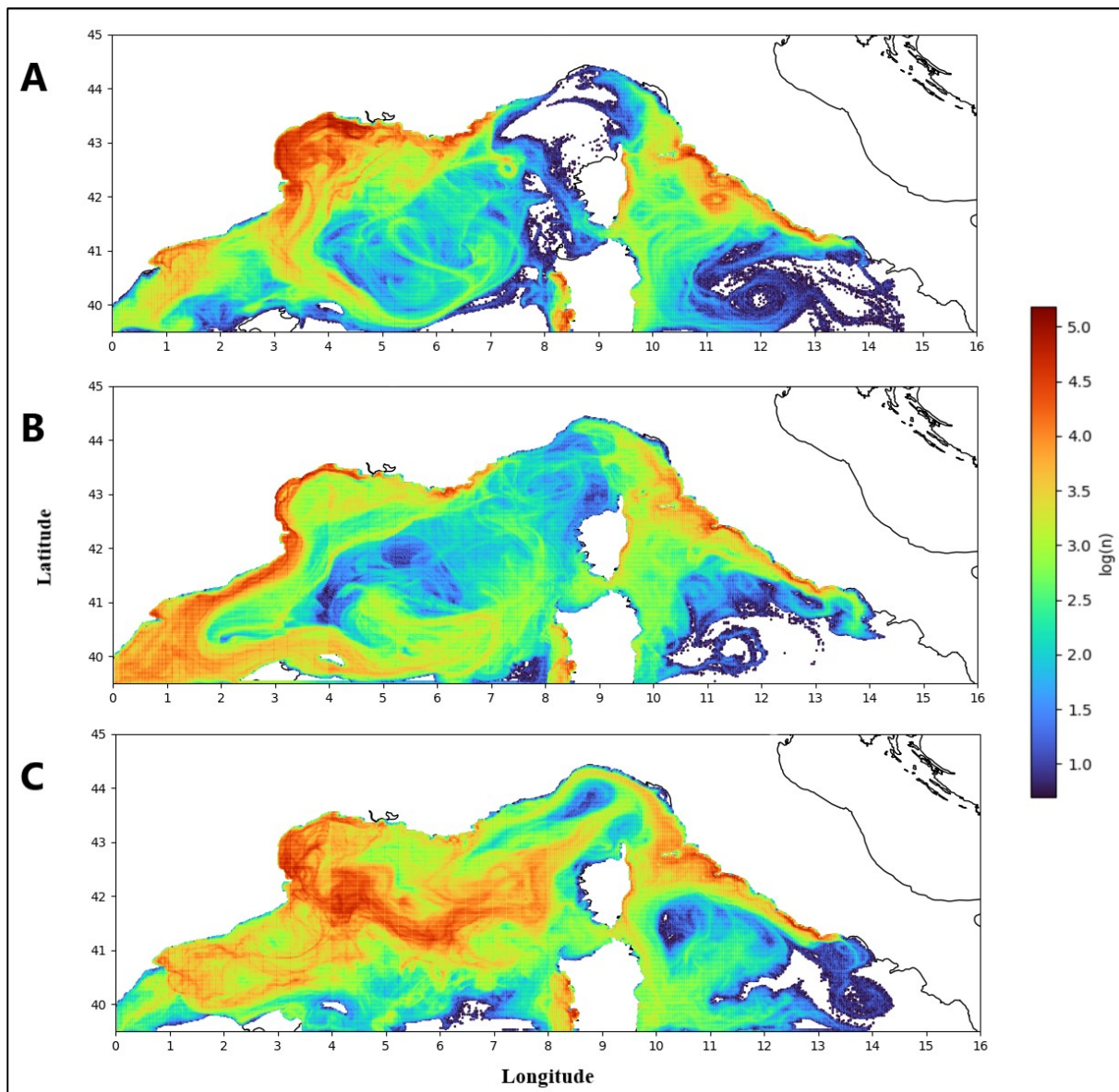


Figure 11 : Comparaison des cartes de densité de trajectoires des larves pour l'automne 2012 (A), 2014 (B) et 2016 (C).

## 4.2) Connectivité inter lagunes

Les matrices (figure 12 et 13) montrent la connectivité entre les lagunes. Elle a été calculée en faisant la moyenne de toutes les années sur la période 2010-2019. La variabilité interannuelle est représentée par le coefficient de variation qui est le rapport entre l'écart-type et la moyenne. Plus cet indice est élevé, plus le niveau de dispersion autour de la moyenne est important.

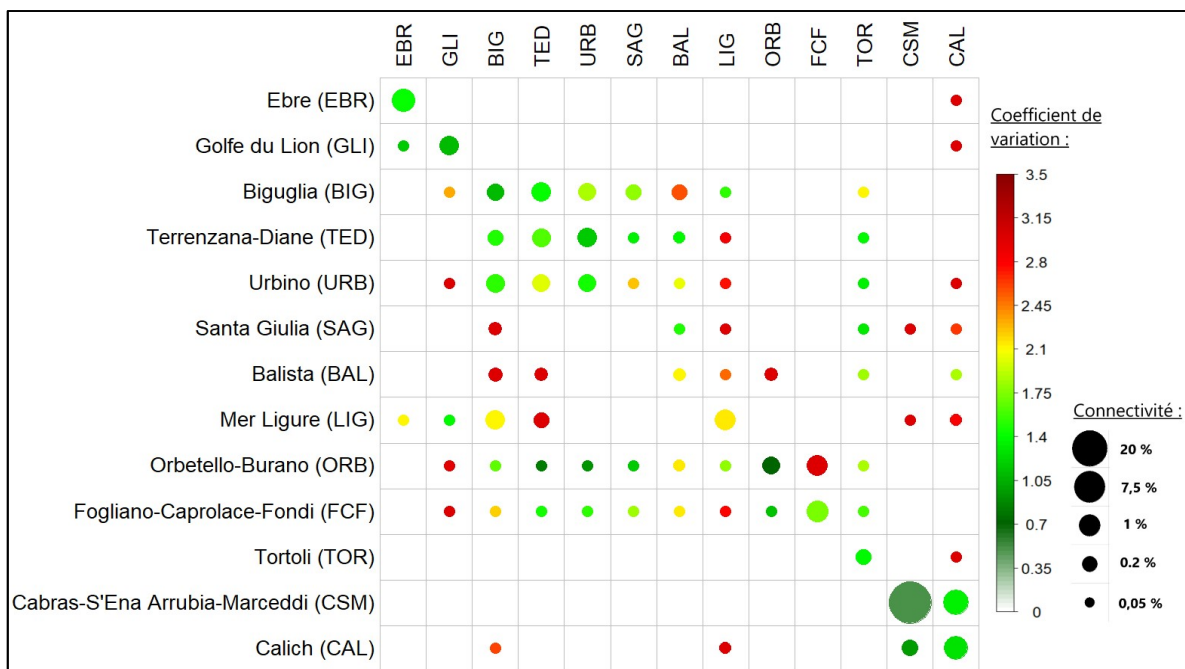


Figure 12 : Connectivité moyenne entre les lagunes de Méditerranée nord-occidentale au printemps sur la période 2010-2019.

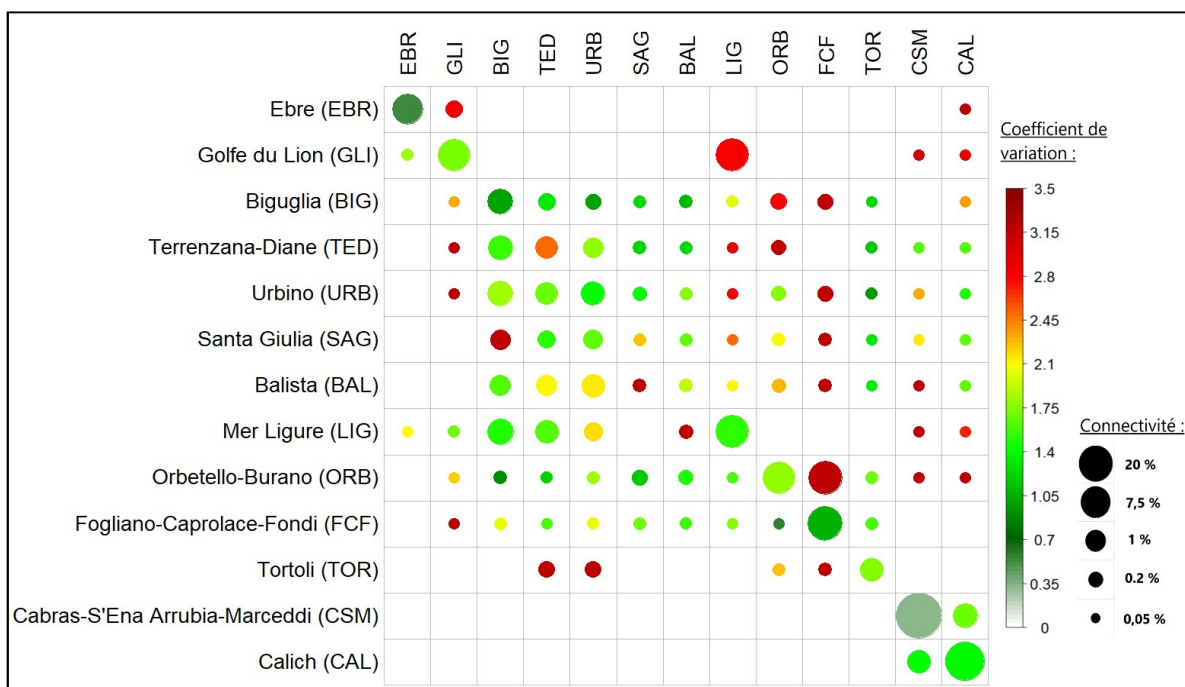


Figure 13 : Connectivité moyenne entre les lagunes de Méditerranée nord-occidentale en automne sur la période 2010-2019.

Quelle que soit la saison, le recrutement des larves est le plus important dans les lagunes où elles ont été lâchées (on parlera alors d'autorecrutement). La connectivité semble globalement plus conséquente en automne avec des taux d'autorecrutement plus importants et des coefficients de variations moins élevés. Par exemple, ce taux en automne est le double de celui observé au printemps pour l'Ebre (EBR). Ces matrices mettent en évidence des échanges entre certaines lagunes proches comme entre L'Ebre et le golfe du Lion ou encore entre les lagunes corses Biguglia, Terrenzana, Diane et Urbino. Par ailleurs, les matrices montrent également une connectivité entre lagunes plus éloignées comme l'Ebre avec l'étang de Calich en Sardaigne. Cette observation est un autre indicateur de la nécessité d'élargir l'emprise du modèle océanographique.

#### **4.3) Impact de la migration verticale sur la dispersion et la connectivité**

En comparant les figures 12 et 13 avec une migration activée dans les simulations avec les figures 14 et 15 dans lesquelles elle est désactivée, on peut observer des différences, notamment au niveau des coefficients de variation. Par exemple pour l'autorecrutement dans le golfe du Lion en automne, la connectivité moyenne a une même valeur que ce soit avec ou sans migration verticale, mais le coefficient de variation est plus élevé sans cette migration.

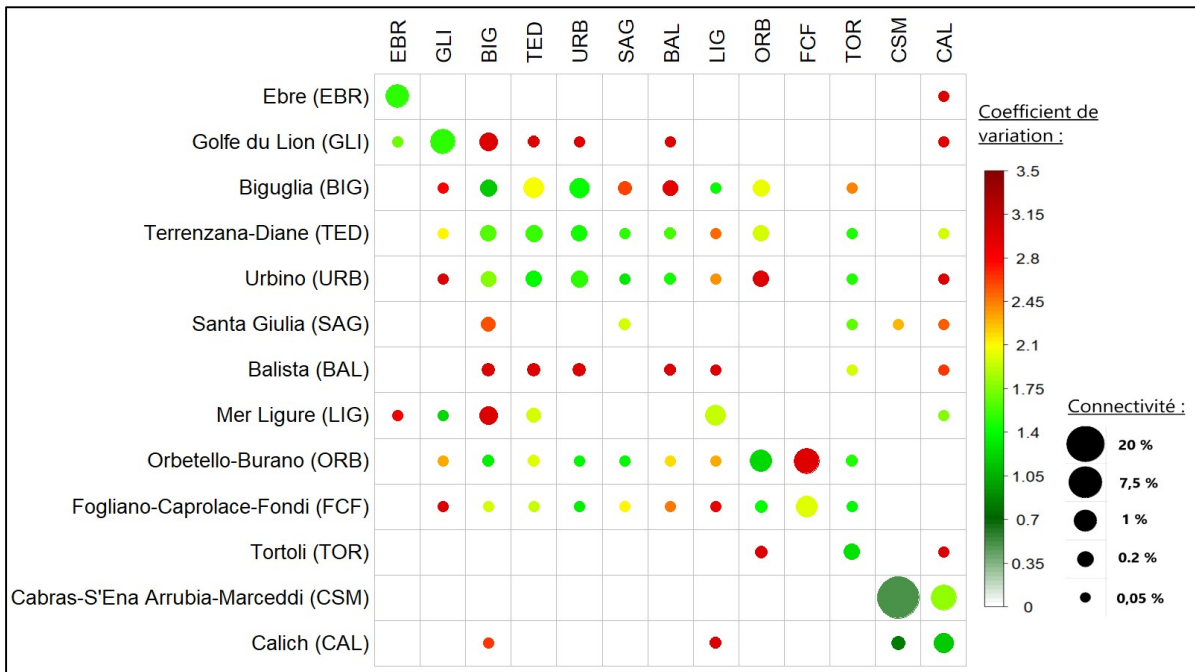


Figure 14 : Connectivité moyenne entre les lagunes de Méditerranée nord-occidentale au printemps sur la période 2010-2019 sans migration verticale.

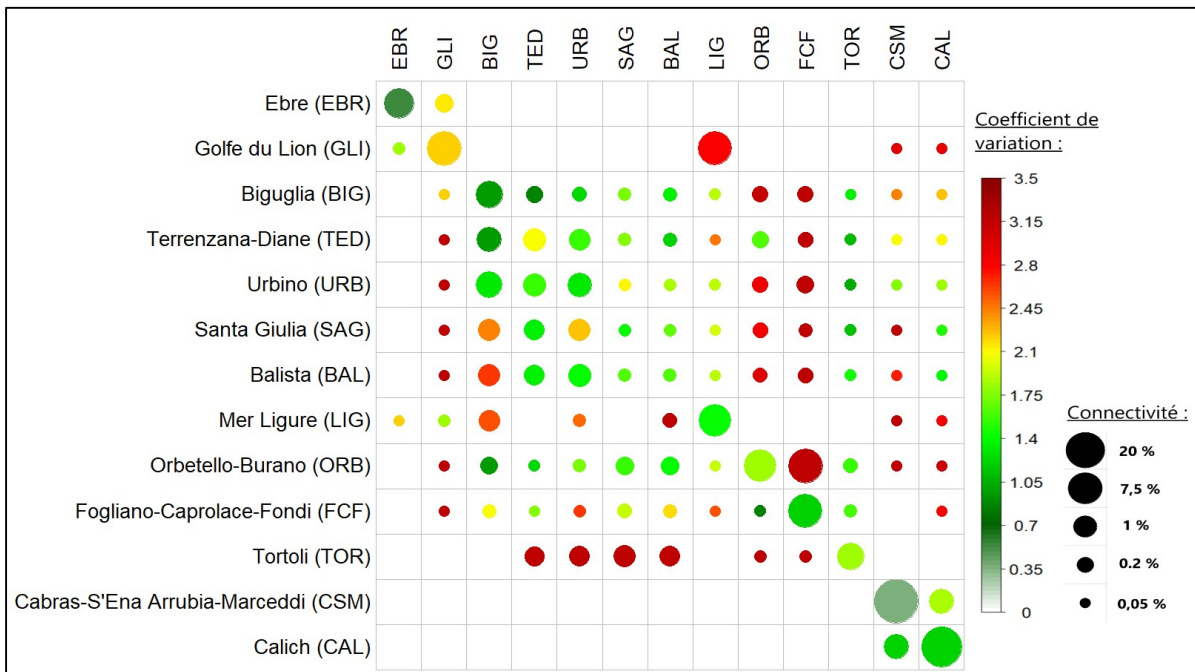


Figure 15 : Connectivité moyenne entre les lagunes de Méditerranée nord-occidentale en automne sur la période 2010-2019 sans migration verticale.

#### 4.4) Ouverture sur une plus grande emprise

Cette expérience préliminaire utilisant le modèle d'emprise générale sur la Méditerranée permet de mettre en évidence plusieurs phénomènes. Premièrement, les deux années contrastées choisies pour les variations observées à l'échelle Méditerranée nord-occidentale présentent à cette échelle aussi des différences notables. Les tendances générales sont comparables, mais il y a des différences locales. Au printemps les larves sont transportées plus au sud, que ce soit à l'ouest ou à l'est. En effet, à l'ouest, celles lâchées de l'Ebre, du golfe du Lion et de Sardaigne arrivent jusqu'au large des côtes algériennes, notamment en 2016 (figure 16 B). Lors de cette même année en automne (figure 17 B) elles ne dépassent pas les îles Baléares. À l'est aussi la dispersion est plus importante au printemps, les larves sont dispersées dans toute la mer tyrrhénienne mais ne passe pas dans le bassin oriental par le détroit de Messine.

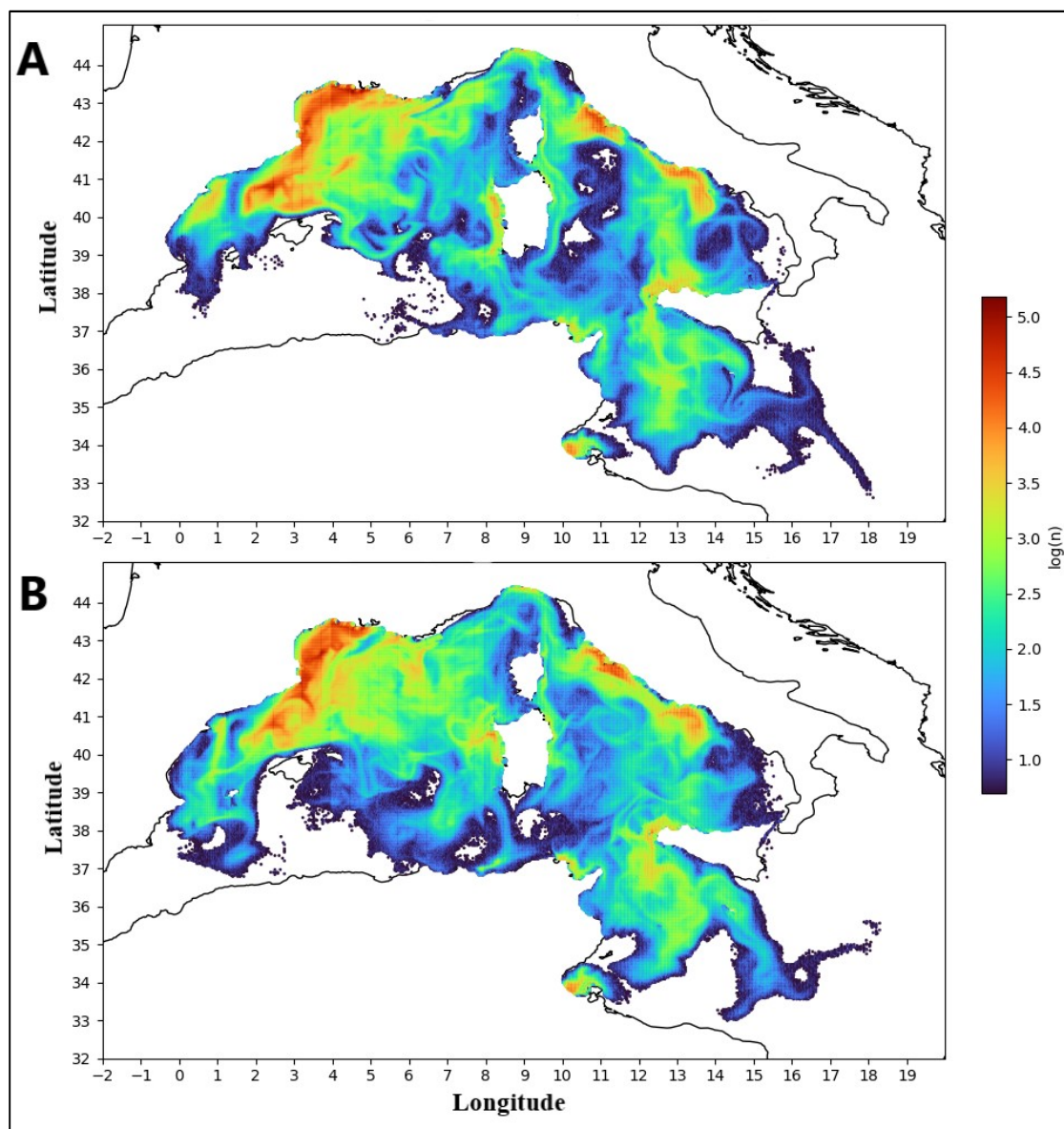


Figure 16 : Cartes des densités de trajectoires empruntées par les larves avec le modèle de grande emprise pour printemps 2014 (A) et 2016 (B).

Par rapport au modèle avec la plus petite emprise, 4 zones de lâchées ont été ajoutées, dans le golfe de Gabes et Bizerte en Tunisie ainsi que Trapani et Mazaro en Sicile. Le but ici est de voir si les crabes bleus en Méditerranée Nord-Occidentale pourraient possiblement venir de ces zones. Lors des deux années étudiées, les larves lâchées du golfe de Gabes n'ont pas été transportées hors de leur lieu de ponte. En revanche, pour les deux lagunes de Sicile, une partie des larves est transportée à l'est dans le bassin oriental tandis que l'autre partie est acheminée vers les côtes italiennes plus au nord. Enfin, pour les lâchés de Bizerte au nord des côtes tunisiennes, les larves sont transportées vers l'est et semblent elles aussi partir vers le bassin oriental.

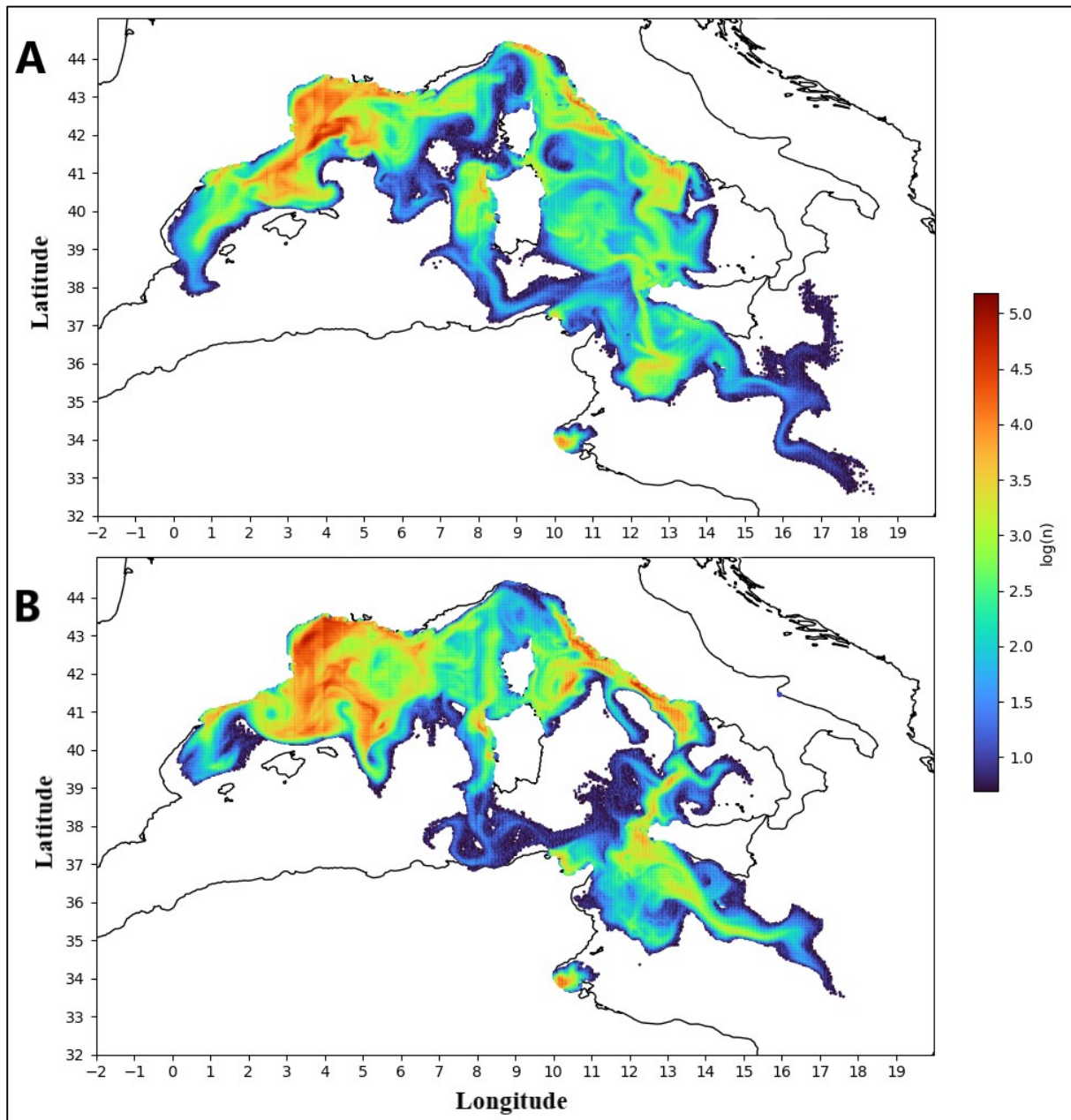


Figure 17 : Cartes de densités de trajectoires empruntées par les larves avec le modèle de grande emprise pour automne 2014 (A) et 2016 (B).

## 5/ Discussion

### 5.1) Dynamique spatiotemporelle de l'invasion de *Callinectes sapidus* en Méditerranée nord-occidentale et connectivité inter-lagunes

Les résultats mettent en évidence une variabilité entre les saisons. En effet, sur les cartes de trajectoires des larves partant du golfe du Lion (figures 9 et 10) et les matrices de connectivité (figures 12 et 13), les larves se dispersent plus loin en automne qu'au printemps. Cette observation est étonnante, car la durée de vie larvaire est plus longue quand les températures sont plus froides ce qui est le cas au printemps. Cette différence saisonnière pourrait donc s'expliquer par des courants en Méditerranée nord-occidentale plus puissants à partir d'automne à l'exception du courant des Baléares qui lui est plus fort au printemps selon Birol et al, (2010). En revanche cette exception pour le courant des Baléares (passant au nord de Majorque et Minorque et partant vers l'est) n'est pas visible sur les figures 9 et 10 où les larves sont transportées principalement vers l'ouest au printemps contrairement à l'automne, saison pour laquelle certaines années (2016 et 2017 par exemple) les larves vont se retrouver à l'est, au niveau des côtes de Corse et de Sardaigne.

Malgré ces observations, aucune population établie de crabe bleu n'a été identifiée à ce jour sur les côtes ouest de la Corse (contrairement à celles de Sardaigne). Cette absence pourrait potentiellement s'expliquer par trois paramètres qui sont importants pour la dynamique de l'espèce en Méditerranée. Premièrement, il n'y a pas de lagune sur cette côte et malgré la présence de petits estuaires, le crabe ne semble pas s'y installer pour le moment. Ensuite, cette partie de la Corse est très rocheuse et n'offre pas beaucoup d'habitats intéressants comme des fonds sableux/vaseux pour que les juvéniles puissent s'y développer. Enfin, la présence en abondance d'un prédateur important du crabe bleu, le poulpe (*Octopus vulgaris*), pourrait également expliquer cette impossibilité d'installation. Une autre observation intéressante a été réalisée par Clavero et al (2022). Dans cette étude, les auteurs ont montré un léger ralentissement des augmentations d'abondances de *Callinectes sapidus* dans le delta de l'Ebre, en raison des perturbations de son régime alimentaire. En effet, la proportion animale/végétale des ressources alimentaires consommées par le crabe aurait un impact fort sur sa fertilité et ses capacités de survie (Belgrad et Griffen, 2016). Ainsi, une diminution des proies pourrait affecter négativement la croissance des populations, avec notamment l'apparition de comportements de cannibalismes nuisant à la survie des larves et des juvéniles (Moksnes et al, 1997). Ces observations en Corse et dans le delta de l'Ebre montrent que pour trouver des solutions permettant de limiter l'invasion du crabe bleu il faut aussi s'intéresser à ses prédateurs et à ses proies potentielles.

Le crabe bleu est bien étudié dans son aire de répartition d'origine, mais en Méditerranée il y a encore peu de travaux sur la biologie de cette espèce. La période de ponte est un paramètre crucial pour étudier la dispersion larvaire. Or, pour *Callinectes sapidus*, cette période varie en fonction de la localisation des populations. Par exemple, dans son aire de répartition d'origine à Chesapeake Bay aux États-Unis la ponte se fait de mai à septembre (McConaughy et al, 1983) alors que sur les côtes au sud du Brésil elle a lieu toute l'année avec une intensification lors des mois les plus chauds, de décembre à mars (Severino-Rodrigues et al, 2013). Dans notre étude, les périodes utilisées (une au printemps et l'autre en automne) ont été déterminées par un rétrocalcul basé sur la présence de juvéniles dans les lagunes. Cependant, des suivis d'observations du crabe bleu organisés par l'Office de l'Environnement de la Corse comme le groupe de travail « *Callinectes sapidus* » ([https://orzhc.oec.fr/Action\\_Callinectes\\_sapidus\\_mpage\\_258.htm](https://orzhc.oec.fr/Action_Callinectes_sapidus_mpage_258.htm)) ou le programme Bleu-Adapt (<https://pole-lagunes.org/programme-bleu-adapt-un-questionnaire-pour-recueillir-les-temoignages-des-pecheurs-professionnels-vis-a-vis-de-linvasion-du-crabe-bleu/>) permettent d'avoir de plus en plus



de données. Or, des observations récentes de femelles grainées hors de ces saisons vont dans le sens d'une période de ponte qui serait plus étendue. Ce phénomène a déjà été observé dans la lagune de Beymelek en Turquie, où des femelles ont été observées portant des œufs entre février et septembre, avec des abondances maximums en août (Sumer et al, 2013). De plus, la durée de la ponte varie en fonction des conditions environnementales (températures et salinités). Lors d'expériences en milieux contrôlés, Sandoz et al (1944) ont montré que la plage de salinité optimale pour l'éclosion chez ce crabe était de 23 à 28 PSU. Hors de cette plage, les larves observées étaient alors sous-développées et avaient donc une chance de survie très faible. Concernant la température la tolérance montrée dans cette étude semblait plus importante, à partir du moment où cette dernière dépassait les 19°C. La caractérisation de cette période de ponte, grâce à des travaux plus avancés effectués dans notre zone d'étude, pourra donc permettre d'améliorer la précision du modèle.

### **5.2) Impact de la migration verticale sur la dispersion et la connectivité**

La comparaison entre les simulations avec et sans migration verticale du stade mégalope a permis de mettre en évidence des différences de connectivité entre les deux scénarios comme par exemple l'apparition d'échanges entre le delta de l'Ebre (Espagne) et l'étang de Calich (Sardaigne) en automne quand cette migration est activée. Ces différences semblent de faible importance, localisées et ne vont pas forcément dans le sens d'une plus forte connectivité. En Méditerranée, Ospina-Alvarez et al, (2012) ont étudié l'impact de la migration verticale sur la dispersion et la connectivité des larves d'anchois européens (*Engraulis encrasicolus*). Les résultats de cette étude montrent que la migration verticale diminue significativement la distance parcourue par les larves d'anchois par rapport à des particules passives, et que le phénomène dépend beaucoup des années étudiées. Cependant, contrairement aux anchois, les larves de crabe bleu ne sont capables d'effectuer des migrations verticales qu'aux derniers stades de leur développement, ce qui représente environ un quart seulement de leur durée de vie larvaire (dans cette étude elles commencent au 30<sup>ème</sup> jour en automne et 40<sup>ème</sup> jour au printemps, pour une dispersion qui dure respectivement 40 et 55 jours). Il n'est donc pas étonnant de constater que les impacts d'une migration verticale sur le transport des larves entre lagunes soient plus faibles que ceux observés dans l'étude d'Ospina-Alvarez et al (2012).

Néanmoins, cette migration verticale pourrait avoir un rôle important au moment de l'entrée des larves dans les lagunes, zones qui ne sont malheureusement pas modélisées dans cette étude, en raison d'une résolution des modèles hydrodynamiques insuffisante. En effet, dans son aire de répartition d'origine, Olmi (1994) a montré que la migration verticale, en plus d'éviter les prédateurs, était un mécanisme qui permettait aux larves de remonter plus facilement et rapidement dans les estuaires. Par exemple, dans la baie de Chesapeake, les larves au stade mégalopes effectuant cette migration ont mis en moyenne 3,5 jours pour y entrer contre 6,5 jours pour les larves mégalopes restant au fond.

### **5.3) Ouverture de l'étude au-delà de la Méditerranée nord-occidentale**

En compilant 72 articles, Pascual et al (2017) ont caractérisé les flux de gènes en Méditerranée et l'impact des 7 fronts océaniques présents dans cette zone sur ces derniers (figure 18 : détroit de Gibraltar, façade Almería-Oran, canal d'Ibiza, front des Baléares, canal de Sicile, canal d'Otrante et front Égéen). L'étude met en évidence une réduction plus ou moins importante des échanges génétiques de part et d'autre des fronts en fonction des traits de vie de l'espèce et notamment de la durée en phase larvaire (PLD). En effet, les espèces avec des PLD longues (> 4 semaines) ont enregistré les réductions des flux de gènes les plus importants (66%). Le crabe bleu, avec une vie

larvaire qui dure entre 55j au printemps et 40j en automne, fait partie des espèces potentiellement grandement influencées par ces barrières océaniques.

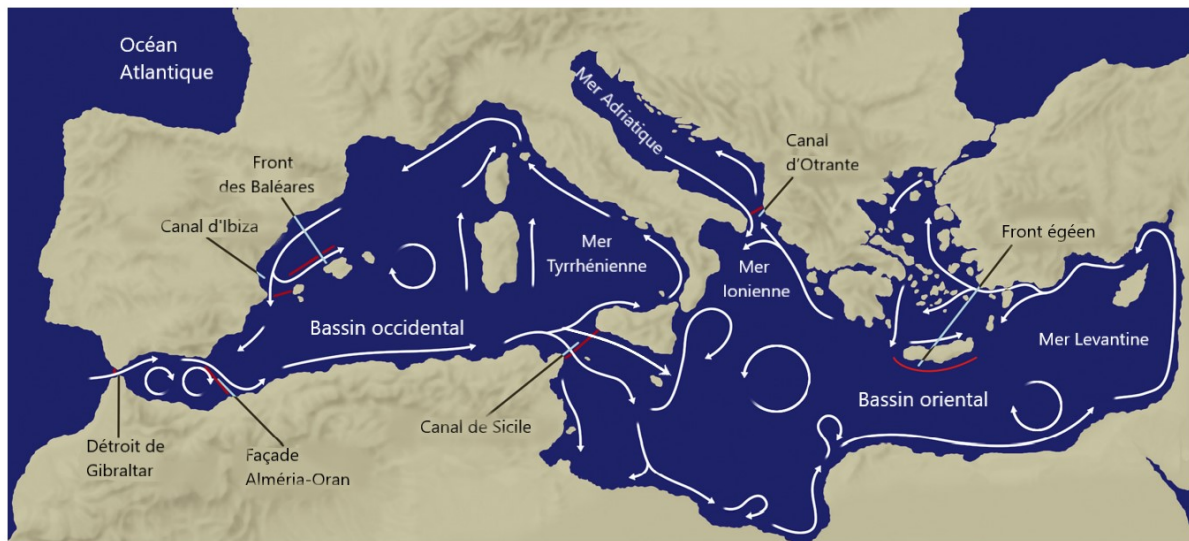


Figure 18 : Carte des principaux courants et barrières océanographiques en Méditerranée (modifiée à partir de Pascual et al, 2017 et Ismail et al, 2014).

Concernant la connectivité entre les deux bassins, Ismail et al (2014) ont montré que le courant de surface suivant les côtes africaines dans le bassin occidental se sépare en trois au niveau du canal de Sicile (Figure 18). Deux d'entre eux vont passer dans le bassin oriental, l'un en longeant les côtes tunisiennes l'autre en longeant celles du sud de la Sicile. Le dernier va rester dans le bassin occidental en passant par le nord de la Sicile. Dans le cadre de cette étude, deux années (2014 et 2016) ont été étudiées avec un modèle de grande emprise pour voir si les larves présentes en Méditerranée nord-occidentale pourraient venir des côtes tunisiennes ou siciliennes, mais également de comprendre la dynamique des échanges entre les deux bassins (oriental et occidental). La direction de dispersion des larves pour les années étudiées semble être en accord avec les travaux d'Ismail et al (2014). En effet la figure 17 B représentant la simulation d'automne 2016 montre que les larves lâchées à Bizerte vont être transportées dans le bassin oriental en restant près des côtes tunisiennes. Les particules lâchées de Trapani et Mazaro longeront, quant à elles, les côtes de la Sicile (nord et sud). L'autre potentiel passage entre les deux bassins méditerranéens est le détroit de Messine, mais les résultats (figure 16) ne permettent pas de déterminer si les larves peuvent être transportées dans le bassin oriental à ce niveau. Enfin, des auteurs comme Androssov et al (2002) ont montré que la direction des courants dans cette zone dépend de la marée. Afin d'améliorer nos conclusions, il faudrait réaliser des simulations avec un pas de temps assez faible pour être représentatif de la réalité. L'étude des lagunes va aussi permettre d'améliorer la compréhension de cette dispersion. En Corse, une thèse effectuée par Viviana Ligorini, sur la caractérisation de l'état des lagunes, est en cours. Ces données pourront ainsi aider à la prise de décision pour limiter l'invasion de l'espèce en accentuant les efforts sur les lagunes vulnérables. De plus, dans le cadre du projet Interreg Retralags pour la gestion des lagunes, des lacs et des étangs, un travail sur le fonctionnement hydrodynamique et écosystémique de la lagune de Biguglia a déjà été fait. En effet, Dufresne et al (2017) ont modélisé les courants ainsi que les flux d'azote et phosphores au sein de la lagune en utilisant le code de MARS3D.

## 6/ Conclusions et perspectives

Cette étude est la première à s'intéresser à la dispersion larvaire du crabe bleu (*Callinectes sapidus*) en Méditerranée grâce à un outil numérique tel qu'Ichthyop. Elle a permis de mettre en évidence une connectivité entre les populations de cette espèce présente dans les lagunes de cette zone, et parfois même entre lagunes éloignées de plusieurs centaines de kilomètres. Cependant cette dispersion et cette connectivité ne sont pas stables au cours du temps, avec une variabilité interannuelle et saisonnière. Cette étude a aussi montré qu'il est crucial d'analyser la dispersion larvaire en considérant la Méditerranée dans son ensemble, puisque que les larves peuvent passer d'un bassin à un autre.

Au cours de ce travail, plusieurs limites ont pu être identifiées. Premièrement, le modèle hydrodynamique, qui permet de faire les simulations, ne possède pas de données à l'intérieur des lagunes. Ainsi, dans la présente étude, les lâchers et les recrutements ont été simulés et calculés juste en face de l'ouverture de ces dernières. Il semble donc nécessaire de coupler cette étude avec d'autres expériences sur les caractéristiques des lagunes de cette zone. En effet, chaque lagune possède des propriétés différentes, que se soit la température, la salinité, les habitats, les courants à l'entrée, les périodes d'ouverture du grau (partie communicante entre la lagune et la mer), etc. Ces dernières informations sont essentielles pour savoir si les larves (au dernier stade) vont réellement pénétrer dans les lagunes et se transformer en adultes matures. Un indicateur de l'état écologique pourrait aussi être intéressant étant donné qu'une espèce invasive a plus de chance de se développer dans un milieu déjà dégradé (Robbins, 2004). La présence d'espèces invasives peut donc être considérée comme un indicateur de vulnérabilité pour une lagune.

Deuxièmement, les connaissances sur la biologie de *Callinectes sapidus* en Méditerranée restent encore parcellaires par rapport à celles dans son aire d'origine. Dans cette étude, certains paramètres ont donc été paramétrés en fonction des recherches effectuées dans les estuaires d'Amérique du nord. Néanmoins, certains travaux sont en cours (notamment au Pôle-relais lagunes méditerranéennes) et leurs avancées vont permettre d'améliorer la précision du modèle.

Enfin, au niveau des perspectives de développement de l'outil Ichthyop, les particules représentant les larves sont lâchées dans des polygones qui ont été placés dans une bathymétrie cohérente avec la biologie de l'espèce, correspondant ainsi à la zone potentielle des lâchés des œufs. Néanmoins, leur répartition entre les polygones n'est, à l'heure actuelle, pas paramétrable, et dépend uniquement de la taille de chaque polygone. Des discussions avec les développeurs de l'outil sont en cours pour implémenter la capacité de choisir le nombre de particules lâchées par polygones.

Cette étude de stage de master vient s'insérer dans un ensemble plus global constituant un travail de doctorat à l'Université de Corse. Ce travail va permettre d'apporter des connaissances fondamentales sur la macroécologie de l'espèce, qui pourront servir à la mise en place de mesures locales pour gérer cette invasion.

## 7/ Bibliographie

- Aguilar, R., A. H. Hines, T. G. Wolcott, D. L. Wolcott, M. A. Kramer, and R. N. Lipcius. "The timing and route of movement and migration of post-copulatory female blue crabs, *Callinectes sapidus* Rathbun, from the upper Chesapeake Bay." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 319, no. 1-2 (2005): 117-128.
- Almany, Glenn R., Serge Planes, Simon R. Thorrold, Michael L. Berumen, Michael Bode, Pablo Saenz-Agudelo, Mary C. Bonin et al. "Larval fish dispersal in a coral-reef seascape." *Nature Ecology & Evolution* 1, no. 6 (2017): 1-7.
- Androsov, A. A., B. A. Kagan, D. A. Romanenkov, and N. E. Voltzinger. "Numerical modelling of barotropic tidal dynamics in the strait of Messina." *Advances in water resources* 25, no. 4 (2002): 401-415.
- Arakawa, Akio, and Vivian R. Lamb. "Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model." *General circulation models of the atmosphere* 17, no. Supplement C (1977): 173-265.
- Begon, Michael, and Colin R. Townsend. *Ecology: from individuals to ecosystems*. John Wiley & Sons, (2020).
- Belgrad, Benjamin A., and Blaine D. Griffen. "The influence of diet composition on fitness of the blue crab, *Callinectes sapidus*." *PloS one* 11, no. 1 (2016).
- Birol, F., M. Cancet, and C. Estournel. "Aspects of the seasonal variability of the Northern Current (NW Mediterranean Sea) observed by altimetry." *Journal of Marine Systems* 81, no. 4 (2010): 297-311.
- Bode, Michael, Jeffrey M. Leis, Luciano B. Mason, David H. Williamson, Hugo B. Harrison, Severine Choukroun, and Geoffrey P. Jones. "Successful validation of a larval dispersal model using genetic parentage data." *PLoS Biology* 17, no. 7 (2019).
- Botsford, L. W., James Wilson White, M-A. Coffroth, C. B. Paris, Serge Planes, T. L. Shearer, Simon R. Thorrold, and GP3402229 Jones. "Connectivity and resilience of coral reef metapopulations in marine protected areas: matching empirical efforts to predictive needs." *Coral reefs* 28, no. 2 (2009): 327-337.
- Box, A., V. Colomar, A. Sureda, S. Tejada, V. Nuñez-Reyes, A. Cohen-Sanchez, T. Avila et al. "Next step of the colonization of the Balearic Islands (Spain) by invasive Atlantic blue crab, *Callinectes sapidus* Rathbun, 1896 (Crustacea: Decapoda: Portunidae)." *BioInvasions Records* 9, no. 2 (2020): 259-265.
- Clavero, Miguel, Nati Franch, Rubén Bernardo-Madrid, Verónica López, Pere Abelló, Josep Maria Queral, and Giorgio Mancinelli. "Severe, rapid and widespread impacts of an Atlantic blue crab invasion." *Marine Pollution Bulletin* 176 (2022).
- Cossarini, Gianpiero, Laura Feudale, Anna Teruzzi, Giorgio Bolzon, Gianluca Coidessa, Cosimo Solidoro, Valeria Di Biagio et al. "High-Resolution Reanalysis of the Mediterranean Sea Biogeochemistry (1999–2019)." *Frontiers in Marine Science* (2021): 1537.
- Costlow Jr, John D., and C. G. Bookhout. "The larval development of *Callinectes sapidus* Rathbun reared in the laboratory." *The Biological Bulletin* 116, no. 3 (1959): 373-396.

- Costlow, John D. "The effect of salinity and temperature on survival and metamorphosis of megalops of the blue crab *Callinectes sapidus*." *Helgoländer wissenschaftliche Meeresuntersuchungen* 15, no. 1 (1967): 84-97.
- Cowen, Robert K., Claire B. Paris, and Ashwanth Srinivasan. "Scaling of connectivity in marine populations." *Science* 311, no. 5760 (2006): 522-527.
- Criales, Maria M., Laurent Chérubin, Ryan Gandy, Lysel Garavelli, Mohamed Ali Ghannami, and Claire Crowley. "Blue crab larval dispersal highlights population connectivity and implications for fishery management." *Marine Ecology Progress Series* 625 (2019): 53-70.
- DeAngelis, Donald L., and Wolf M. Mooij. "Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes." *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 36 (2005): 147-168.
- DiBacco, Claudio, and Lisa A. Levin. "Development and application of elemental fingerprinting to track the dispersal of marine invertebrate larvae." *Limnology and Oceanography* 45, no. 4 (2000): 871-880.
- Dufresne, C., N. Malet, S. Coudray, and A. Fiandrino. "Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 1: Mise en place de la modélisation numérique 3D." (2017).
- Dufresne, C., N. Malet, S. Coudray, and A. Fiandrino. "Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 1: Mise en place de la modélisation numérique 3D." (2017).
- Epifanio, C. E. "Transport of blue crab (*Callinectes sapidus*) larvae in the waters off mid-Atlantic states." *Bulletin of Marine Science* 57, no. 3 (1995): 713-725.
- Epifanio, C. E., and R. W. Garvine. "Larval transport on the Atlantic continental shelf of North America: a review." *Estuarine, coastal and shelf Science* 52, no. 1 (2001): 51-77.
- Escudier, R., Clementi, E., Omar, M., Cipollone, A., Pistoia, J., Aydogdu, A., Drudi, M., Grandi, A., Lyubartsev, V., Lecci, R., Cretí, S., Masina, S., Coppini, G., & Pinardi, N. "Mediterranean Sea Physical Reanalysis (CMEMS MED-Currents) (Version 1)." Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). (2020).
- Farré, M., A. Lombarte, V. M. Tuset, and P. Abelló. "Shape matters: relevance of carapace for brachyuran crab invaders." *Biological Invasions* 23, no. 2 (2021): 461-475.
- Forward R. "A reconsideration of the shadow response of a larval crustacean." *Marine & Freshwater Behaviour & Phy* 12, no. 2 (1986): 99-113.
- Forward, R., R. Tankersley, K. Smith, and J. Welch. "Effects of chemical cues on orientation of blue crab, *Callinectes sapidus*, megalopae in flow: implications for location of nursery areas." *Marine Biology* 142, no. 4 (2003): 747-756.
- Fowler, A. J., S. E. Campana, S. R. Thorrold, and C. M. Jones. "Experimental assessment of the effect of temperature and salinity on elemental composition of otoliths using laser ablation ICPMS." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52, no. 7 (1995): 1431-1441.
- Gérigny, O., M-L. Pedrotti, M. El Rakwe, M. Brun, M. Pavec, M. Henry, F. Mazeas, J. Maury, P. Garreau, and F. Galgani. "Characterization of floating microplastic contamination

in the bay of Marseille (French Mediterranean Sea) and its impact on zooplankton and mussels." *Marine Pollution Bulletin* 175 (2022): 113353.

- Guizien, K., M. Belharet, P. Marsaleix, and J. M. Guarini. "Using larval dispersal simulations for marine protected area design: application to the Gulf of Lions (northwest Mediterranean)." *Limnology and Oceanography* 57, no. 4 (2012): 1099-1112.
- Herzka, S. Z., S. A. Holt, and G. J. Holt. "Characterization of settlement patterns of red drum *Sciaenops ocellatus* larvae to estuarine nursery habitat: a stable isotope approach." *Marine Ecology Progress Series* 226 (2002): 143-156.
- Hovel, K. A., and M. S. Fonseca. "Influence of seagrass landscape structure on the juvenile blue crab habitat-survival function." *Marine Ecology Progress Series* 300 (2005): 179-191.
- Ismail, S. B., K. Schroeder, C. Sammari, G. P. Gasparini, M. Borghini, and L. Aleya. "Interannual variability of water mass properties in the Tunisia–Sicily Channel." *Journal of Marine Systems* 135 (2014): 14-28.
- Jivoff, P. R., A. H. Hines, and S. Quackenbush. "Reproduction and embryonic development." *Blue crab: Callinectes sapidus* (2007).
- Jones, G. P., M. J. Milicich, M. J. Emslie, and C. Lunow. "Self-recruitment in a coral reef fish population." *Nature* 402, no. 6763 (1999): 802-804.
- Kalish, J. M. "Otolith microchemistry: validation of the effects of physiology, age and environment on otolith composition." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 132, no. 3 (1989): 151-178.
- Kampouris, T. E., J. S. Porter, and W. G. Sanderson. "Callinectes sapidus Rathbun, 1896 (Brachyura: Portunidae): An assessment on its diet and foraging behaviour, Thermaikos Gulf, NW Aegean Sea, Greece: Evidence for ecological and economic impacts." *Crustacean Research* 48 (2019): 23-37.
- Kneib, R. T. "The effects of predation by wading birds (Ardeidae) and blue crabs (*Callinectes sapidus*) on the population size structure of the common mummichog, *Fundulus heteroclitus*." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 14, no. 2 (1982): 159-165.
- Labrune, C., E. Amilhat, J-M. Amouroux, C. Jabouin, A. Gigou, and P. Noël. "The arrival of the American blue crab, *Callinectes sapidus* Rathbun, 1896 (Decapoda: Brachyura: Portunidae), in the Gulf of lions (Mediterranean Sea)." *BioInvasions Records* 8, no. 4 (2019): 876-81.
- Lazure, P., and F. Dumas. "An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)." *Advances in water resources* 31, no. 2 (2008): 233-250.
- Lett, C., P. Verley, C. Mullon, C. Parada, T. Brochier, P. Penven, and B. Blanke. "A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics." *Environmental Modelling & Software* 23, no. 9 (2008): 1210-1214.
- Levin, L. A. "Recent progress in understanding larval dispersal: new directions and digressions." *Integrative and comparative biology* 46, no. 3 (2006): 282-297.

- Luckenbach, M. W., and R. J. Orth. "Swimming velocities and behavior of blue crab (*Callinectes sapidus* Rathbun) megalopae in still and flowing water." *Estuaries* 15, no. 2 (1992): 186-192.
- McConaugha, J. R., D. F. Johnson, A. J. Provenzano, and R. C. Maris. "Seasonal distribution of larvae of *Callinectes sapidus* (Crustacea: Decapoda) in the waters adjacent to Chesapeake Bay." *Journal of Crustacean Biology* 3, no. 4 (1983): 582-591.
- Meerhoff, E., O. Defeo, V. Combes, B. C. Franco, R. P. Matano, A. R. Piola, F. H. Vaca, and E. Celentano. "Assessment of larval connectivity in a sandy beach mole crab through a coupled bio-oceanographic model." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 246 (2020): 107035.
- Millot, C., and I. Taupier-Letage. "Circulation in the Mediterranean sea." *The Mediterranean Sea* (2005): 29-66.
- Moksnes, P. O., R. N. Lipcius, L. Pihl, and J. Van Montfrans. "Cannibal-prey dynamics in young juveniles and postlarvae of the blue crab." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 215, no. 2 (1997): 157-187.
- Nehring, S. "Invasion history and success of the American blue crab *Callinectes sapidus* in European and adjacent waters." *In the wrong place-alien marine crustaceans: distribution, biology and impacts*. Springer, Dordrecht, (2011). 607-624.
- Olmi, E. J. "Vertical migration of blue crab *Callinectes sapidus* megalopae: implications for transport in estuaries." *Marine Ecology Progress Series* 113 (1994): 39.
- Olson, R. R. "The consequences of short-distance larval dispersal in a sessile marine invertebrate." *Ecology* 66, no. 1 (1985): 30-39.
- Oms, P-E. "Multiscale transfers of continental inputs in the Bay of Biscay." Thèse de doctorat (2019).
- Ospina-Alvarez, A., C. Parada, and I. Palomera. "Vertical migration effects on the dispersion and recruitment of European anchovy larvae: from spawning to nursery areas." *Ecological Modelling* 231 (2012): 65-79.
- Ospina-Alvarez, A., I. A. Catalán, M. Bernal, D. Roos, and I. Palomera. "From egg production to recruits: Connectivity and inter-annual variability in the recruitment patterns of European anchovy in the northwestern Mediterranean." *Progress in Oceanography* 138 (2015): 431-447.
- Ospina-Alvarez, A., N. Weidberg, C. M. Aiken, and S. A. Navarrete. "Larval transport in the upwelling ecosystem of central Chile: The effects of vertical migration, developmental time and coastal topography on recruitment." *Progress in Oceanography* 168 (2018): 82-99.
- Paris, C. B., J. Helgers, E. Van Sebille, and A. Srinivasan. "Connectivity Modeling System: A probabilistic modeling tool for the multi-scale tracking of biotic and abiotic variability in the ocean." *Environmental Modelling & Software* 42 (2013): 47-54.
- Pascual, M., B. Rives, C. Schunter, and E. Macpherson. "Impact of life history traits on gene flow: A multispecies systematic review across oceanographic barriers in the Mediterranean Sea." *PLoS One* 12, no. 5 (2017).

- Patankar, N. A., and D. D. Joseph. "Modeling and numerical simulation of particulate flows by the Eulerian–Lagrangian approach." *International journal of multiphase flow* 27, no. 10 (2001): 1659-1684.
- Peliz, A., P. Marchesiello, J. Dubert, M. Marta-Almeida, C. Roy, and H. Queiroga. "A study of crab larvae dispersal on the Western Iberian Shelf: Physical processes." *Journal of Marine Systems* 68, no. 1-2 (2007): 215-236.
- Pitts, L. C., and G. T. Wallace. "Lead deposition in the shell of the bivalve, *Mya arenaria*: an indicator of dissolved lead in seawater." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 39, no. 1 (1994): 93-104.
- Robbins, C. T., C. C. Schwartz, and L. A. Felicetti. "Nutritional ecology of ursids: a review of newer methods and management implications." *Ursus* 15, no. 2 (2004): 161-171.
- Rosas, C., E. Lazaro-Chavez, and F. Bückle-Ramirez. "Feeding habits and food niche segregation of *Callinectes sapidus*, *C. rathbunae*, and *C. similis* in a subtropical coastal lagoon of the Gulf of Mexico." *Journal of Crustacean Biology* 14, no. 2 (1994): 371-382.
- Sandoz, M., and R. Rogers. "The effect of environmental factors on hatching, moulting, and survival of zoea larvae of the blue crab *Callinectes sapidus* Rathbun." *Ecology* 25, no. 2 (1944): 216-228.
- Schlag, Z. R., and E. W. North. "Lagrangian TRANSPORT (LTRANS) v.2 model User's Guide." Technical Report of the University of Maryland Center for Environmental Science Horn Point Laboratory. Cambridge, MD (2012).
- Segovia-Zavala, J. A., F. Delgadillo-Hinojosa, and S. Alvarez-Borrego. "Cadmium in the coastal upwelling area adjacent to the California–Mexico border." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 46, no. 4 (1998): 475-481.
- Severino-Rodrigues, E., J. Musiello-Fernandes, Á. AS. Mour, G. MP. Branco, and V. OC. Canéo. "Fecundity, reproductive seasonality and maturation size of *Callinectes sapidus* females (Decapoda: Portunidae) in the Southeast coast of Brazil." *Revista de Biologia Tropical* 61, no. 2 (2013): 595-602.
- Shima, J. S., and S. E. Swearer. "Evidence and population consequences of shared larval dispersal histories in a marine fish." *Ecology* 97, no. 1 (2016): 25-31.
- Slatkin, M. "Isolation by distance in equilibrium and non-equilibrium populations." *Evolution* 47, no. 1 (1993): 264-279.
- Sulkin, S. D., W. Van Heukelem, P. Kelly, and L. Van Heukelem. "The behavioral basis of larval recruitment in the crab *Callinectes sapidus* Rathbun: a laboratory investigation of ontogenetic changes in geotaxis and barokinesis." *The Biological Bulletin* 159, no. 2 (1980): 402-417.
- Sumer, C., I. Teksam, H. Karatas, T. Beyhan, and C. M. Aydin. "Growth and reproduction biology of the blue crab, *Callinectes sapidus* Rathbun, 1896, in the Beymelek Lagoon (Southwestern Coast of Turkey)." *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 13, no. 4 (2013).
- Swearer, S. E., E. A. Trembl, and J. S. Shima. *A review of biophysical models of marine larval dispersal*. CRC Press, (2019).



- Swearer, S. E., J. E. Caselle, D. W. Lea, and R. R. Warner. "Larval retention and recruitment in an island population of a coral-reef fish." *Nature* 402, no. 6763 (1999): 799-802.
- Thorrold, S. R., and S. Shuttleworth. "In situ analysis of trace elements and isotope ratios in fish otoliths using laser ablation sector field inductively coupled plasma mass spectrometry." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57, no. 6 (2000): 1232-1242.
- Thorrold, S. R., C. M. Jones, and S. E. Campana. "Response of otolith microchemistry to environmental variations experienced by larval and juvenile Atlantic croaker (*Micropogonias undulatus*)." *Limnology and Oceanography* 42, no. 1 (1997): 102-111.
- Thorrold, S. R., C. M. Jones, S. E. Campana, J. W. McLaren, and J. W. H. Lam. "Trace element signatures in otoliths record natal river of juvenile American shad (*Alosa sapidissima*)." *Limnology and Oceanography* 43, no. 8 (1998): 1826-1835.
- Treml, E. A., J. R. Ford, K. P. Black, and S. E. Swearer. "Identifying the key biophysical drivers, connectivity outcomes, and metapopulation consequences of larval dispersal in the sea." *Movement ecology* 3, no. 1 (2015): 1-16.
- Veyssiere D., Garrido M., Massé C., Noël P., Romans P. "Etat des connaissances sur le Crabe bleu, *Callinectes sapidus* (Rathbun, 1896). Focus sur la Méditerranée et la Corse." Rapport Office de l'Environnement de la Corse (2022) 49 p.
- Webster, M. S., P. P. Marra, S. M. Haig, S. Bensch, and R. T. Holmes. "Links between worlds: unraveling migratory connectivity." *Trends in ecology & evolution* 17, no. 2 (2002): 76-83.
- White, J. W., S. G. Morgan, and J. L. Fisher. "Planktonic larval mortality rates are lower than widely expected." *Ecology* 95, no. 12 (2014): 3344-3353.
- Young, C. M. "Behavior and locomotion during the dispersal phase of larval life." *Ecology of marine invertebrate larvae* (2020): 249-277.

## Résumé :

Originnaire des côtes Atlantiques nord-ouest, le crabe bleu (*Callinectes sapidus*) est aujourd'hui une espèce considérée comme invasive en Méditerranée, probablement introduit avec des eaux de ballast. Bien que sa biologie soit depuis longtemps étudiée dans son aire de répartition d'origine, elle reste peu connue dans ce nouvel environnement où l'on trouve peu de grands estuaires, mais beaucoup de lagunes. Cette étude est la première visant à caractériser la dispersion larvaire du crabe bleu dans cette nouvelle zone géographique, sur une période de 10 ans (2010-2019) grâce à la modélisation. Pour cela un outil lagrangien, Ichthyop, couplant des données physiques et biologiques de l'espèce issues d'études passées et en cours en méditerranée, est utilisé. L'étude met en évidence la variabilité annuelle de cette dispersion larvaire, mais aussi une variabilité saisonnière lors des deux périodes de pontes par an (le printemps et l'automne) avec une plus forte connectivité entre les lagunes en automne, quand les courants sont plus forts. Une attention particulière est portée sur l'impact de la migration verticale lors de cette dispersion, en comparant des scénarios avec et sans cette dernière. Cette approche par modélisation permet d'avoir une première vision de la dispersion du crabe bleu en Méditerranée nord-occidentale, et entre ses bassins est et ouest, en élargissant l'emprise du modèle hydrodynamique utilisé. L'objectif prochain est d'agrandir la zone d'étude à toute la méditerranée, comme cela a été fait pour les années 2014 et 2016 dans la présente étude, et d'affiner le paramétrage du modèle avec des données biologiques plus poussées.

Mots-clés : dispersion larvaire, *Callinectes sapidus*, Méditerranée, modélisation, lagrangien, Ichthyop.

## Abstract:

Native to the northwest Atlantic coasts, the blue crab (*Callinectes sapidus*) is now considered like an invasive species in the Mediterranean, probably introduced with ballast water. Although its biology has been studied for a long time in its original geographical area, little is known about it in his new environment, where there are few large estuaries, but many lagoons. This study is the first to model the blue crab's larval dispersion in the Mediterranean, over a period of 10 years (2010-2019). For this purpose, a Lagrangian tool, Ichthyop, coupling physical data and biological data from past and current studies is used. The study highlights larval dispersion annual variability, but also a seasonal variability during the two spawning periods per year (spring and autumn) with a stronger connectivity between lagoons in autumn, when the currents are stronger. Particular attention is paid to the impact of vertical migration during this dispersion, by comparing scenarios with and without this parameter. This modeling approach provides a first vision of the blue crab in the northwestern Mediterranean, and between its eastern and western basins, by widening the influence of the hydrodynamic model used. The next objective is to extend the study area to the whole Mediterranean, as was done for the years 2014 and 2016 in the present study, and to refine the model parameterization with more advanced biological data.

Keywords : larval dispersion, *Callinectes sapidus*, Mediterranean, modeling, Lagrangian, Ichthyop