

Etude du rôle des parcs éoliens offshore sur la connectivité et l'effet récif en Manche : approche par traits d'histoire de vie et modélisation



Présenté par **Kévin Boutin** pour obtenir le grade de Docteur de l'Université du Littoral Côte d'Opale.

Direction de la thèse :

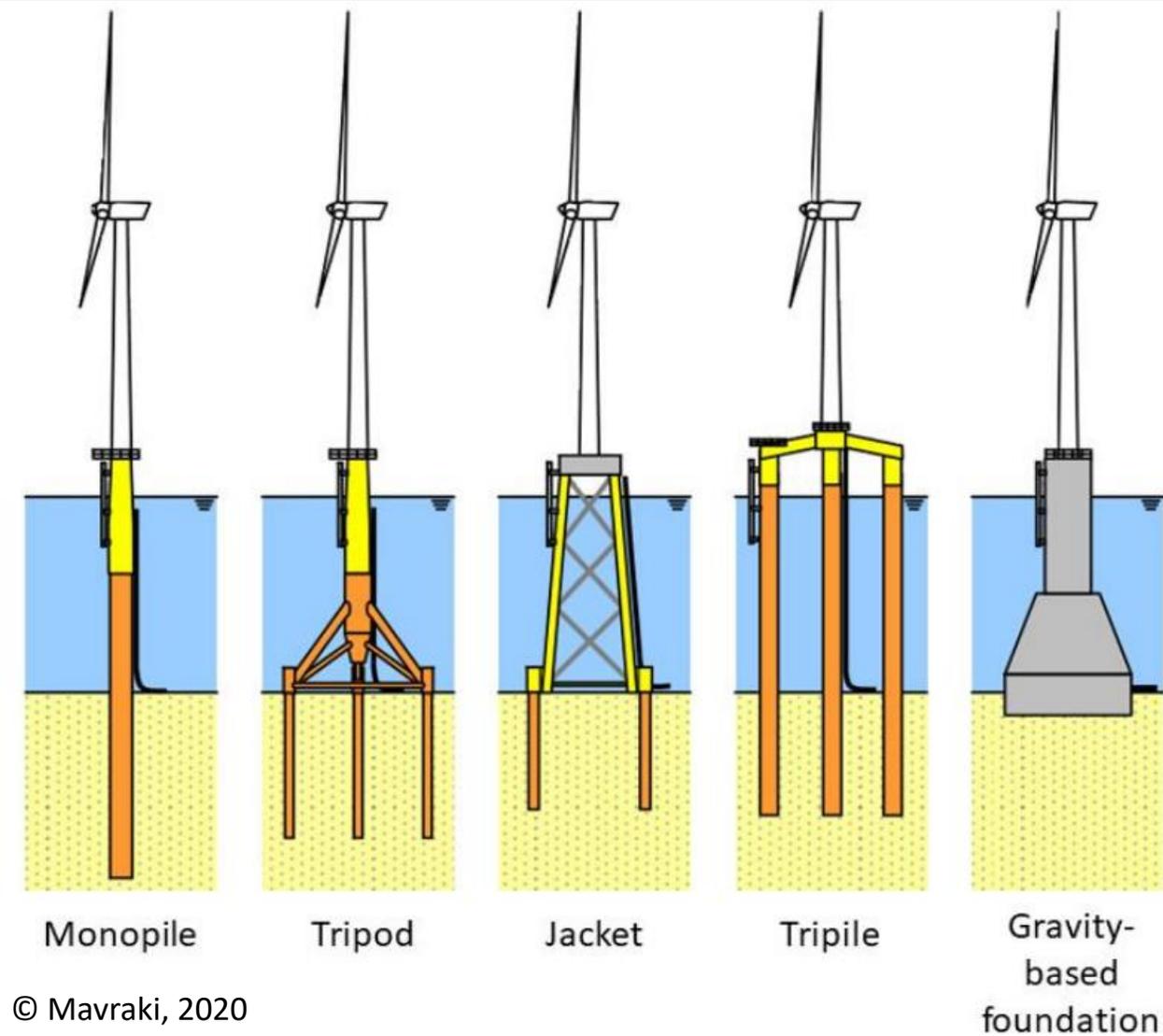
M^{me} Ben Rais Lasram Frida, Professeure, ULCO,
M^{me} Gaudron M. Sylvie, MCF HDR, Sorbonne Université,

Directrice de thèse
Co-directrice de thèse



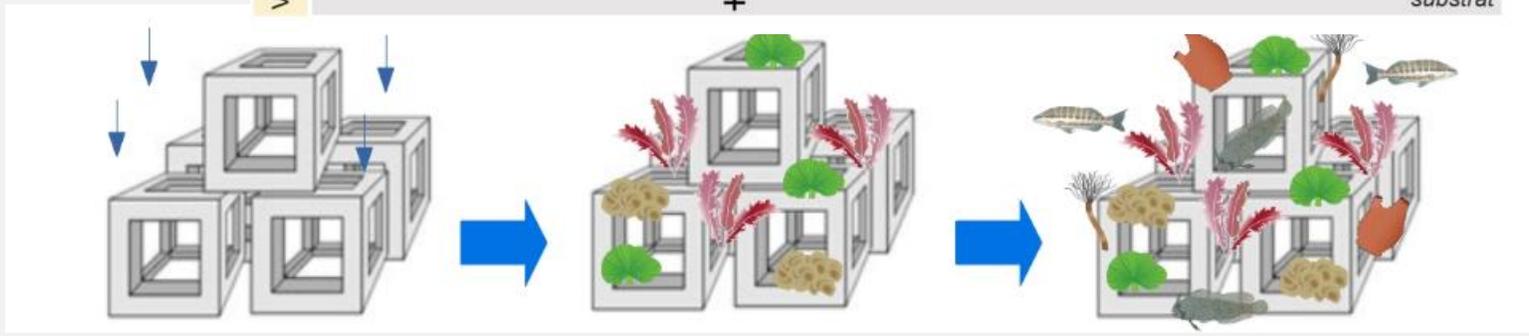
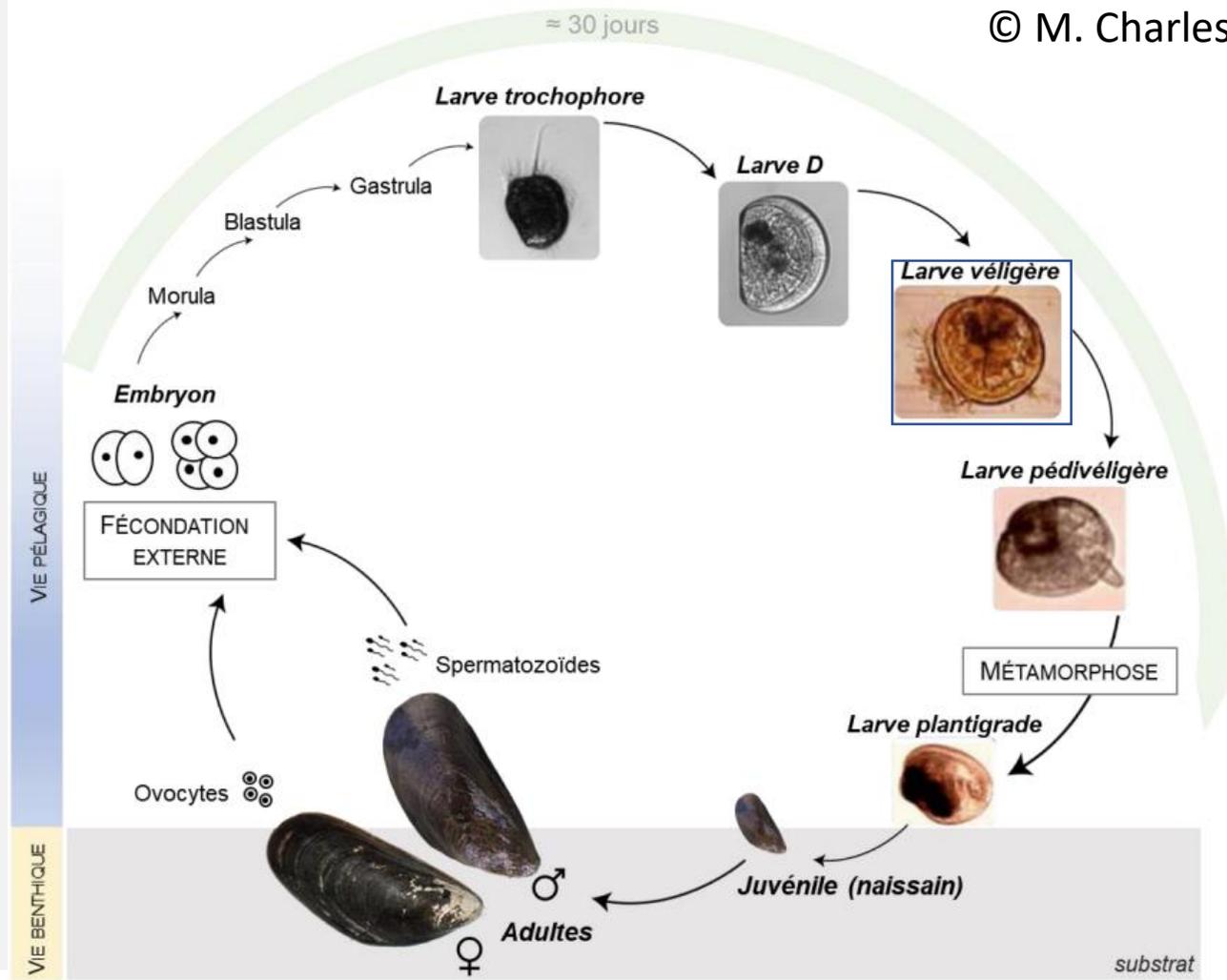
Introduction

- Développement de l'éolien offshore
- **Changement climatique**, demande croissante en **énergie**
- Développement des **énergies renouvelables** dont l'éolien offshore.
 - Objectif : **42,5% d'énergie renouvelable** dans le mix énergétique en **2030**.



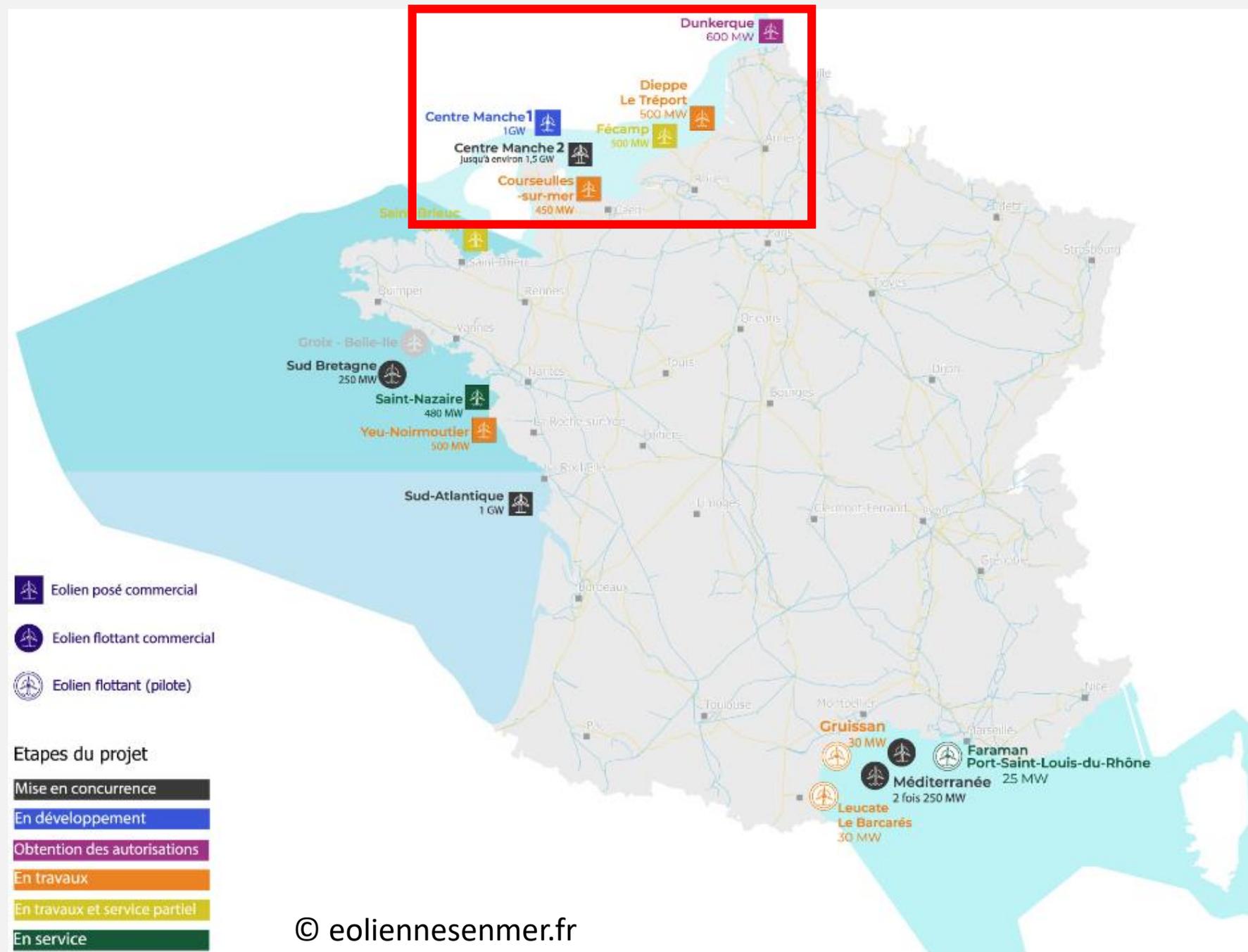
Introduction

- Substrats artificiels (épaves, récifs)
- Les « invertébrés benthiques »
 - Cycle de vie benthopélagique
- Durée de vie larvaire



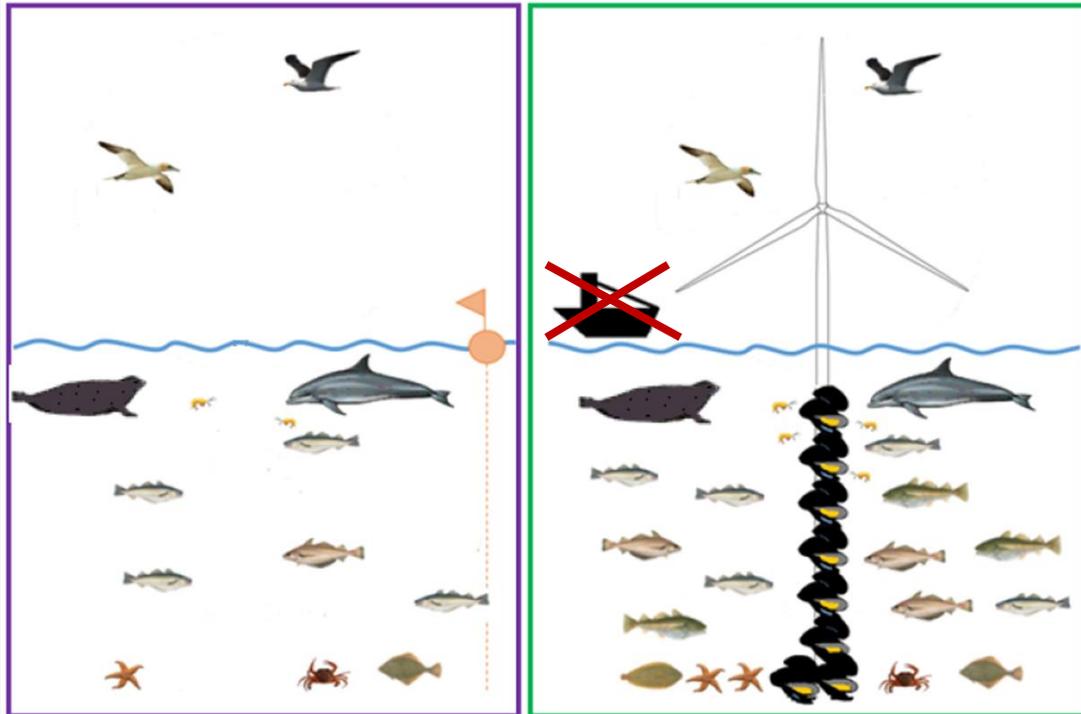
Introduction

- En 2024, **16 parcs éoliens offshore** sont prévus en France.
- **5 parcs éoliens offshore** prévus en **Manche-Est**. 1 actuellement **en service à Fécamp**.



Introduction

- Dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons à deux effets connus :
- **L'effet récif : colonisation de la partie immergée des mâts d'éoliennes par les organismes benthiques.**
- Entre **55 et 121 taxons** identifiés dans la littérature (Kerckhof et al., 2010, 2012 ; Karlsson et al., 2021 ; Vanagt et al., 2013 ; Leonhard & Pedersen, 2004 ; Bouma & Lengkeek, 2013)



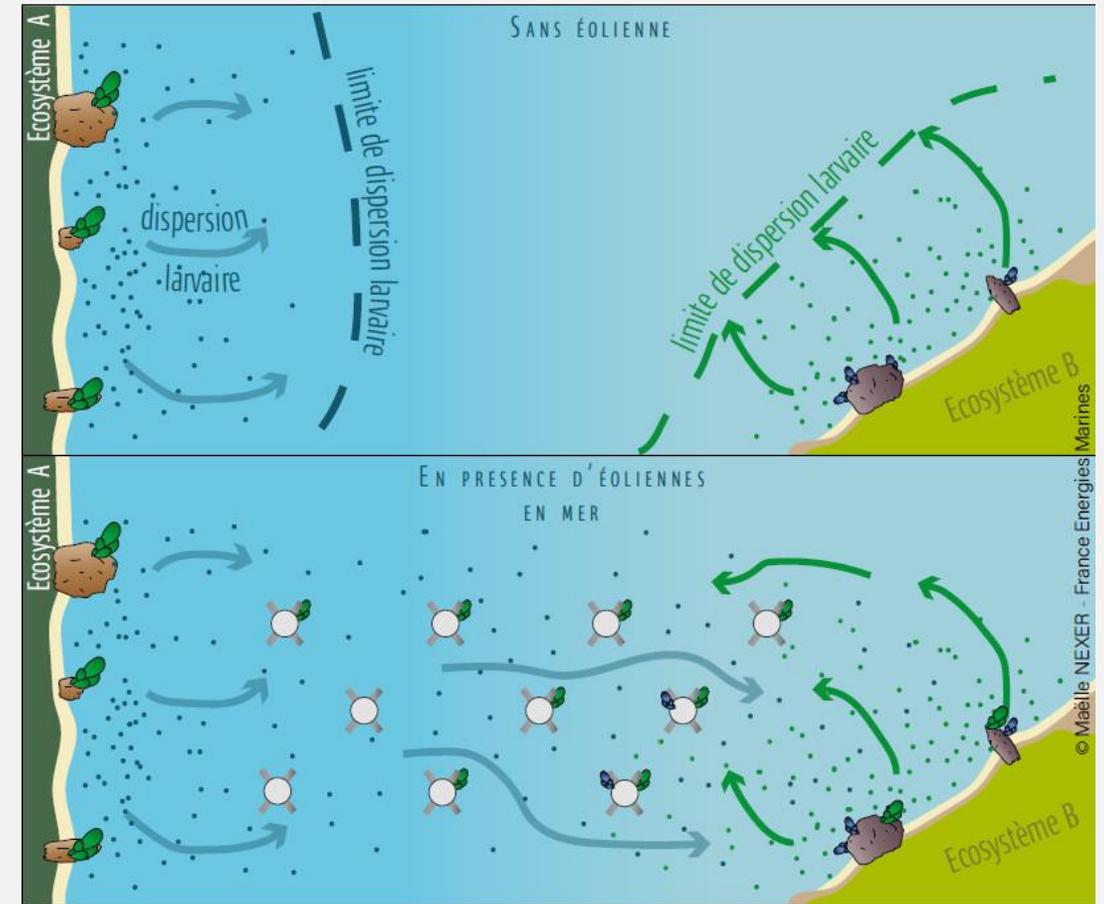
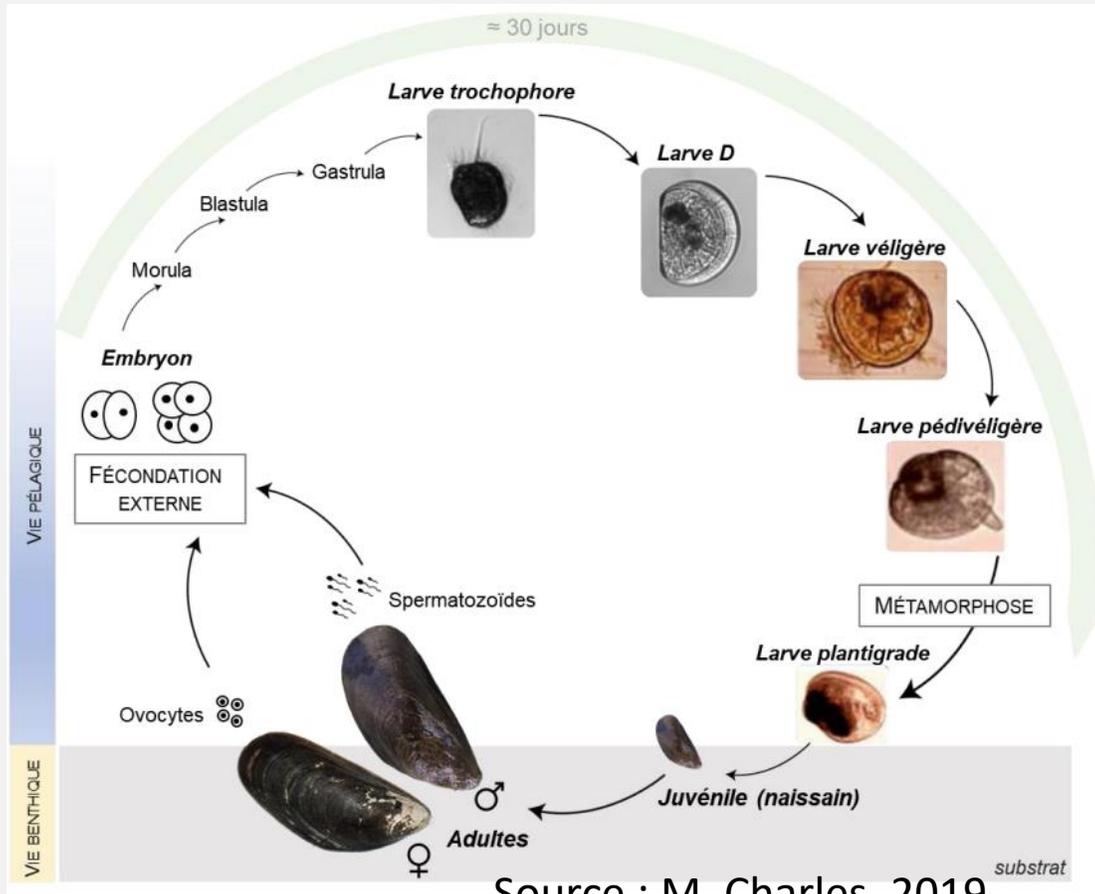
Source : A. Raoux, N. Niquil (2017)



Source : Degraer et al., 2020

Introduction

- Dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons à deux impacts connus :
- **L'effet relais qui correspond à la facilitation de la dispersion des organismes benthiques par l'apparition d'un nouveau substrat disponible pour la colonisation.**



Questions scientifiques

Effet récif



Quels sont les potentiels colonisateurs ?



Quels sont leurs traits fonctionnels ?

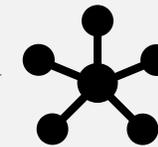
Effet relais



D'où viennent-ils ?



Où vont-ils se disperser ?



Quel rôle vont jouer les parcs dans la dynamique de dispersion ?

Questions scientifiques

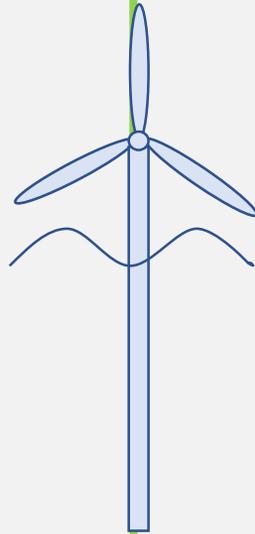
Effet récif



Quels sont les potentiels colonisateurs ?



Quels sont leurs traits fonctionnels ?



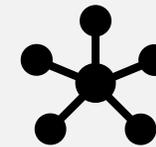
D'où viennent-ils ?



Où vont-ils se disperser ?



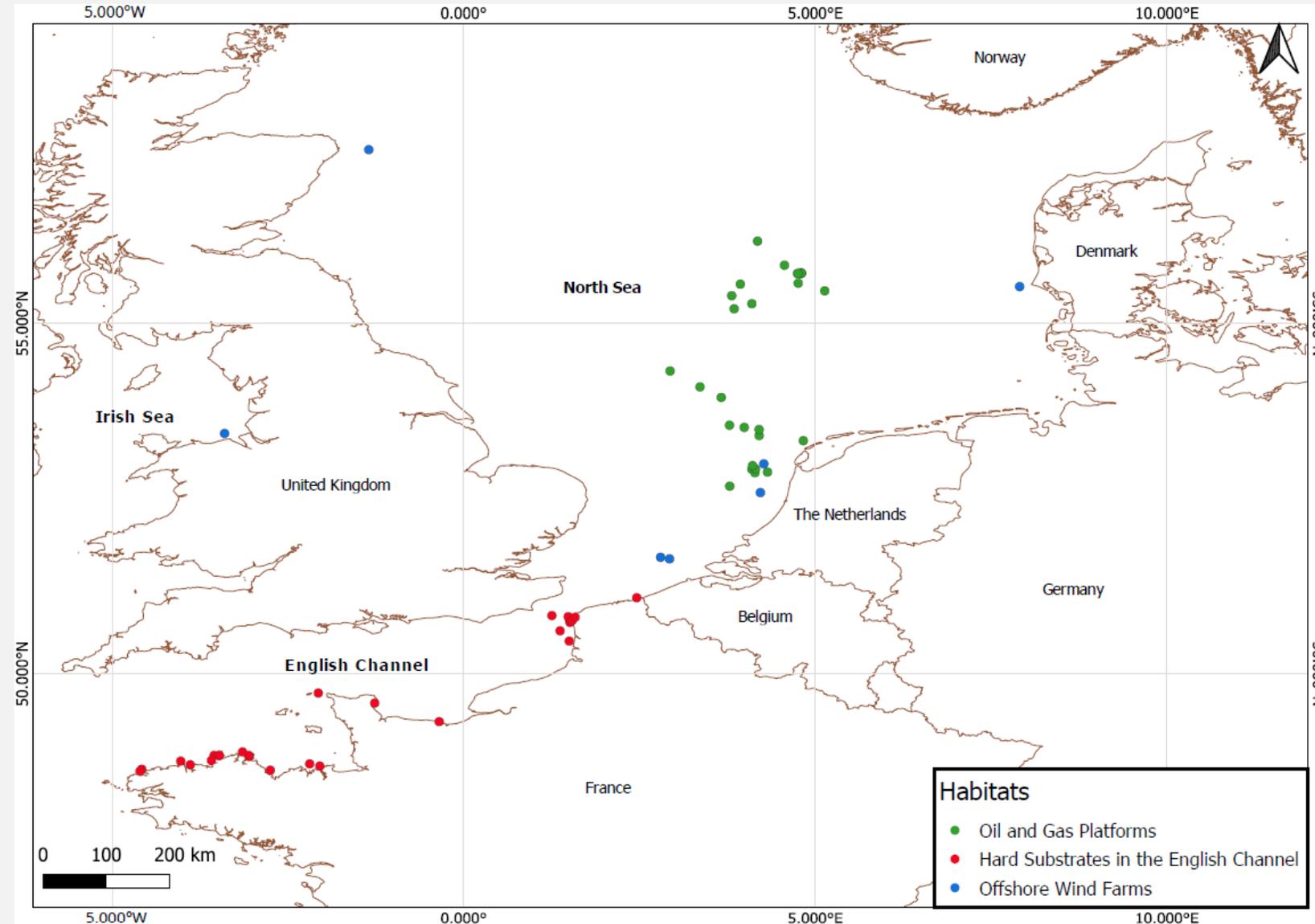
Quel rôle vont jouer les parcs dans la dynamique de dispersion ?



1. Potentiels colonisateurs

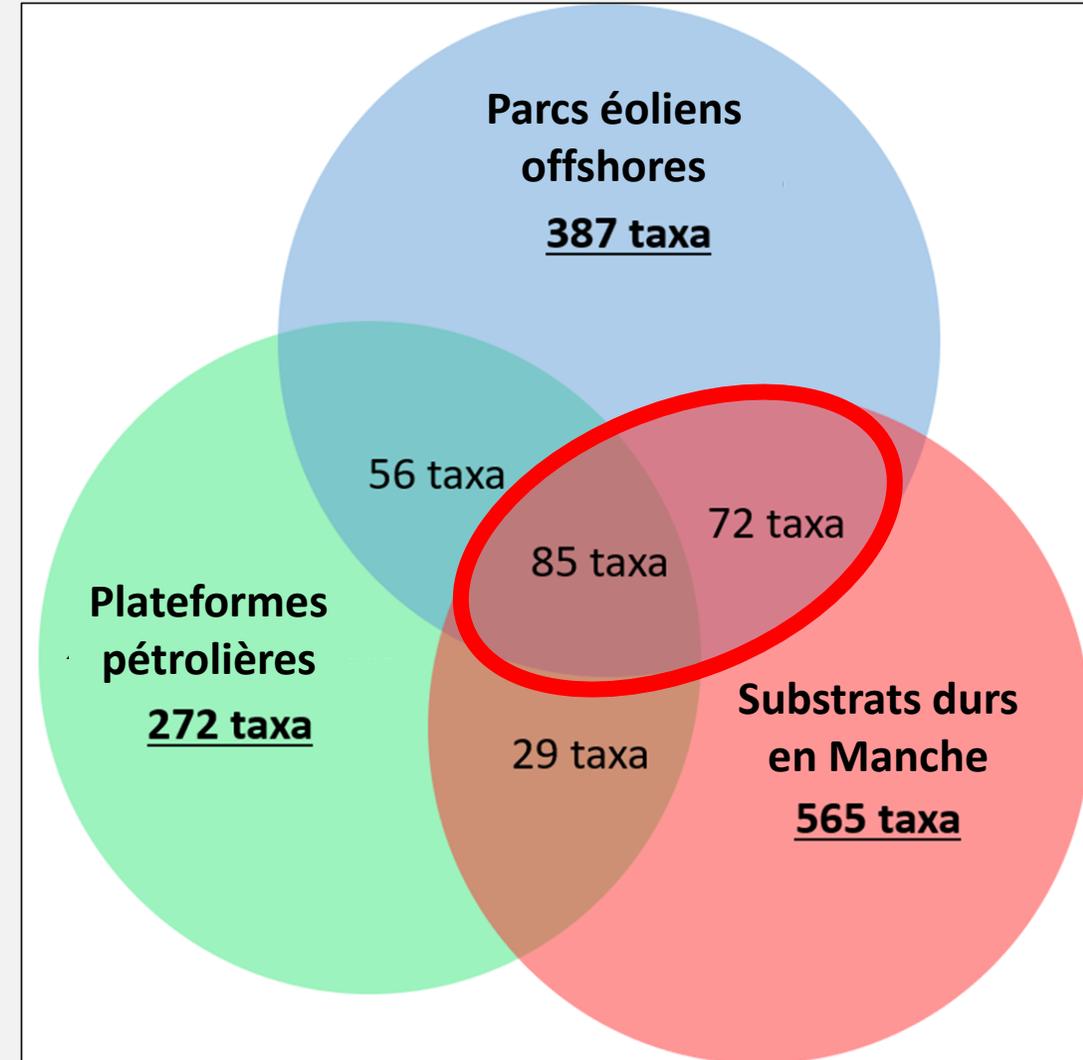
Hypothèse : les colonisateurs de substrats durs sont attendus sur les futurs parcs offshore en Manche.

- Recenser les **listes d'espèces colonisatrices** disponibles dans la littérature.
 - Plateformes pétrolières
 - Parcs éoliens offshore
 - **Substrats durs en Manche**
- Matrice présence / absence



1. Potentiels colonisateurs

	Eoliennes offshore	Substrats durs en Manche	Plateformes pétrolières
Publications	14	8	5
Points d'échantillonnages	7	>25	27
Nombre de taxons	387	565	272
Nombre de phylums	12	14	11
Principaux phylums	Arthropodes, Annélides, Mollusques	Arthropodes, Annélides, Cnidaires	Arthropodes, Annélides, Cnidaires



- Liste de 157 potentiels colonisateurs

1. Potentiels colonisateurs

- Extraction des **espèces principales** dans la matrice pres. / abs.

- Espèces identifiées au moins 2 fois dans la littérature

- Sélection des **traits fonctionnels** et des **catégories**.

Caractéristiques morphologiques, physiologiques, phénologiques ou comportementales qui ont un effet sur la fitness des organismes. Ils sont des indicateurs du fonctionnement des écosystèmes.

- **7 traits, 27 catégories**

- Recherche des traits fonctionnels des espèces.
 - Littérature, BIOTIC, Add my pet, Encyclopedia of Life, Polytraits

Functional Traits	Categories	Modalities
Maximum body size		
	S1	Small (< 10 mm)
	S2	Small medium (10 - 50 mm)
	S3	Medium (50 - 100 mm)
	S4	Medium - large (100 - 300 mm)
	S5	Large (> 300 mm)
Reproduction		
	R1	Asexual (Budding, fission ...)
	R2	Gonochoric
	R3	Hermaphrodite
Larval development		
	L1	Pelagic
	L2	Benthic
	L3	Direct (No larval stage)
Larval feeding		
	LD1	Planktotrophic
	LD2	Lecitotrophic
	LD3	Direct (No larval stage)
Life span		
	A1	Short (< 2 years)
	A2	Short - medium (2 - 5 years)
	A3	Medium - long (5 - 20 years)
	A4	Long (> 20 years)
Mobility		
	MO1	Sessile
	MO2	Burrower
	MO3	Crawler
	MO4	Swimmer
Feeding habit		
	FH1	Deposit feeder
	FH2	Suspensivore
	FH3	Herbivore
	FH4	Opportunist / Scavenger
	FH5	Carnivore

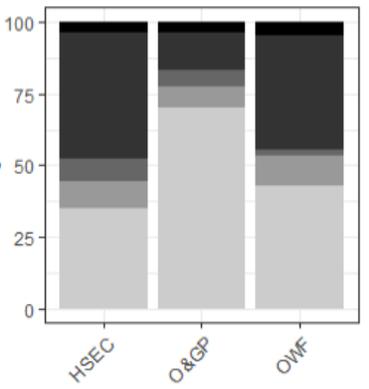
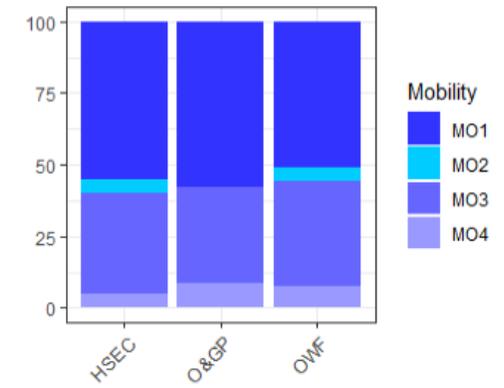
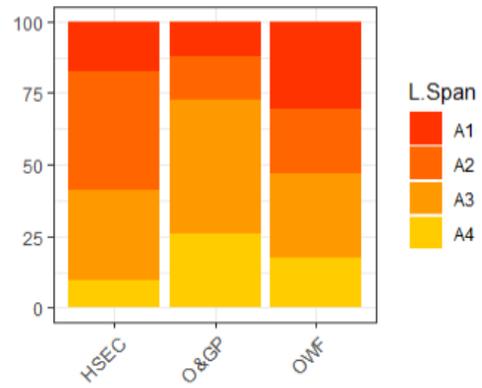
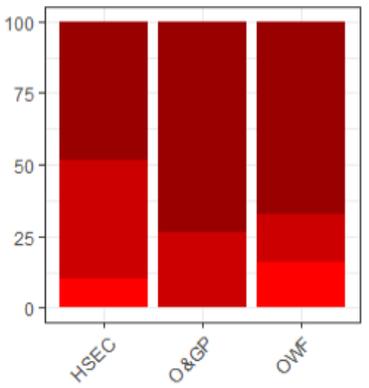
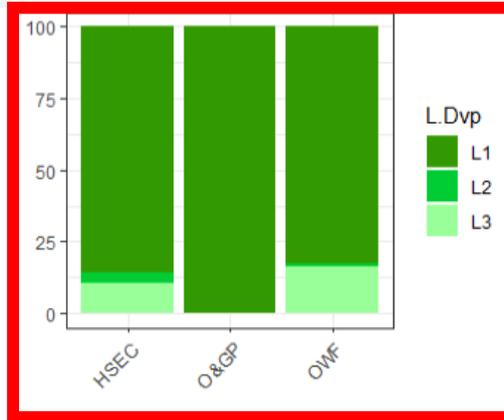
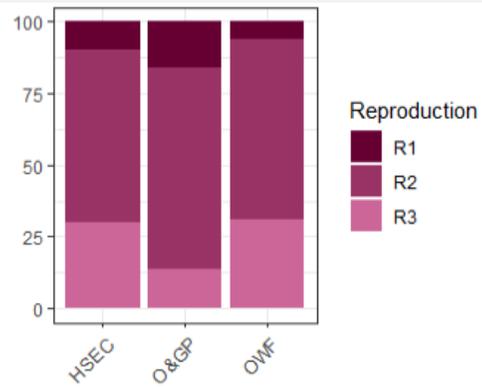
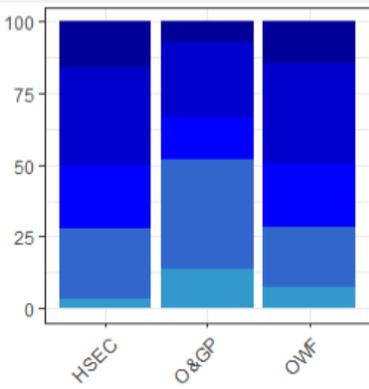
1. Potentiels colonisateurs

- Création de la **matrice de traits fonctionnels** selon la méthode **Fuzzy code** (Chevenet et al., 1994)
 - A l'échelle de l'espèce
 - L'**affinité** espèce -> catégorie : 0, 1, 2 ou 3
- Identifier les catégories les plus représentées
- Comparaison des **polygones fonctionnels** par habitats
 - **Analyse factorielle multiple** (Escofier & Pagès, 1994)



Trait	Catégories	<i>Mytilus edulis</i>	<i>Jassa herdmani</i>
Développement larvaire	Pélagique	3	0
	Benthique	0	0
	Directe	0	3

1. Potentiels colonisateurs



Habitats:
 HSEC = Substrats durs en Manche
 O&GP = Plateformes pétrolières
 OWF = Eoliennes offshore

Substrats durs en Manche	Plateformes pétrolières	Eoliennes offshore
10 – 50 mm (34%) 100 – 300 mm (25%)	100 – 300 mm (38%) 10 – 50 mm (26%)	10 – 50 mm (35%) 50-100 mm (22%)
Gonochorique (60%)	Gonochorique (70%)	Gonochorique (63%)
Pelagique (86%)	Pelagique (100%)	Pelagique (83%)
Planctotrophique (48%) Lecithotrophique (41%)	Planctotrophique (73%)	Planctotrophique (67%)
2-5 ans (41%) 5-20 ans (31%)	5-20 ans (46%) >20 ans (26%)	<2 ans (31%) 5-20 ans (30%)
Sessile (55%)	Sessile (58%)	Sessile (51%)
Suspensivore (44%) Carnivore (35%)	Carnivore (70%)	Carnivore (43%) Suspensivore (40%)

1. Potentiels colonisateurs

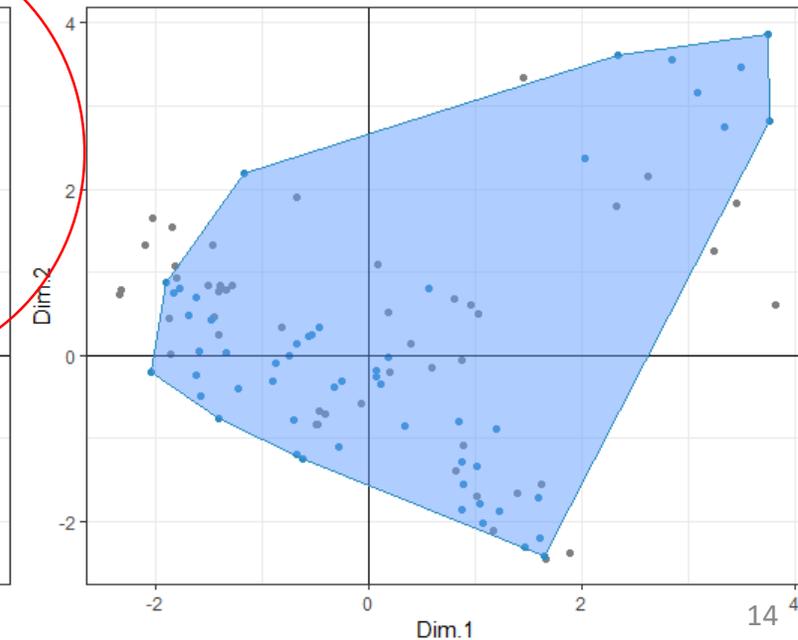
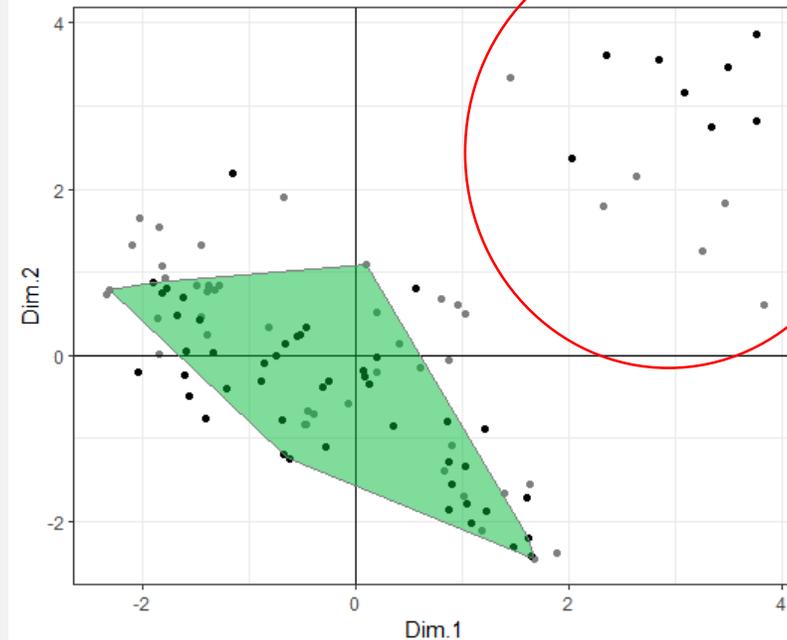
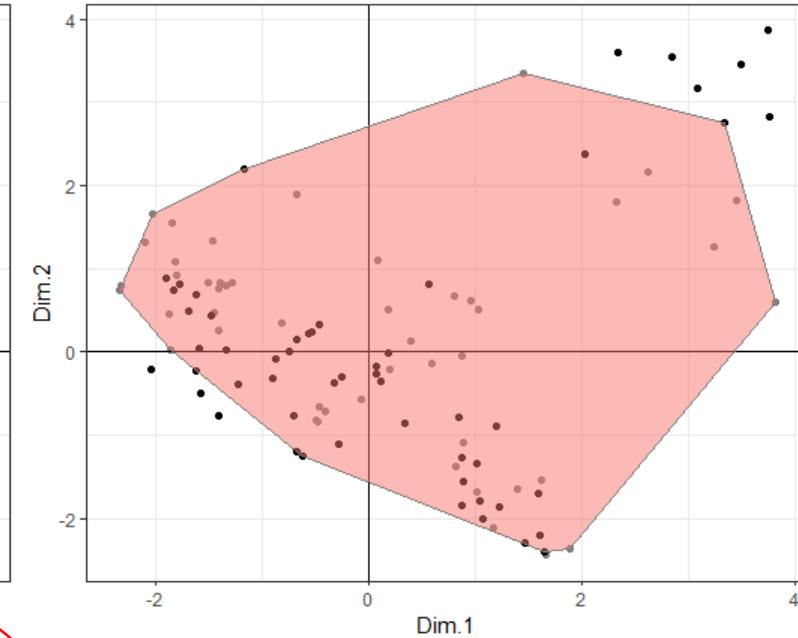
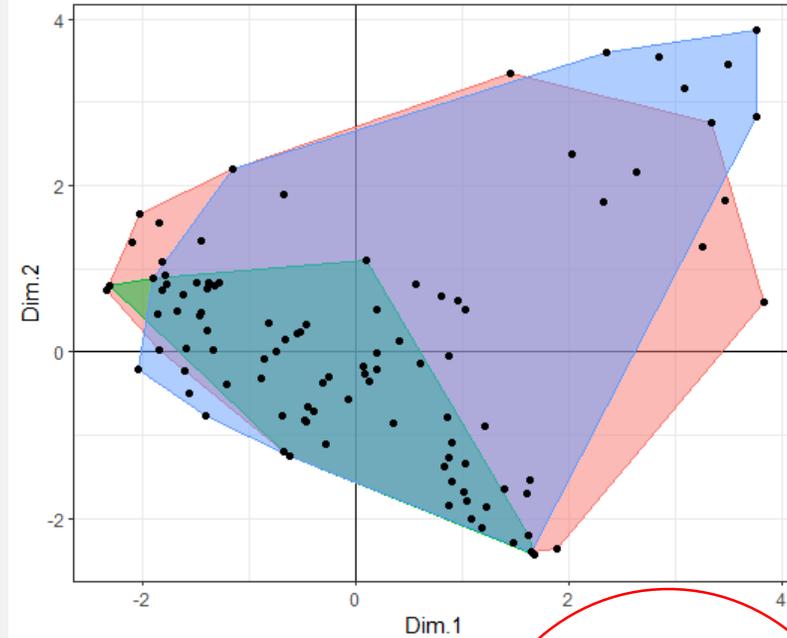
Habitats :

Plateformes pétrolières

Parcs éoliens offshore

Substrats durs en Manche

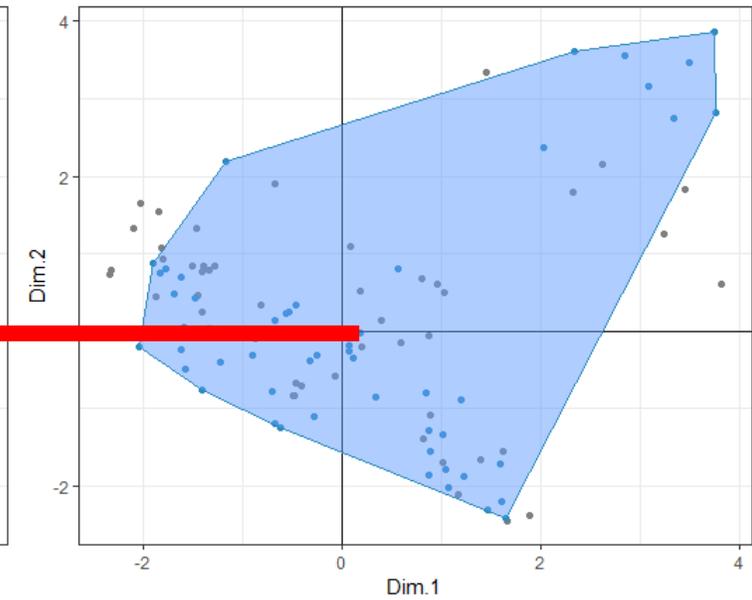
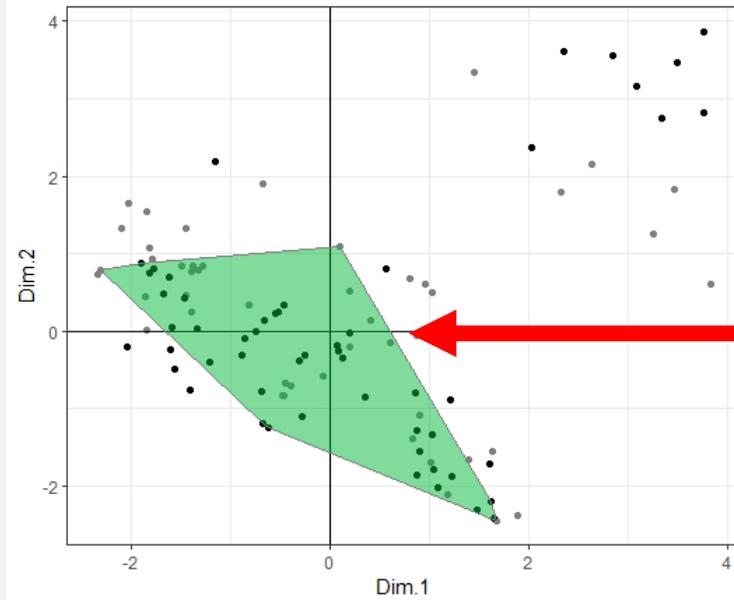
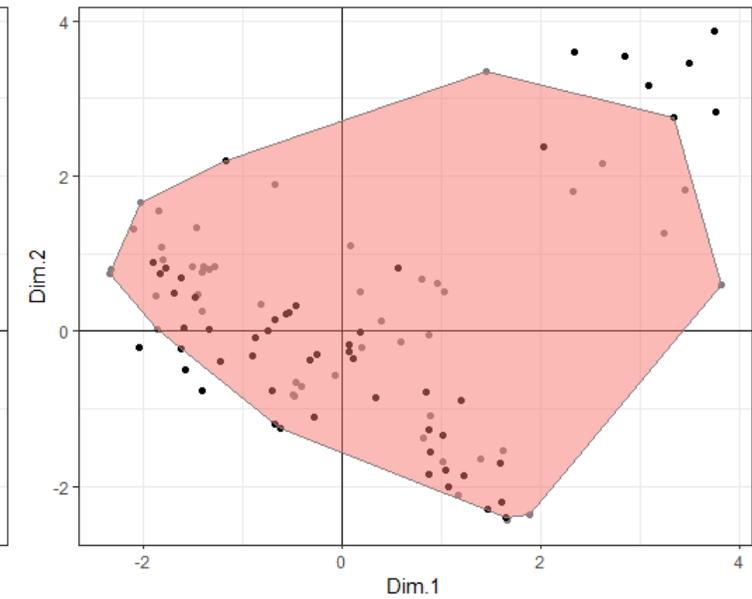
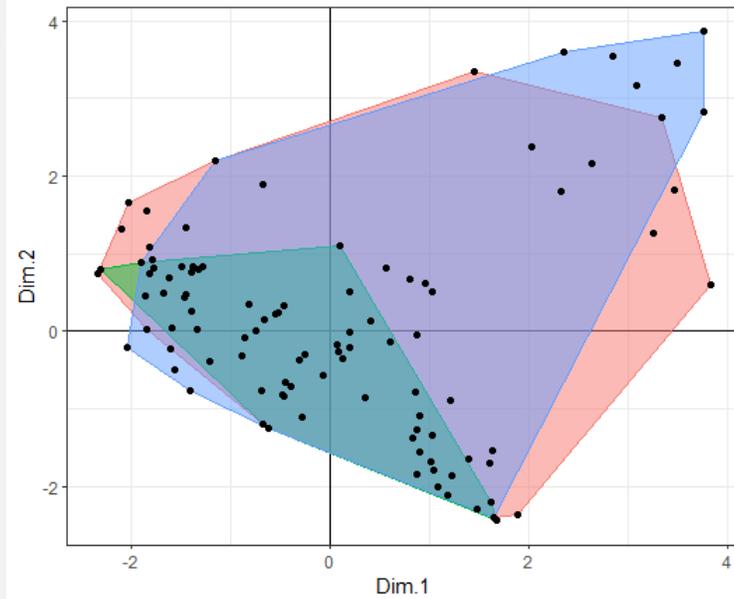
- **Recouvrement important** entre les substrats durs en manche et les éoliennes
- Pourquoi le polygone fonctionnel des plateformes pétrolières diffère des deux autres ?



1. Potentiels colonisateurs

- La mobilité (MO1 et MO3)
- Le développement larvaire (LD1, LD3, L1 et L3)
- LD3 et L3 sont absentes du profil fonctionnel des colonisateurs de plateforme pétrolière et gazière

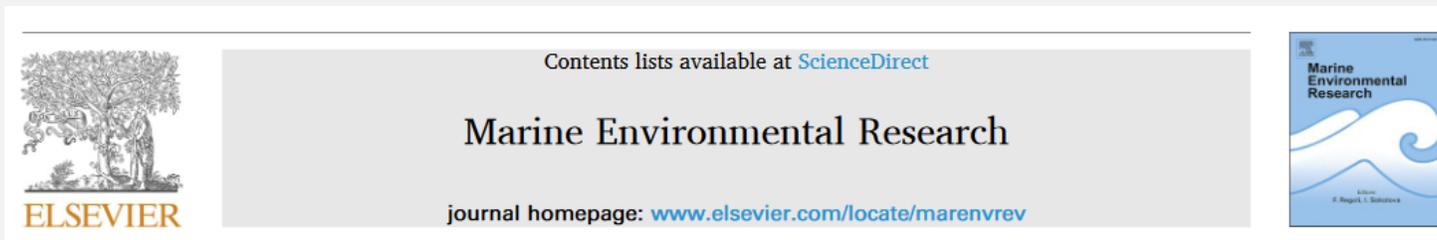
Quantitative variables - MFA



Dim1 (14.8%)

Take home message

- **157 taxa** identifiés comme **potentiels colonisateurs** des futurs parcs éoliens offshore
- **Profil fonctionnel des colonisateurs d'éoliennes**
 - espèces mesurant entre 10 et 100 mm, avec une reproduction gonochorique, des larves pélagiques et planctotrophes, une durée de vie inférieure à 2 ans ou de 5 à 20 ans, sessiles et carnivores ou filtreurs.
- **Polygones fonctionnels** des colonisateurs **d'éoliennes similaires** à celui des **substrats durs en Manche**



The image shows the cover of the journal 'Marine Environmental Research'. On the left is the Elsevier logo featuring a tree and a figure. In the center, it says 'Contents lists available at ScienceDirect' and 'Marine Environmental Research' with the journal homepage 'www.elsevier.com/locate/marenvrev'. On the right is a blue cover with a white wave graphic and the text 'Marine Environmental Research' and 'Editor: F. Regal, I. Sotirova'.

Potential marine benthic colonisers of offshore wind farms in the English channel: A functional trait-based approach

Kevin Boutin^{a,*}, Sylvie Marylene Gaudron^{a,b}, Jérémy Denis^a, Frida Ben Rais Lasram^a

^a Univ. Littoral Côte d'Opale, Univ. Lille, CNRS, IRD, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 62930, Wimereux, France
^b Sorbonne Univ., UFR 927, 75005, Paris, France

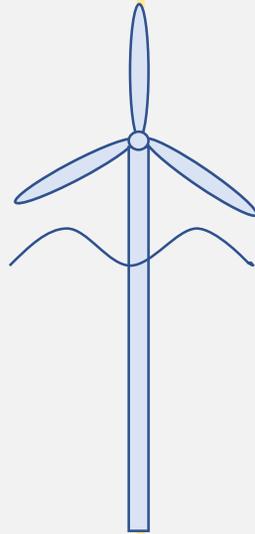
Questions scientifiques



Quels sont les potentiels colonisateurs ?



Quels sont leurs traits fonctionnels ?



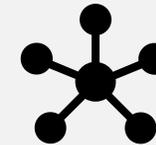
Effet relais



D'où viennent-ils ?



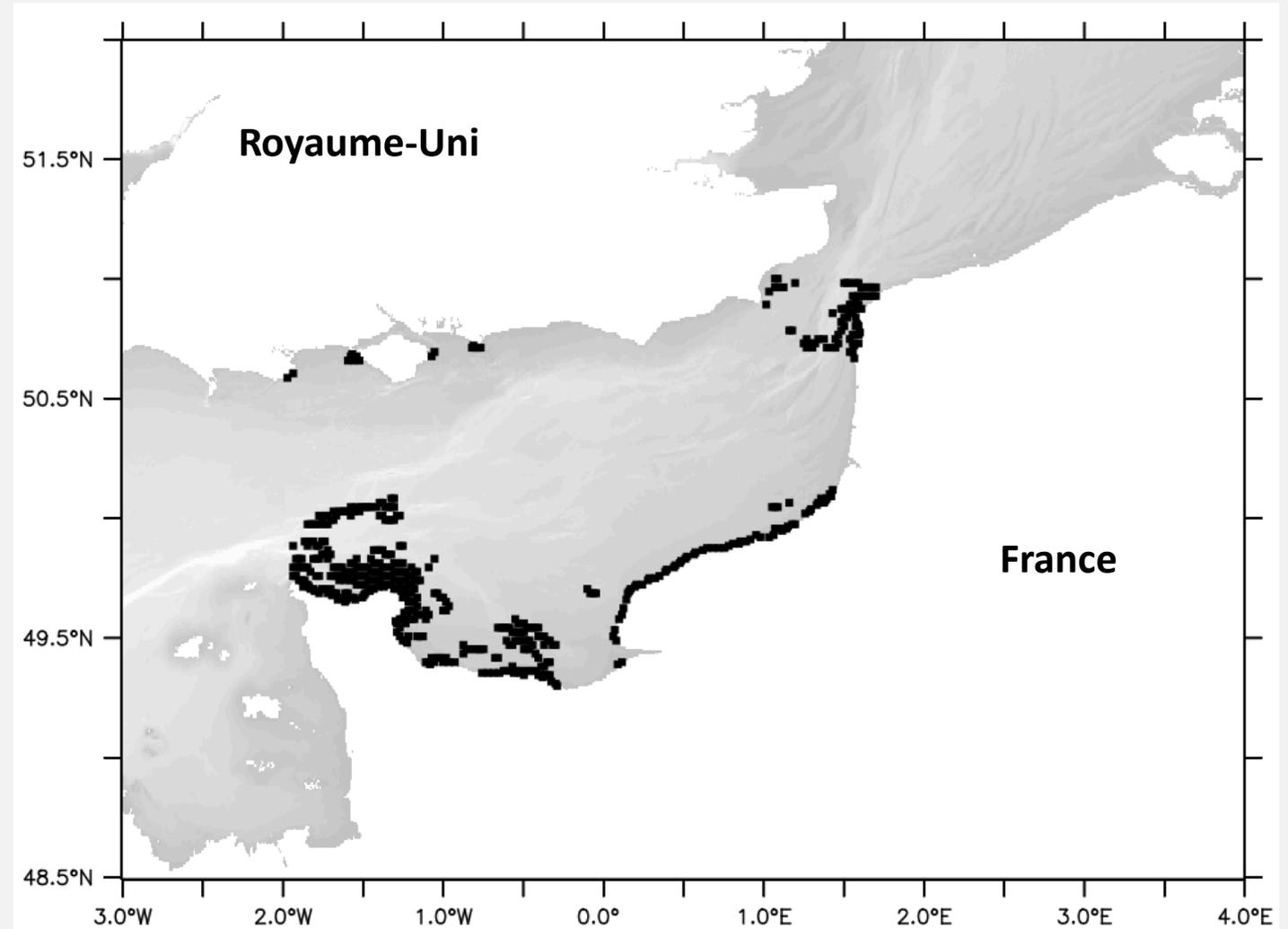
Où vont-ils se disperser ?



Quel rôle vont jouer les parcs dans la dynamique de dispersion ?

2. Dispersion larvaire à l'état initial

- Dispersion larvaire avant l'implantation des parcs offshore



2. Dispersion larvaire à l'état initial

- Dispersion larvaire de 5 espèces d'intérêt :
 - En suivant le profil fonctionnel établi dans la partie précédente



Asterias rubens

- Abondante
- Carnivore
- Larves pélagiques



Mytilus edulis

- Abondante
- Ingénieure positive
- Sessile
- Filtreur
- Larves pélagiques



Lanice conchilega

- Ingénieure positive
- Patrimoniale
- Sessile
- Filtreur
- Larves pélagiques



Magallana gigas

- Espèce introduite
- Ingénieure positive
- Sessile
- Filtreur
- Larves pélagiques



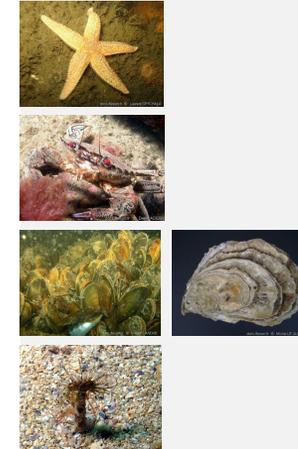
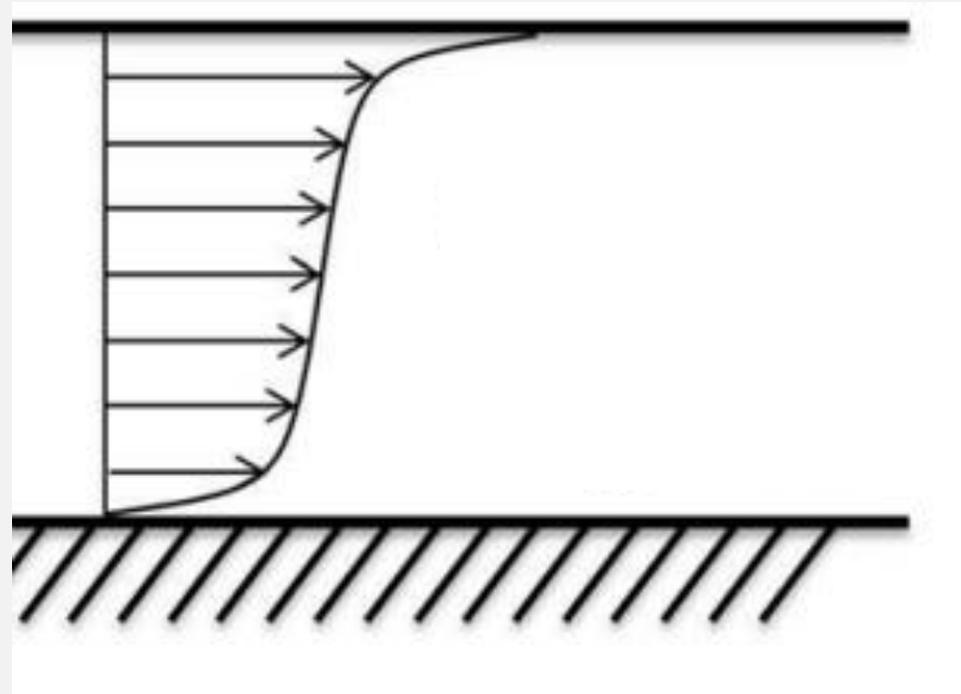
Necora puber

- Abondante
- Carnivore
- Larves pélagiques

2. Dispersion larvaire à l'état initial

- Obtention des **traits d'histoire de vie** de chacune des espèces dans la **littérature**

- **Période de ponte**
- **Durée de vie larvaire (PLD)**
 - Durée maximum
- **Position verticale**
 - Gravité spécifique

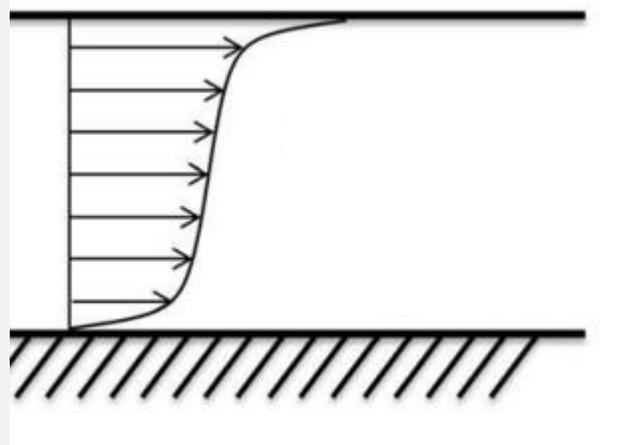


	<i>Asterias rubens</i>	<i>Necora puber</i>	<i>Mytilus edulis</i>	<i>Magallana gigas</i>	<i>Lanice conchilega</i>
Période de ponte	Avril à Juillet	Avril à Juin	Avril à Juin	Juin à Juillet	Avril à Juillet
Durée de vie larvaire	90 jours	50 jours	60 jours	30 jours	52 jours
Gravité spécifique	1025,75 kg/m ³	1026 kg/m ³	1026,25 kg/m ³	1026,25 kg/m ³	1026,5 kg/m ³

2. Dispersion larvaire à l'état initial

- Obtention des **traits d'histoire de vie** de chacune des espèces dans la **Littérature**

- **Période de ponte**
- **Durée de vie larvaire**
- **Position verticale**



- Les **paramètres abiotiques** sont extraits des sorties du modèle hydrodynamique **MARS-3D** (rés. 2,5km) de **2013**

à 2022 (PREVIMER)



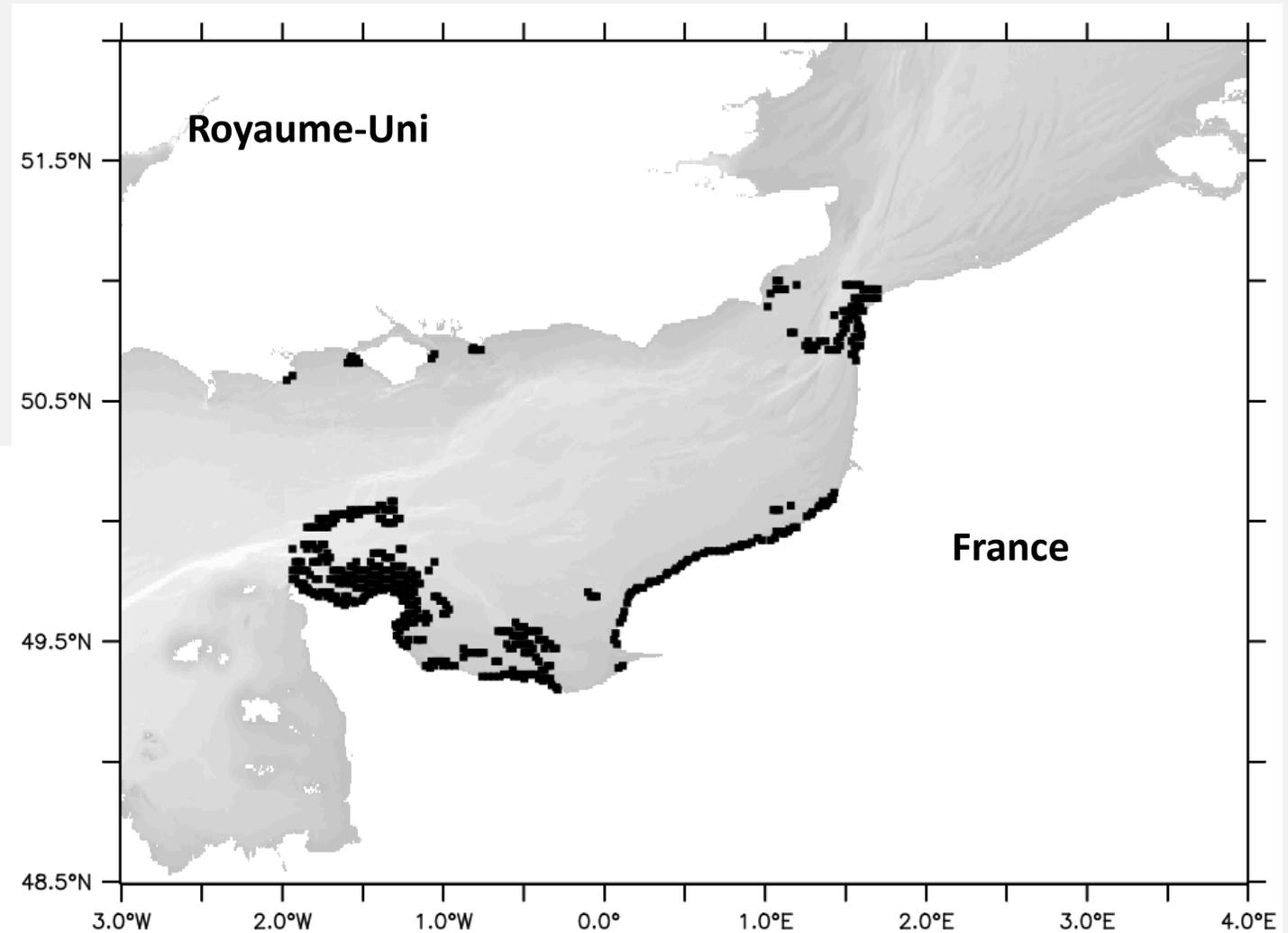
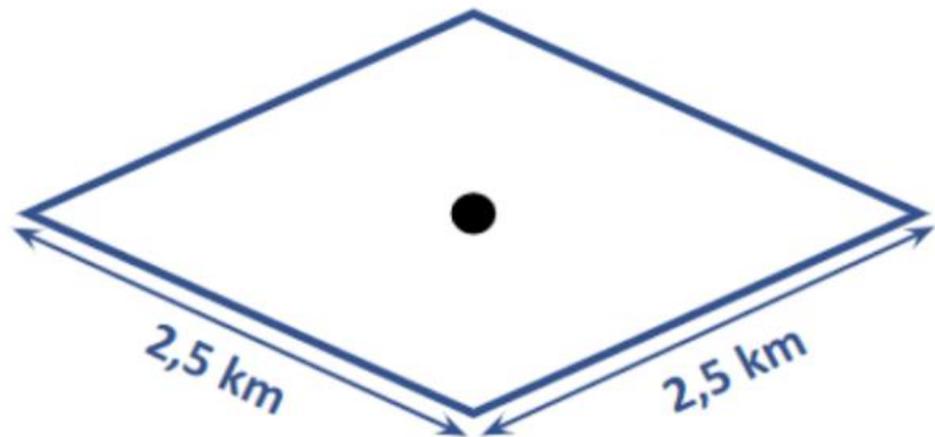
- **séries temporelles de courants 3D**
- **température et salinité**

- **Ichthyop (IRD)**, un modèle **lagrangien individu centré (IBM)** pour suivre la dispersion des larves



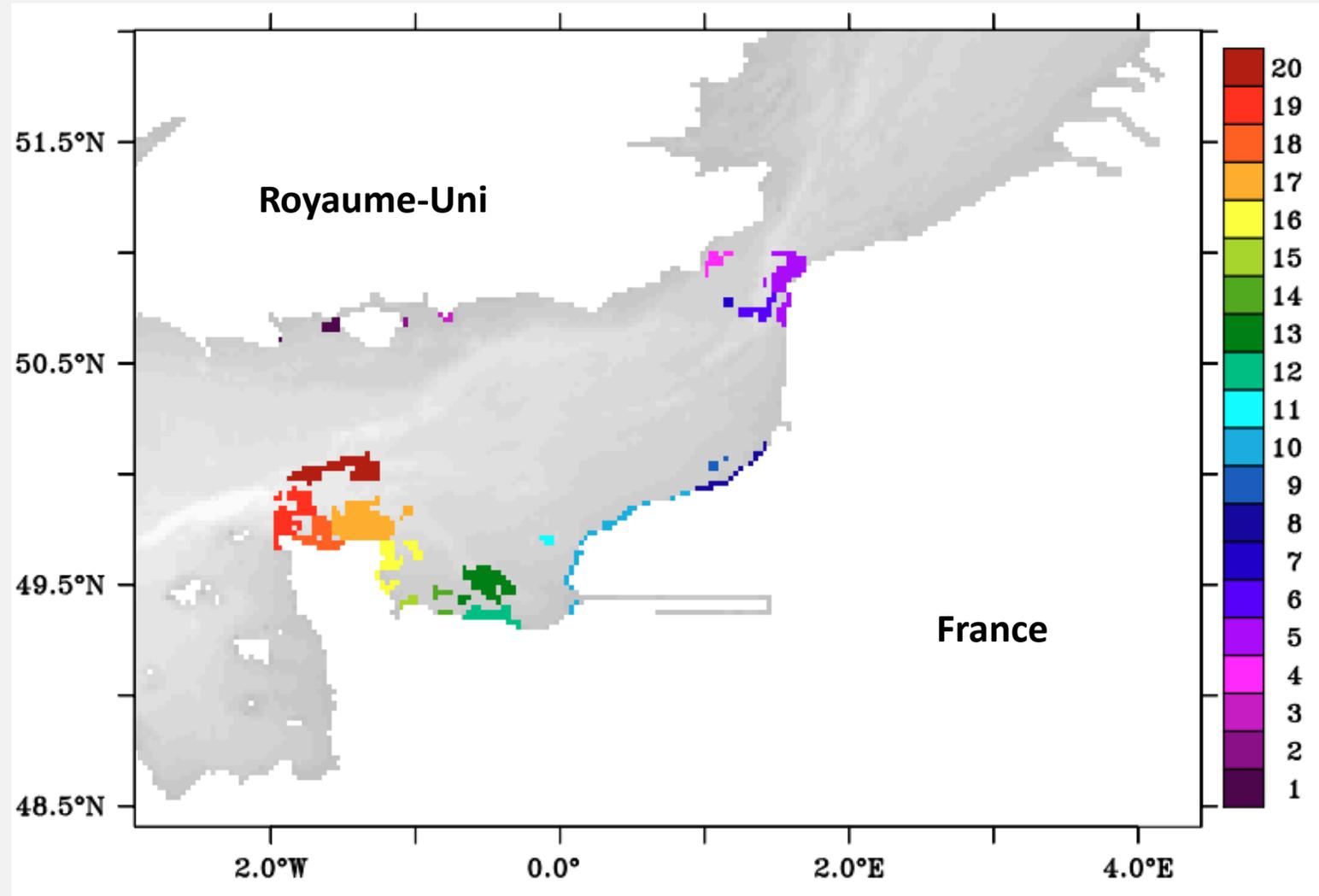
2. Dispersion larvaire à l'état initial

- Les larves sont **relâchées sur le fond** sur des substrats rocheux
- Toutes les **deux semaines** pendant la période de ponte de chaque espèce
- Pendant **12 heures** pour chevaucher le cycle de la marée



2. Dispersion larvaire à l'état initial

- Division des zones rocheuses pour le calcul de la dispersion en fonction de 4 paramètres
 - Vitesse et direction des courants
 - Température
 - Salinité
 - Profondeur
- **20 zones rocheuses**

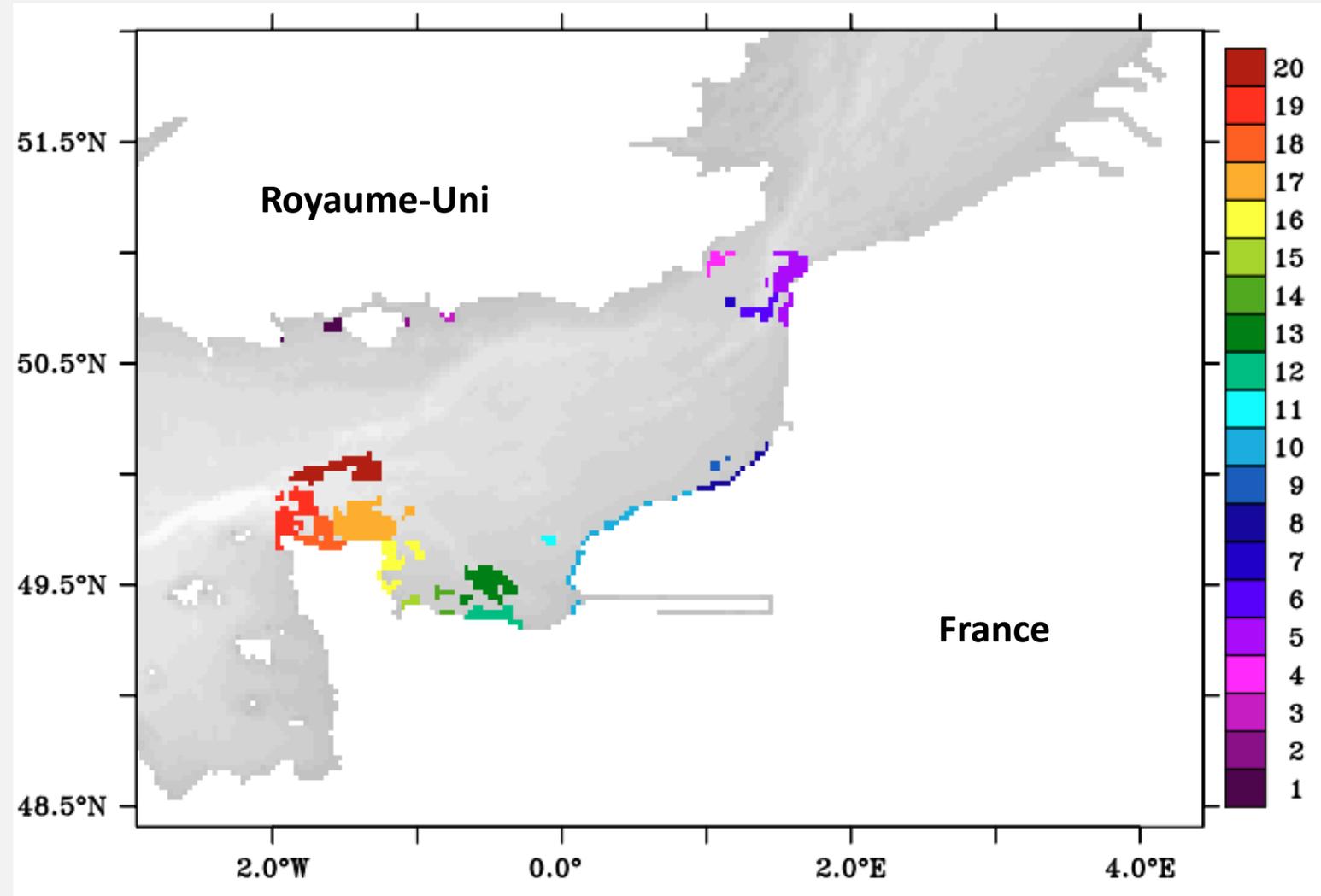


2. Dispersion larvaire à l'état initial

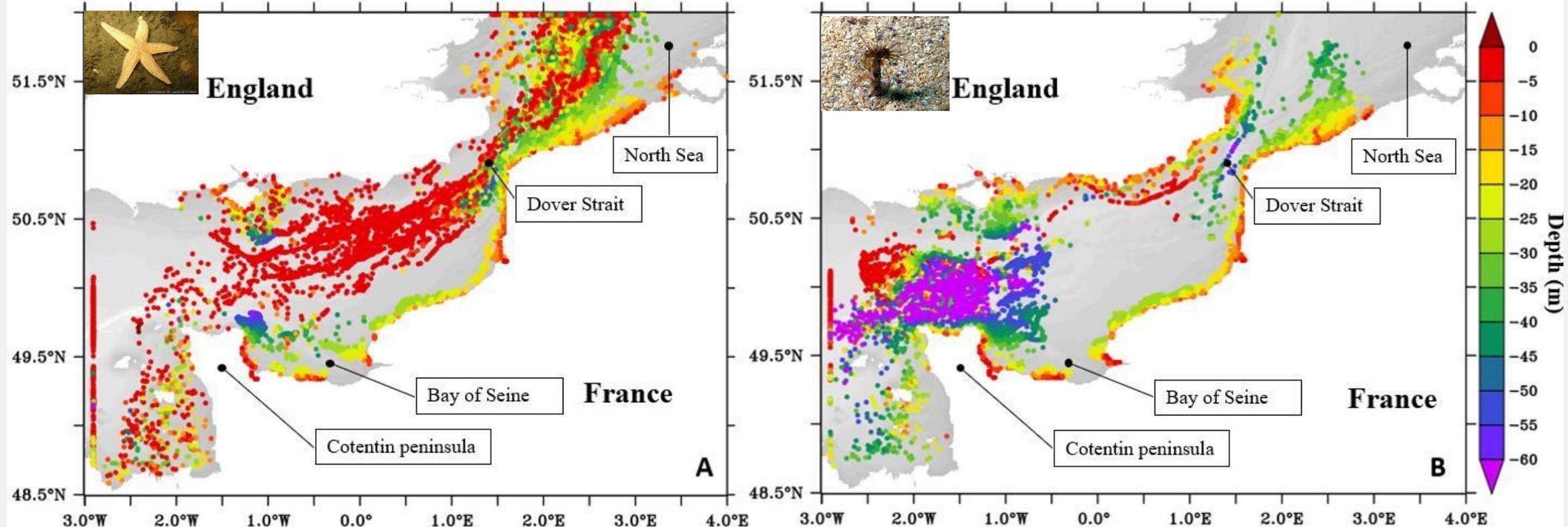
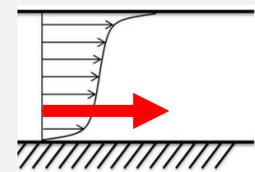
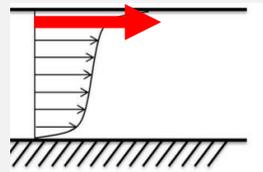
- Calcul des matrices de connectivité



- Comptage des larves par zones à la fin de la PLD
 - Zones **puits** et zones **sources**
- 1 matrice par an et par espèce



2. Dispersion larvaire à l'état initial



- Large vs côte
- Surface vs profondeur
- Fleuve côtier

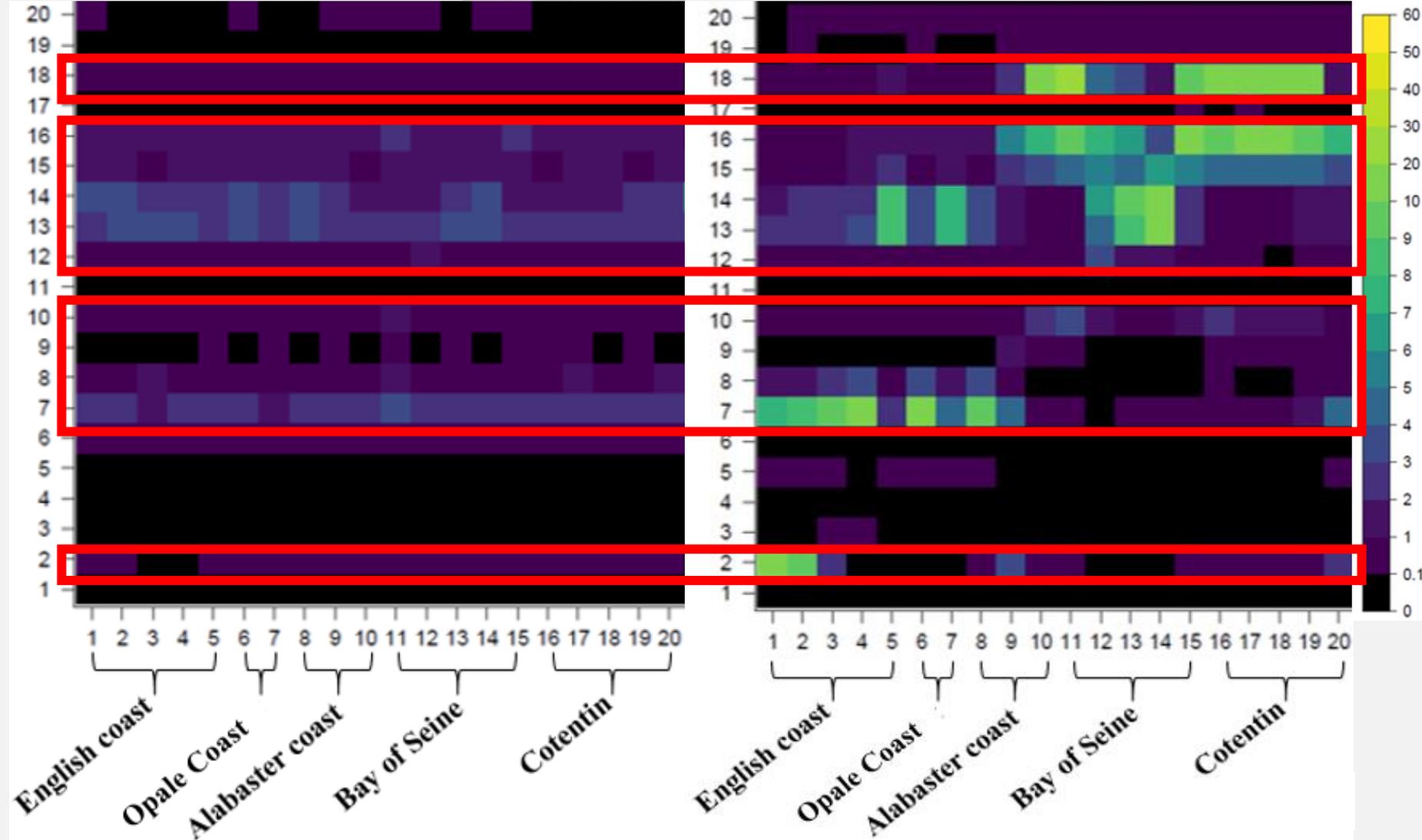
2. Dispersion larvaire à l'état initial



Asterias rubens



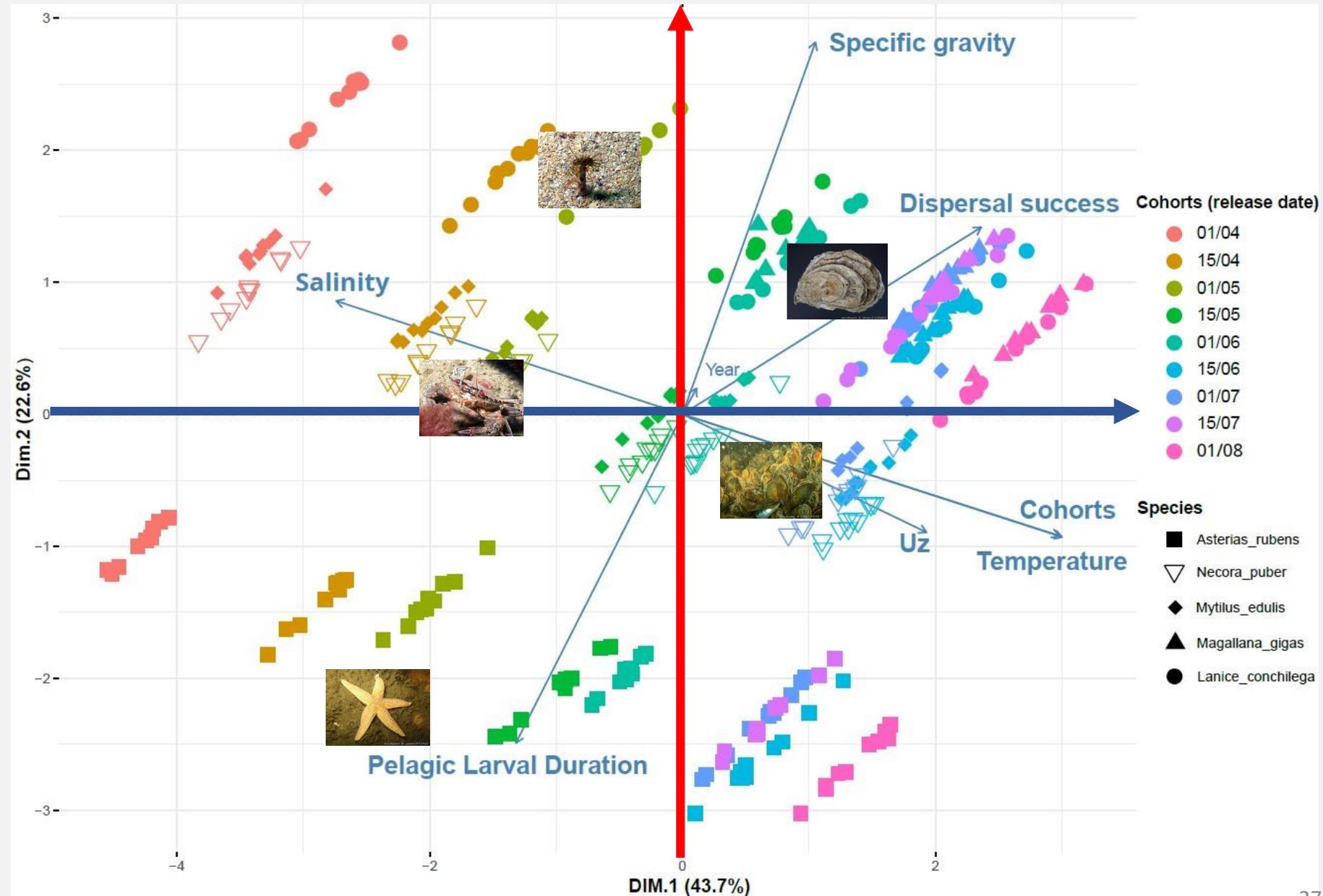
Lanice conchilega



- Grands patrons de dispersion similaire entre les espèces
- Succès de dispersion plus important pour la Lanice

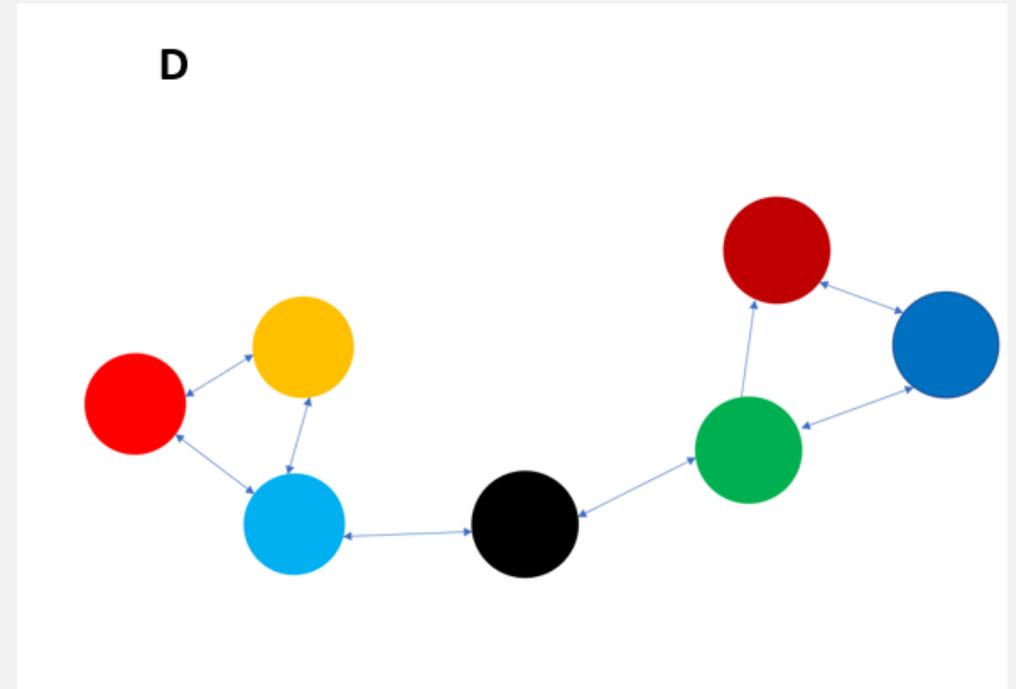
2. Dispersion larvaire à l'état initial

- Les traits d'histoire de vie expliquent la différence entre les espèces
- L'environnement marque la différence entre les évènements de pontes
- Intégrer la dynamique de dispersion sur les 10 années d'étude

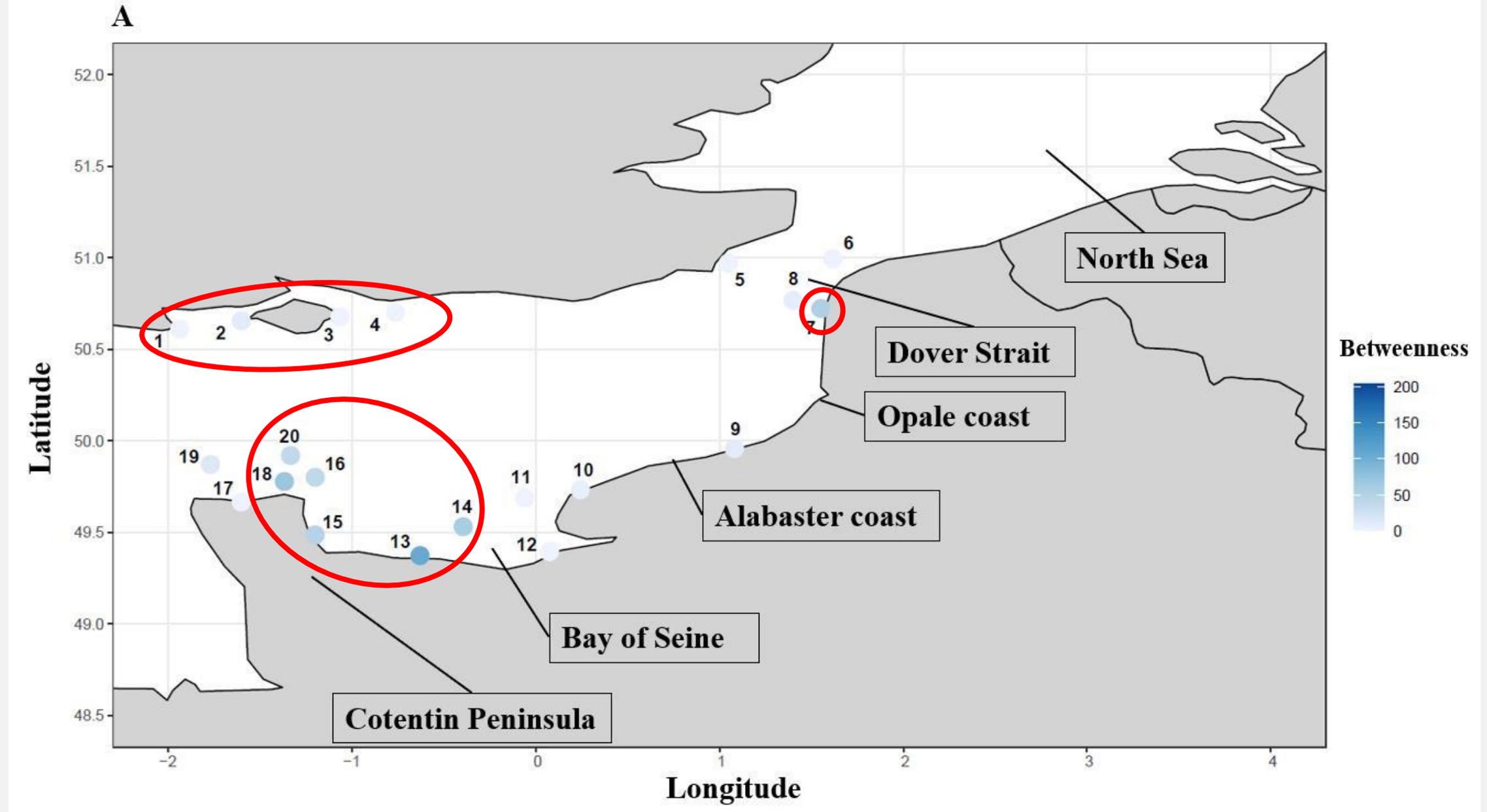


2. Dispersion larvaire à l'état initial

- Analyse en réseau (théorie des graphes)
- Approche complémentaire aux matrices de connectivité
 - Permet d'identifier le rôle d'un habitat au sein du réseau
 - Point de vue d'ensemble
- Calcul de 3 indices à partir des matrices de connectivité pondérées par la surface des zones
 - **Densité de connexion** = nombre de connexions observées par rapport au nombre de connexions possibles
 - **Forces des connexions** = connexions entrantes et sortantes, zones puits et zones sources
 - **Centralité (Betweenness)** = zone avec un rôle centrale dans le réseau, **effet relais** (Kininmonth et al., 2019 ; Friesen et al., 2019 ; Ser-Giacomi et al., 2021)



2. Dispersion larvaire à l'état initial



Questions scientifiques

Effet récif



Quels sont les potentiels colonisateurs ?



Quels sont leurs traits fonctionnels ?

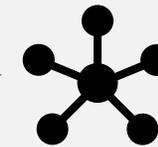
Effet relais



D'où viennent-ils ?



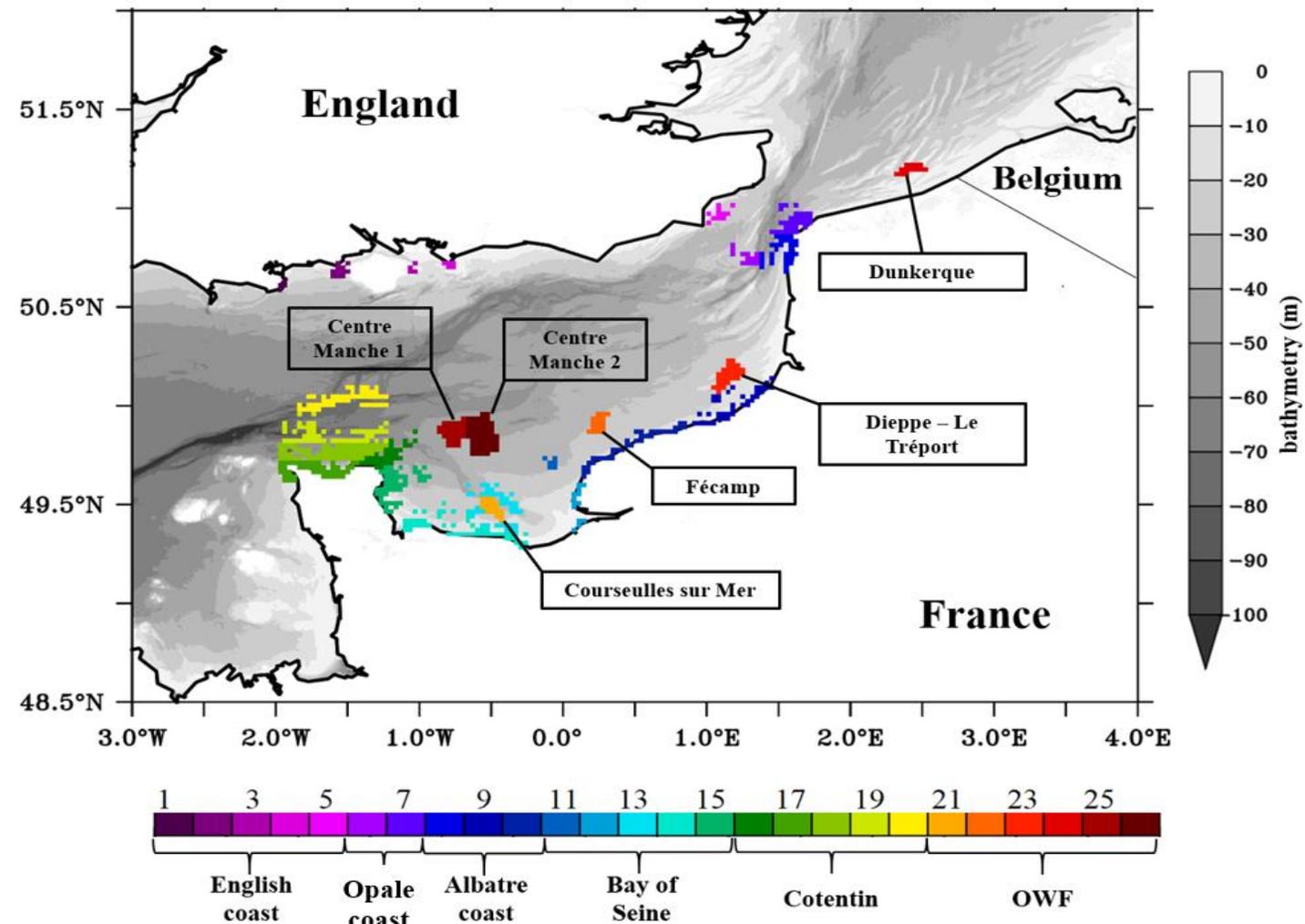
Où vont-ils se disperser ?



Quel rôle vont jouer les parcs dans la dynamique de dispersion ?

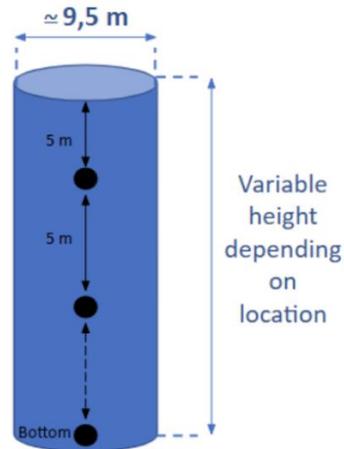
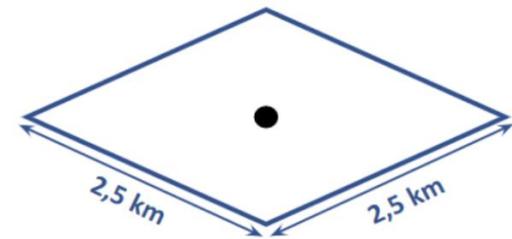
3. Rôles des parcs offshore dans la dispersion

- Les larves sont **relâchées sur le fond** **et tous les 5m jusqu'à la surface.**
- Ajout des parcs selon l'ordre prévu de mise en service



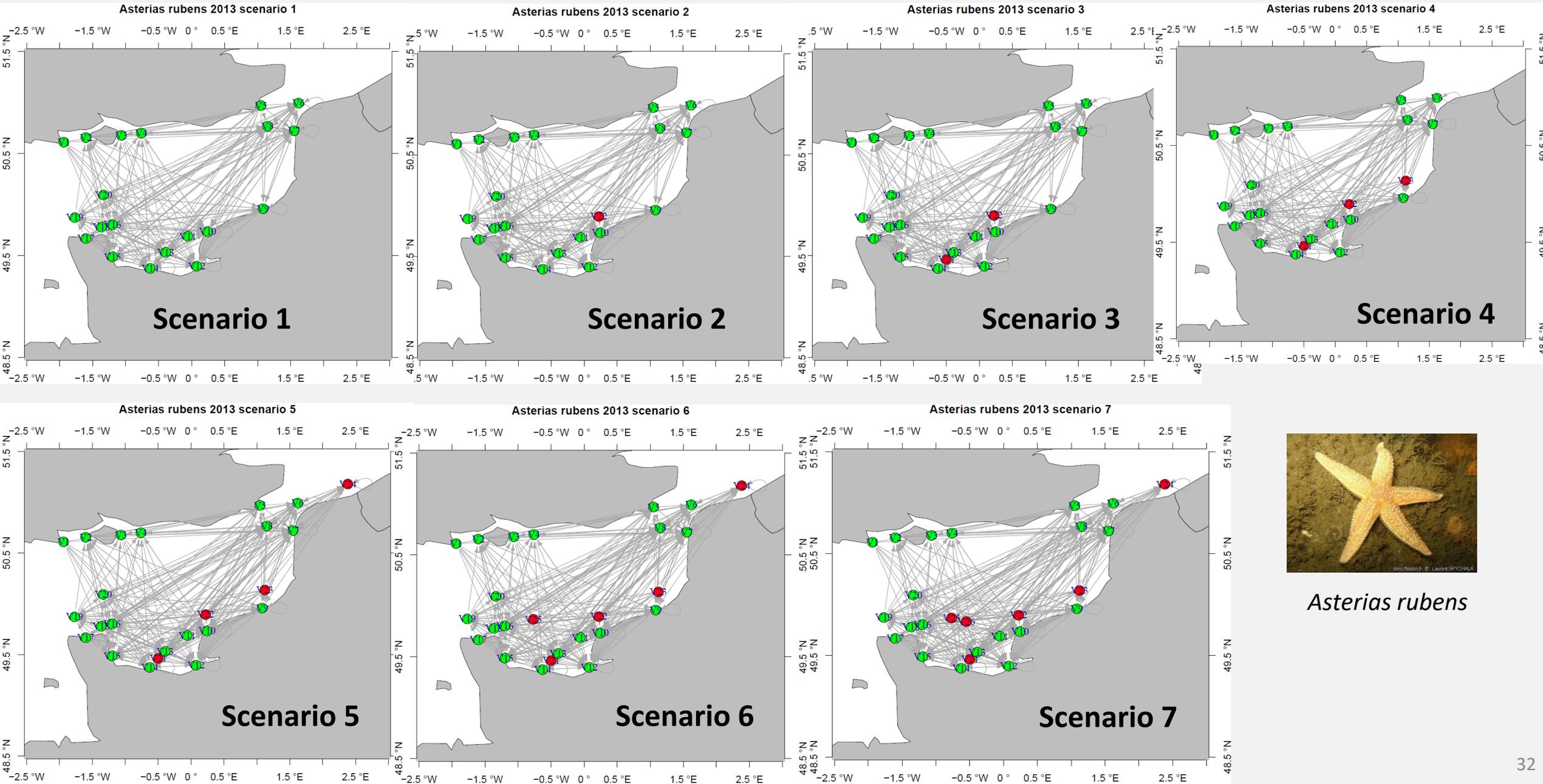
ROCK

OWF



● point of release

3. Rôles des parcs offshore dans la dispersion



Asterias rubens

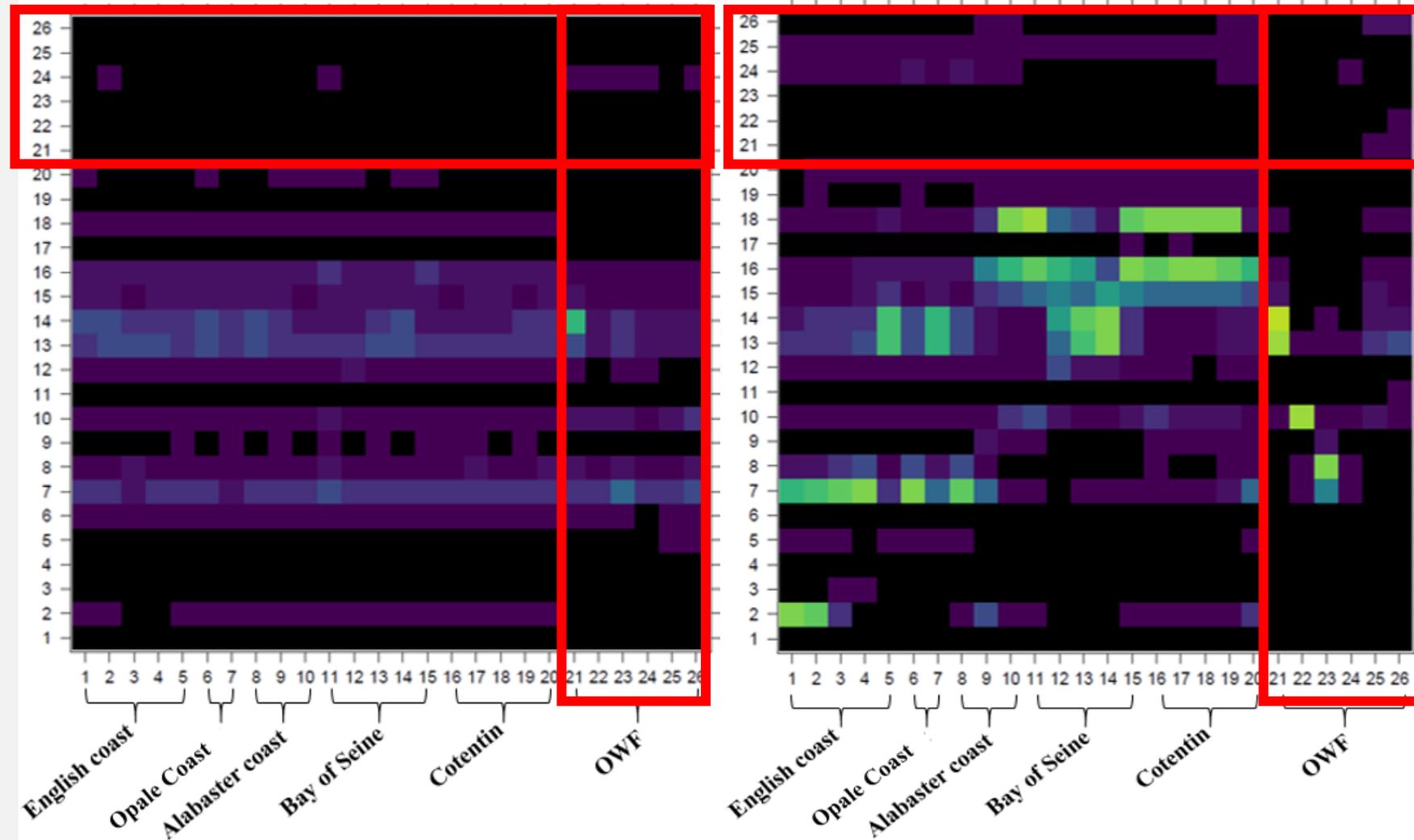
3. Rôles des parcs offshore dans la dispersion

Effet relais :

Asterias rubens



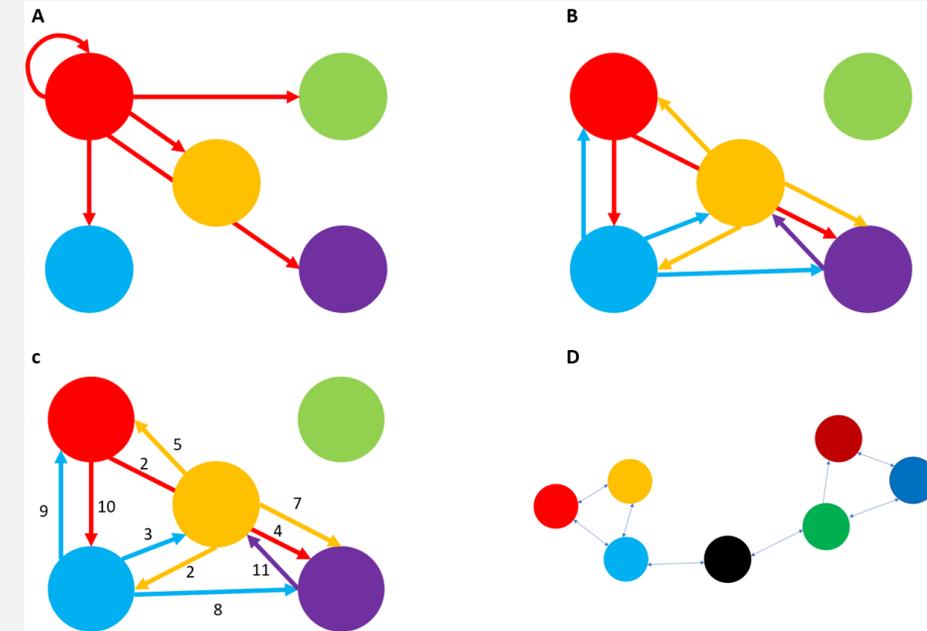
Lanice conchilega



- Le rôle de source varie en fonction des parcs et des espèces
- Les parcs éoliens offshore sont des puits relativement faibles

3. Rôles des parcs offshore dans la dispersion

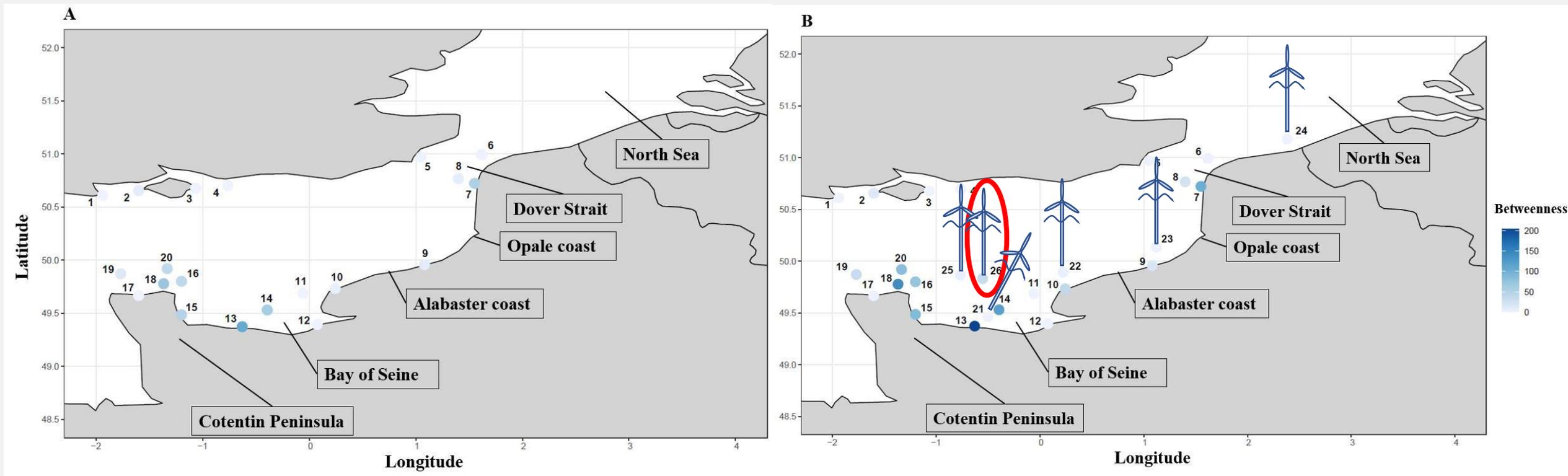
- Analyse en réseau (théorie des graph)
- Approche complémentaire aux matrices de connectivité
 - Permet d'identifier le rôle d'un habitat au sein du réseau
 - Point de vue d'ensemble



- Calcul de 3 indices à partir des matrices de connectivité pondérées par la surface des zones
 - **Densité de connexion** = nombre de connexions observées par rapport au nombre de connexions possibles
 - **Forces des connexions** = connexions entrantes et sortantes, zones puits et zones sources
 - Pas de différence entre les scénarios
 - **Centralité** = zone avec un rôle centrale dans le réseau, cohésion du réseau

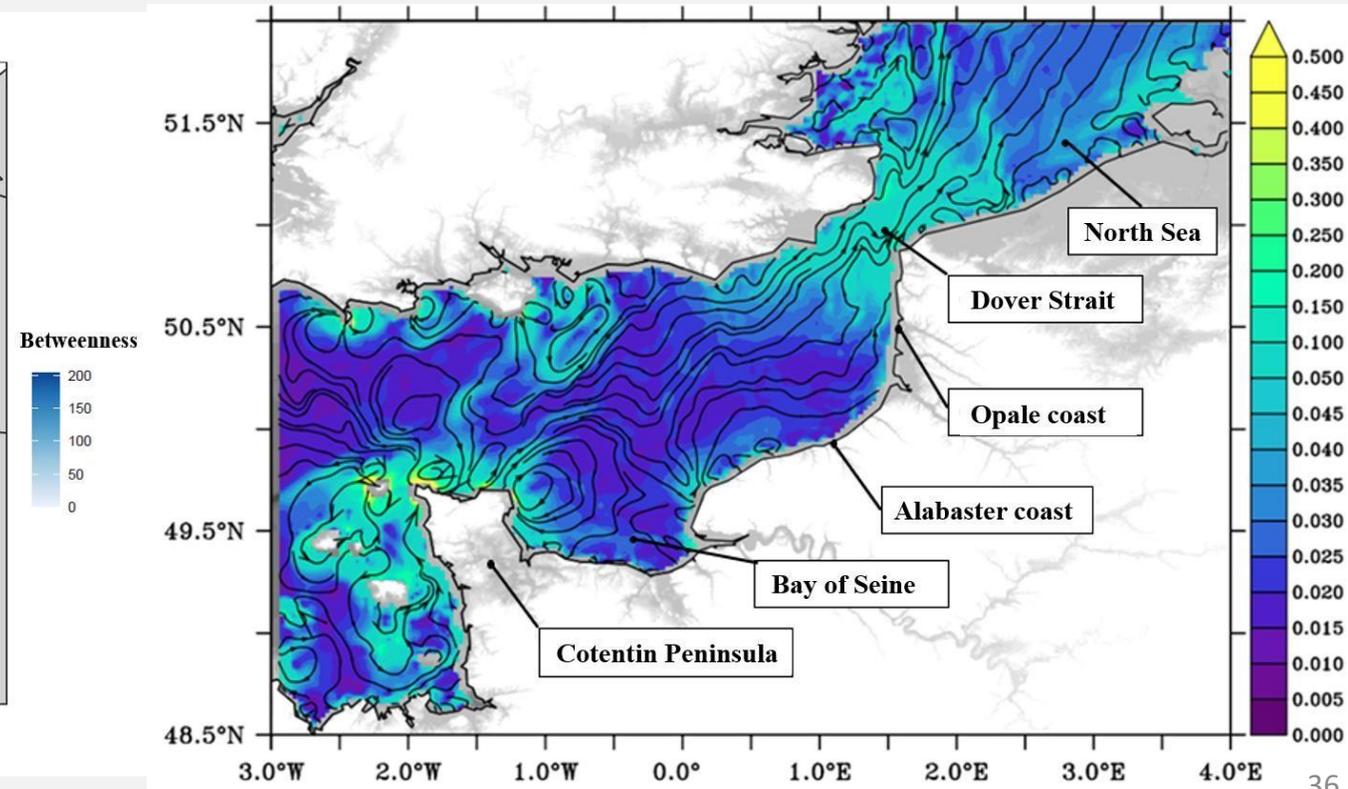
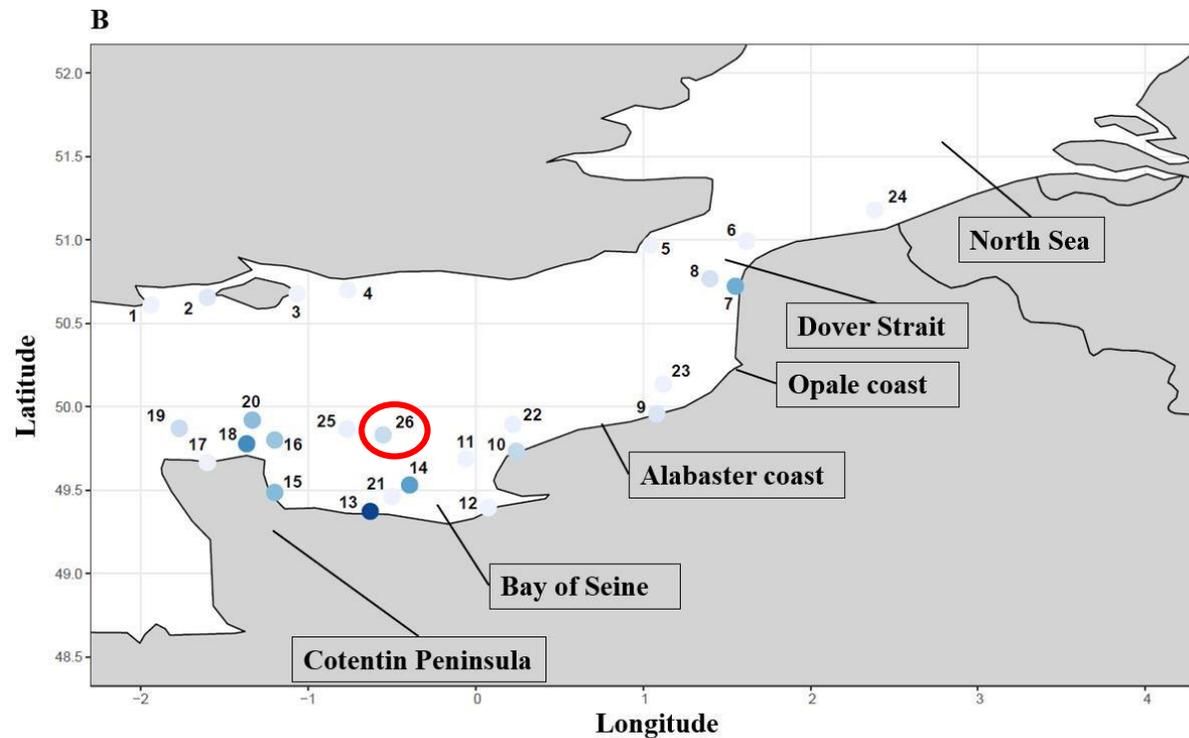
3. Rôles des parcs offshore dans la dispersion

- L'implantation des parcs offshore augmente la centralité de certaines zones rocheuses
- **Centre Manche 2 est le parc avec la plus grande centralité**



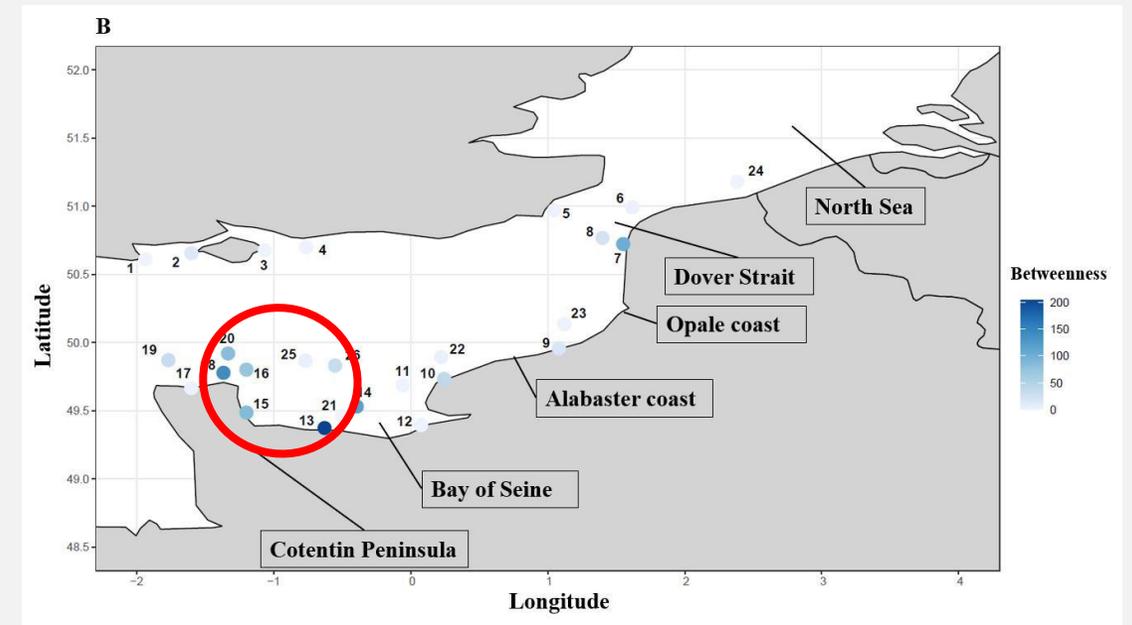
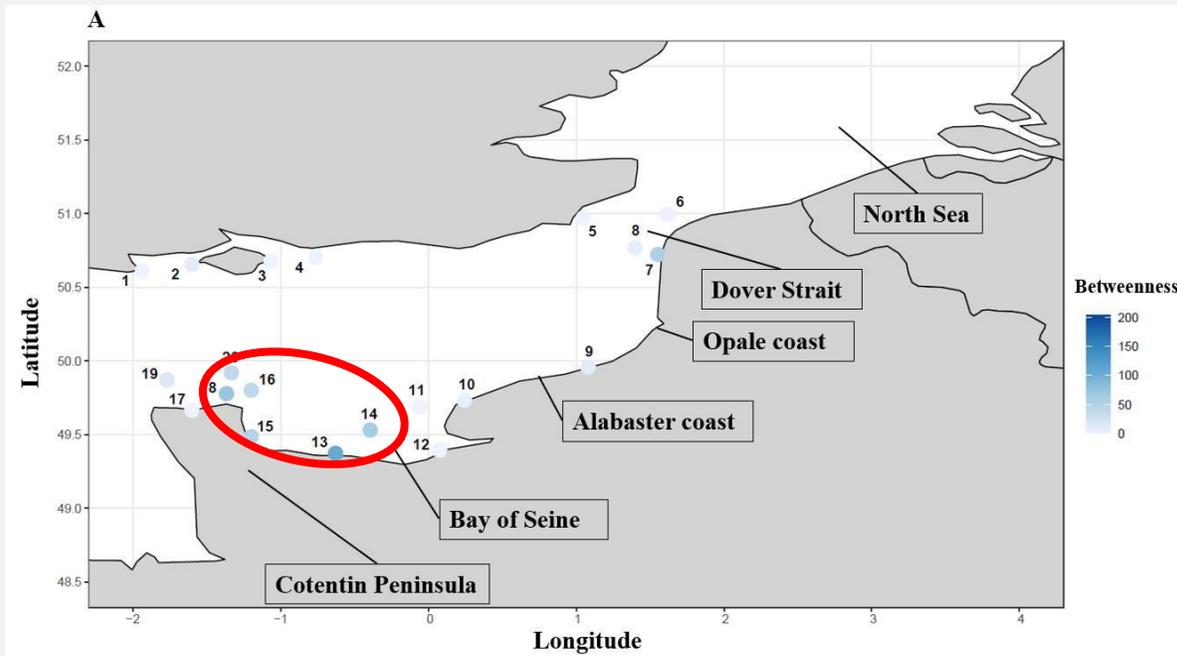
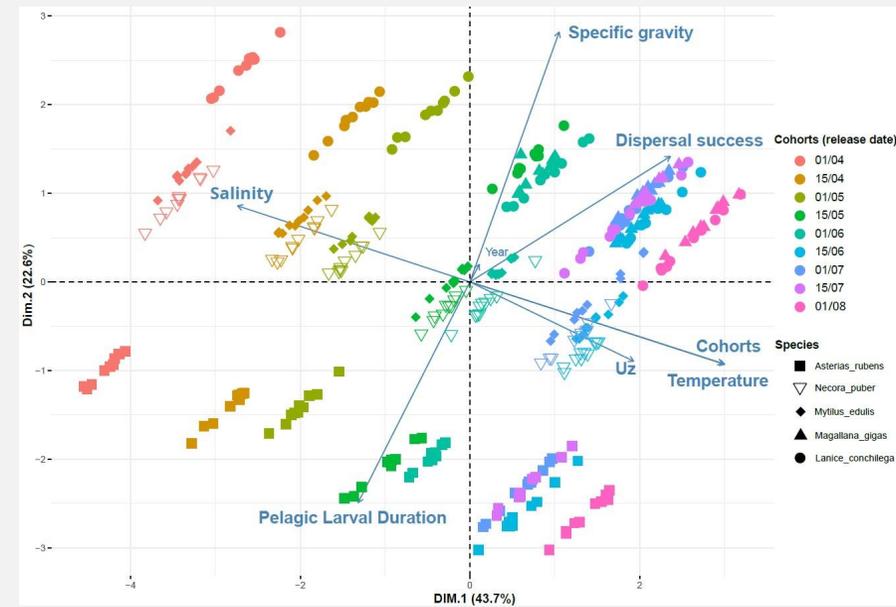
3. Rôles des parcs offshore dans la dispersion

- L'implantation des parcs offshore augmente la centralité de certaines zones rocheuses
- Centre Manche 2 est le parc avec la plus grande centralité
 - Hydrodynamisme favorable



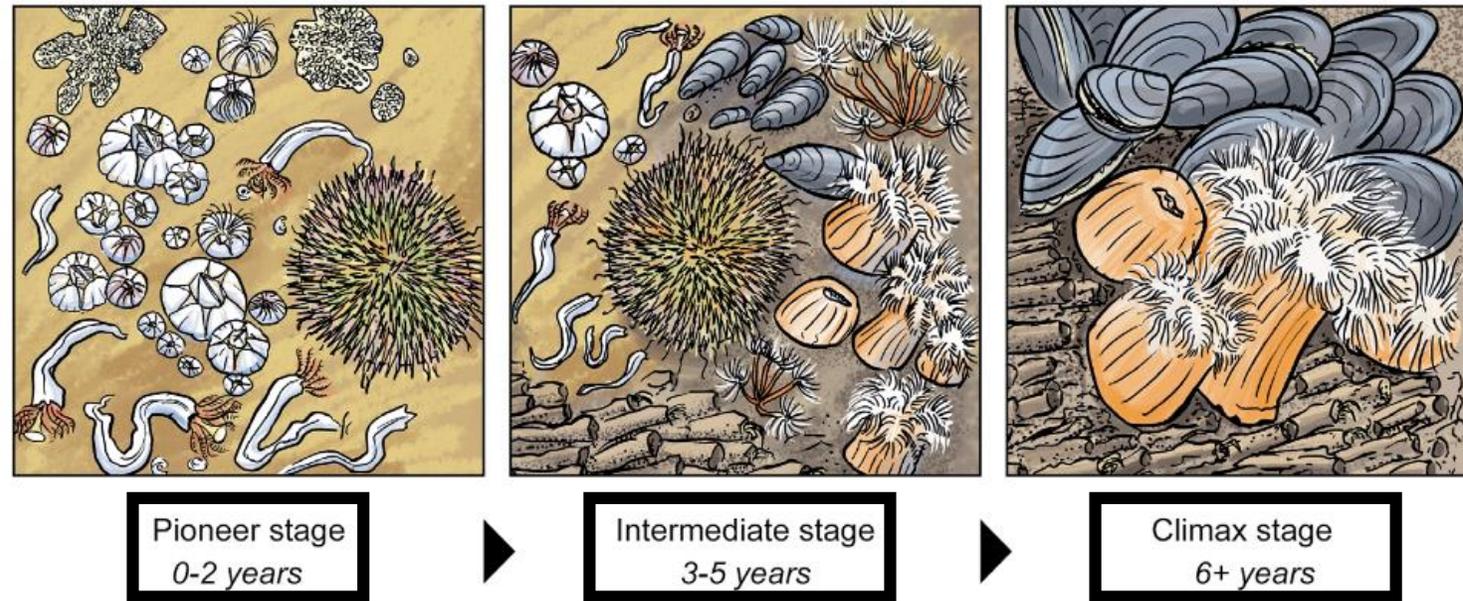
Take home message

- Traits d'histoire de vie et saisonnalité
- Baie de seine et Détroit du Pas de Calais
- Centre Manche 2

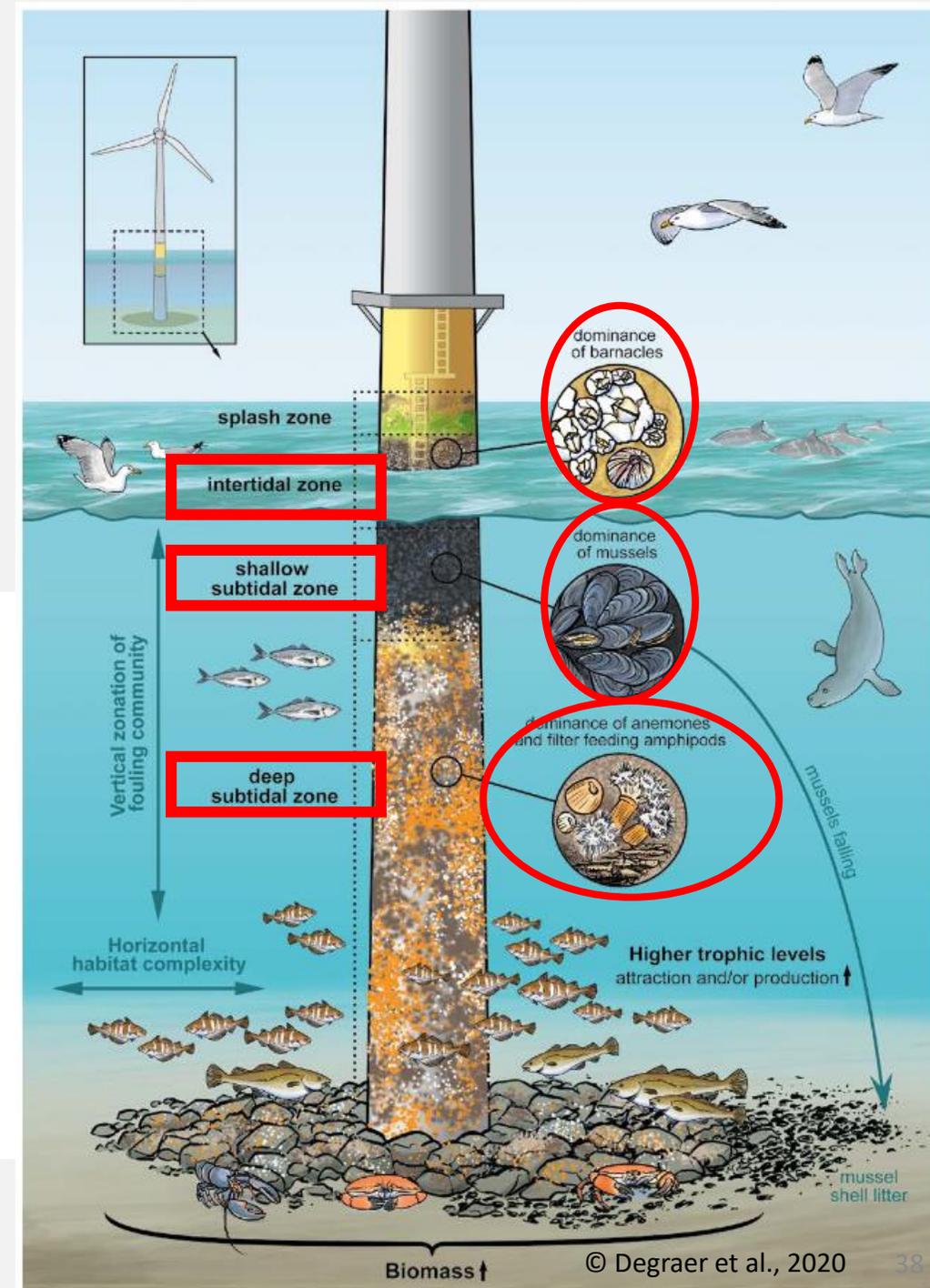


Discussion

- Les successions et la distribution spatiale des espèces
 - Abondance et biomasse des espèces
 - Paramètres environnementaux
 - Age du substrat
- Enrichissement du sédiments sur plusieurs dizaine de mètres autour des mâts d'éoliennes



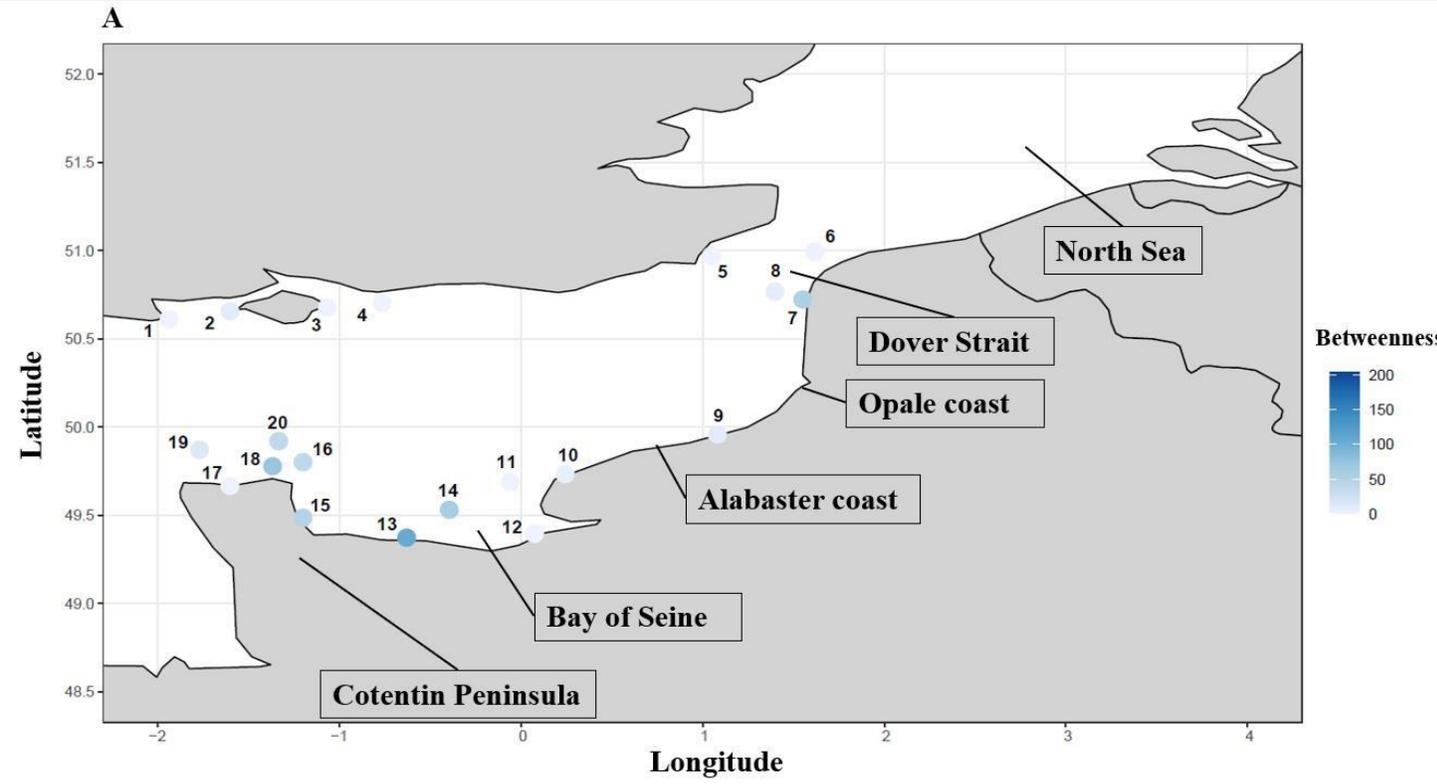
© Degraer et al., 2020



© Degraer et al., 2020

Discussion

- Importance de la baie de Seine dans la dynamique de dispersion



- Résultats similaires

○ Wood et al., 2021



Magallana gigas

© Michel Le Quement

Ellien et al., 1999



© Hans Hillewaert

Pectinaria koreni

Barnay et al., 2003



© David Fenwick

Owenia fusiformis

Lefebvre et al., 2003



© W. Bay Nouailhat

Ophiotrix fragilis

Nicolle et al., 2017

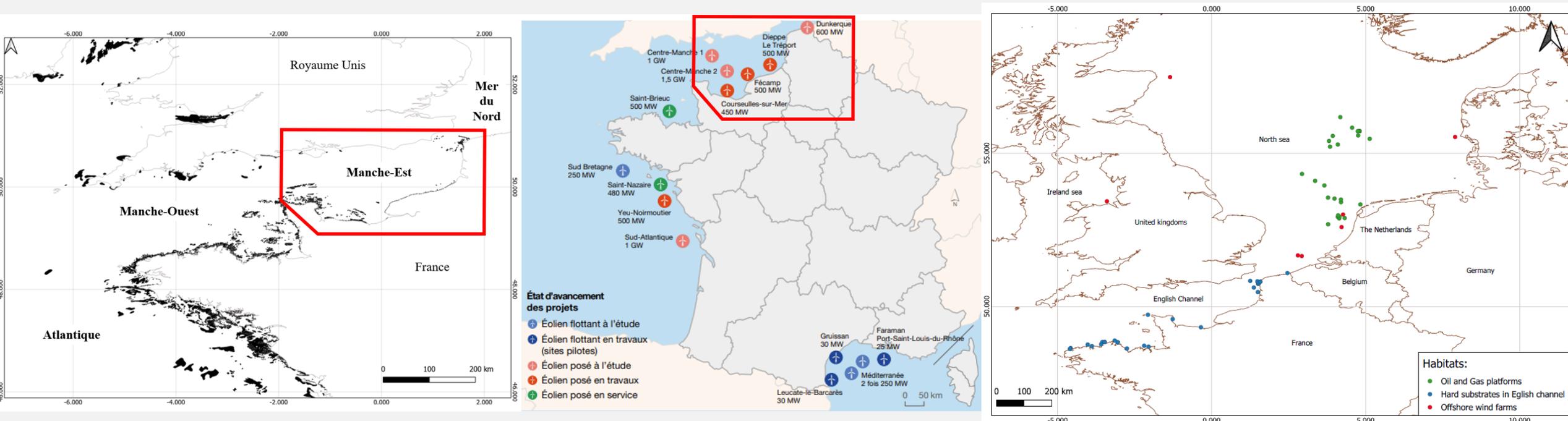


© Mer et Littoral

Pecten maximun

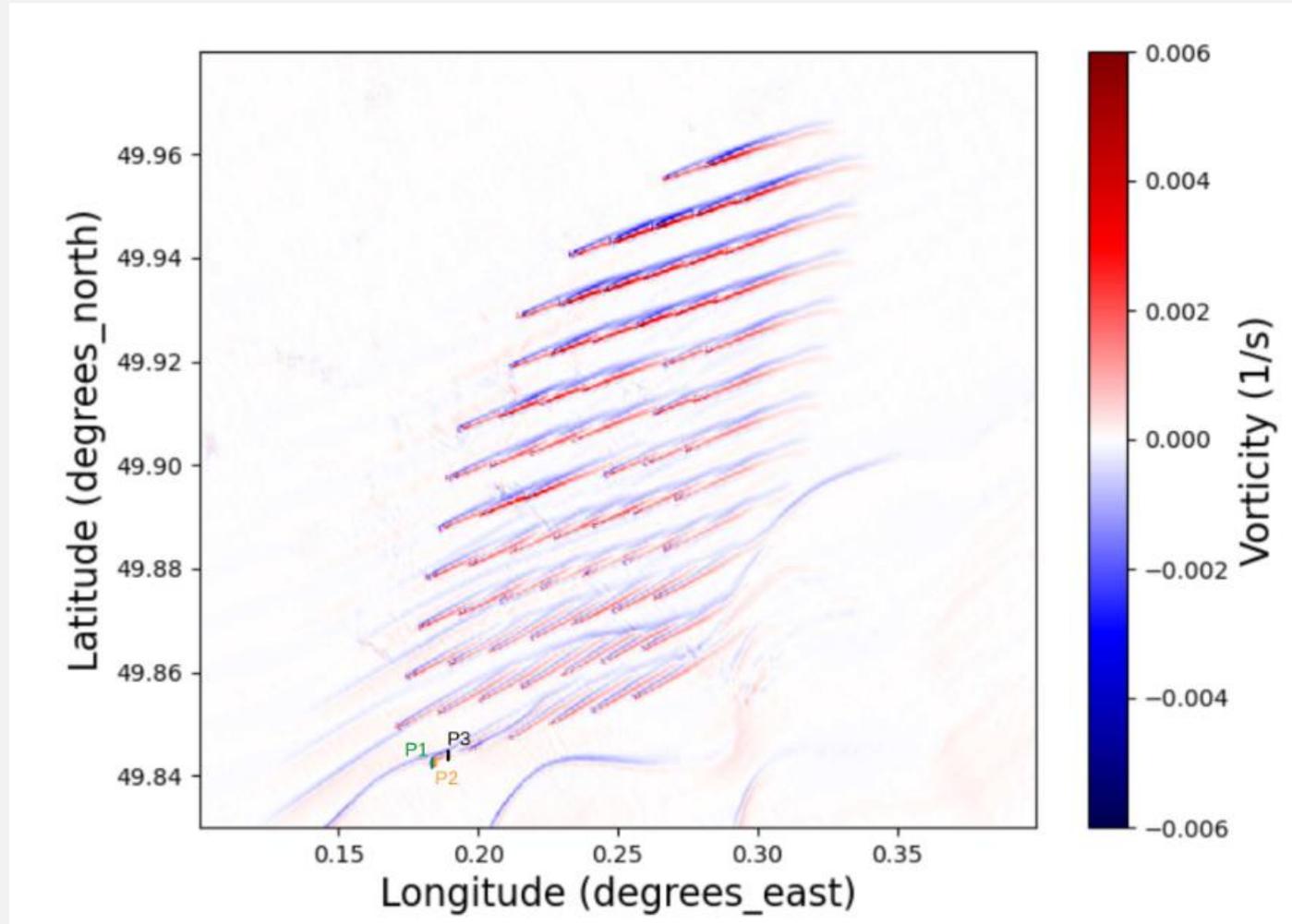
Discussion

- L'implantation des parcs offshore augmente la centralité de certaines zones rocheuses
- Centre Manche 2 est le parc avec la plus grande centralité
- Cependant, **les propriétés d'un réseau** peuvent dépendre de **l'échelle à laquelle il est étudié** (Scotti et al., 2007)
- D'autres infrastructures à prendre en compte : ports, épaves, digues, câbles sous marins etc...



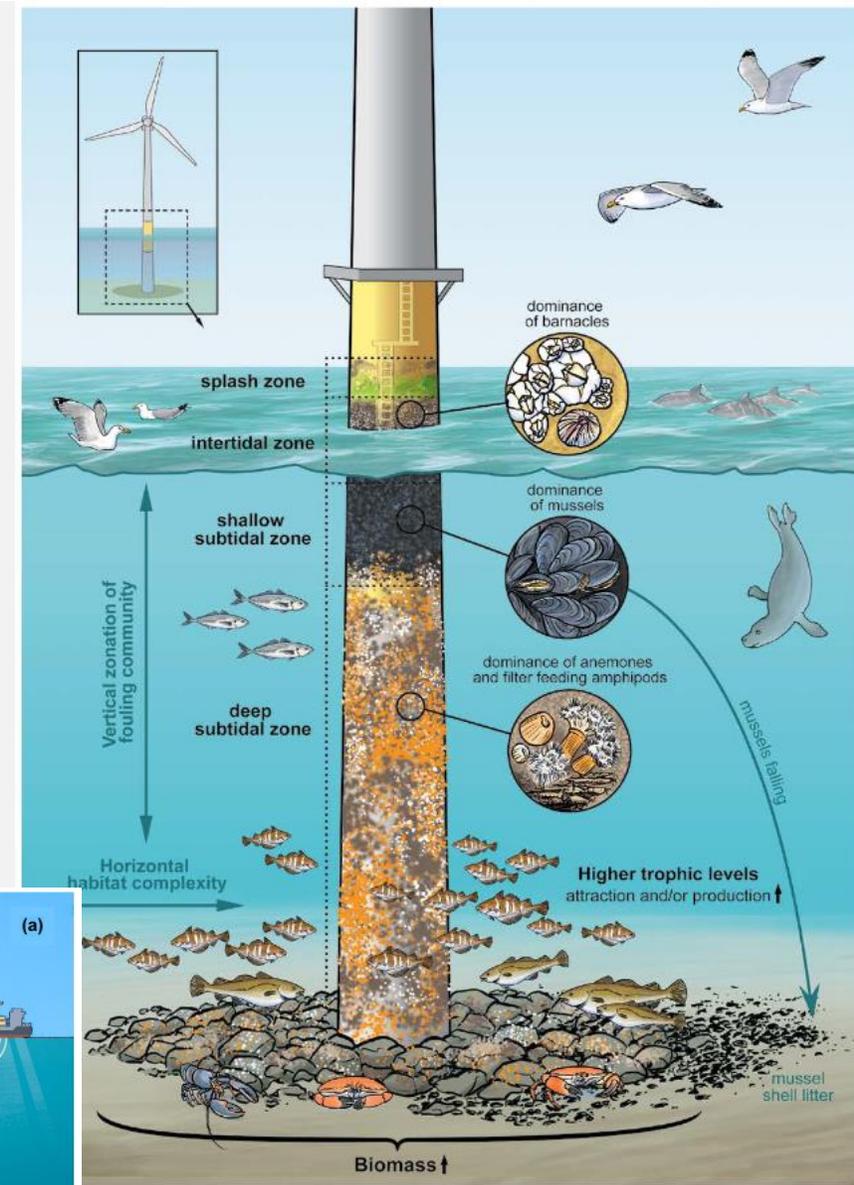
Discussion

- Impact des mats d'éoliennes sur l'hydrodynamisme local (Ajmi et al., 2024)



Perspectives

- Travaux en cours ICES -> RLQ
- Améliorations du modèle :
- PLD varie en fonction des paramètres environnementaux et de la nourriture disponible (Pepin, 1991, O'Connor et al., 2007)
- Comportement des larves (nage, migration nyctémérale, développement et croissance) (Swearer et al., 2019)
- Filtre d'habitat
- Vecteurs de fixation : Biofilm (Hadfield, 2010)
- Son (Davies et al., 2024)
- Compétition entre espèces (anémone)



© Davies et al., 2024

Remerciements

Encadrement

- Frida Ben Rais Lasram
- Sylvie Marylène Gaudron



Financeurs

- ULCO
- Parc Eolien en Mer de Dunkerque



Collaborateurs

- Jérémy Denis (Chapitre 1)
- Elena Alekseenko (Chapitre 2 et 3)
- Philippe Cugier (Chapitre 3)
- Martin Pierre Marzloff (Chapitre 3)

