



Identification de zones de moindres contraintes pour les Parcs Eoliens Offshore Flottants :

Une approche par optimisation spatiale

Damien Le Guyader*, Cyril Tissot**, Clara Jarry**

*Geo4Seas

** UMR LETG-Brest, UBO

Colloque merIGéo 4^{ème} édition

Le Havre - 2023-03-15



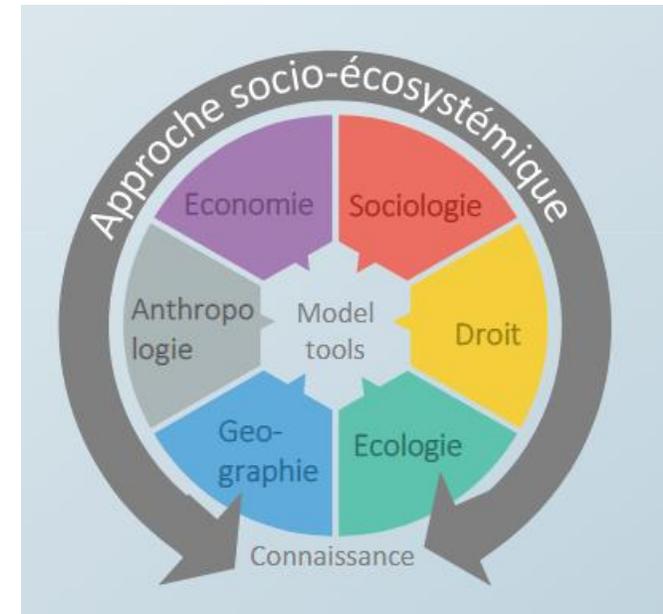
Contexte

Contexte scientifique

Projet APPEAL (2019-2022): « Approche socio-écosystémique de l'impact des parcs éoliens offshore flottants (PEOF) »

Objectifs

- Connaître les effets des PEOF sur les socio-écosystèmes.
- Développer des outils numériques pour caractériser et mesurer les interactions acteurs-environnement.
- Développer des outils d'aide à l'intégration des PEOF dans leur environnement naturel et socio-économique.



Coordination: F. Le Loc'h (IRD/UBO), Financement: ANR-10-IED-0006-17 / France Energie Marine.

Problématique

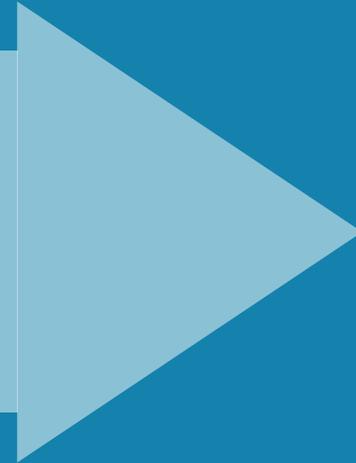
Contexte général

- Comment identifier des sites d'implantation potentiels de PEOF qui maximisent le potentiel de production énergétique tout en **minimisant les interactions** négatives avec les **compartiments biologiques** et **socio-économiques** ?
- Comment mobiliser ce modèle afin de réaliser des simulations prospectives spatialisées selon différents scénarios?

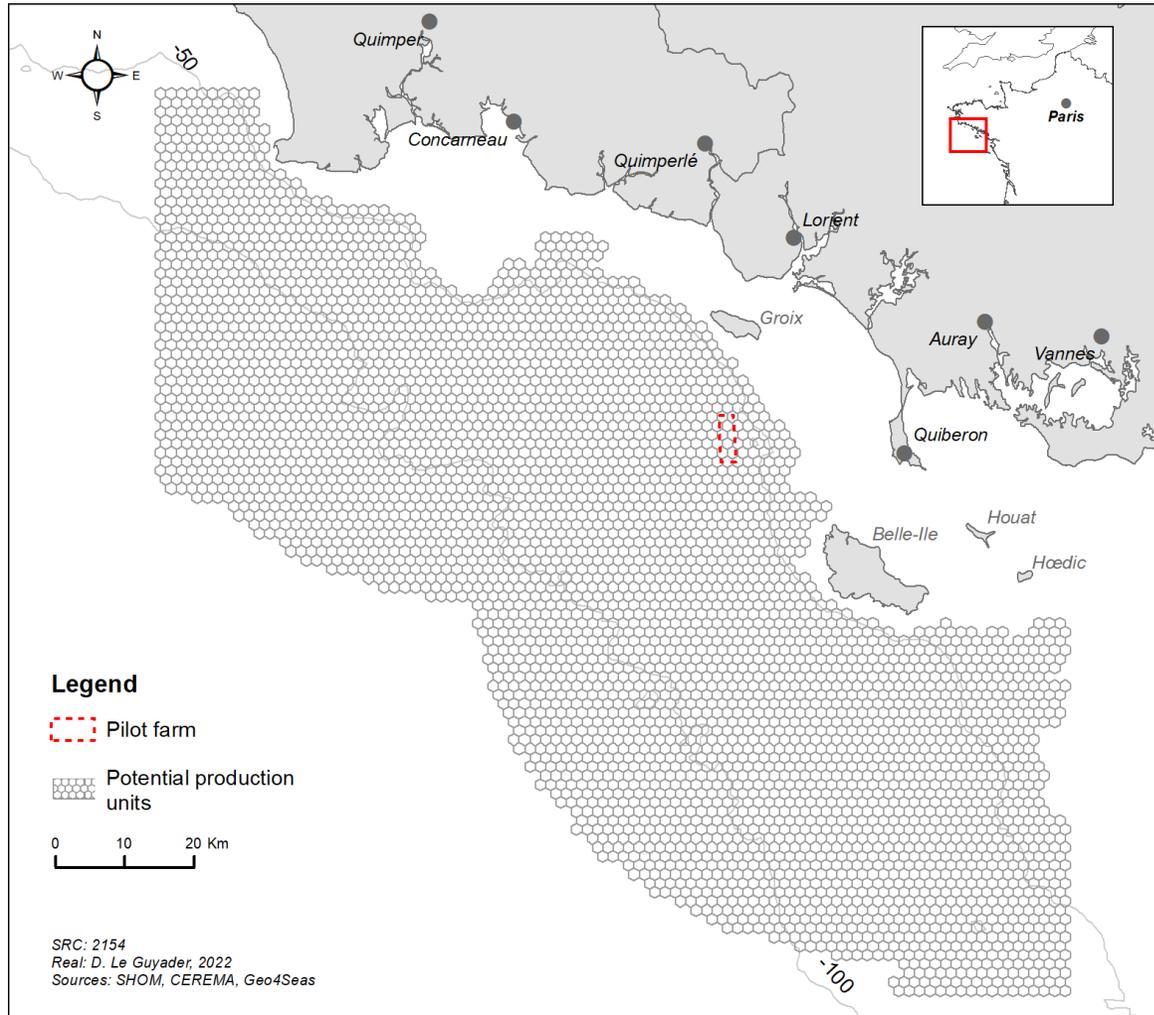
Hypothèses:

- (1) Le cadre conceptuel de **Planification Systématique de la Conservation** (Margules *et al.*, 2000) peut permettre l'identification de sites d'implantation potentiels
- (2) Les interactions potentielles négatives peuvent être approchées par la mobilisation du cadre conceptuel des **Effets Cumulés** ou multiples (Halpern *et al.*, 2008)

Données & Méthode

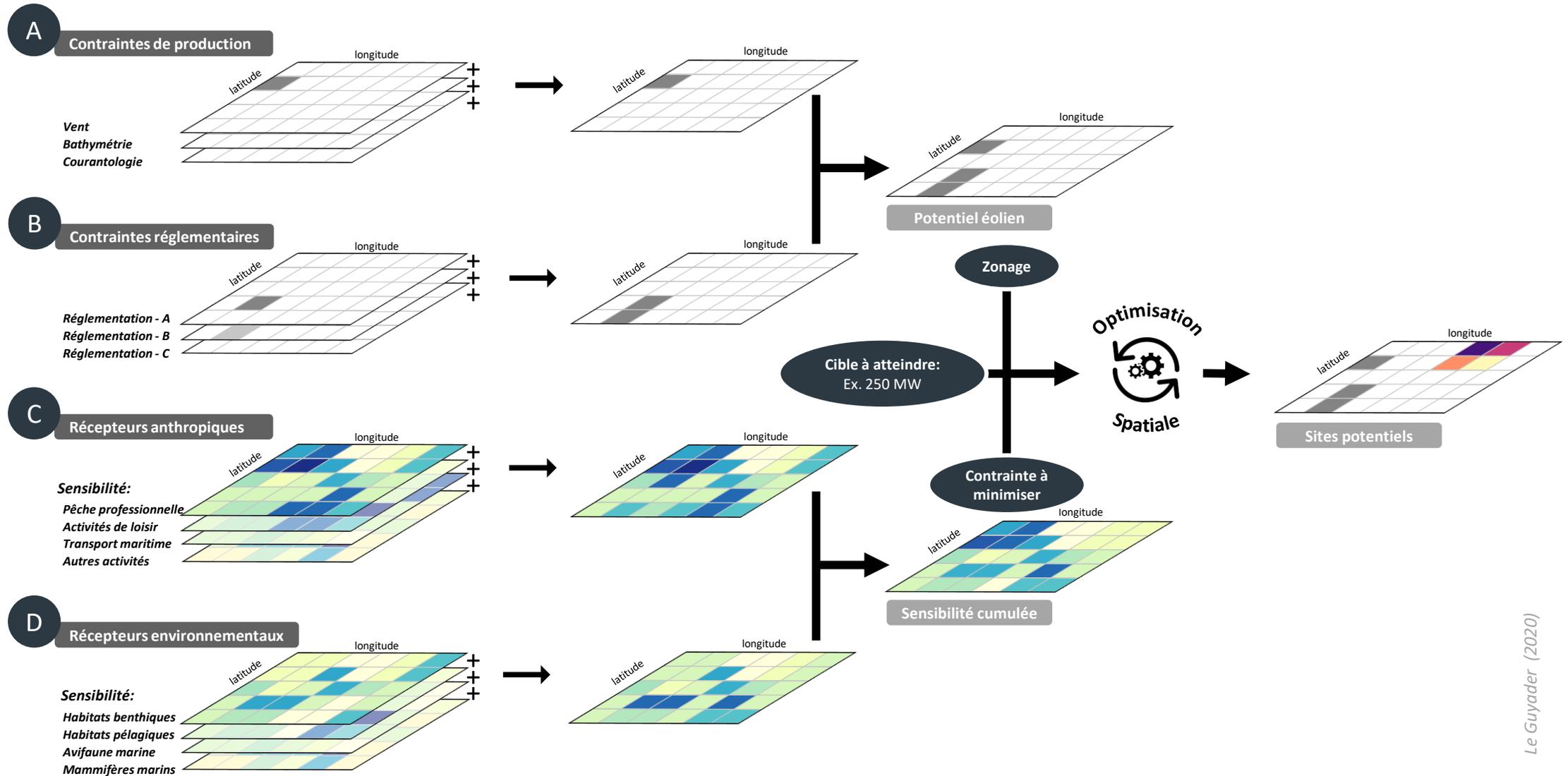


Zone d'étude

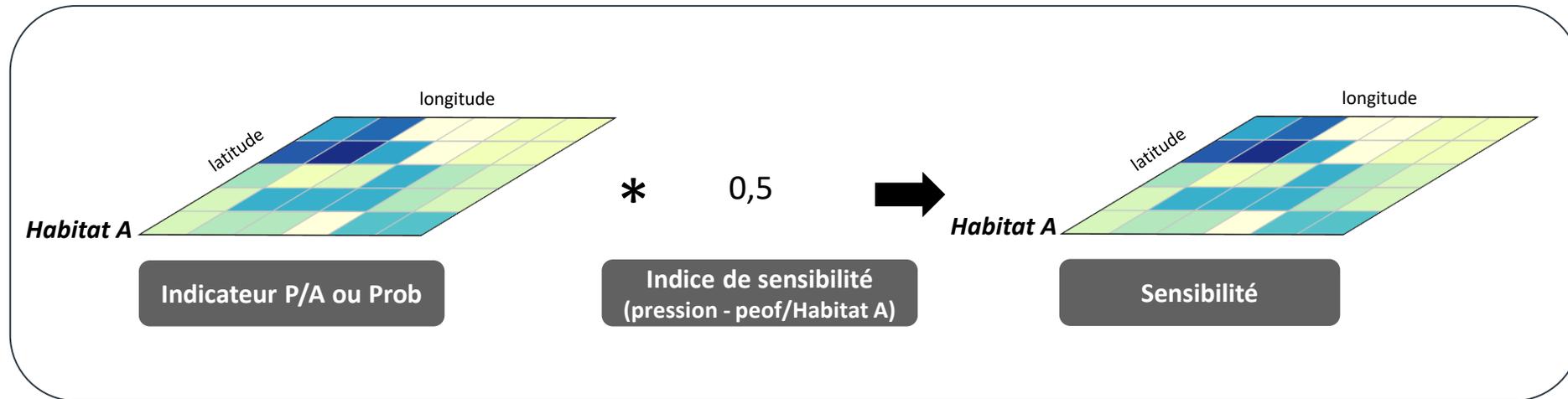


- Comprise dans la zone du potentiel technique éolien flottant défini par le CEREMA (2018):
 - vent moyen > 7 m/s;
 - 40 m < bathymétrie < 350 m;
 - vitesse courant de vives eaux en surface < 2,5m/s.
- Résolution spatiale : distance entre 2 éoliennes (1,5 km)
- Potentiel de production supposé homogène dans l'espace

Représentation schématique de la méthode



Elaboration des sensibilités cumulées: principe



- Co-construction d'informations « à dire d'experts »:
 - 1) **Identification des triplets A-P-R**: quelle Activité génère quelle Pression sur quel Récepteur?
 - 2) **Elaboration des indices de sensibilité**: quelle est la sensibilité d'un récepteur au regard d'une pression A exercée par une activité B?

(Halpern *et al.*, 2008)

Indices de sensibilité

- Construction selon 2 critères semi-quantitatifs

Récepteurs environnementaux

Résistance: « capacité d'un habitat à tolérer une pression sans modification notable de ses caractéristiques biotiques et abiotiques ».

Résilience: « temps nécessaire à la récupération d'un habitat, une fois que la pression impactante a cessé »

(La Rivière *et al.*, 2016)

Récepteurs anthropiques

Résistance: « capacité d'une activité à s'exercée au sein d'un parc ».

Résilience:

- **spatiale:** « potentiel de report de l'activité vers une autre zone »
- **de développement :** « potentiel de diversification dans le même secteur »

Indices de sensibilité

■ Calcul de l'indice de sensibilité

		Critère Résilience				
		Aucune (5)	Faible (4)	Modérée (3)	Haute (2)	Très Haute (1)
Critère Résistance	Aucune (5)	25	20	15	10	5
	Faible (4)	20	16	12	8	4
	Modérée (3)	15	12	9	6	3
	Haute (2)	10	8	6	4	2
	Très Haute (1)	5	4	3	2	1

Sensibilité:

Très faible (1)
 Faible (2)
 Modérée (3)
 Haute (4)
 Très haute (5)

		Indice de confiance: critère Résilience		
		Faible (0)	Moyen (1)	Haut (2)
Indice de confiance: critère Résistance	Faible (0)	0	0	0
	Moyen (1)	0	1	2
	Haut (2)	0	2	4

Indice de confiance de l'indice de sensibilité:

Faible
 Moyen
 Haut

■ Co-construction à dire d'acteurs

	Entretien semi-directifs	Ateliers
Habitats benthiques		2 (13 pers.)
Pêche professionnelle	1	2 (6 pers.)
Transport maritime	2	
Navigation sportive et de loisir	4	

Indices de sensibilité

■ Exemples :

Récepteurs environnementaux : n = 94

FOW - Activity	Pressure	Receptor	Resist.	Resil.	Sensi.
Float	Abrasion	A5.35-Circalittoral sandy mud	Low***	High**	Moderate**
anchors and anchor lines	Abrasion	A5.36-Circalittoral fine mud	Low***	Moderate**	Moderate**
anchors and anchor lines	Abrasion	A5.37-Deep circalittoral mud	Low***	Moderate**	Moderate**
anchors and anchor lines	Abrasion	A5.35-Circalittoral sandy mud	Low***	High**	Moderate**
Cables	Electromagnetic emissions	A4.1-Atlantic and mediterranean high energy circalittoral rock	Moderate*	High*	Low*
Cables	Electromagnetic emissions	A4.12-Sponge communities on deep circalittoral rock circalittoral rock or faunal communities on deep low energy circalittoral rock	Moderate*	High*	Low*

Récepteurs anthropiques: n = 16

Fishing	FOW - Activity	Pressure	Receptor	Resist.	Resil.	Sensi.
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Fixed gears	Moderate***	High**	Low**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Longlines	Moderate***	Moderate**	Moderate**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Other gears	Low***	None**	High**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Purses seines	Low***	None*	High**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Trawlers	Low***	Low**	High***

Note:

Resist. = Resistance index, Resil. = Resilience index, Sensi. = Sensitivity index; Confidence index = *: Low; **: Moderate; ***: High.

Indices de sensibilité

■ Exemples :

Récepteurs environnementaux : n = 94

FOW - Activity	Pressure	Receptor	Resist.	Resil.	Sensi.
Float	Abrasion	A5.35-Circalittoral sandy mud	Low***	High**	Moderate**
Anchors and anchor lines	Abrasion	A5.36-Circalittoral fine mud	Low***	Moderate**	Moderate**
Anchors and anchor lines	Abrasion	A5.37-Deep circalittoral mud	Low***	Moderate**	Moderate**
Anchors and anchor lines	Abrasion	A5.35-Circalittoral sandy mud	Low***	High**	Moderate**
Cables	Electromagnetic emissions	A4.1-Atlantic and mediterranean high energy circalittoral rock	Moderate*	High*	Low*
Cables	Electromagnetic emissions	A4.12-Sponge communities on deep circalittoral rock circalittoral rock or faunal communities on deep low energy circalittoral rock	Moderate*	High*	Low*

Récepteurs anthropiques: n = 16

Fishing	FOW - Activity	Pressure	Receptor	Resist.	Resil.	Sensi.
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Fixed gears	Moderate***	High**	Low**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Longlines	Moderate***	Moderate**	Moderate**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Other gears	Low***	None**	High**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Purses seines	Low***	None*	High**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Trawlers	Low***	Low**	High***

Note:

Resist. = Resistance index, Resil. = Resilience index, Sensi. = Sensitivity index; Confidence index = *: Low; **: Moderate; ***: High.

Indices de sensibilité

■ Exemples :

Récepteurs environnementaux : n = 94

FOW - Activity	Pressure	Receptor	Resist.	Resil.	Sensi.
Float	Abrasion	A5.35-Circalittoral sandy mud	Low***	High**	Moderate**
Anchors and anchor lines	Abrasion	A5.36-Circalittoral fine mud	Low***	Moderate**	Moderate**
Anchors and anchor lines	Abrasion	A5.37-Deep circalittoral mud	Low***	Moderate**	Moderate**
Anchors and anchor lines	Abrasion	A5.35-Circalittoral sandy mud	Low***	High**	Moderate**
Cables	Electromagnetic emissions	A4.1-Atlantic and mediterranean high energy circalittoral rock	Moderate*	High*	Low*
Cables	Electromagnetic emissions	A4.12-Sponge communities on deep circalittoral rock circalittoral rock or faunal communities on deep low energy circalittoral rock	Moderate*	High*	Low*

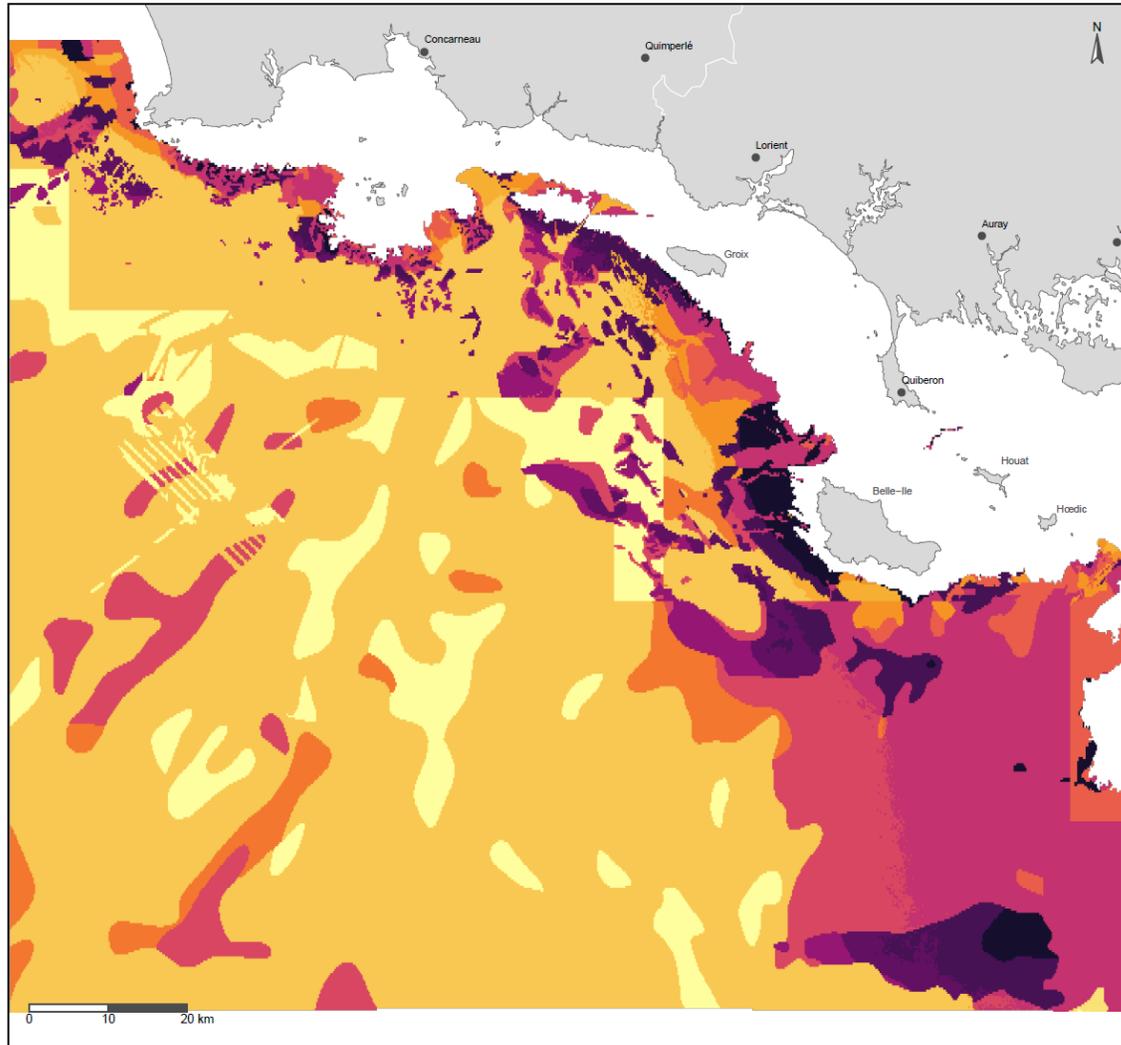
Récepteurs anthropiques: n = 16

Fishing	FOW - Activity	Pressure	Receptor	Resist.	Resil.	Sensi.
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Fixed gears	Moderate***	High**	Low**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Longlines	Moderate***	Moderate**	Moderate**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Other gears	Low***	None**	High**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Purses seines	Low***	None*	High**
Allowed	Physical presence of infrastructure	Competition for space	Fishing - Trawlers	Low***	Low**	High***

Note:

Resist. = Resistance index, Resil. = Resilience index, Sensi. = Sensitivity index; Confidence index = *: Low; **: Moderate; ***: High.

Habitats Benthiques



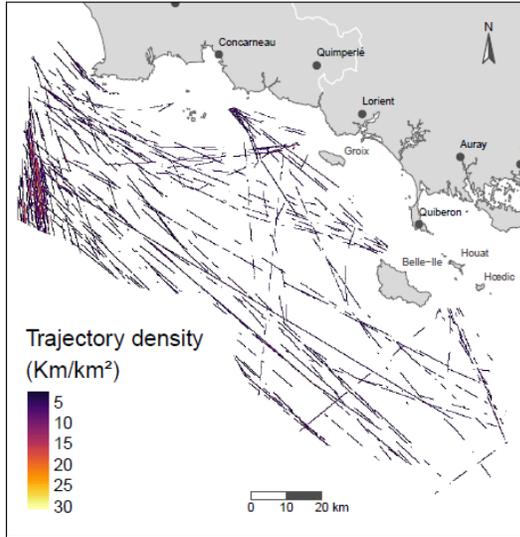
Benthic habitats (EUNIS)

- A3.1: Atlantic and Mediterranean high energy infralittoral rock
- A4.1: Atlantic and Mediterranean high energy circalittoral rock
- A4.12: Sponge communities on deep circalittoral rock
- A4.2: Atlantic and Mediterranean moderate energy circalittoral rock
- A4.27: Faunal communities on deep moderate energy circalittoral rock
- A4.3: Atlantic and Mediterranean low energy circalittoral rock
- A4.33: Faunal communities on deep low energy circalittoral rock
- A5.14: Circalittoral coarse sediment
- A5.15: Deep circalittoral coarse sediment
- A5.25 or A5.26: Circalittoral fine sand or Circalittoral muddy sand
- A5.27: Deep circalittoral sand
- A5.35: Circalittoral sandy mud
- A5.36: Circalittoral fine mud
- A5.37: Deep circalittoral mud
- A5.44: Circalittoral mixed sediments
- A5.45: Deep circalittoral mixed sediments

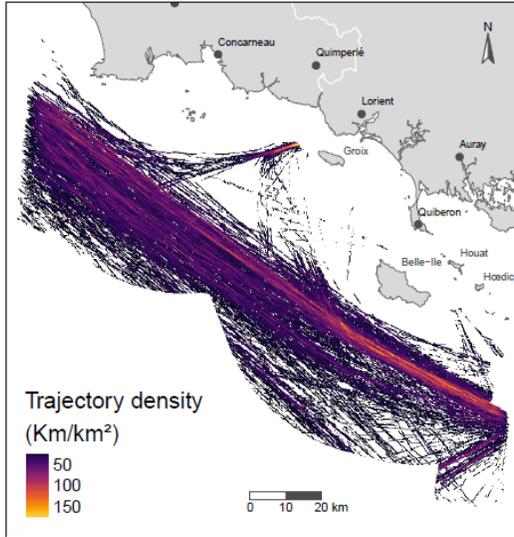
Source = OFB (2019) : EuSeaMap 2017 + cartographies régionales

Activités Anthropiques

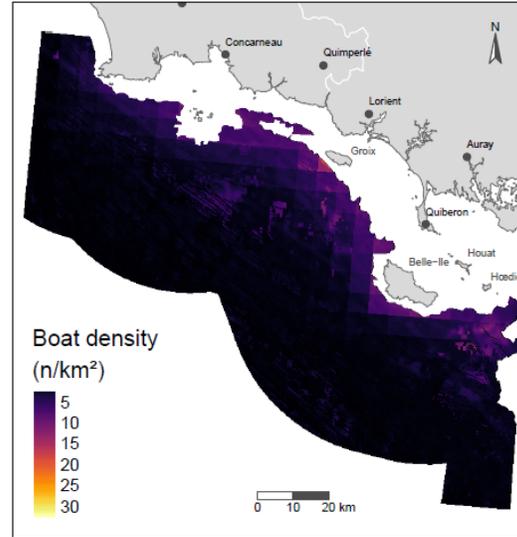
Passenger transport



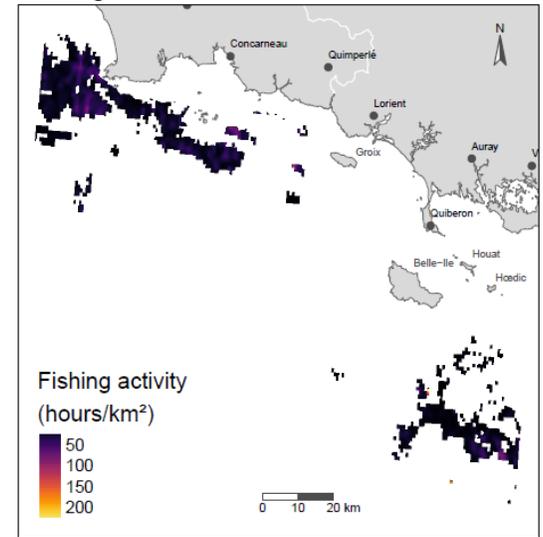
Goods transport



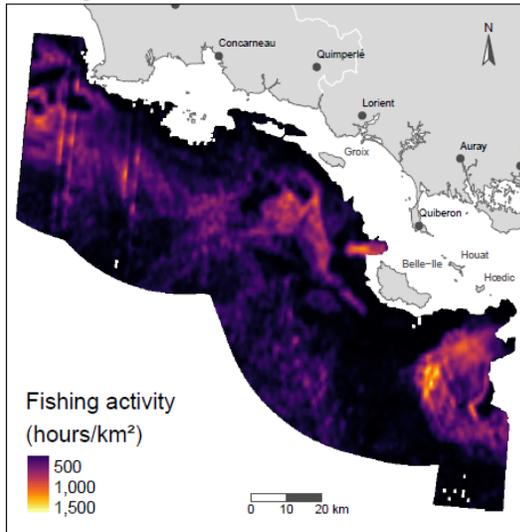
Leisure boat



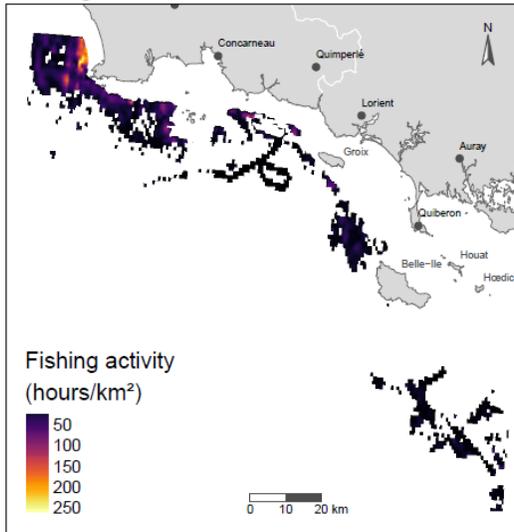
Fishing – Other Gears



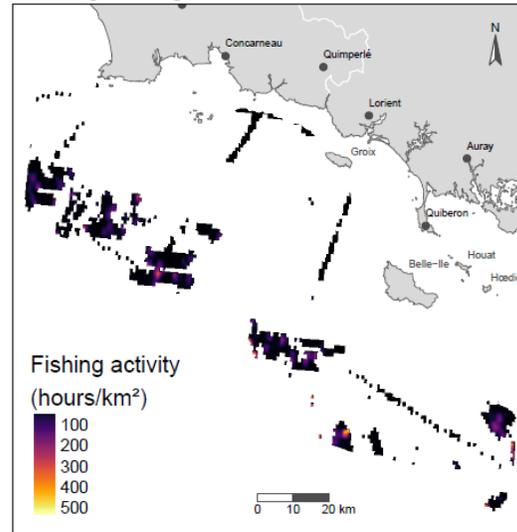
Fishing – Trawlers



Fishing – Purse Seines



Fishing – Longlines

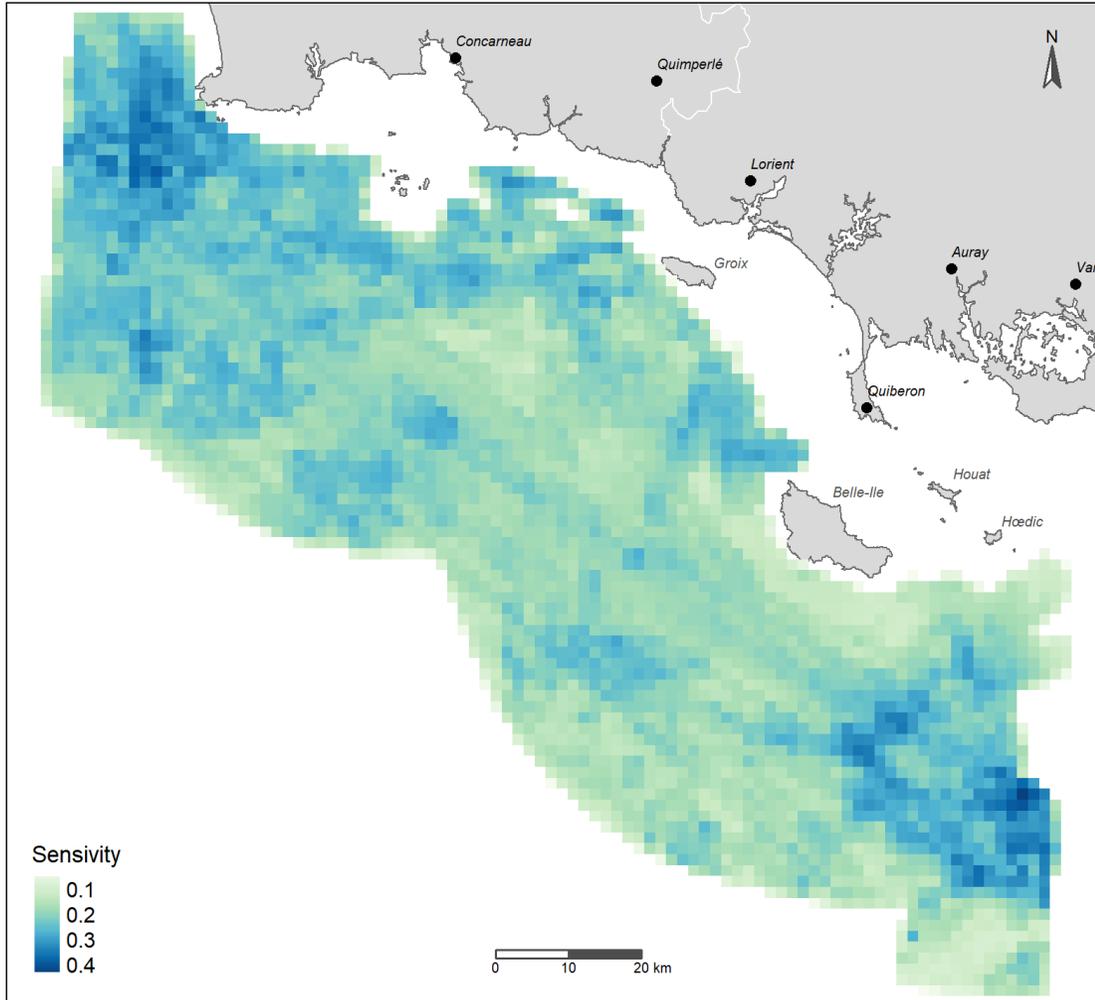


Sources:

- *MarineTraffic (2019),*
- *LETG (2020 à 2022),*
- *Global Fishing Watch (2014 à 2016)*

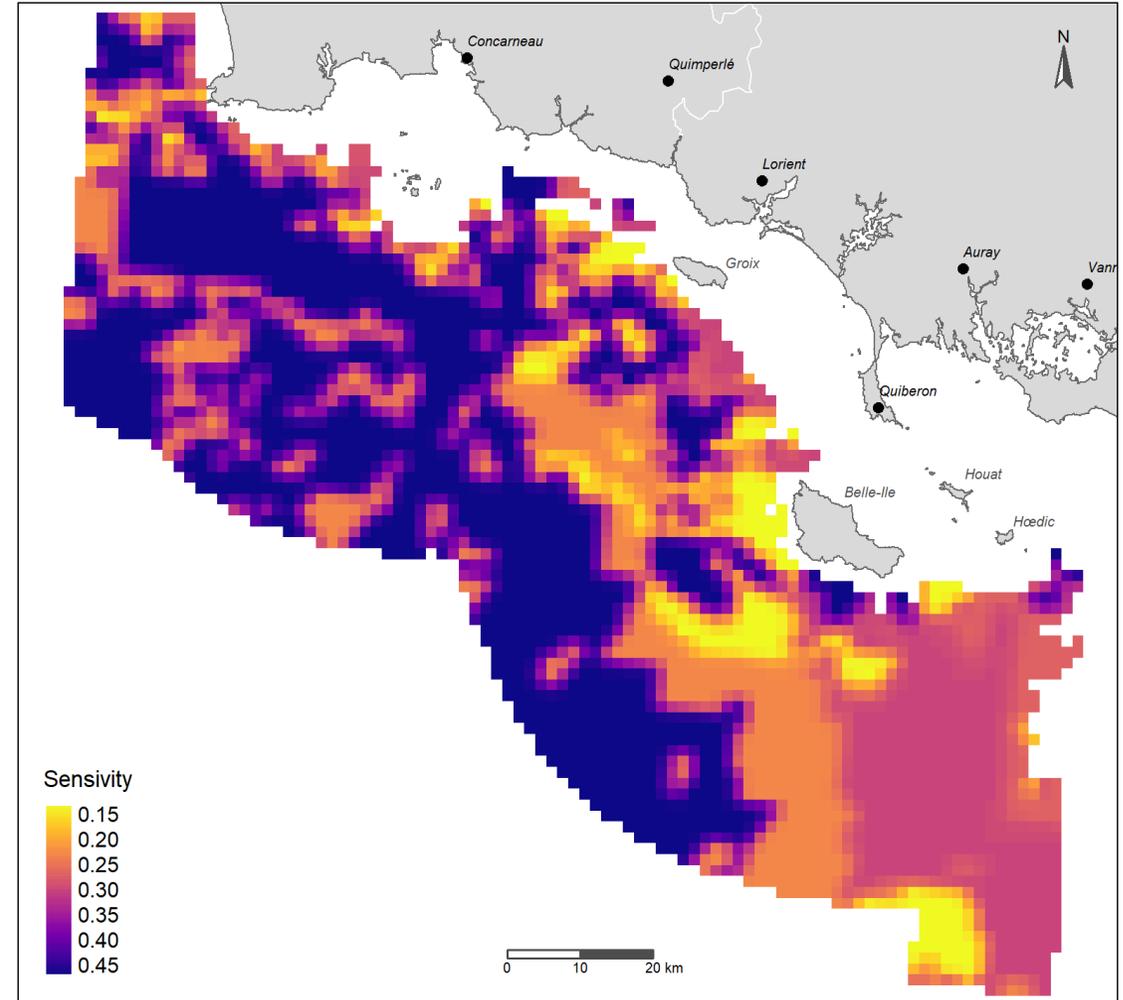
Les données de coûts

Cumulative sensitivity of anthropic receptors



7 activités / 16 triplets APR

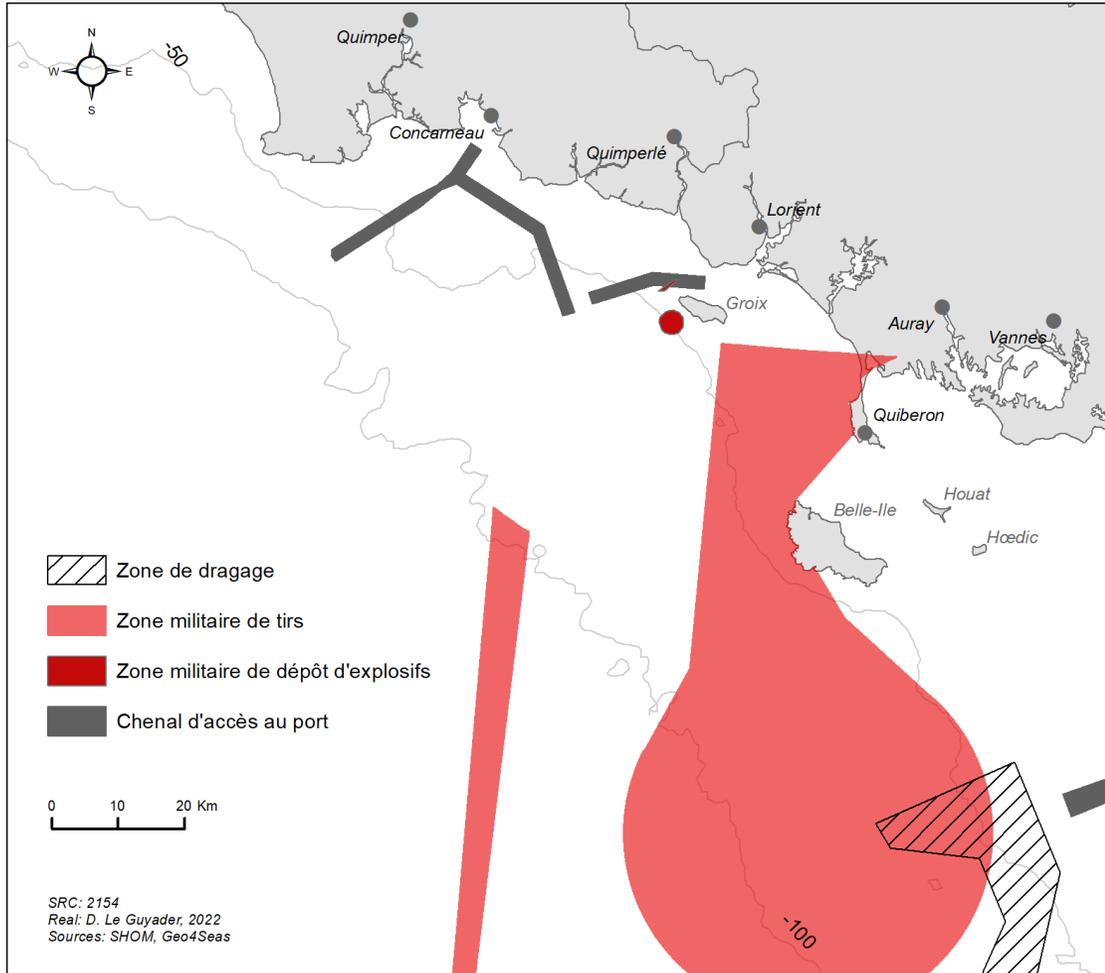
Cumulative sensitivity of environmental receptors



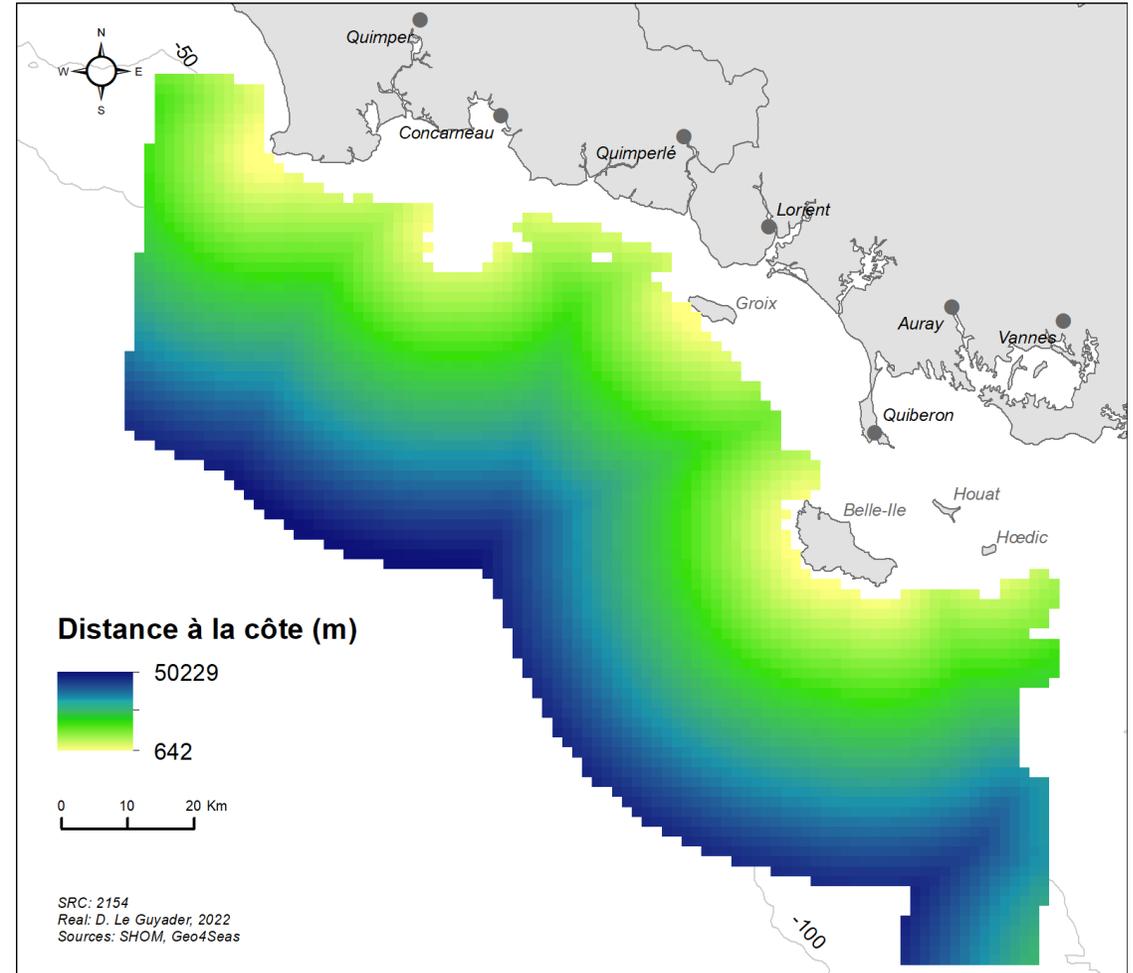
16 habitats benthiques / 94 triplets APR

Zones d'exclusion & Contraintes

Zones d'exclusion liées à la réglementation



Contrainte liée à la distance à la côte



Scénarios et modèles d'optimisation spatiale

■ Spécification des scénarios

	   Scénario A	   Scénario B	   Scénario C
Cible (Potentiel de production)	27 MW (6.75 km ²)	252 MW (63 km ²)	252 MW (63 km ²)
Activité au sein du parc	Autorisée	Autorisée	Interdite
Coût	Sensibilité cumulée <i>SC</i>		

■ Optimisation spatiale

○ *Approche comparative d'algorithmes:*

- Algorithme heuristique de recuit simulé : Marxan (Watts *et al.*, 2009)
- Algorithmes « exacts » de programmation en nombre linéaire entier (Beyer *et al.*, 2016)

○ *Ajout de contraintes topologiques*

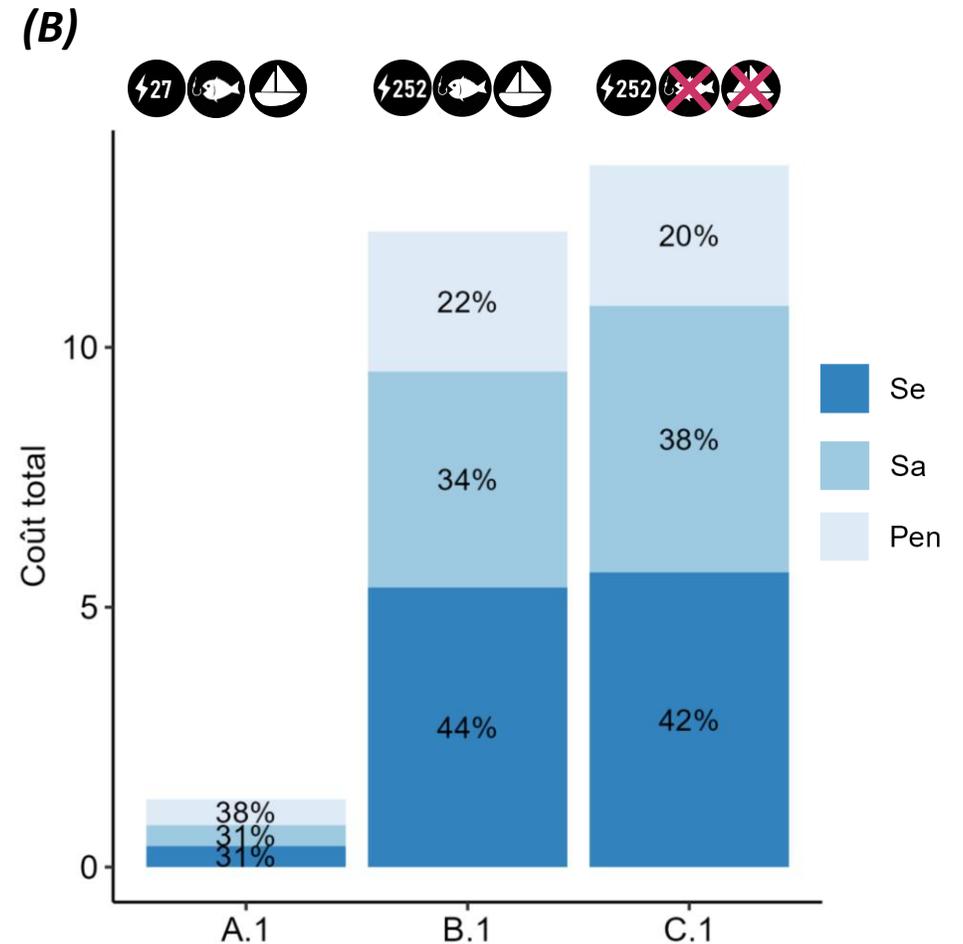
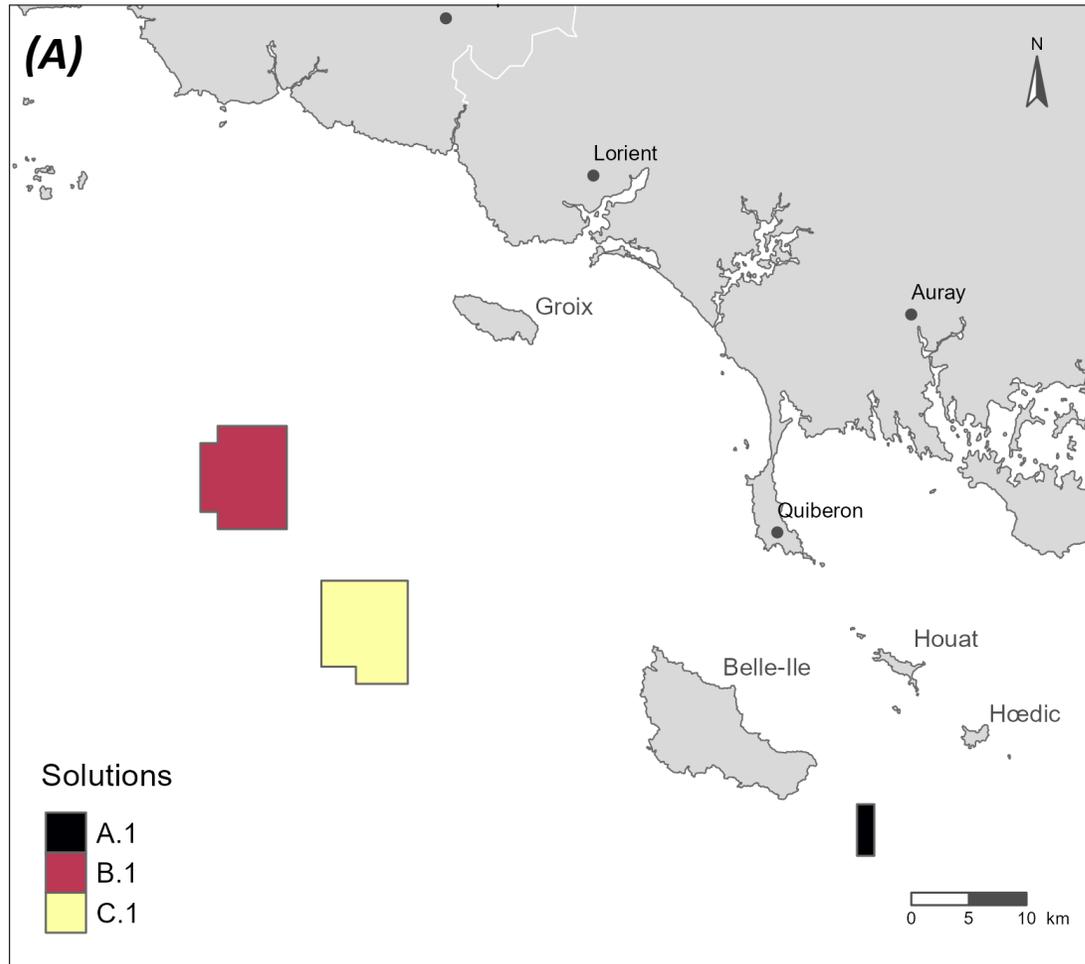
- De connectivité entre cellules sélectionnées
- De compacité de la zone (BLM)

○ *Pénalité liée à la distance à la côte*

Résultats

A light blue arrow pointing right, containing the word 'Résultats' in bold dark blue text. The arrow is centered horizontally and vertically on a solid blue background.

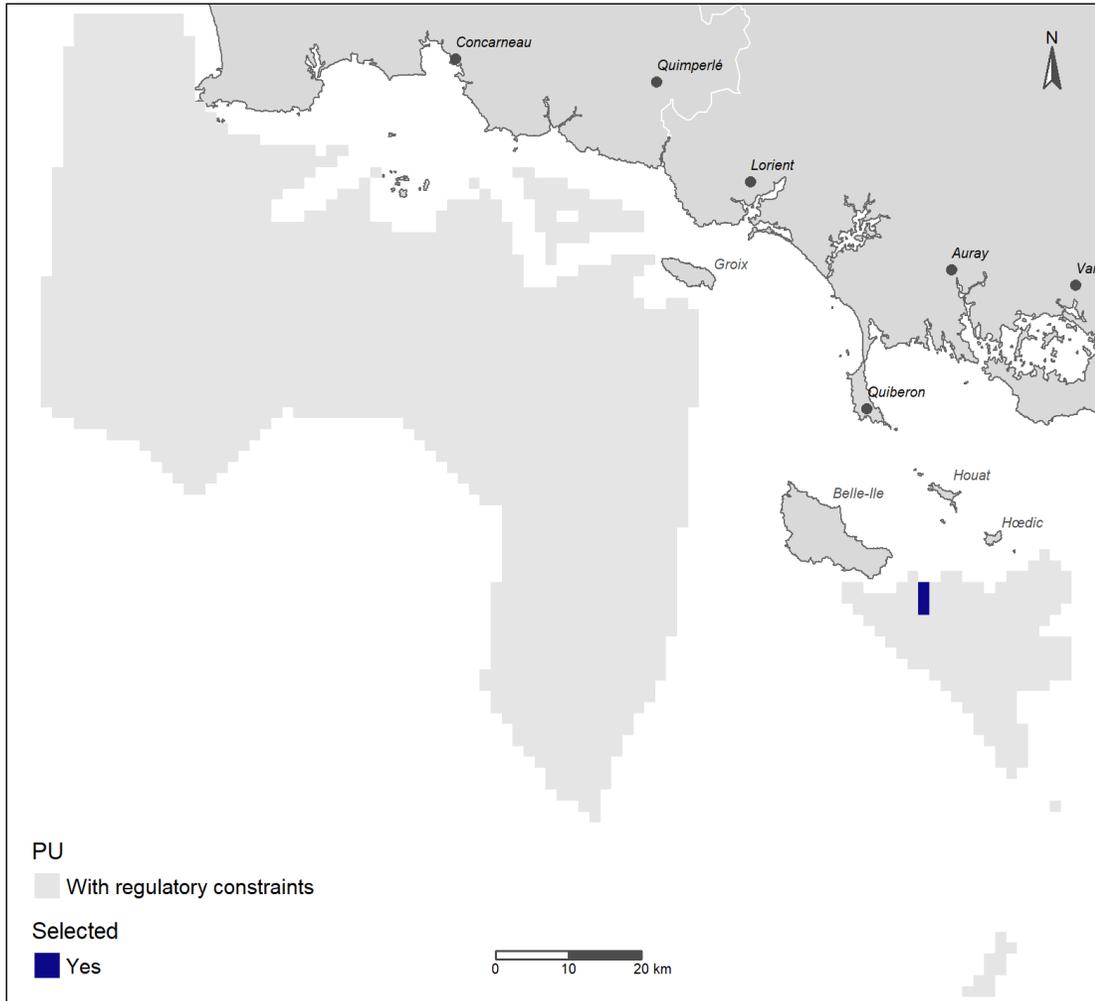
Solutions identifiées



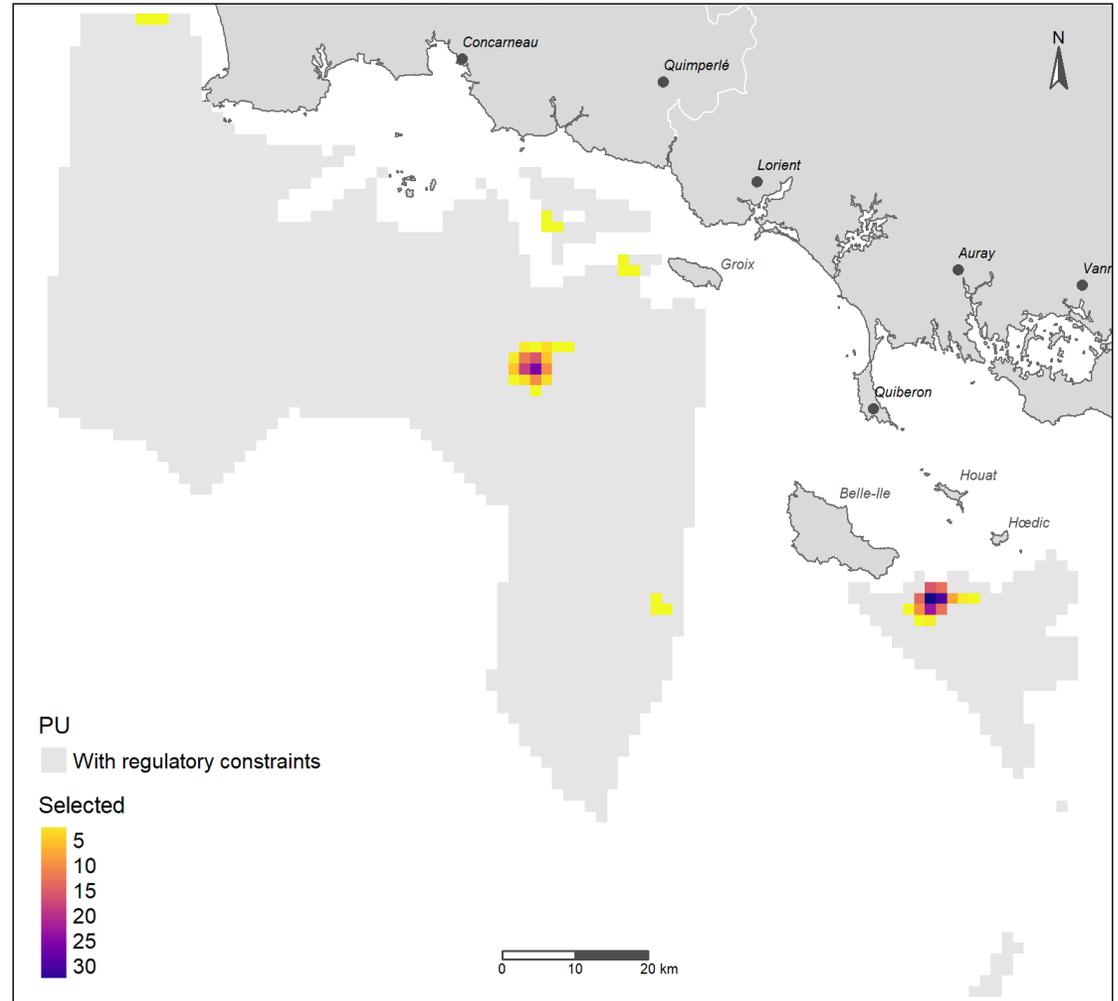
(A) Solutions optimale pour chaque scénarios ; **(B)** Répartition du coût par scénarios (Se : sensibilité cumulée des récepteurs environnementaux, Sa: sensibilité cumulée des récepteurs anthropiques, Pen: pénalités).

Solutions identifiées – Scénario A

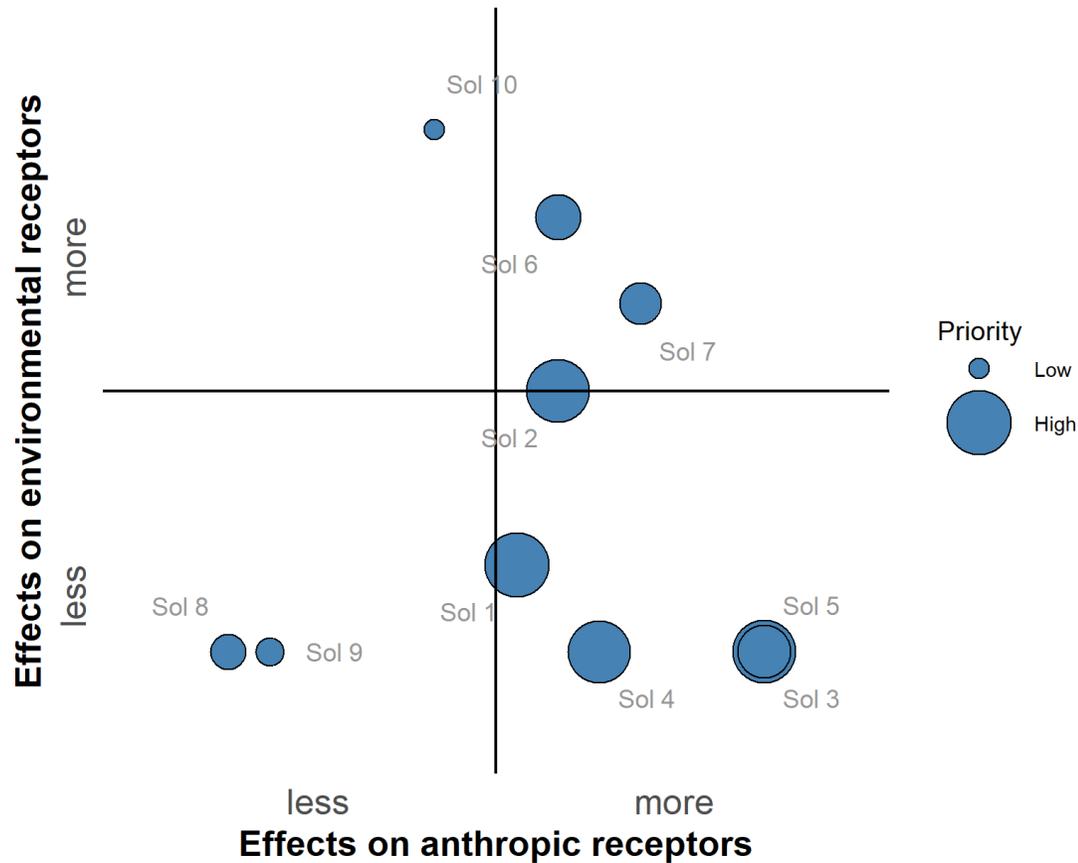
Best solution for 27 MW



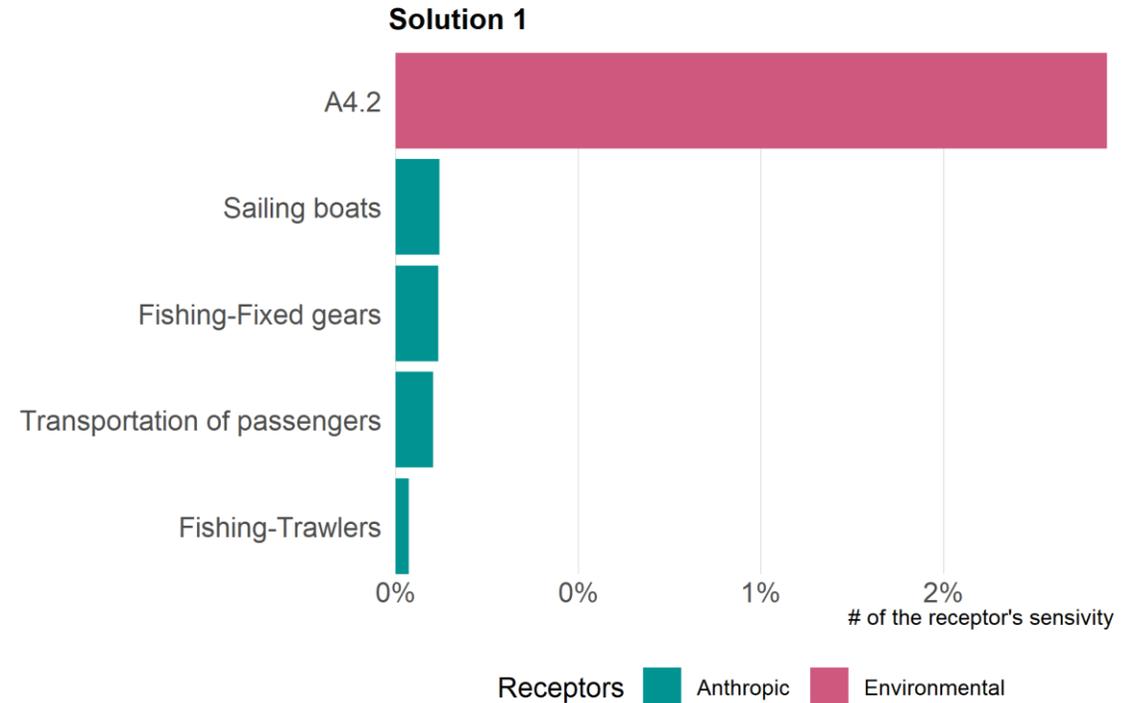
All solutions for 27 MW (rep: 100)



Solutions identifiées – Scénario A



Geo4Seas, 2022

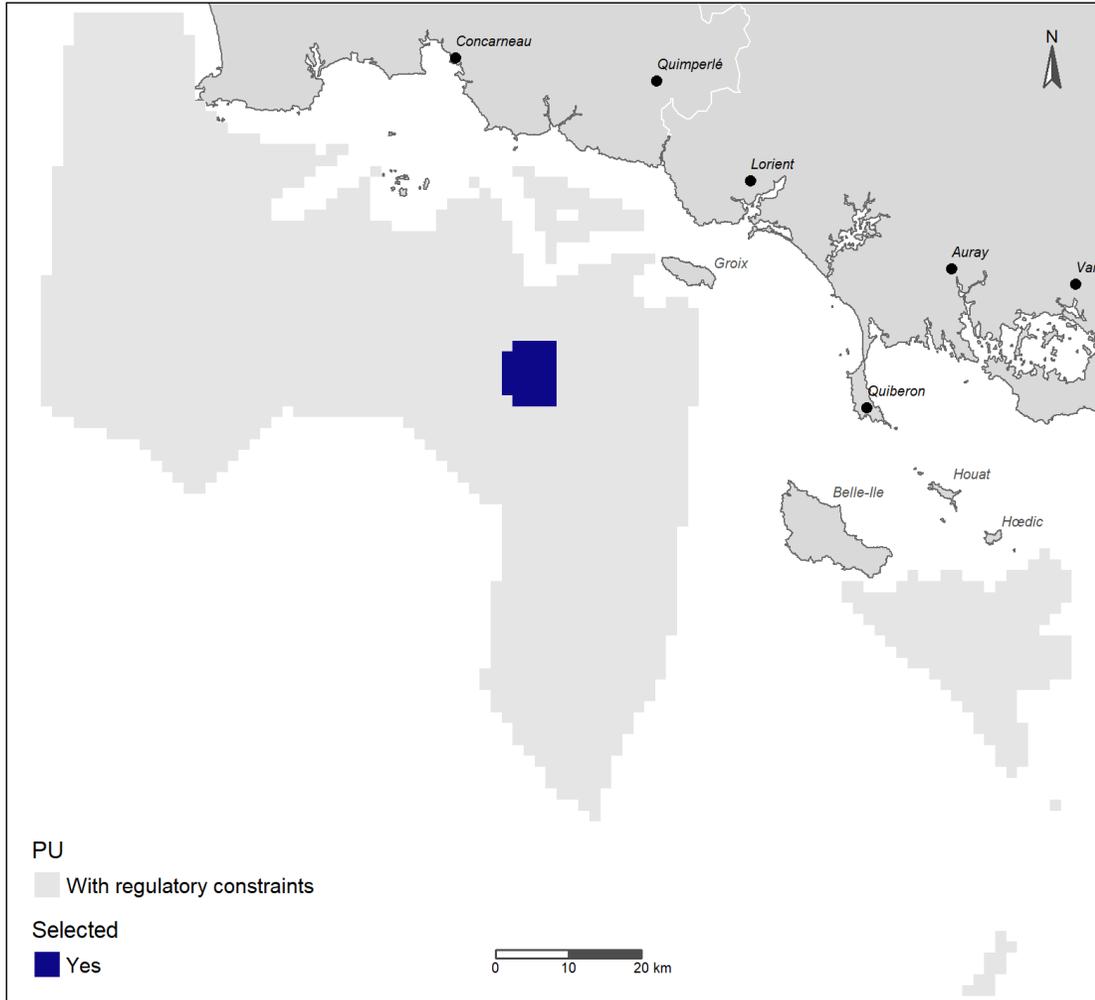


A4.2: Atlantic and mediterranean moderate energy circalittoral rock

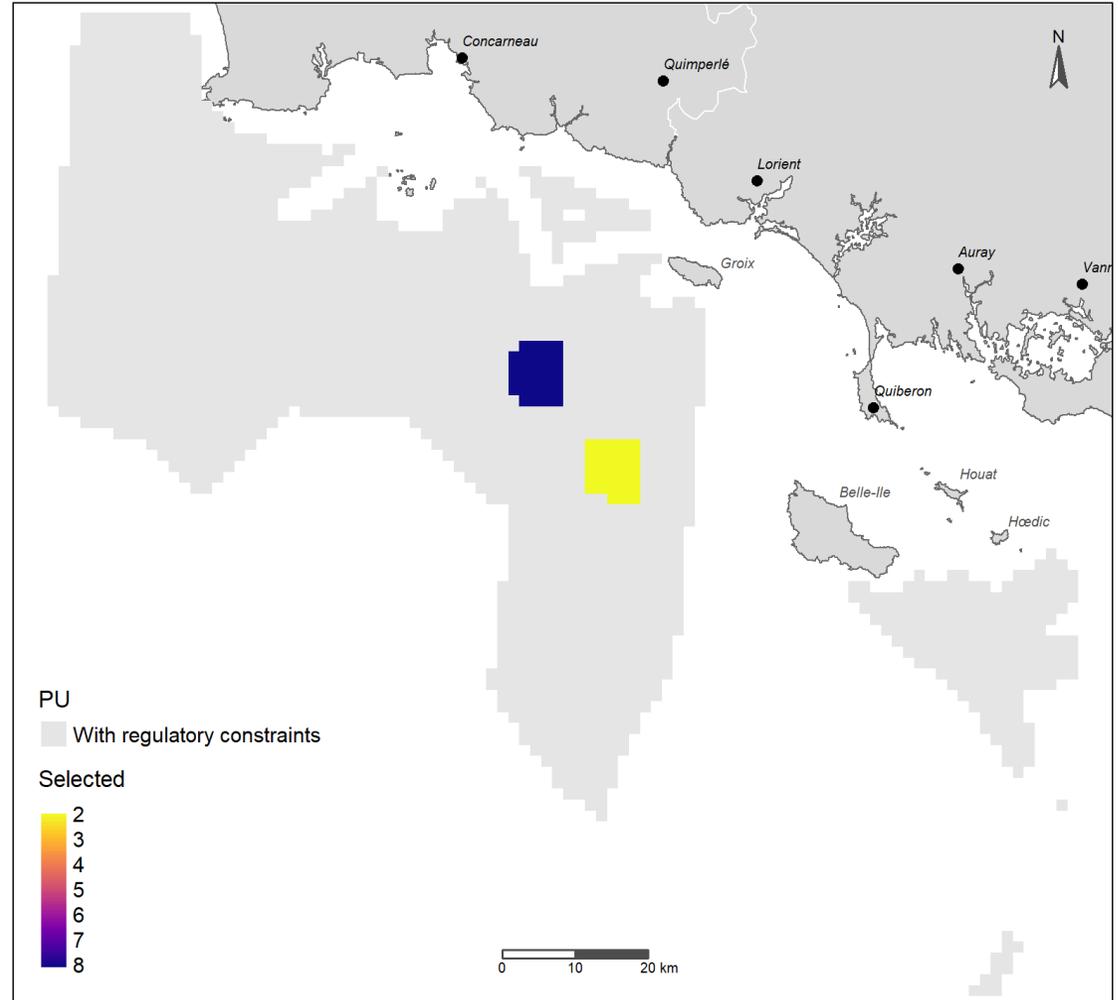
(A) Projection des solutions ($n=10$) dans l'espace des contraintes; **(B)** Effets potentiels de la solution 2 sur les récepteurs.

Solutions identifiées – Scénario B

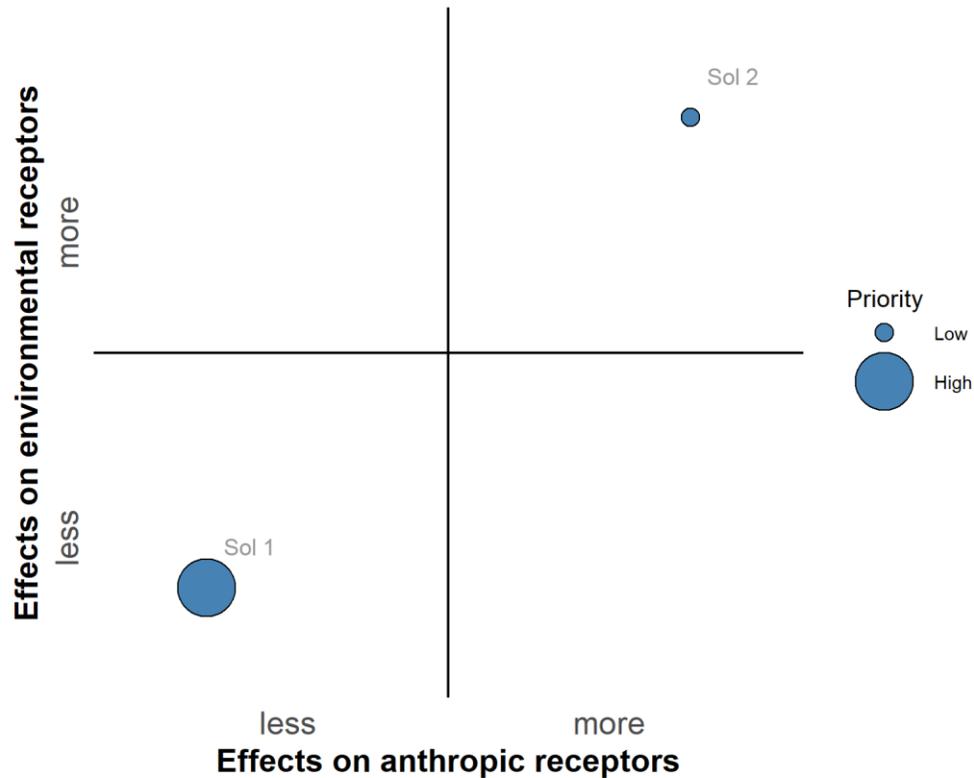
Best solution for 250 MW



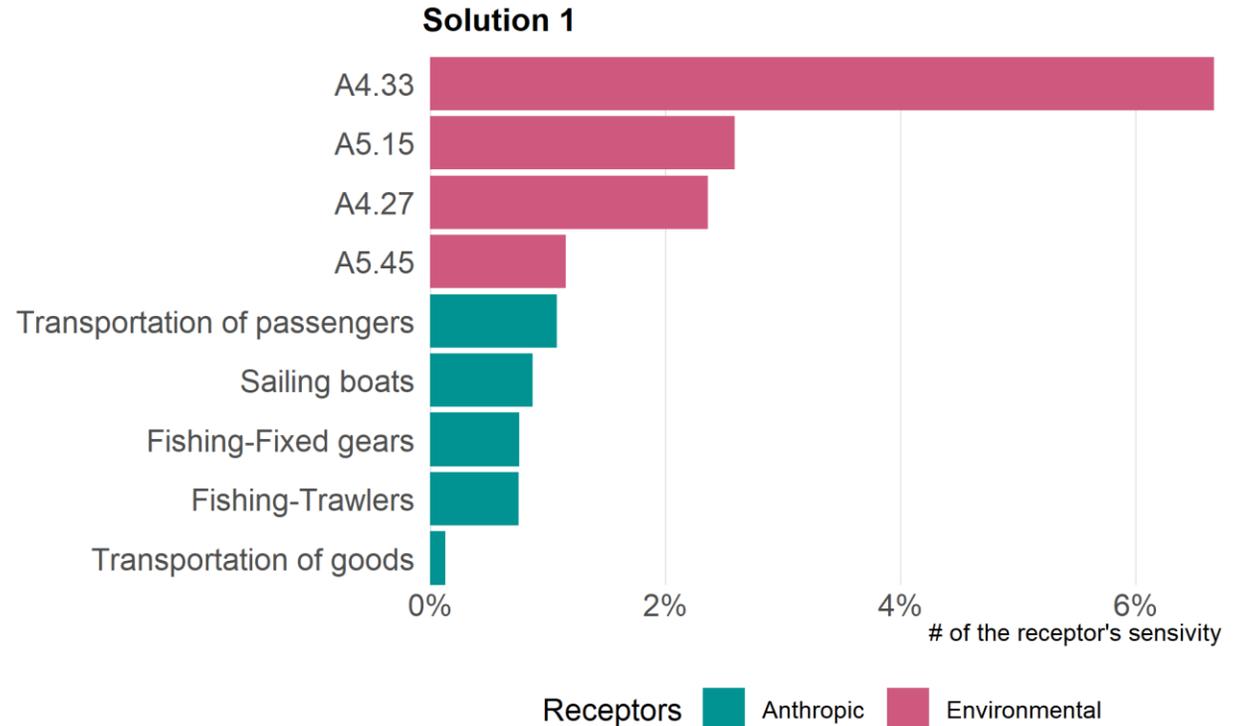
All solutions for 250 MW (rep: 10)



Solutions identifiées – Scénario B



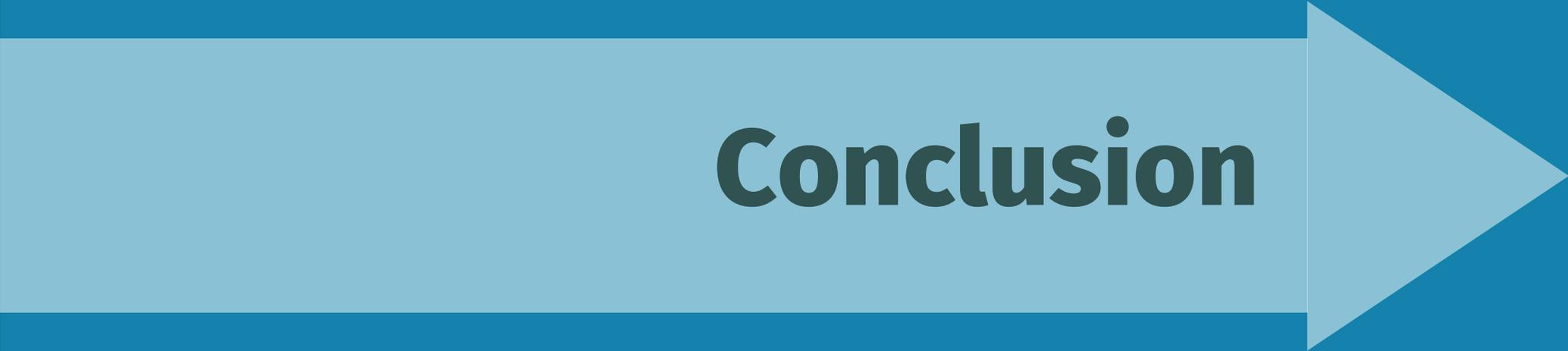
Geo4Seas, 2022



A4.33: Faunal communities on deep low energy circalittoral rock, A5.15: Deep circalittoral coarse sediment, A4.27: Atlantic and mediterranean moderate energy circalittoral rock and A5.45: Deep circalittoral mixed sediments

(A) Projection des solutions (n=2) dans l'espace des contraintes; **(B)** Effets potentiels de la solution 2 sur les récepteurs.

Conclusion

A light blue arrow pointing right, containing the word 'Conclusion' in bold dark blue text. The arrow is centered horizontally and vertically on a solid blue background.

Conclusion/Perspectives

- **Elaboration d'un prototype fonctionnel**
 - Approche potentiellement transférable;
 - Informations issues d'un processus de co-construction;
 - Simulation de scénarios et explicite les choix;
 - Ajout de contraintes supplémentaires: emplacement des stations à terre, potentiel de vent non homogène...).

- **Mais qui nécessite un socle de connaissances important**
 - Distribution des récepteurs anthropiques et environnementaux (absence de données: avifaune / non accès aux données: VALPENA ...);
 - Qualification des interactions potentielles (ateliers / entretiens demi-directifs).

- **Quel apport de la démarche dans un processus de concertation?**



Identification de zones de moindres contraintes pour les Parcs Eoliens Offshore Flottants :

Une approche par optimisation spatiale

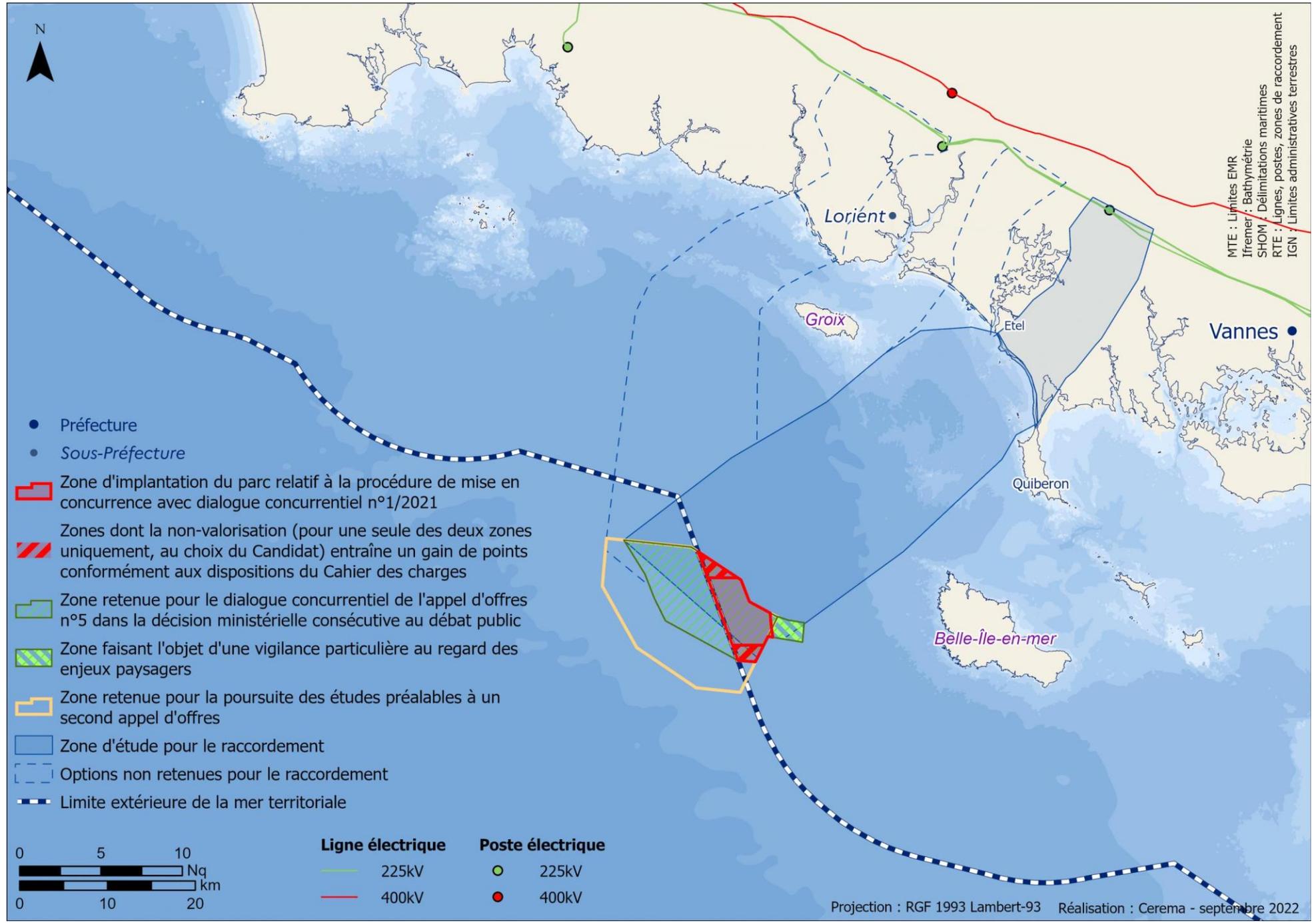
Damien Le Guyader*, Cyril Tissot**, Clara Jarry**

*Geo4Seas

** UMR LETG-Brest, UBO

Colloque merIGéo 4^{ème} édition

Le Havre - 2023-03-15



Calculs formels

Calcul de la sensibilité cumulée (SC)

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_i(x, y) \mu_{i,j}$$

Où R_i est l'intensité d'un récepteur i , et $\mu_{i,j}$ est l'indice de sensibilité de i pour chaque élément des triplets APR j .

$$SC(x, y) = med(S_a(x, y)) + med(S_e(x, y))$$

Fonction Objective à minimiser

$$TotalCost = \sum_{PUs} Cost + BLM \sum_{PUs} Boundary + \sum_{ConValue} CFPF * Penalty + ThresholdPenalty$$

Où PU : unité de planification, BLM : boundary length modifier et $CFPF$: conservation feature penalty factor

Typologie des activités

GT ECUME (2020)*

PHASE	MILIEU	ACTIVITE_N1	ACTIVITE_N2
Construction	Sous-marin	Fondations	Forage / Battage de pieux
			Dragage pour la mise en place des fondations gravitaires
			Mise en place de la couche d'assise
	Sous-marin	Poste électrique	Mise en place des protections anti-affouillement
			Forage / Battage de pieux
			Installation de la sous-station
	Sous-marin	Câble	Tranchage / Ensouillage
			Pose d'enrochement
Fondations			
Interface	Transport	Structure	
Aérien	Eolienne	Poste électrique	
		Installation de l'éolienne	
Aérien	Eclairage	Eclairage - construction	
Fonctionnement	Sous-marin	Fondations	Anodes sacrificielles
			Fondations
	Sous-marin	Poste électrique	
	Sous-marin	Câble	
Interface	Navigation		
Aérien	Rotation des pâles		
		Eclairage	
		Poste électrique	
		Mât	
Démantèlement	Sous-marin	Fondations	Démolition
			Dragage pour enlever les éléments au fond
	Sous-marin	Poste électrique	Démantèlement
	Sous-marin	Câble	Enlèvement
Interface	Transport	Transport des morceaux de structure et fondations	
Interface	Démantèlement		
Aérien	Eclairage		

*Typologie du GT Ecume simplifiée

Typologie des activités liées à l'éolien flottant*

PHASE	MILIEU	ACTIVITE_N1	ACTIVITE_N2
Construction	Sous-marin	Ancres et lignes d'ancrage	
		Câble	Tranchage / Ensouillage Pose d'enrochement
		Poste électrique	Forage / Battage de pieux Installation de la sous-station
	Interface	Transport	Transport des éléments de structure, des ancres et lignes d'ancrage et poste électrique
	Aérien	Structure Eclairage	
Fonctionnement	Sous-marin	Ancres et lignes d'ancrage	
		Anodes sacrificielles	
		Câble	
	Interface	Poste électrique	
		Navigation	
	Aérien	Rotation des pâles	
Eclairage			
Poste électrique			
Démantèlement	Sous-marin	Mât	
		Ancres et lignes d'ancrage	
		Câble	
	Interface	Poste électrique	
		Structure	Démantèlement des éoliennes
		Transport	Transport des éléments de structure, des ancres et lignes d'ancrage
		Aérien	Eclairage

*Typologie adaptée des travaux du GT Ecume

Typologie des pressions

GT ECUME (2020)*

PRESSIONS_N1	PRESSIONS_N2
Pressions physiques	Perte d'un habitat
	Changement d'habitat
	Extraction de substrat
	Abrasion
	Dépôt de matériel
	Modif. des cond. hydrodynamiques
	Modif. de la charge en particules
	Modif. de la température
	Emissions sonores
	Emissions électromagnétiques
Emission de lumière	
Pressions chimiques	Métaux synthétiques et non synthétiques
	Composés organiques et non synthétiques
	Autres substances chimiques (solides, liquides, gazeuses)
	Enrichissement organique
	Hypoxie
Pressions biologiques	Introduction d'individus génétiquement différents d'espèces indigènes
	Introduction ou propagation d'espèces non indigènes
	Collisions
	Obstacle au mouvement, à l'alimentation, au repos, à la mue (entraînant une perte d'habitat fonctionnel)
Dérangement lié à la fréquentation humaine (perturbations sonores exceptées)	

*Typologie du GT Ecume simplifiée

Effets cumulés

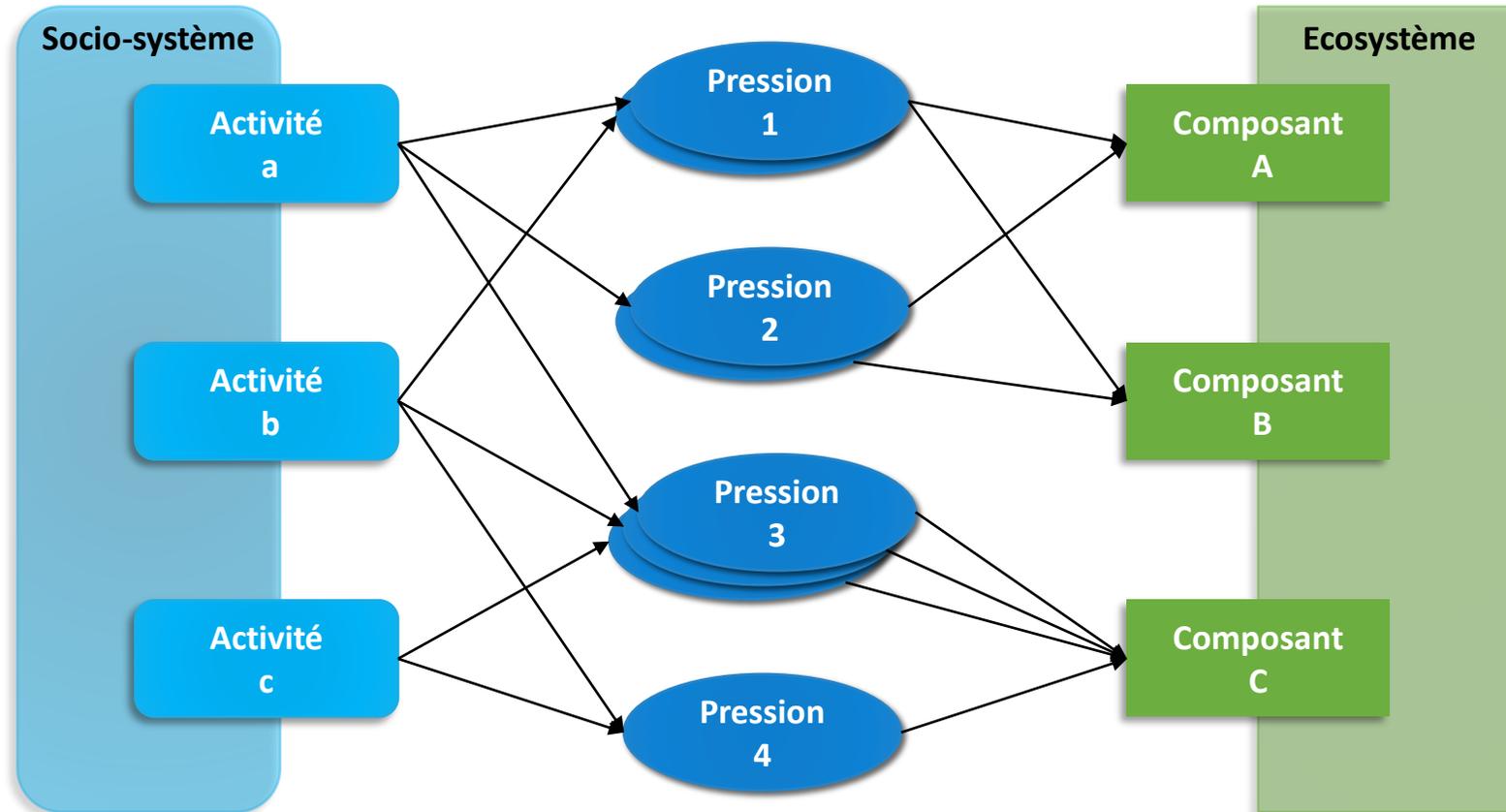
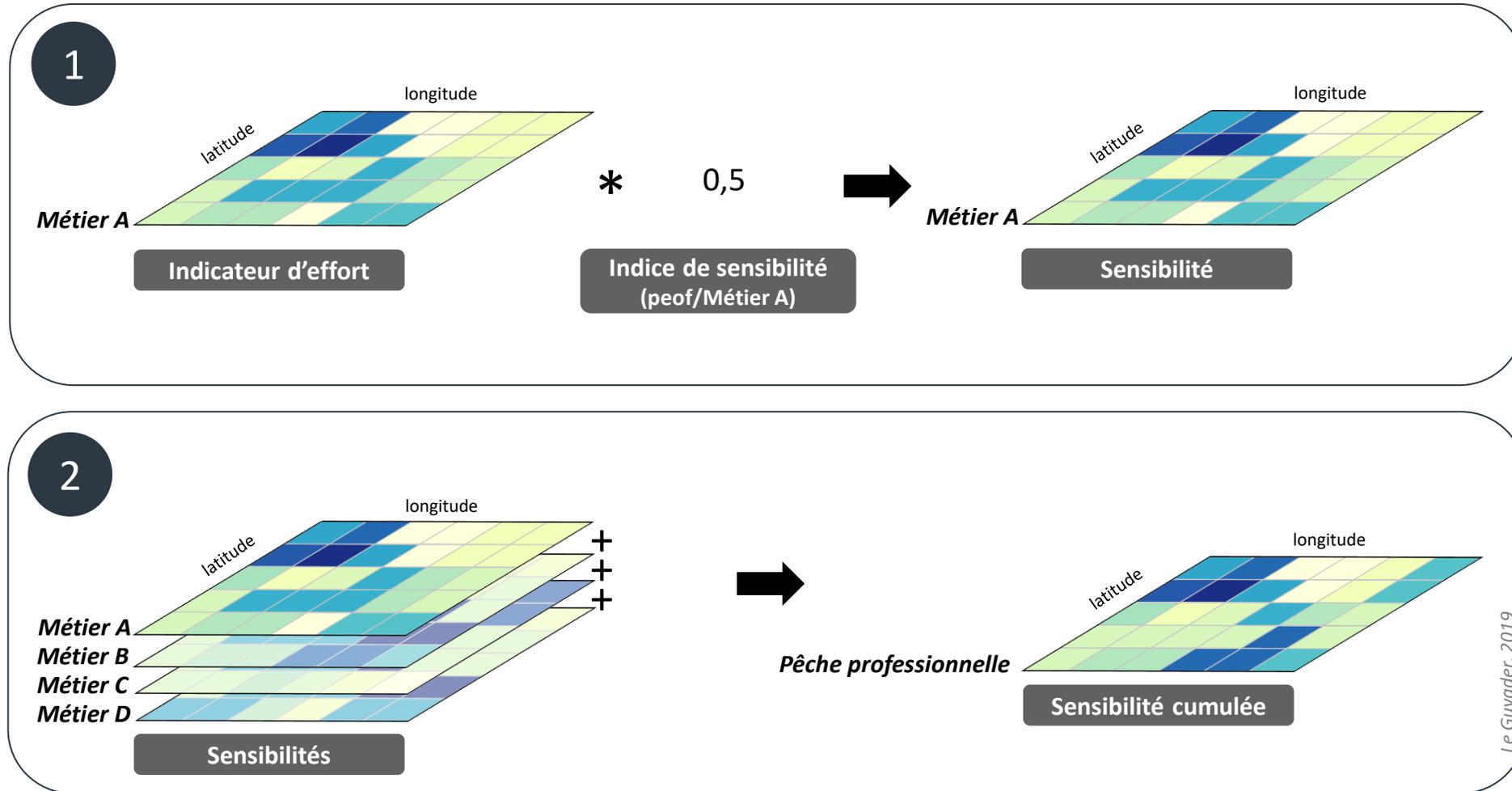


Schéma conceptuel des interactions potentielles

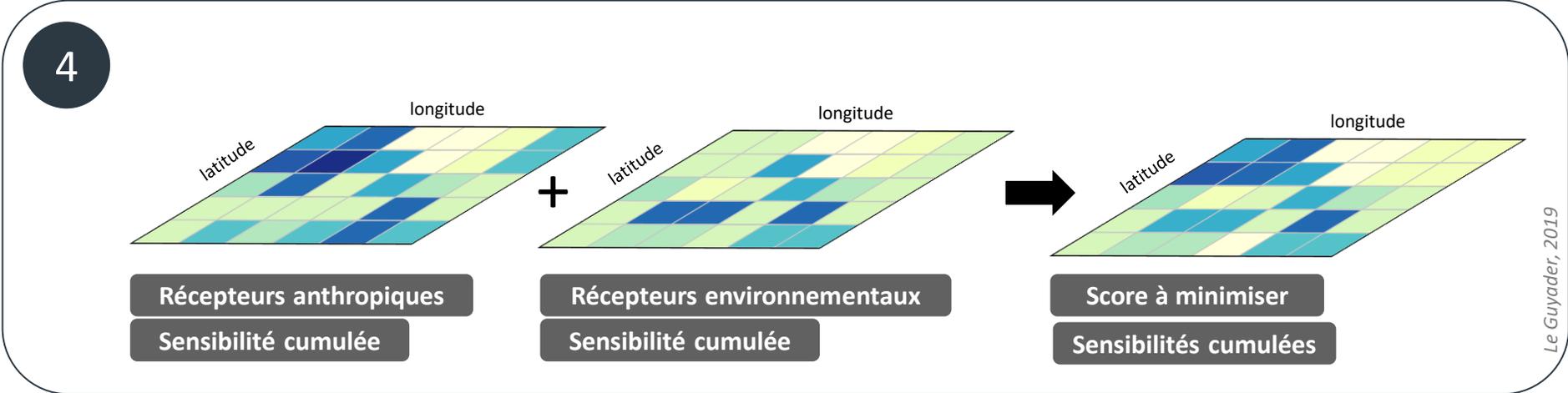
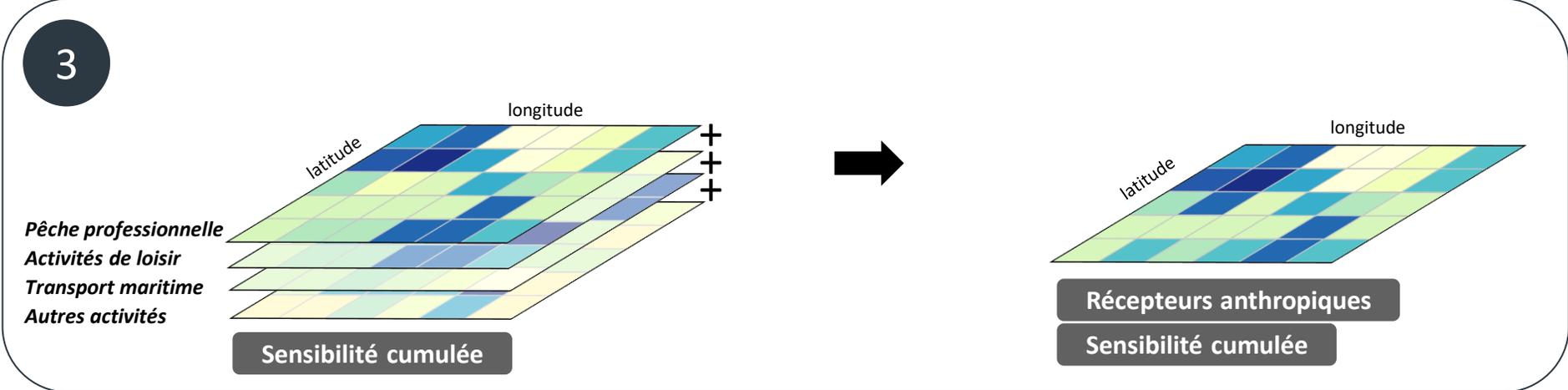
Le Guyader, d'après Vries *et al.* (2011)

Elaboration des sensibilités cumulées: principe



Indices de sensibilité définis selon les critères proposés par La Rivière *et. al* (2016).

Elaboration des sensibilités cumulées: principe



Co-construction des indices de sensibilité

Echelle qualitative de résistance d'un habitat à une pression

Aucune	Faible	Modérée	Haute
Destruction de l'habitat	Dégradation sévère de l'habitat	Modification notable	Pas de modification notable
Perte totale de ses caractéristiques biotiques et abiotiques (ex. : disparition d'espèces clés, disparition du substrat)	Perte majeure des caractéristiques biotiques et abiotiques (ex. : dégradation importante du substrat) de l'habitat pouvant entraîner une modification du type d'habitat.	Modification notable des caractéristiques biotiques et abiotiques (ex.: déclin des espèces clés, dégradation du substrat) de l'habitat	Pas de modification notable des caractéristiques biotiques et abiotiques de l'habitat
La perte peut par exemple se traduire par une réduction quasi-totale de la surface de recouvrement, de la densité ou de l'abondance des espèces clés ou caractéristiques.	La perte peut par exemple se traduire par une diminution de la surface de recouvrement, de la densité, de l'abondance dans des proportions moindres.	sans risque de changement du type d'habitat.	Certains processus biologiques comme par exemple la nutrition, la respiration ou le taux de reproduction peuvent être perturbés, mais la viabilité des populations d'espèces clés n'est pas affectée.

Co-construction des indices de sensibilité

Echelle semi-quantitative de **résilience** d'un habitat affecté par une pression

Aucune	Faible	Modérée	Haute	Très haute
> 25 ans	10-25 ans	2-10 ans	1-2 ans	< 1 an

Indice de sensibilité pour les récepteurs sociaux

Quelle est la sensibilité d'une activité A au regard de la pression d'occupation de l'espace exercée par les PEOF ?



- Construction en adaptant l'indice de La Rivière *et al.* (2016)
- Prise en compte de 3 critères:
 - 1) L'activité peut-elle **s'exercer au sein** d'un Parc?
 - 2) L'activité peut-elle **s'exercer dans d'autres zones** qu'actuellement? (Quel est le potentiel de report de l'activité dans d'autres zones?)
 - 3) L'activité peut-elle **se diversifier** (modification d'activité)?

Indice de sensibilité pour la pêche professionnelle (1)

L'activité peut-elle s'exercer au sein d'un parc ?

	Pas du tout	Avec contraintes majeures	Avec contraintes modérées	Avec contraintes mineures	Tout à fait
Engin A					

*Contraintes fortes : données spatialisées très lacunaires (nature et typologique)

Indice de sensibilité pour la pêche professionnelle (2)

L'activité peut-elle s'exercer dans d'autres zones qu'actuellement? (Quel est le potentiel de report de l'activité dans d'autres zones?)

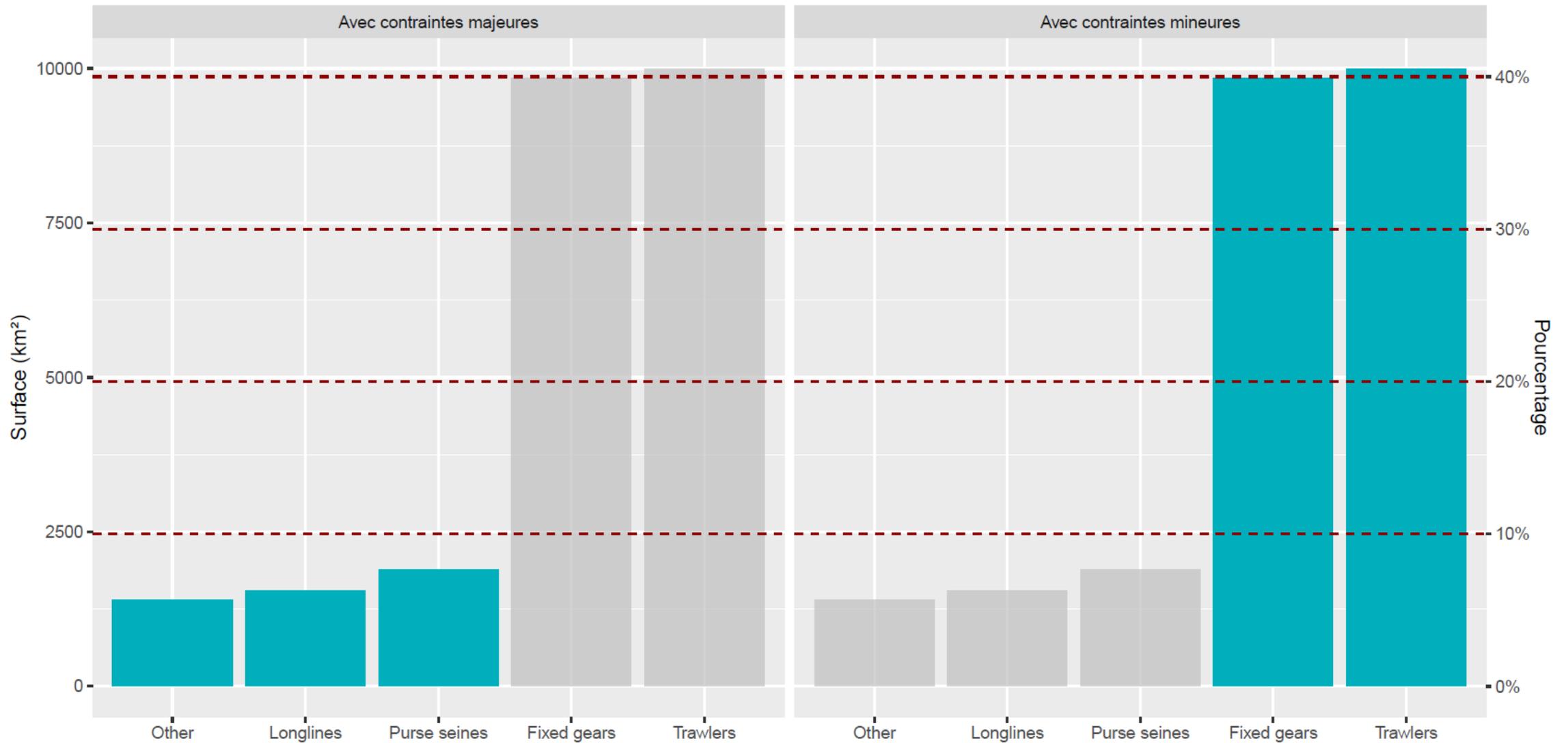
- Identification à dire d'acteur complexe -> requiert la spécification spatiale
- Autres sources:
 - ~~VALPENA~~ -> ~~indicateur de dépendance économique~~
 - Analyse spatiale ->
 - Hypothèse: « *plus la zone de pêche pratiquée par un engin a une emprise spatiale importante, plus son potentiel de report est élevé* ».

Indice de sensibilité pour la pêche professionnelle (2)

Quel est le potentiel de report de l'activité?

	Aucun	Avec contraintes majeures	Avec contraintes modérées	Avec contraintes mineures	Complet
Engin A					

Indice de sensibilité pour la pêche professionnelle (2)



Indice de sensibilité pour la pêche professionnelle (3)

L'activité peut-elle se diversifier (modification partielle de l'activité)?

- L'évaluation de la capacité d'adaptation dépend de nombreux critères à l'échelle individuelle (capital physique, humain, social, économique...):

-> non applicable dans le cadre du projet.

-> **Estimation simplifiée** en se basant sur la capacité potentielle d'une flottille à pouvoir pratiquer d'autres engins:

Les unités de pêche de l'activité A peuvent elles pratiquer d'autres engins?

	Pas du tout	Avec contraintes majeures	Avec contraintes modérées	Avec contraintes mineures	Tout à fait
Engin A					

