

Table ronde 2 (1) :

Impacts, effets des parcs éoliens : le vrai, le faux et les incertitudes

Courants et sédiments - Biofouling et corrosion

Câbles sous-marins





- 
- ✓ Professeure, enseignante-chercheuse au laboratoire **M2C** (Morphodynamique Continentale et Côtière), **Université de Caen Normandie**
 - ✓ Spécialisée dans l'océanique côtier et dans le développement des énergies marines renouvelables



- ✓ Professeur, directeur de **LUSAC (Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg)**, Université de Caen Normandie
- ✓ Spécialisé dans la physique numérique, la dynamique des fluides et géophysique



- ✓ Chargé de recherche à **France Énergies Marines**
- ✓ Biologiste marin, cadre de recherche en approche écosystémique



- ✓ Directeur chez **Corrodys**, Centre technique en corrosion, corrosion marine et biocorrosion, Cherbourg
- ✓ Expertise pluridisciplinaire avec actuellement des travaux sur l'hydrolien



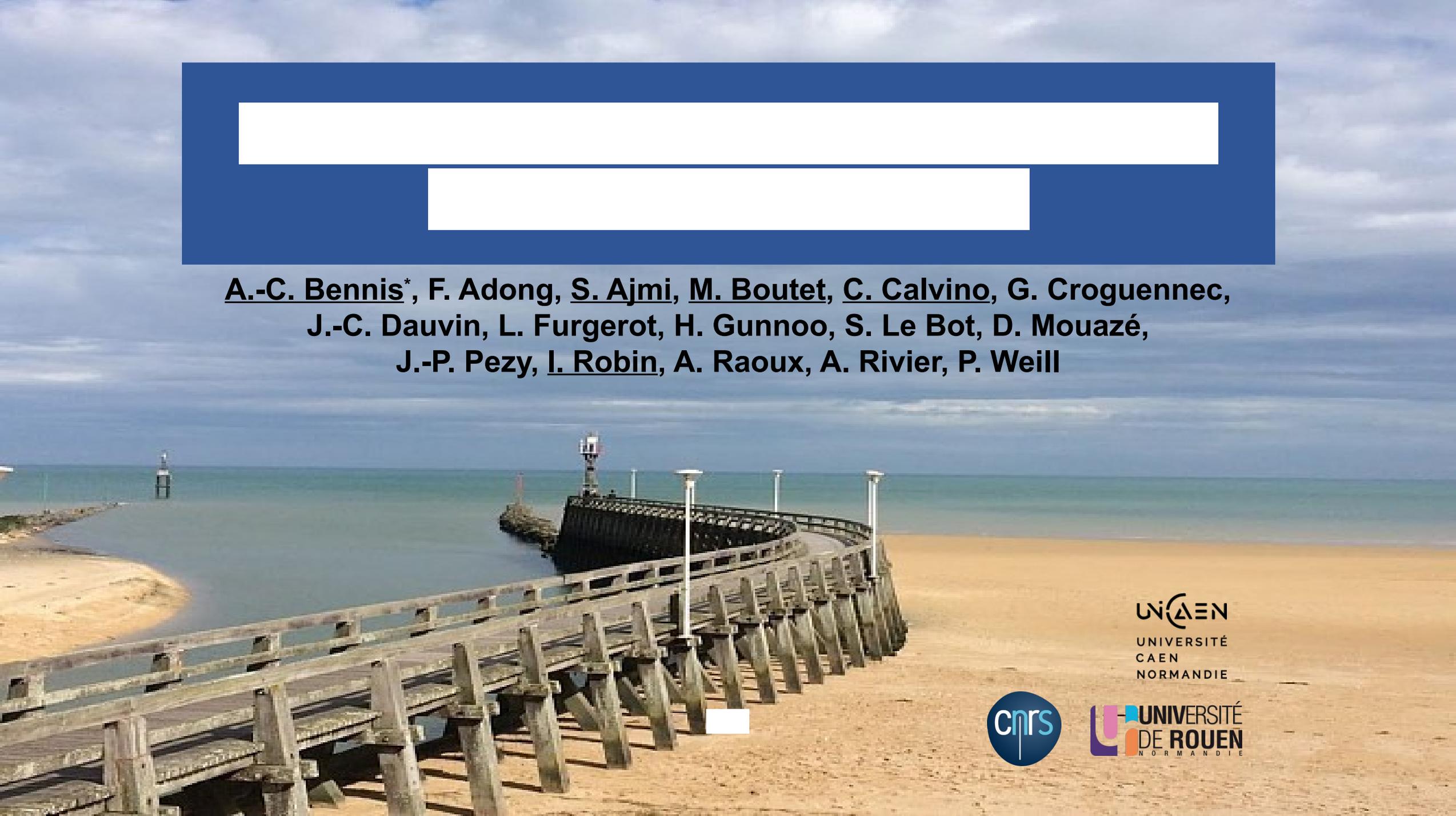
✓ Chercheur, Laboratoire d'écologie benthique côtière,
IFREMER, Brest

✓ Projet **SPECIES** sur l'interaction des câbles sous-marins avec l'environnement et suivis associés

✓ Chargé d'affaires environnement et concertation
marin, **RTE**

✓ Pilotage des études environnementales pour le
développement de liaisons sous-marines





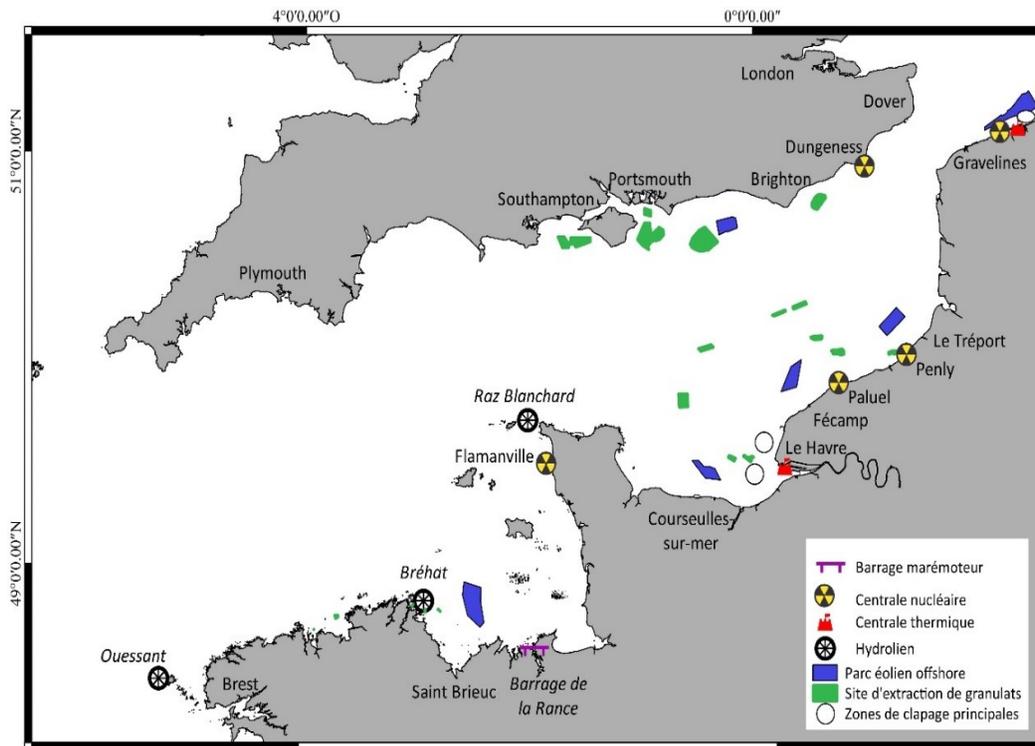
A.-C. Bennis*, **F. Adong**, **S. Ajmi**, **M. Boutet**, **C. Calvino**, **G. Croguennec**,
J.-C. Dauvin, **L. Furgerot**, **H. Gunnoo**, **S. Le Bot**, **D. Mouazé**,
J.-P. Pezy, **I. Robin**, **A. Raoux**, **A. Rivier**, **P. Weill**

UNICAEN
UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



UNIVERSITÉ
DE ROUEN
NORMANDIE

Sites d'études et activités de recherche EMR



D'après Pezy, 2020

1. Impact des **éoliennes en mer** :

* sur la **biodiversité**

- Effet récif
- Approche et modélisation écosystémique

* sur la dynamique **hydro-sédimentaire**

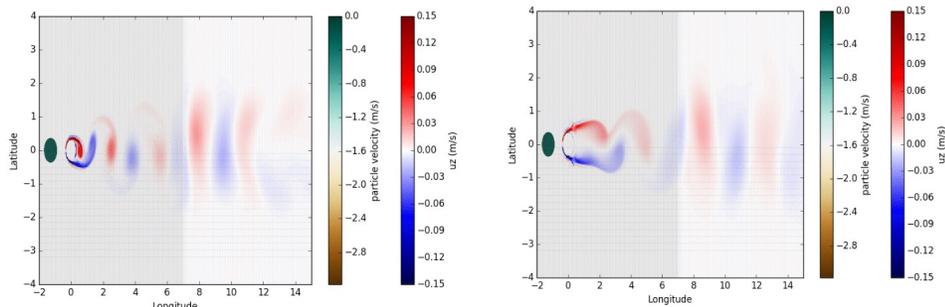
2. Caractérisation de la **ressource hydrolienne** dans le Raz Blanchard :

- **Cisaillements** horizontaux et verticaux de **courant**
- **Etats de mer**
- Impact des **interactions hydrodynamiques** (vagues-courant-turbulence) sur le productible hydrolien
- Impact du **biofouling**

+ caractérisation du **benthos** et de la **dynamique sédimentaire**

Impacts des fondations éoliennes sur la dispersion larvaire

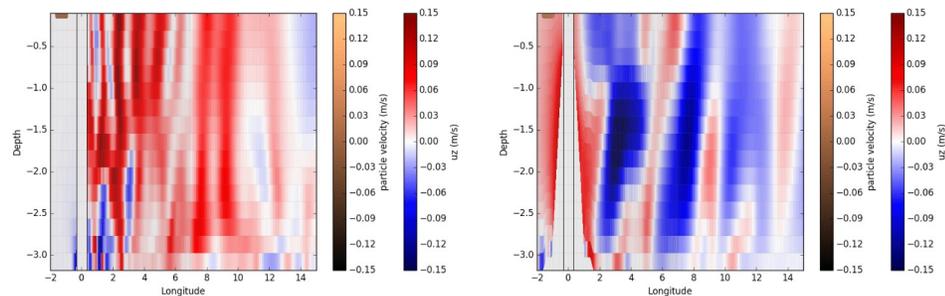
Thèse de **S. Ajmi** (2020-2023) : Rôle des parcs éoliens en mer en baie de Seine étendue sur la dispersion larvaire et la connectivité



Monopieu

Gravière

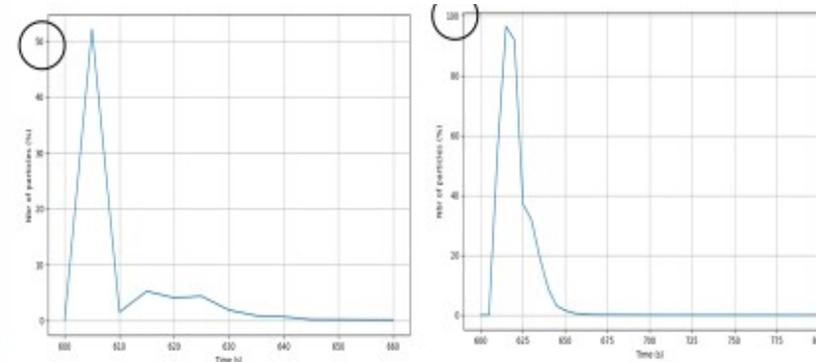
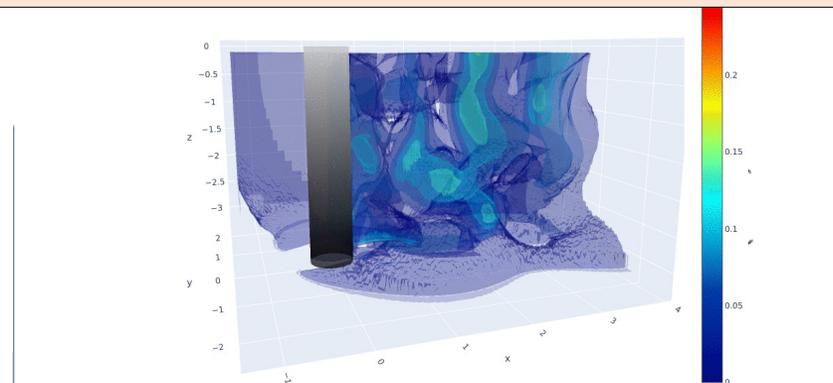
Visualisation sur la surface : vorticité avec la profondeur des particules



Monopieu

Gravière

Coupe sur la verticale : vitesse verticale U_z avec la vitesse des particules



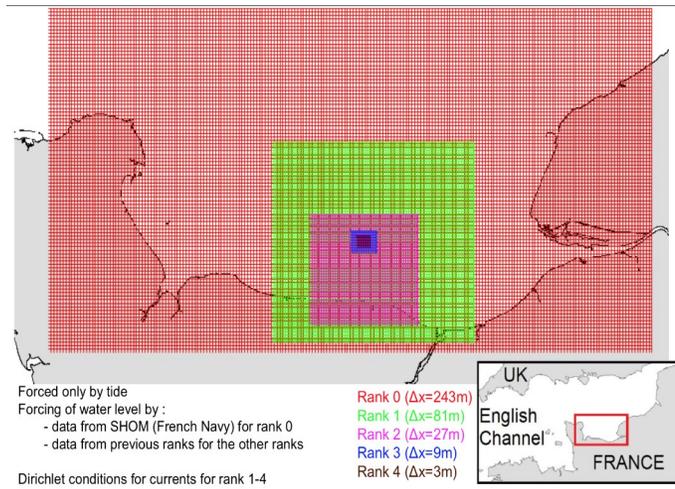
Monopieu

Gravière

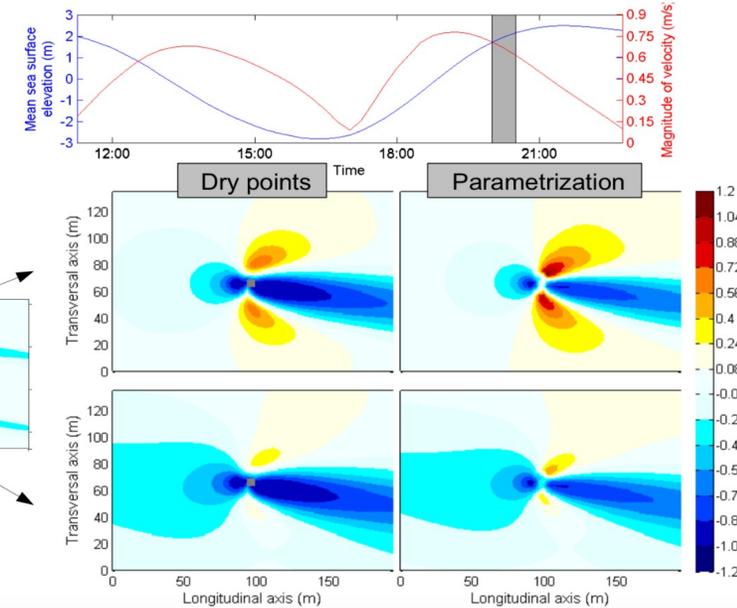
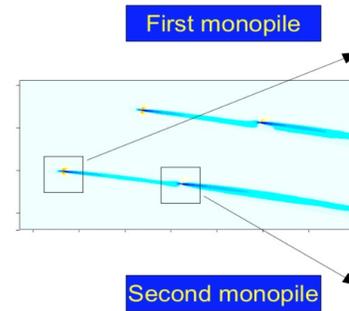
Temps de rétention des particules

Impacts des fondations éoliennes sur la dynamique hydro-sédim.

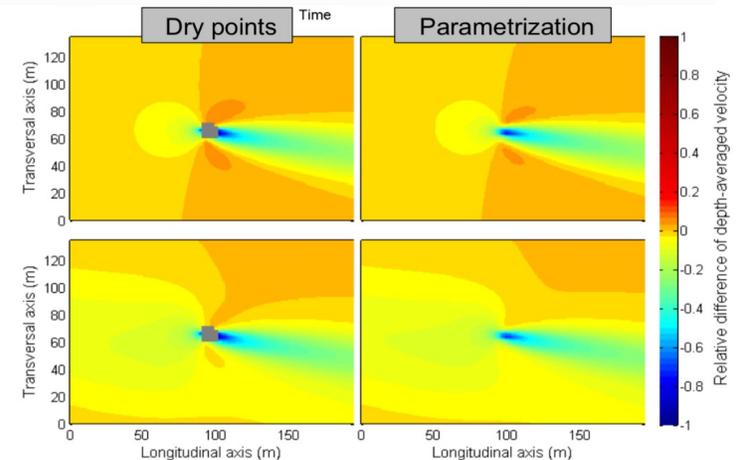
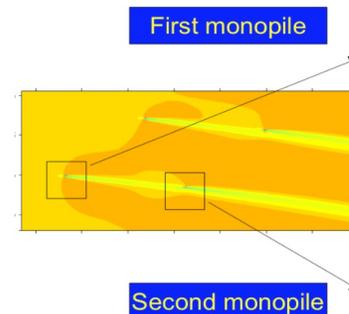
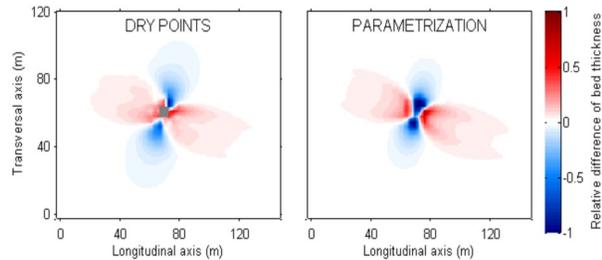
Post-doctorat de **A. Rivier** (2014-2015) : Paramétrisation de l'effet sur l'environnement hydro-sédimentaire des fondations éoliennes de type monopieu. Application au parc de Courseulles s/mer.



Relative difference of suspended sediment concentration near-bed



Relative difference of bed thickness after one tidal cycle around the first monopile



Projet Interreg Iva France-Angleterre OFELIA



Colloque Environnement –Eolien en mer, Cherbourg le 5 mai

LUSAC – Un laboratoire tourné vers les énergies renouvelables et l'environnement

GUILLOU Sylvain S.

University of Caen, Applied Sciences laboratory of Cherbourg (LUSAC)
60 rue Max-Pol Fouchet 50130 Cherbourg-en-Cotentin France
Director of LUSAC lab.

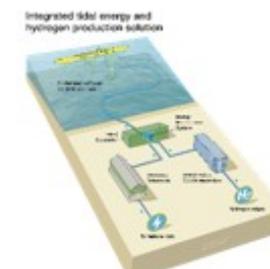
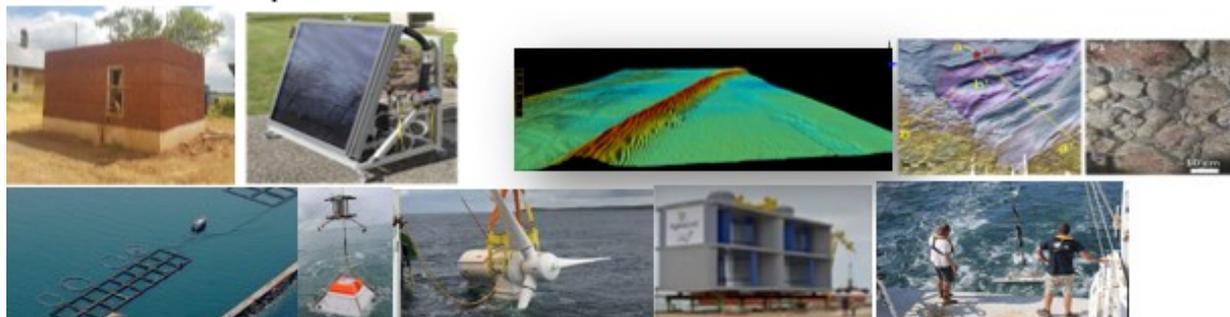
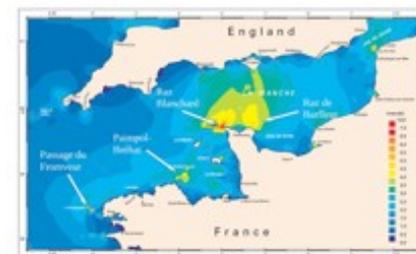




Structure et objectifs

- ❑ Présents sur Cherbourg (site universitaire et CNAM) et St-Lô
- ❑ Organisation du LUSAC autour de trois thématiques:
 - ❑ Efficacité énergétique et Transferts Thermiques
 - ❑ Ecoulements et Environnement
 - ❑ Stockage de l'énergie électrique et matériaux

- ❑ Applications visées
 - ❑ Energies marines renouvelables
 - ❑ Hydrogène décarbonnée dans le bâtiment & le transport
 - ❑ Refroidissement Passif et stockage thermique
 - ❑ Stockage et gestion de l'énergie électrique
 - ❑ Impact des activités humaines sur l'environnement marin

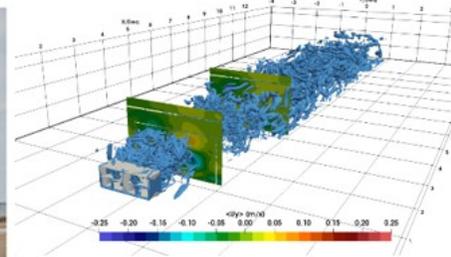
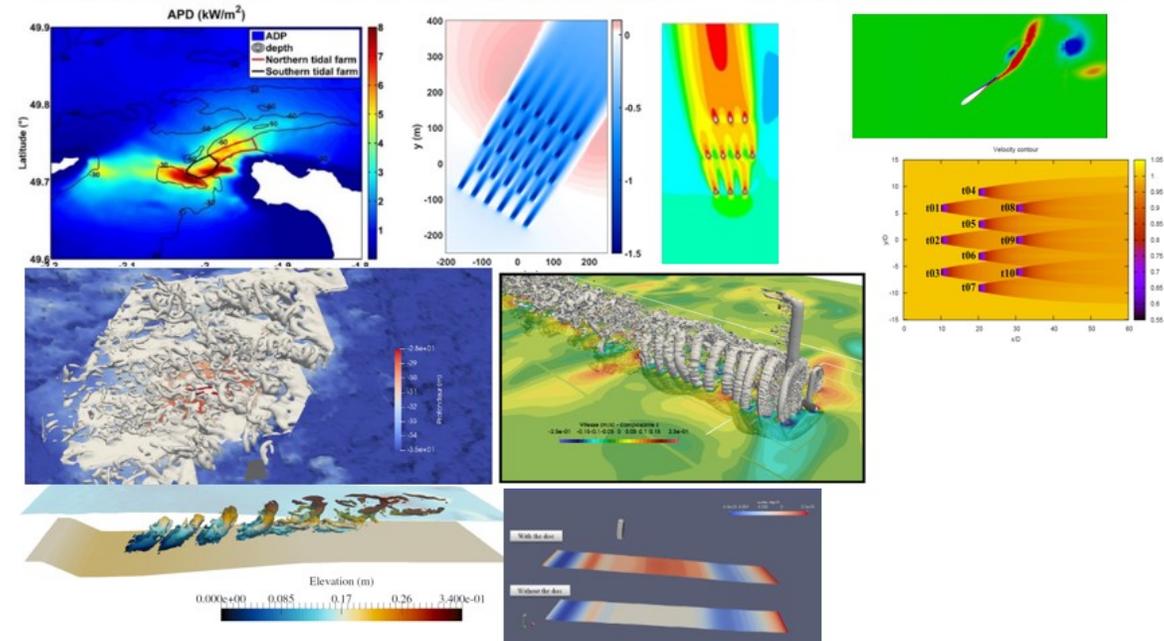
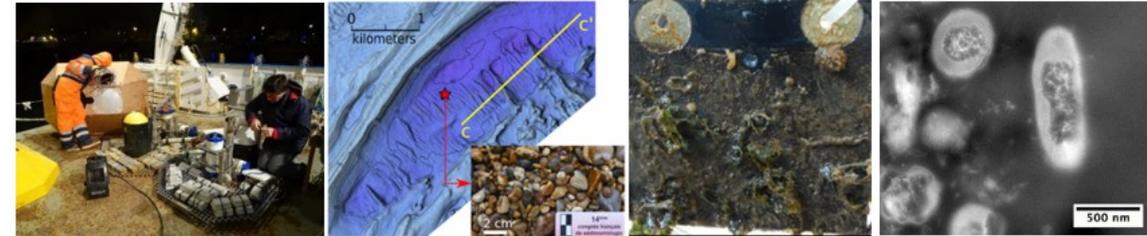


❑ Ecoulements et EMR

- ❑ Caractérisation des masses d'eau et des sédiments, du biofilm sur les structures
- ❑ Contaminations métalliques
- ❑ Interactions écoulements-machines-environnement (turbulence, sédiments, IFS ...)
- ❑ Optimisation de la récupération d'énergie

❑ Moyens :

- ❑ Mesures in situ (ADCP/ADV, prélèvements eau et sédiment, mesures géophysiques ...)
- ❑ Modèles in-vitro, mesures en laboratoire (XRF, CHS, ...)
- ❑ Modélisations numériques Locales et Régionales (Turbulence, sédiments, IFS ...)
- ❑ Tunnel hydrodynamique



Colloque Environnement – Nouveau parc éolien en mer en Normandie

Deuxième table ronde sur les impacts environnementaux des parcs éoliens:
Corrosion et biofouling

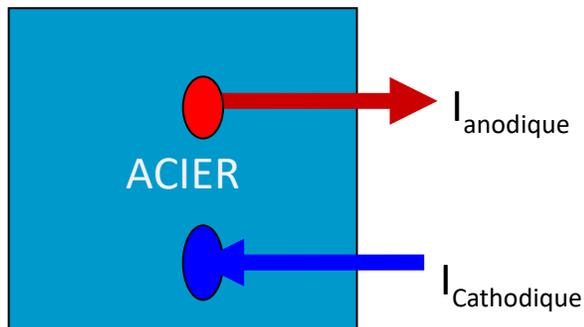
Impacts environnementaux des protections anticorrosion:
projets de recherche ANODE et ECOCAP

Georges Safi
France Energies Marines



Corrosion généralisée :

- Des surfaces du métal sont cathodique ou anodiques
- $I_{\text{anodique}} = \text{courant de corrosion}$

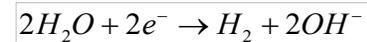
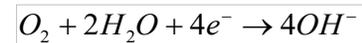


Protection cathodique (PC) :

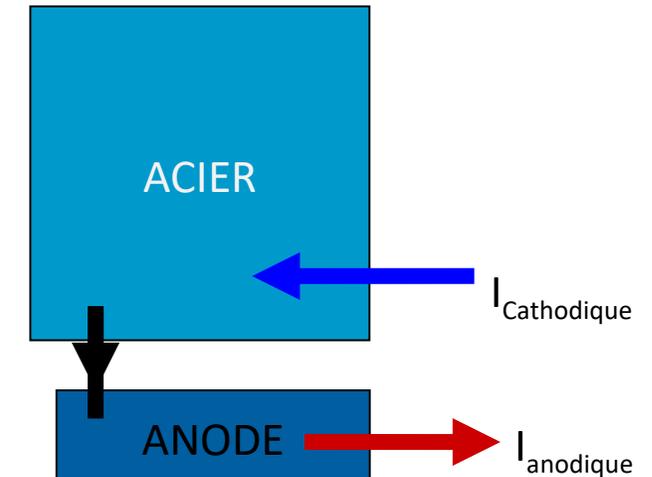
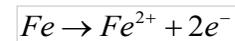
- Déplacer la zone anodique sur l'anode
- Rendre cathodique toute la surface de l'acier

**SORTIE DE COURANT =
CORROSION**

Réactions à la cathode :



Réactions à l'anode :



Principes de la corrosion et de la protection cathodique (PC)

Domaines d'applications industriels de la PC : structures portuaires, naval civil et militaire, EMR, robotique, offshore pétrolier, ...



ANODE: Evaluation quantitative des métaux libérés dans le milieu marin et issus des anodes galvaniques des structures EMR



ANODE
 Evaluation quantitative des métaux libérés dans le milieu marin et issus des anodes galvaniques des structures EMR



DURÉE : 12 mois | LANCEMENT : 2019
 Budget total : 263 k€

- NOS PROGRAMMES S&T CONCERNÉS**
- CARACTÉRISATION DE SITES
 - INTÉGRATION ENVIRONNEMENTALE

OBJECTIF
 Quantifier les composés chimiques émis par les anodes galvaniques des structures EMR et le risque de dispersion dans le milieu marin.

- CONTENU SCIENTIFIQUE**
- Revue bibliographique des protections cathodiques et de leurs impacts potentiels sur l'environnement
 - Modélisation des flux de dispersion des métaux libérés dans l'environnement à différents sites d'EMR situés sur les façades maritimes françaises
 - Evaluation des risques d'exposition aux émissions dans l'environnement de composés chimiques issus des anodes galvaniques

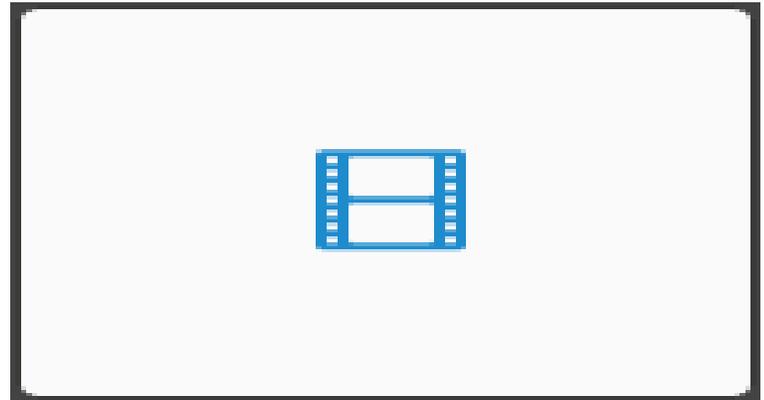
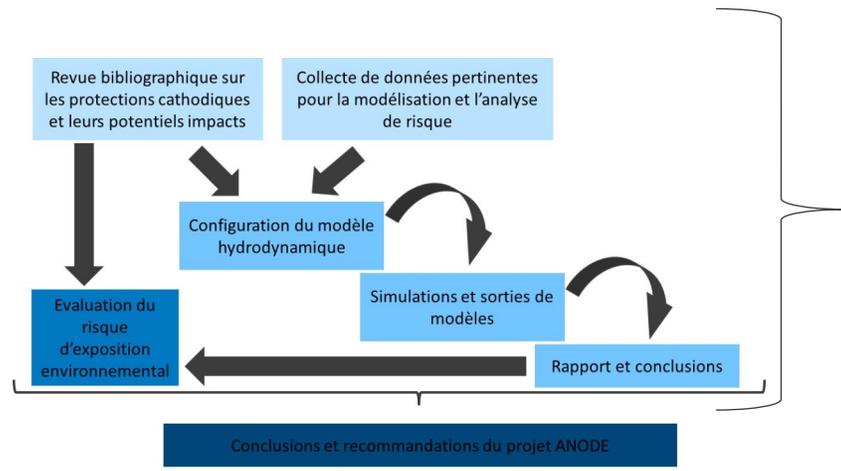
CONTEXTE
 L'utilisation d'une protection cathodique par anode galvanique est une méthode efficace et utilisée depuis longtemps pour lutter contre la corrosion des structures métalliques immergées en mer (ex. navires, quais sur pieux, plateformes offshore...). L'oxydation de ces anodes, composées souvent de zinc ou d'aluminium, provoque la libération et la diffusion d'éléments métalliques sous forme d'ions ou d'oxyhydroxydes. A la faveur du développement des ENR, la question des effets de la dégradation des anodes est réapparue au sein de la société civile et relayée par les services de l'état. Il est donc important de pouvoir fournir des réponses scientifiquement étayées à cette interrogation.

- RÉSULTATS ATTENDUS**
- Etude approfondie de l'état actuel des connaissances sur les protections cathodiques, les composés libérés et leur répartition dans les différents compartiments de l'environnement.
 - Remise en contexte des apports de métaux provenant des anodes galvaniques des structures ENR avec les composés métalliques d'origines naturelle et anthropique dans le milieu marin.
 - Conclusions concernant les potentiels impacts des protections cathodiques sur le milieu marin et recommandations pour la conception d'expérimentations permettant de caractériser et quantifier ces effets, le cas échéant.



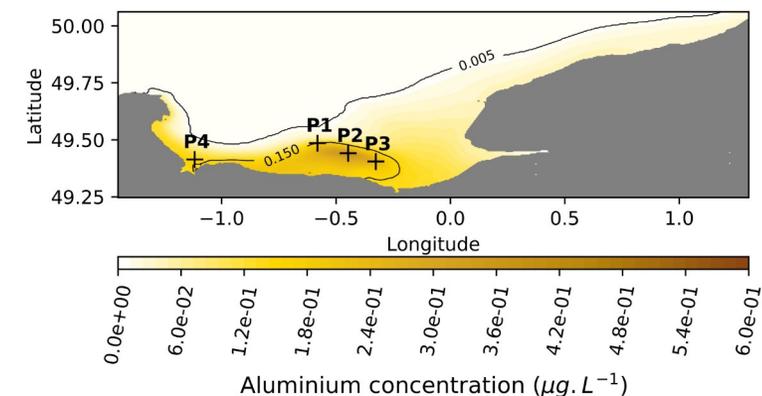
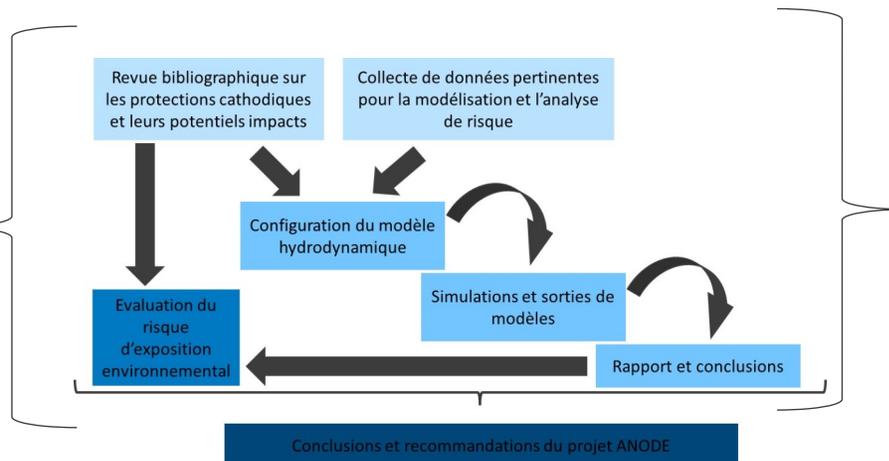
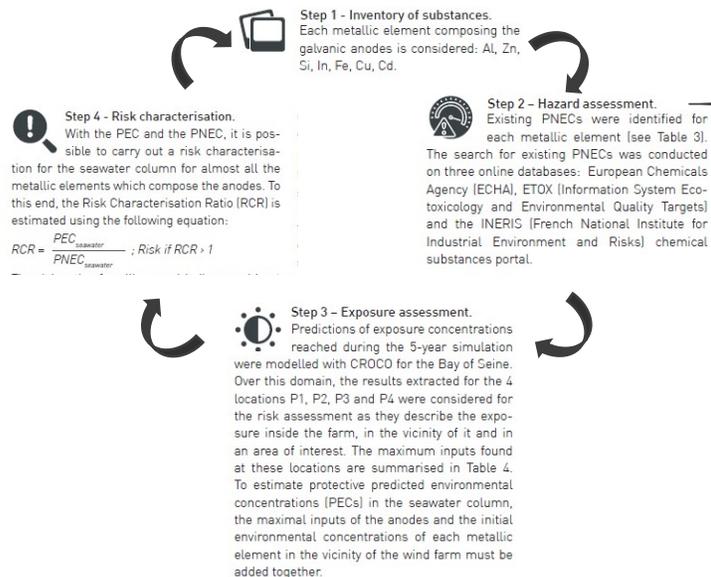
Avec le soutien complémentaire de la Région Normandie.

Ce projet bénéficie d'une aide de l'Etat de 70 k€, gérée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au titre du Programme des Investissements d'Avenir (ANR-10-IEED-0006-3D).



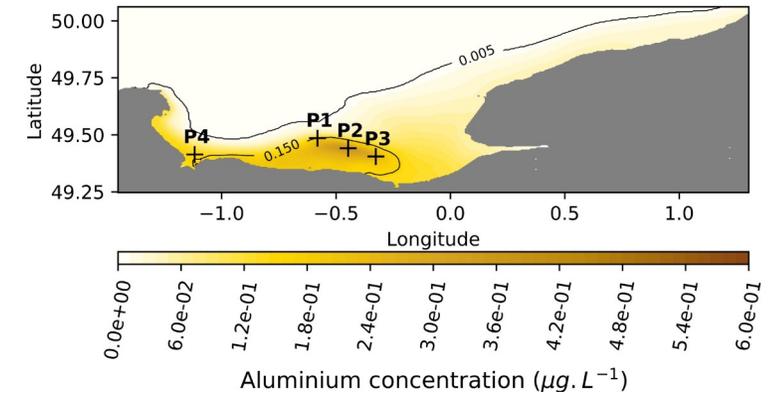
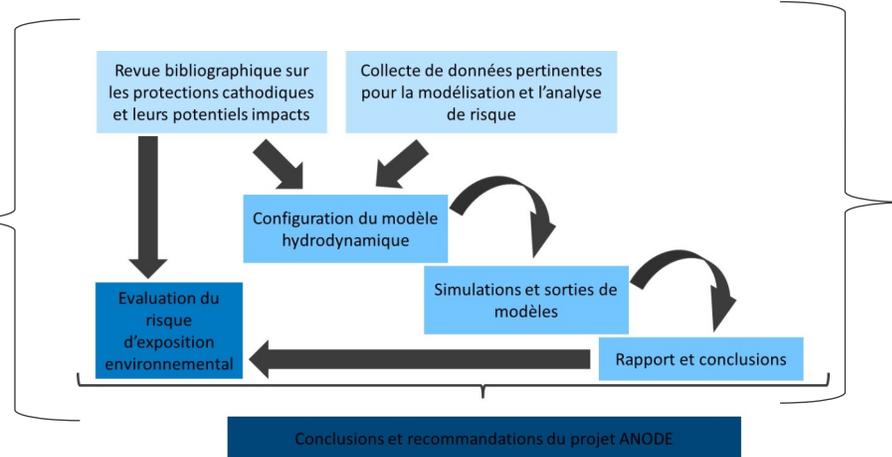
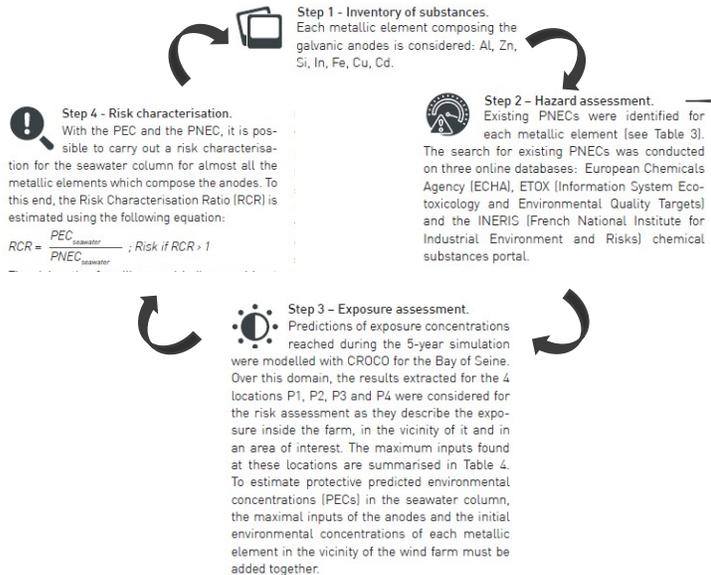
ANODE: Evaluation quantitative des métaux libérés dans le milieu marin et issus des anodes galvaniques des structures EMR

Processus itératif pour l'évaluation du risque chimique



ANODE: Evaluation quantitative des métaux libérés dans le milieu marin et issus des anodes galvaniques des structures EMR

Processus itératif pour l'évaluation du risque chimique



Métaux	Concentrations maximales (µg.L ⁻¹)	Seuils de toxicité (µg.L ⁻¹)	Pourcentages (Concentration / Seuil)
Zinc (Zn)	6,82 . 10 ⁻²	3,00	2,27 %
Fer (Fe)	1,05 . 10 ⁻³	1,60	0,07 %
Silicium (Si)	1,23 . 10 ⁻³	-	-
Indium (In)	4,84 . 10 ⁻⁴	40,6	1,2 . 10 ⁻³ %
Cuivre (Cu)	3,73 . 10 ⁻⁵	2,64	1,4 . 10 ⁻³ %
Cadmium (Cd)	2,50 . 10 ⁻⁵	0,21	1,2 . 10 ⁻² %

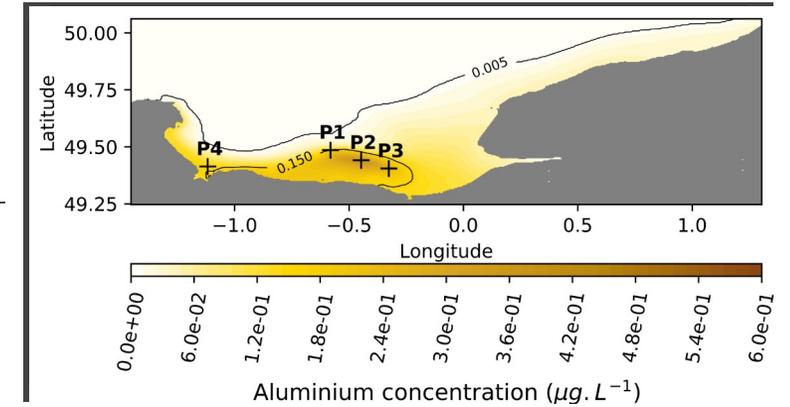
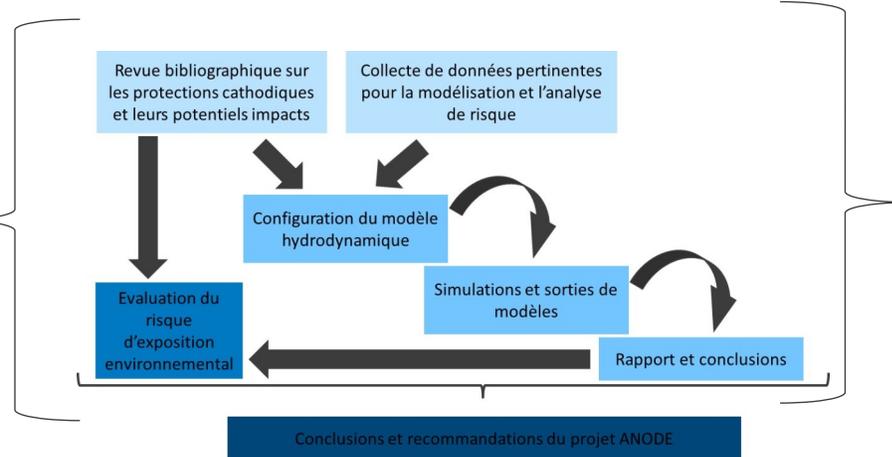
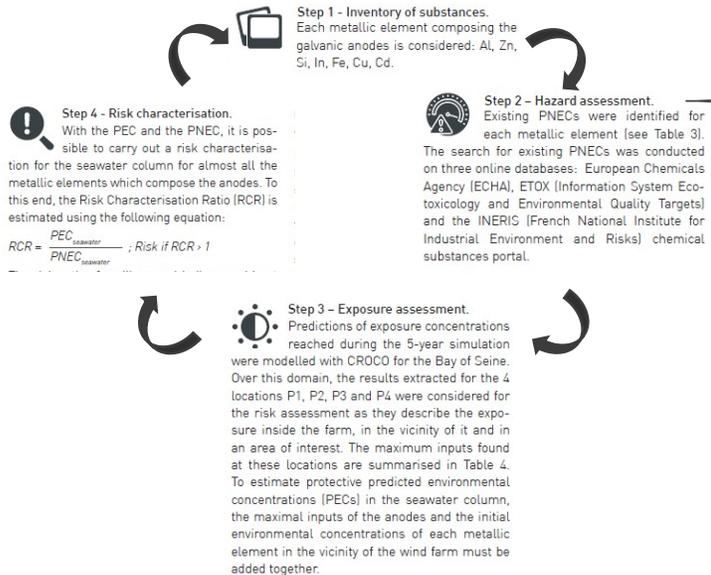
Point s	Exposition courte (2 jours)	Exposition longue (2 semaines)
P1	0,76 µg.L ⁻¹	0,33 µg.L ⁻¹
P2	0,96 µg.L ⁻¹	0,67 µg.L ⁻¹
P3	0,74 µg.L ⁻¹	0,49 µg.L ⁻¹
P4	0,44 µg.L ⁻¹	0,33 µg.L ⁻¹

Concentrations maximales atteintes par les métaux composant les anodes : très faible par rapport à leur seuils de toxicité respectifs

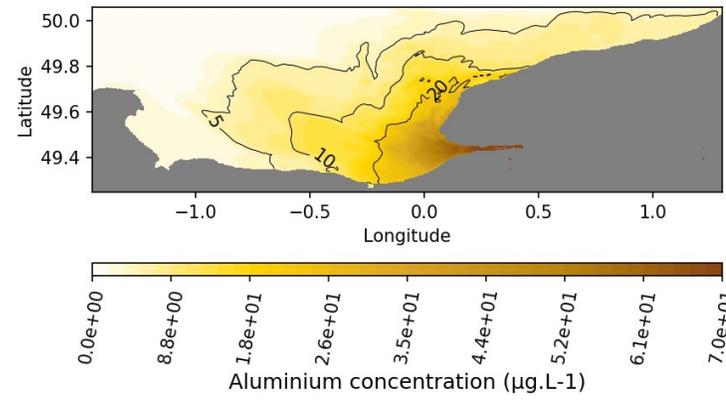
Pas de conclusion sur l'aluminium car seuils PNEC existants non robustes

ANODE: Evaluation quantitative des métaux libérés dans le milieu marin et issus des anodes galvaniques des structures EMR

Processus itératif pour l'évaluation du risque chimique



Comparaison avec les apports naturels de la Seine: 10 à 30 fois inférieur (dans la zone du parc)



Point s	Exposition courte (2 jours)	Exposition longue (2 semaines)
P1	0,76 µg.L ⁻¹	0,33 µg.L ⁻¹
P2	0,96 µg.L ⁻¹	0,67 µg.L ⁻¹
P3	0,74 µg.L ⁻¹	0,49 µg.L ⁻¹
P4	0,44 µg.L ⁻¹	0,33 µg.L ⁻¹

ANODE: Evaluation quantitative des métaux libérés dans le milieu marin et issus des anodes galvaniques des structures EMR

<https://www.france-energies-marines.org/projets/anode/>

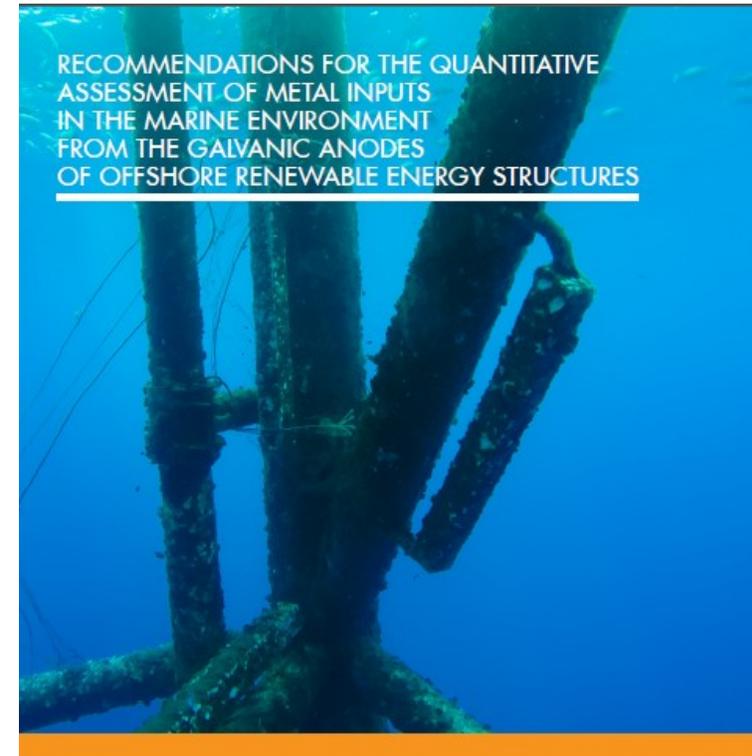
RESSOURCES

Fiche résultats (PDF)

Webinar de restitution des résultats

Session Questions & Réponses (PDF)

Rapport de recommandations (PDF en anglais)



Suite : ECOCAP

- Révision de la PNEC Aluminium
- Conclure sur le risque chimique de l'aluminium issu des parcs EMRs
- Etudier les risques potentiels avec les Protections Cathodiques à courant imposé (ICCP) et les peintures anticorrosion
- Etudier le risque de contamination des réseaux trophiques marins

<https://www.france-energies-marines.org/projets/ecocap/>

ECOCAP

Analyse écotoxicologique des protections cathodiques pour évaluer le risque chimique des éléments libérés par les anodes galvaniques et le courant imposé sur le milieu marin et ses réseaux trophiques

Durée: 36 mois | Lancement: 2021 | Budget total: 2 189 k€

CONTEXTE

Les protections cathodiques – telles que les anodes galvaniques (GACP) et les courants imposés (ICCP) – ainsi que les peintures anticorrosion sont largement utilisées pour prévenir la corrosion des matériaux métalliques immergés dans l'eau de mer. Ces méthodes, bien qu'efficaces, conduisent à la libération d'une grande quantité d'éléments chimiques dans l'environnement marin, dont l'effet nocif potentiel, encore mal évalué, préoccupe les autorités environnementales et la société civile. Les effets écotoxicologiques potentiellement induits par les éléments libérés sur l'environnement marin et les réseaux trophiques étant encore méconnus, il apparaît nécessaire d'étudier en profondeur l'impact environnemental de ces protections.

OBJECTIF

Produire une base de connaissances sur les impacts environnementaux potentiels des protections anticorrosion couramment utilisées dans l'industrie des énergies marines renouvelables, notamment les protections cathodiques à anodes galvaniques (GACP), les protections cathodiques à courant imposé (ICCP) et les peintures anticorrosion.

RÉSULTATS ATTENDUS

- Une évaluation du risque chimique de l'aluminium dans l'eau de mer.
- Des expériences en laboratoire pour évaluer le risque chimique du cocktail d'éléments libérés par les GACP utilisant une anode à base d'aluminium.
- Une première description complète des éléments et des composés (chloro)bromés libérés par les systèmes ICCP et leur devenir en fonction du temps.
- Une première étude écotoxicologique comparative sur la toxicité des protections cathodiques de type GACP et ICCP.
- Des outils destinés aux acteurs de la filière EMR pour (1) simuler la dispersion des éléments issus des GACP et ICCP et (2) étudier le transfert potentiel des éléments libérés dans les réseaux trophiques.
- Des recommandations sur l'utilisation des systèmes de protection cathodique et des revêtements anticorrosion dans les projets futurs.



CONTENU SCIENTIFIQUE

Une revue bibliographique et un audit des pratiques actuelles en matière de protections cathodiques et de peintures anticorrosion.

- Une série d'expériences en laboratoire pour :
- Évaluer le risque chimique de l'aluminium issu des GACP et libéré dans l'eau de mer.
 - Étudier l'impact des cocktails d'éléments libérés par les GACP et ICCP sur les organismes marins.
 - Caractériser tous les éléments et les composés (chloro)bromés libérés par les systèmes ICCP et leur stabilité dans l'eau de mer.

- Mettre à jour et développer des modèles pour :
- Simuler la dispersion des éléments issus des GACP et ICCP (modèle hydrodynamique).
 - Étudier le transfert trophique des éléments issus des GACP et/ou ICCP dans les réseaux alimentaires (modèle trophique).

Publication d'un rapport de recommandations pour les acteurs de la filière EMR

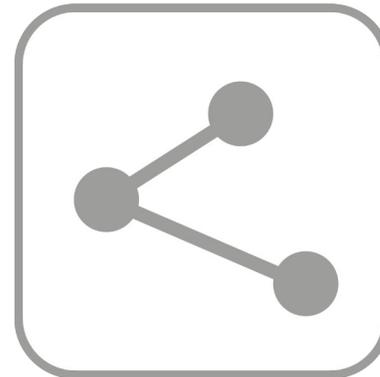
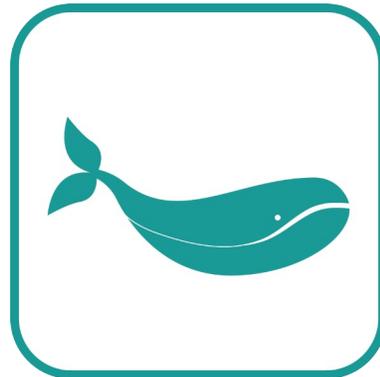
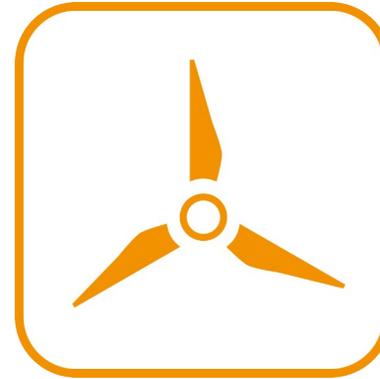
PARTENAIRES



Avec le soutien financier des régions Provence-Alpes-Côte d'Azur, Bretagne et Normandie.

Ce projet bénéficie d'un financement de l'Etat français de 348 k€ géré par l'Agence nationale de la recherche au titre du Programme des Investissements d'Avenir

Merci pour votre attention



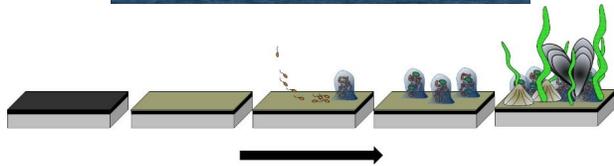
CORROSION ET BIOFOULING

Colloque Environnement
Cherbourg le 05/05/2022

Hervé GUEUNE
Directeur CORRODYS



Eoliennes et milieu marin



- Milieu marin = milieu agressif (chimie, biologie, courant...)
- Durabilité des infrastructures = réduction de l'impact environnemental
- Impact environnemental à considérer tout au long du cycle de vie d'un parc (fabrication, installation, exploitation, démantèlement)
- Utilisation de systèmes de protection : revêtement et/ou protection cathodique
- Zones immergées = substrat pour la colonisation par biofouling

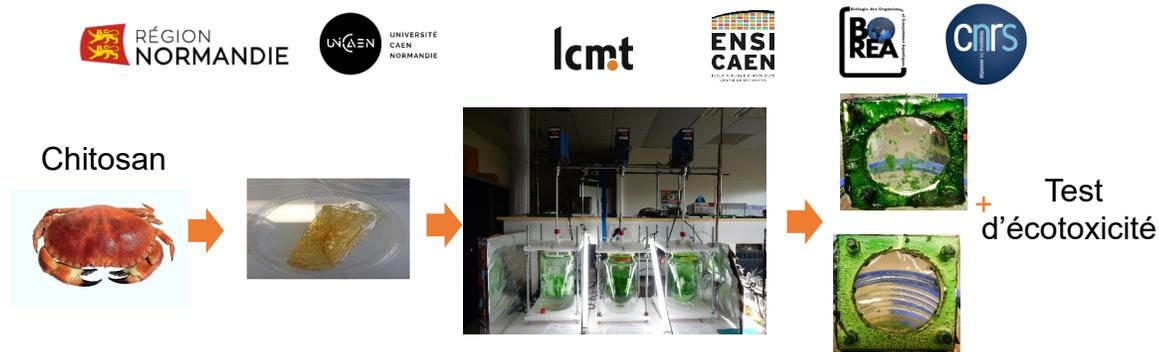


Innovation permanente matériau/revêtement pour accroître leur durabilité et réduire l'impact environnemental

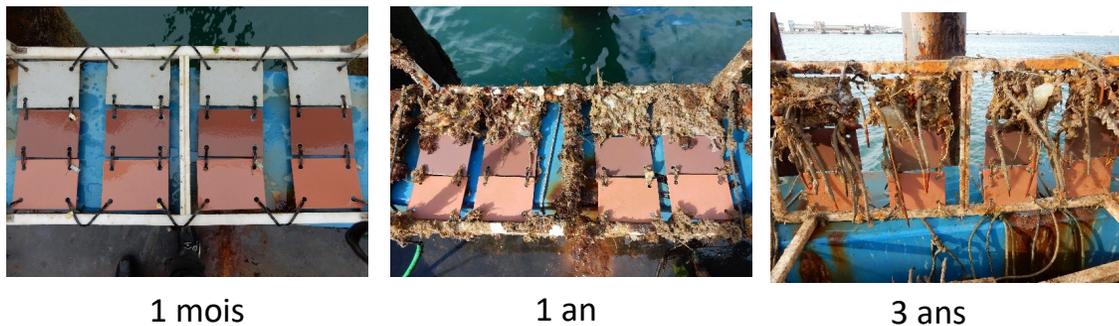
Exemple Test et qualification

➤ En laboratoire

Développement de nouveaux revêtements à partir de biopolymère marin



➤ En milieu naturel : test de revêtements



R&D CORRODYS

- Amélioration/standardisation méthode de caractérisation
- Développement de tests intermédiaires entre le laboratoire et l'in-situ incluant l'impact environnemental
- Gestion des données et analyses

Les impacts écologiques potentiels des câbles électriques sous-marins



Crédit : Olivier Dugomay

- Antoine Carlier (IFREMER ; DYNECO-LEBCO)



Qu'est-ce qu'un câble électrique sous-marin ?



Figure 3.1 Exemples de câbles électriques sous-marins modernes

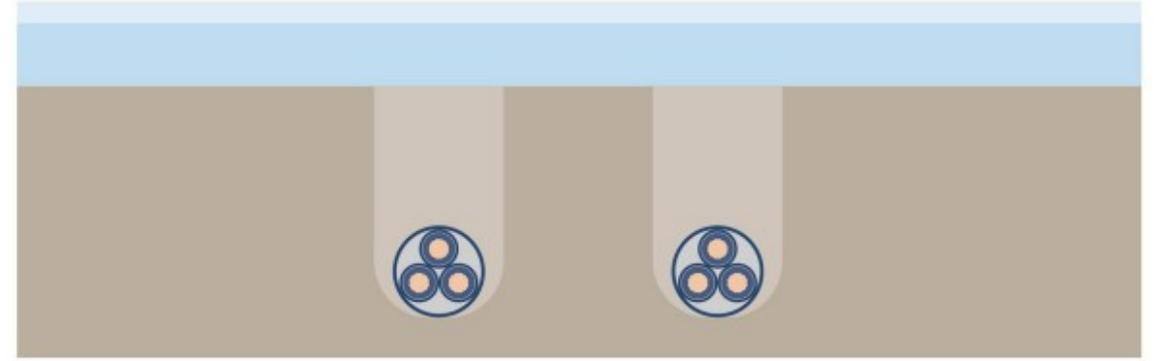
À gauche : Câble c.a. à trois phases avec armure métallique double couche. **Au centre** : Câble CCHT à double conducteur pour le projet NorNed, reliant la Norvège et les Pays-Bas (580 km, 450 kV). **À droite** : Câble de type Möllerhøj du projet Kontek, entre le Danemark et l'Allemagne (170 km, 400 kV, 600 MW c.c.).

Source : Adapté de Worzyk, 2009.

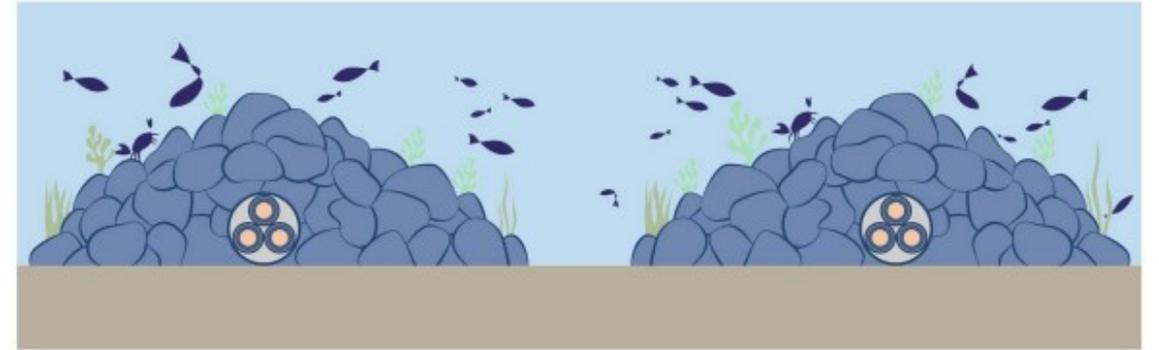
Comment sont installés les câbles électriques sous-marins ?

- Impacts de l'installation variables selon la technique de pose

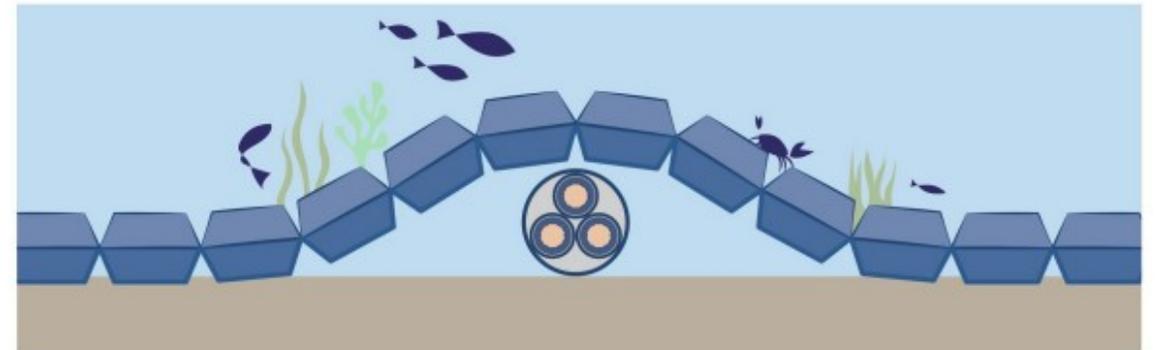
ENSOUILLAGE



ENROCHEMENT

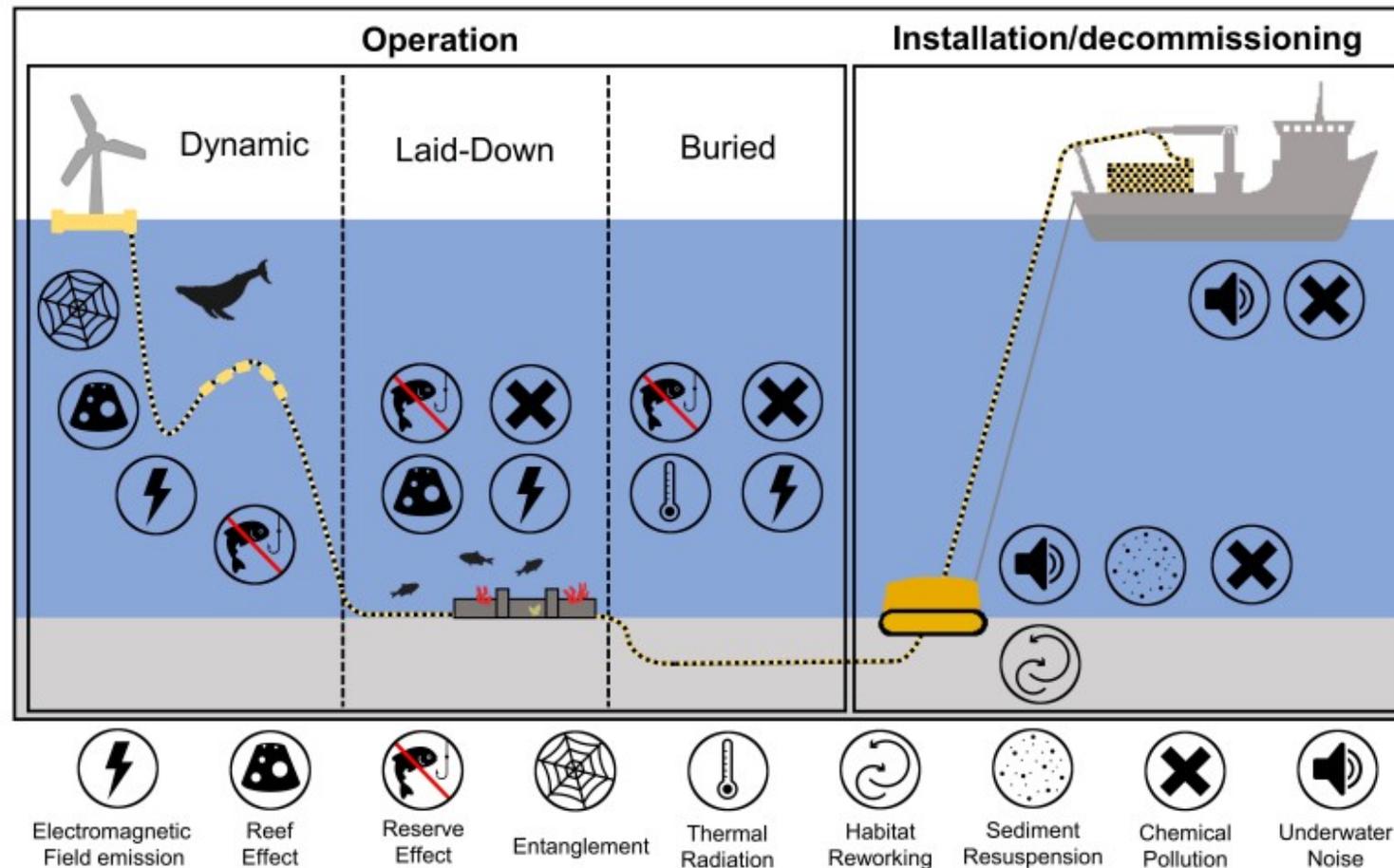


MATELAS BÉTON



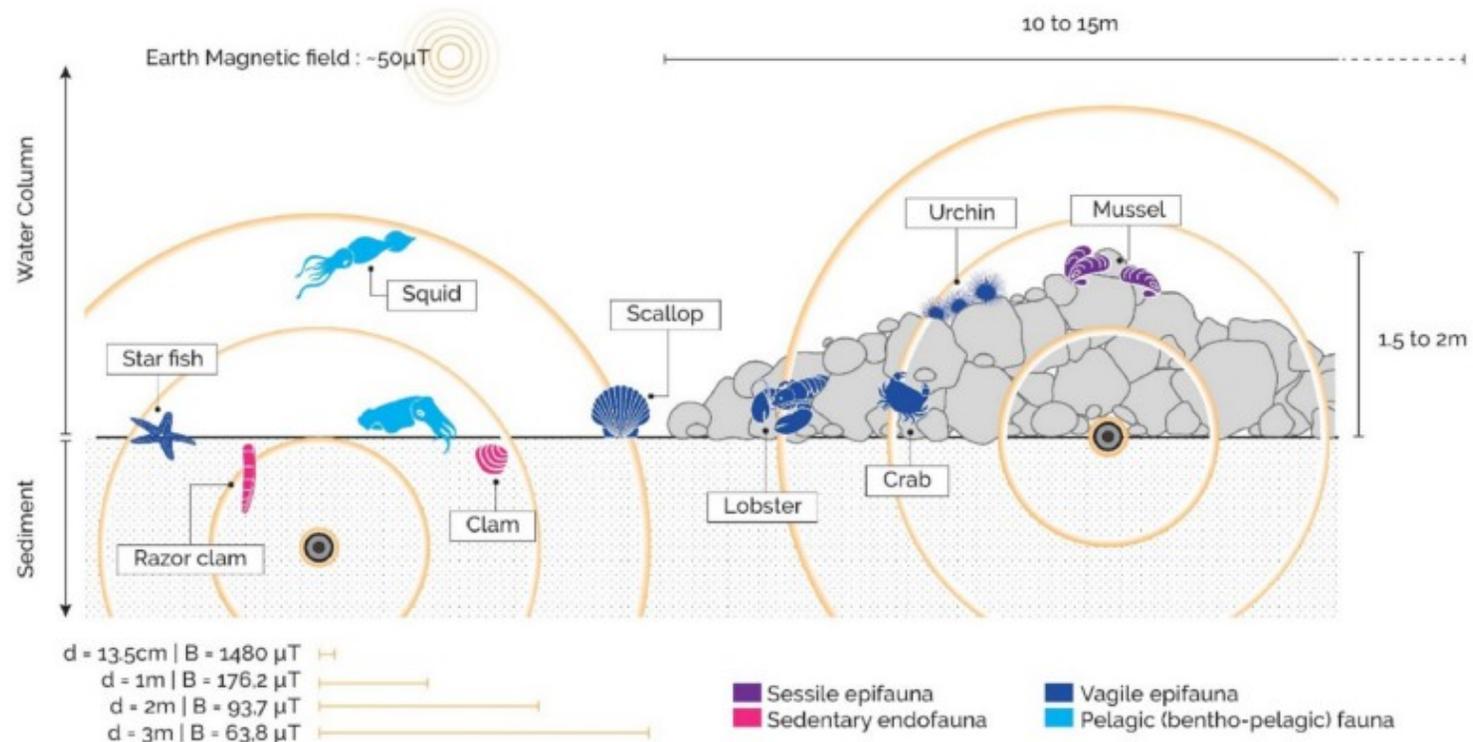
Les effets possibles sur le milieu marin

- Dépendent des caractéristiques du câble, des conditions naturelles locales, des techniques de pose, de la phase du projet

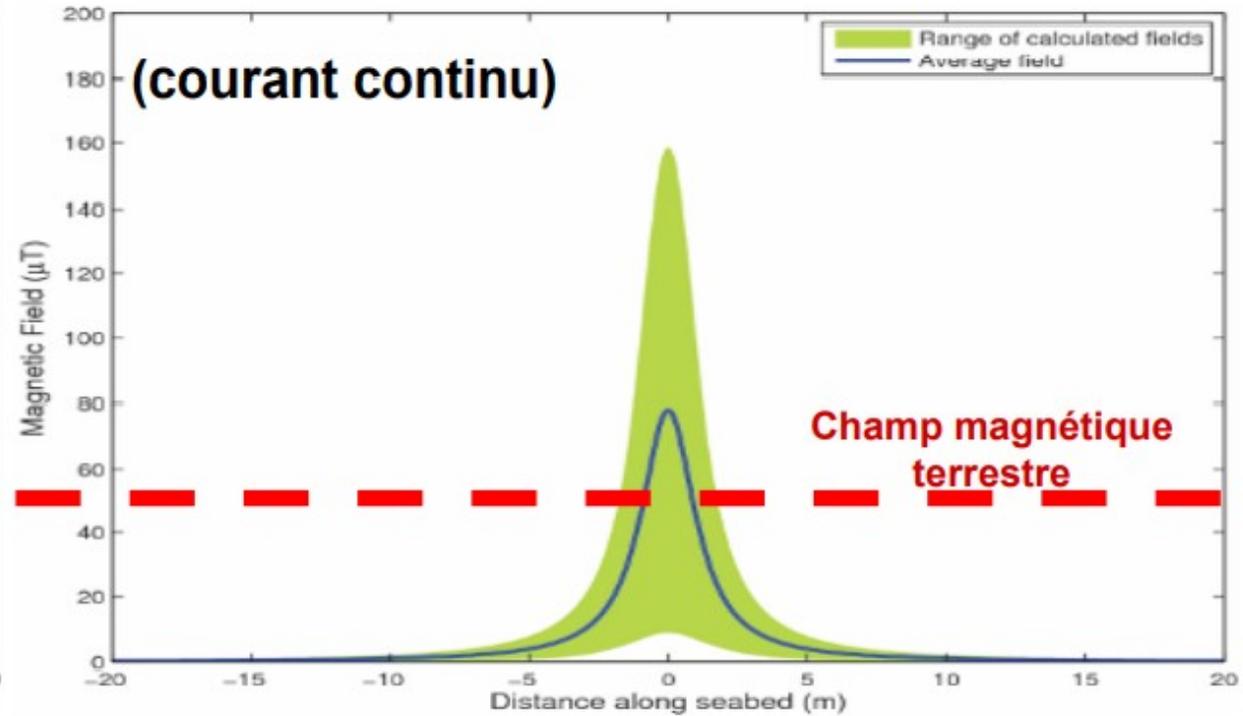
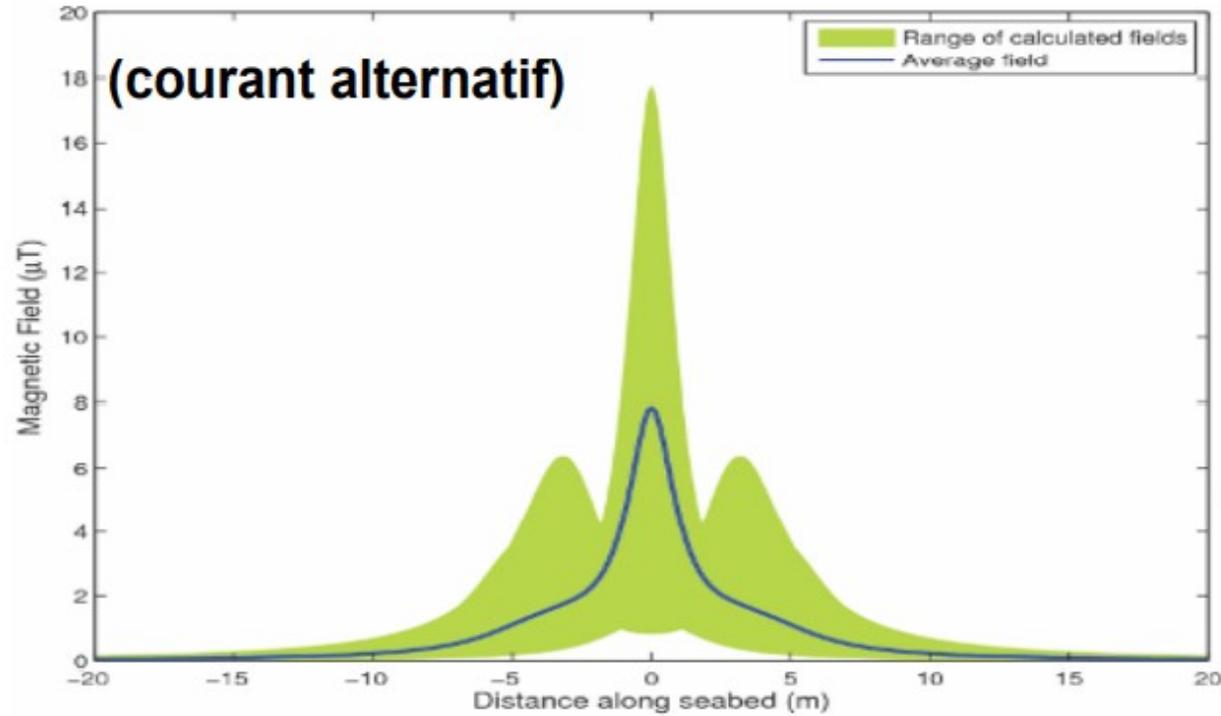


Les espèces marines sont-elles sensibles aux champs électro-magnétiques ?

- Certaines, oui.
- Champs électriques : requins, raies, anguilles
- Champs magnétiques : requins, raies, saumons, anguilles, langoustes, écrevisses, cétacés, tortues marines



(Albert et al., 2020)



(Normandeu, 2011)

- L'intensité du CEM décroît rapidement (spatialement)

Résultats d'expérimentations



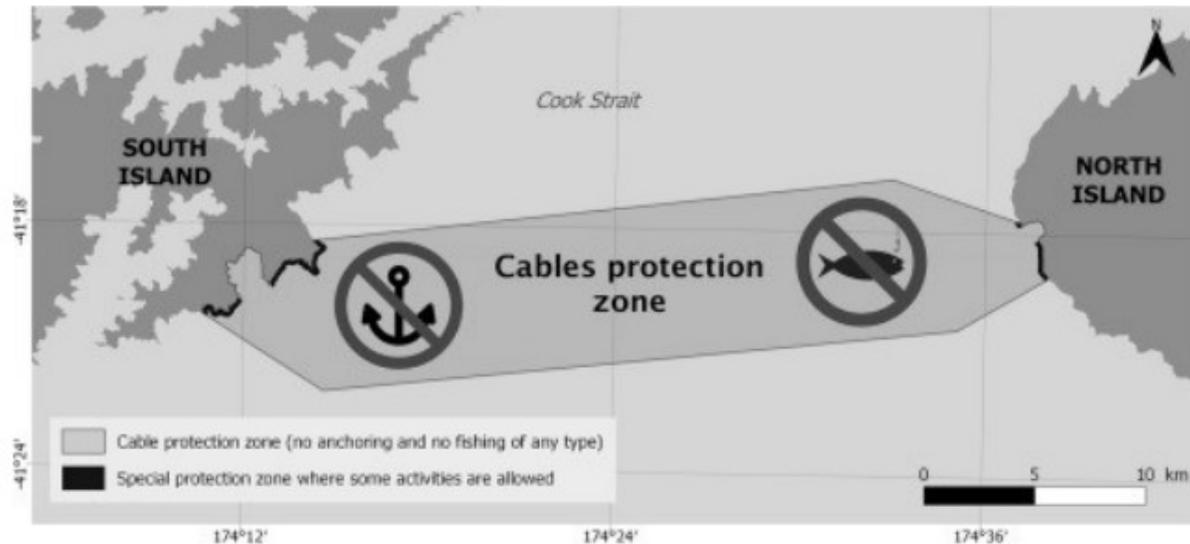
- Les homards juvéniles n'ont pas présenté de changement de comportement lorsqu'ils ont été soumis à un gradient de CM.
- Leur capacité à trouver un abri n'a pas été affectée par une exposition d'une semaine à des CM.

Les études précédentes montrent des résultats hétérogènes :

- Changement subtil du comportement pour *Homarus americanus* (65 μ T)
(Hutchison et al. 2018)
- Attirance d'écrevisses pour CM artificiel (*Orconectes limosus* ; 800 μ T)
(Tański et al. 2005)
- Attirance de tourteau pour CM artificiel (*Cancer pagus* ; 2,800 μ T)
(Scott et al. 2018)
- Répulsion de langouste des Caraïbes pour CM artificiel (*Panulirus argus*; 320 μ T)
(Ernst and Lohman 2018)

Y a-t-il une zone d'exclusion des activités autour des câbles ?

- Oui, souvent ; 200 à 500 de chaque côté.
- Peut engendrer un impact indirect, bénéfique pour l'écosystème marin : l'**effet « réserve »**
- Lorsque des activités humaines impactantes (pêche aux engins trainants ; mouillages) sont interdits dans le corridor du câble



Les câbles jouent-ils un rôle d'**habitat** ?

Pour quelles espèces ?



Credits : Olivier Dugornay

- Acquis du projet de recherche collaboratif **SPECIES** (2017-2020):

<https://www.france-energies-marines.org/nos-actualites/articles/restitution-des-resultats-du-projet-species/>



ODE-DYNECO-LEBDO - RBE / HMMN / LRHPB
Cartier Antoine - Vogel Camille - Alemany Juliette
27/03/2019

ifremer

SYNTHESE DES CONNAISSANCES
SUR LES IMPACTS
DES CABLES ELECTRIQUES SOUS-MARINS:
PHASES DE TRAVAUX ET D'EXPLOITATION

Etude du compartiment benthique et des ressources halieutiques



CEAO
Synthèse des connaissances sur les impacts des câbles électriques sous-marins : phases de travaux et d'exploitation

1