



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



GT ECUME

Rapport final du projet PolluEcume

Evaluation du risque pour les habitats benthiques lié au cumul des rejets issus des systèmes anticorrosion présents au sein des parcs EMR : Zone baie de Seine élargie.



Mois année de publication : Octobre 2024

Auteurs principaux : Mélissa DALLET (Ineris/ETES – Cellule ARC), Isabelle Amouroux (Ifremer, RBE/CCEM – Cellule ARC), Rui Duarte (France Energies Marines), Matthieu Dussauze (France Energies Marines)

Contribution (relecture) - Ifremer : Dufois François, Gonzalez Jean-Louis (ODE/Littoral/LEPAC), Grouhel Anne (RBE/CCEM), Menet Florence (ODE/Littoral/LERN)

Contribution (Vérification) - Ineris : Sandrine Andrès, Olivier Delmas, Jean-Marc Brignon.

Vérification : Groupe d'experts scientifiques du GT ECUME

Validation : Revue de projet du GT ECUME du xx/xx/202X

Comment citer ce document : Dallet M., Amouroux I., Duarte R., Dufois F., Dussauze M., Gonzalez J.L., Grouhel A., Menet F., 2024. Evaluation du risque pour les habitats benthiques lié au cumul des rejets issus des systèmes anticorrosion présents au sein des parcs EMR : Zone baie de Seine élargie. Rapport final du projet PolluEcume. Ineris - Ifremer- septembre 2024, XX p.

Table des matières

1	Le GT ECUME	4
2	Glossaire	5
3	Introduction	7
4	Présentation générale de l'approche substance chimique de l'évaluation des risques pour les écosystèmes (ERE)	7
4.1	Principes	8
4.2	Une démarche par étape	8
5	Application de la démarche dans le cadre du projet PolluEcume.....	11
5.1	Présentation des sites étudiés - Description des fondations et protections cathodiques des parcs de Courseulles, Fécamp et le Tréport	12
5.2	Identification des substances	14
5.2.1	Éléments potentiellement émis dans l'environnement lors de l'utilisation d'un système de protection cathodique par anode sacrificielles (GACP)	14
5.2.2	Éléments potentiellement émis dans l'environnement lors de l'utilisation d'un système de protection cathodique par anode à courant imposé (ICCP)	17
5.3	Evaluation de l'exposition	18
5.3.1	Taux de relargage des éléments émis dans l'environnement	19
5.3.2	Présentation de la méthodologie proposée pour estimer les concentrations des substances dans les sédiments	23
5.4	Evaluation des dangers pour les organismes benthiques.....	49
5.4.1	Substances candidates au transfert et à l'accumulation dans le sédiment.....	49
5.4.2	Recherche et/ou dérivation de valeur seuil (PNEC)	49
5.4.3	Méthode de calcul d'une PNEC.....	50
5.4.4	Concentrations sans effet prévisible (PNEC _{sédiment marin}) pour les organismes benthiques...52	
5.5	Caractérisation du risque	54
5.5.1	Principe.....	54
5.5.2	Indices de risque calculés dans le cadre du projet PolluEcume	55
5.5.3	Présentation des résultats obtenus	69
6	Discussions	70
7	Conclusion et recommandations	71
8	Références.....	74
9	Annexes	78
9.1	Annexe 1 : Scénario 1 – Parcs EMR tous équipés GACP	78
9.2	Annexe 2 – Scénario 3 – Parc de Fécamp équipé GACP	79
9.3	Annexe 3 : Quel statut réglementaire pour les substances émises via les systèmes anticorrosion utilisés sur le Parcs éolien Offshore (DCE, DCSMM, REACH, CLP) ?	82

1 Le GT ECUME

Le présent rapport a été réalisé dans le cadre du GT ECUME.

La capacité du milieu marin à recevoir plus d'activités doit être évaluée au-delà de projets autorisés de manière successive, en portant un regard global sur leurs effets cumulés à l'échelle du milieu marin.

Le GT ECUME (Groupe de travail sur les Effets CUMulés des projets d'énergies Marines Renouvelables sur l'Environnement marin) répond aux besoins identifiés lors de la 2ème Conférence nationale de l'Océan d'avril 2016 de mener une réflexion sur l'intégration environnementale des projets d'énergies renouvelables en mer (EMR) en amont de toute décision d'implantation d'un de ces parcs. Cela nécessite en particulier une analyse des impacts cumulés de ces projets sur les écosystèmes marins et littoraux.

A cet égard, quatre objectifs complémentaires ont été identifiés pour le GT ECUME :

- Améliorer les évaluations des projets d'EMR sur le volet « analyse des impacts cumulés », pour les services de l'État comme pour les porteurs des projets,
- Identifier les connaissances scientifiques manquantes pour réaliser cette analyse et proposer une méthode opérationnelle pour combler les lacunes identifiées,
- Améliorer la prise en compte des autres sources de pression que les projets EMR et de leurs évolutions futures,
- Sécuriser les autorisations administratives des projets d'EMR vis-à-vis des engagements de la France pour la préservation des écosystèmes marins.

L'atteinte de ces objectifs implique la proposition de méthodes d'évaluation nécessaires à mettre en place afin que les projets français d'énergies renouvelables en mer – non encore autorisés – puissent être mis en œuvre en répondant à l'exigence introduite par la loi sur la biodiversité de 2016¹ à savoir « l'absence de perte nette de biodiversité » par la mise en place de mesures de la séquence « éviter, réduire, compenser », dite « séquence ERC ».

Dans ce contexte, le GT ECUME a pour but de proposer des méthodes d'appréciation des effets cumulés, en les testant à partir de parcs autorisés. Pour cela une démarche méthodologique d'analyse de ces impacts cumulés doit être proposée. Cette démarche est, dans un premier temps, définie et testée sur un périmètre d'étude restreint constitué de deux parcs situés au large de la Normandie, ceux de Fécamp et Courseulles-sur-Mer. Elle a vocation à être ensuite généralisée et appliquée à l'ensemble des projets de parcs éoliens en mer de la façade Manche-Mer du Nord, ou adaptée et reproduite pour d'autres façades.

¹ Loi n° 2016-1087 « Loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature, et des paysages »

2 Glossaire²

Activité (anthropique) :

Action de l'homme qui crée une pression au sein du milieu marin. *Exemple : Rotation des pales d'une éolienne.*

Effet (d'un projet) :

Conséquences objectives en termes de variations de pressions (paramètres physico-chimiques notamment) susceptibles de générer ensuite un impact dans le milieu vivant marin. *Exemples : différentiel de niveau sonore induit dans l'environnement marin, effet barrière d'un champ d'éoliennes, effet récif des fondations des éoliennes.*

Enjeu (écologique) :

Éléments des écosystèmes marins ou de leur fonctionnement dont on doit rétablir ou maintenir le bon état.

Appréciation à dire d'expert de l'importance d'un récepteur pour le Bon Etat Ecologique du Milieu Marin. Des enjeux écologiques ont été définis dans les Documents Stratégiques de Façades Maritimes.

Exposition (à une pression) :

Situation d'un récepteur qui est soumis à une pression.

Impact :

Transposition d'un effet sur l'écosystème marin tenant compte de sa sensibilité. (Adapté du guide MTEs, « Guide d'évaluation des impacts sur l'environnement des parcs éoliens en mer », 2017)

Impacts cumulés :

Cumul des impacts de plusieurs projets de parcs éoliens en mer, et cumul de ces impacts avec ceux des autres activités anthropiques.

Méthode :

Pour un(des) récepteur(s) et une(des) pressions, une méthode permet l'évaluation des impacts cumulés quand un modèle mathématique n'existe pas.

Modèle (mathématique, numérique) :

Pour un(des) récepteur(s) et une(des) pressions, un modèle permet l'évaluation des impacts cumulés de façon mathématique. Un modèle permet notamment de tenir compte, outre du cumul, des effets des interactions (synergies ou antagonismes) entre les différentes pressions.

Pression :

Traduction des activités dans le milieu se matérialisant éventuellement par le changement d'état, dans l'espace ou dans le temps, des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du milieu (d'après l'Arrêté du 17 décembre 2012 relatif à la définition du bon état écologique³). *Exemple : émission de bruit sous-marin, augmentation de la turbidité.*

² Ces définitions figurent dans la « première note de recommandations du GT ECUME pour le cadrage de l'évaluation des impacts cumulés de projets de parcs éoliens en mer » publiée sur le site éoliennes en mer. <https://www.eoliennesenmer.fr/>

³ Abrogé par l'Arrêté du 9 Septembre 2019 - *L'arrêté en vigueur en date du 9 septembre 2019, ne donne pas une définition de ce terme mais cite dans le chapitre « définition » le terme de pressions anthropiques comme étant les pressions qui s'exercent sur le milieu à savoir les pressions biologiques, physiques, substances, déchets et énergie.*

Récepteur :

Habitat, organisme ou groupe d'organismes vivants susceptible de subir un impact lié à une activité anthropique. NB : Dans ce guide, on travaille uniquement sur les différents récepteurs du milieu vivant.

Résilience :

La résilience d'un élément à une perturbation peut être définie comme sa capacité à retrouver un état proche à celui prévalant avant la perturbation. La résilience intègre une notion de temporalité qui doit être adaptée à chaque élément considéré. (MTES, Étude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques des énergies marines renouvelables, 2012).

Risque :

Probabilité de survenue d'un phénomène redouté ou indésirable sur un récepteur (ou sur l'ensemble de l'écosystème), résultant de son exposition directe ou indirecte à une (des) pression(s), ou de l'exposition d'autres récepteurs. *Exemple : Probabilité d'installation d'une espèce non indigène.*

Sensibilité :

La sensibilité d'une espèce est déterminée par estimation de sa tolérance et de sa résilience à une perturbation externe. Elle est déterminée sur la base des caractéristiques biologiques et physiques de l'espèce et de l'amplitude, de la durée et de la fréquence de la perturbation. (MTES, Étude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques des énergies marines renouvelables, 2012).

Tolérance :

La tolérance d'un élément à un effet peut être définie comme sa susceptibilité d'être affectée par cet effet. Pour un élément d'un écosystème, par exemple un habitat ou une espèce, elle décrit le potentiel de destruction, dégradation, de réduction ou d'amélioration de la viabilité qu'a l'effet sur cet élément. (MTES, Étude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques des énergies marines renouvelables, 2012). NB : Le MNHN (La Rivière M. et al., 2015) utilise ce terme en tant que synonyme de résistance dans la méthode développée pour l'évaluation de la sensibilité des habitats benthiques.

3 Introduction

La première phase du projet ECUME, réalisée avec un panel de 35 experts scientifiques, visait à identifier les couples pressions/récepteurs prioritaires afin d'évaluer les effets cumulés des parcs éoliens en mer. Cette priorisation a été rendue possible après l'établissement de notes de "sensibilité", "connaissance" et "enjeu" sur ces couples pressions/récepteurs. Ainsi, les couples sélectionnés portent sur les pressions ayant un fort risque d'impact sur le récepteur, et des récepteurs pour lesquels l'évaluation du risque de la pression sur le récepteur est réalisable, sans manque de connaissance incontournable. Un des couples pressions récepteurs prioritaires pour les parcs éoliens de Fécamp et Courseulles est le risque de pollution chimique sur les habitats benthiques. Cette pollution chimique en phase de fonctionnement des parcs éoliens en mer provient notamment des moyens de protection contre la corrosion (protection cathodique) utilisés : anodes galvaniques (ou sacrificielles) ou à courant imposé (ICCP) dont les risques pour l'environnement marin sont peu connus. C'est dans ce contexte que le projet PolluEcume a été réfléchi et dimensionné. Il est complémentaire au projet de R&D [ANODE⁴](#) (2019-2020) piloté par France Energies Marines, et Ifremer (pilote scientifique) avec l'implication en particulier de la cellule mixte Ifremer/Ineris d'Analyse des Risques Chimiques (ARC) en milieu marin, a été réalisé. L'objectif de ce projet Anode était de quantifier les composés chimiques émis par les protections cathodiques (anodes sacrificielles et courant imposé) protégeant les structures EMR et d'évaluer le risque pour les espèces pélagiques (de la colonne d'eau) lié aux rejets des anodes sacrificielles en particulier. Dans ce projet, un modèle des flux de dispersion des métaux libérés dans la colonne d'eau au niveau de différents sites d'EMR incluant le futur parc éolien de Courseulles sur Mer a été développé et évalué. En parallèle, la dispersion dans la colonne d'eau du dichlore provenant des anodes à courant imposé a été modélisée autour du futur parc éolien de Provence Grand Large en Méditerranée. Comme mentionné ci-avant, le projet Anode s'est focalisé sur un seul compartiment de l'environnement marin en particulier à savoir, la colonne d'eau (France Energies Marines, 2020). Le projet PolluEcume s'intéresse, de façon complémentaire, un autre compartiment de l'environnement marin, le sédiment.

L'objectif du projet est de développer et tester une méthodologie pour évaluer le risque pour les habitats benthiques lié au cumul des rejets issus des systèmes anticorrosion présents au sein des parcs EMR, à travers le cas d'étude de la Baie de Seine élargie avec les parcs de Fécamp, Courseulles et Dieppe Le Tréport.

4 Présentation générale de l'approche substance chimique de l'évaluation des risques pour les écosystèmes (ERE)

L'approche substance chimique suit la méthodologie détaillée dans les documents guides techniques de l'agence européenne des produits chimiques (ECHA⁵) pour l'application de la réglementation REACH⁶ (Guidance on information requirements and chemical safety assessment), notamment pour ce qui concerne la présente étude :

- Le chapitre R 10 « Characterisation of dose [concentration]-response for environment » (ECHA, 2008) et,
- La partie E « Risk Characterisation » (ECHA, 2016).

[ENREF 1](#) Cette approche présente l'intérêt de fonctionner via un processus méthodologique défini dans un cadre réglementaire et validé de manière consensuelle par différents groupes d'experts issus des pays de l'Union Européenne. Cette approche est également décrite dans le

⁴https://www.france-energies-marines.org/wp-content/uploads/2020/12/rapport_reco_anode_EN_BD.pdf

⁵ European Chemical Bureau

⁶ Registration, evaluation and authorisation of chemicals

document d'orientation, rédigé par l'Ineris, qui traite de l'évaluation des risques pour les écosystèmes liés aux rejets de substances chimiques issus des activités anthropiques (Ineris, 2022a).

4.1 Principes

Le risque (probabilité qu'un effet néfaste pour l'environnement se produise) est évalué en confrontant, pour une substance, les concentrations auxquelles sont exposés les différents compartiments (eau, sédiment, sol) d'un écosystème (PEC⁷ ou MEC⁸) avec des valeurs seuil de danger (PNEC⁹) pour les organismes associés (aquatiques, benthiques et terrestres). Il se présente sous la forme d'un indice de risque IR (Cf. Figure 1). L'approche substance chimique ne peut être employée que si les substances rejetées sont connues.

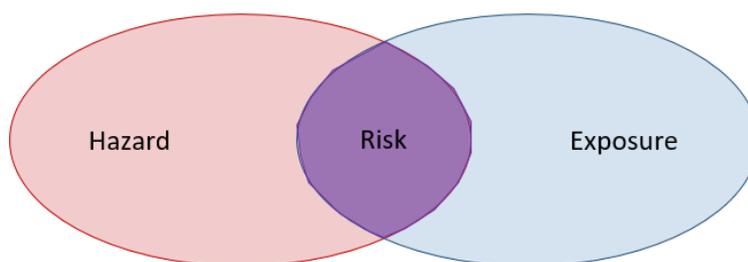


Figure 1 : Caractérisation du risque chimique

Le danger est défini comme une propriété intrinsèque de la substance, tandis que l'exposition est appréhendée par la concentration à laquelle les organismes sont en contact. Une substance identifiée comme peu dangereuse peut présenter un risque élevé si l'exposition est importante. Inversement, une substance très dangereuse peut être de moindre risque si l'exposition est faible.

La démarche d'évaluation des risques, respecte les quatre grands principes suivants :

- Le principe de prudence scientifique qui, en l'absence de données pertinentes, préconise le recours à des hypothèses et des choix raisonnablement majorants ;
- Le principe de proportionnalité qui veille à la cohérence entre le degré d'approfondissement des études et l'importance de la pollution et son incidence prévisible ;
- Le principe de spécificité qui veille à la pertinence des études par rapport à l'usage et aux caractéristiques du site et de son environnement ;
- L'objectif de transparence, qui veille, à travers l'explication et la justification des choix, à la lisibilité des études.

L'évaluation des risques menée dans le cadre du projet PolluEcume s'appuiera sur les connaissances scientifiques disponibles notamment concernant le danger des substances concernées et sur des données spécifiques aux systèmes anticorrosion (composition des anodes) et au site d'étude. La démarche d'évaluation des risques est construite de façon à s'accommoder du déficit de connaissance et de l'existence d'inévitables incertitudes scientifiques.

4.2 Une démarche par étape

Cette démarche d'évaluation se décompose en quatre étapes :

⁷ Predicted environmental concentration

⁸ Measured Environmental concentration

⁹ Predicted No Effect Concentration

1. L'identification des substances concernées (substances émises dans l'environnement par les anodes dans le cadre de la présente étude),
2. L'évaluation de l'exposition visant à déterminer les concentrations auxquelles sont exposées les populations des écosystèmes. Pour cela les PEC pour « Predicted Environmental Concentration » ou les MEC pour « Measured Environmental » selon qu'elles soient calculées ou mesurées, sont déterminées,
3. L'évaluation des dangers visant à identifier les concentrations prévues sans effets pour les organismes vivants dans le compartiment de l'environnement considéré. Pour cela les PNEC pour « Predicted No Effect Concentration » sont recherchées ou déterminées. Il s'agit de la concentration en dessous de laquelle aucun effet toxique sur les organismes n'est attendu,
4. La caractérisation du risque correspondant à une comparaison des concentrations d'exposition (PEC ou MEC) et des concentrations prévues sans effets pour l'environnement (PNEC), ce qui se traduit techniquement par le calcul du ratio $\frac{[\text{exposition}]}{[\text{danger}]}$ autrement appelé indice de risque ou ratio de caractérisation du risque (IR).

L'indice de risque calculé permet d'évaluer rapidement si le rejet d'une substance génère un risque pour la biodiversité de la zone d'étude. En l'état actuel des connaissances, il ne permet pas de quantifier précisément les impacts qui pourraient être observés comme un pourcentage d'organismes affectés de façon négative. Si la première itération, très protectrice (en l'absence de données pertinentes, des hypothèses et des choix raisonnablement majorants « pire cas réaliste » sont appliquées), ne permet pas de conclure quant au risque encouru, il est possible de poursuivre avec une approche dite affinée en tentant, si possible, de réduire les incertitudes associées à l'évaluation de l'exposition d'une part et/ou des dangers d'autre part. Par exemple, si l'étude concerne le rejet de 50 substances, le risque devra être caractérisé individuellement pour chacune de ces 50 substances. Il est possible que les conditions du scénario d'étude en première approche, très majorantes, suffisent à démontrer une absence de risque pour 40 substances. La prise en compte de données supplémentaires n'est alors nécessaire que pour les 10 substances pour lequel l'absence de risque n'a pas pu être démontrée. Dans le cadre de cette approche, les effets de type : additifs, synergiques ou antagonistes ne sont pas considérés.

Dans le cadre du projet PolluEcume la première itération est réalisée. Selon les conclusions obtenues des recommandations seront faites afin de tenter d'affiner l'évaluation et ainsi réduire les incertitudes dans le cadre d'une seconde itération.

La démarche d'évaluation des risques chimique peut se présenter comme illustrée sur la Figure 2.

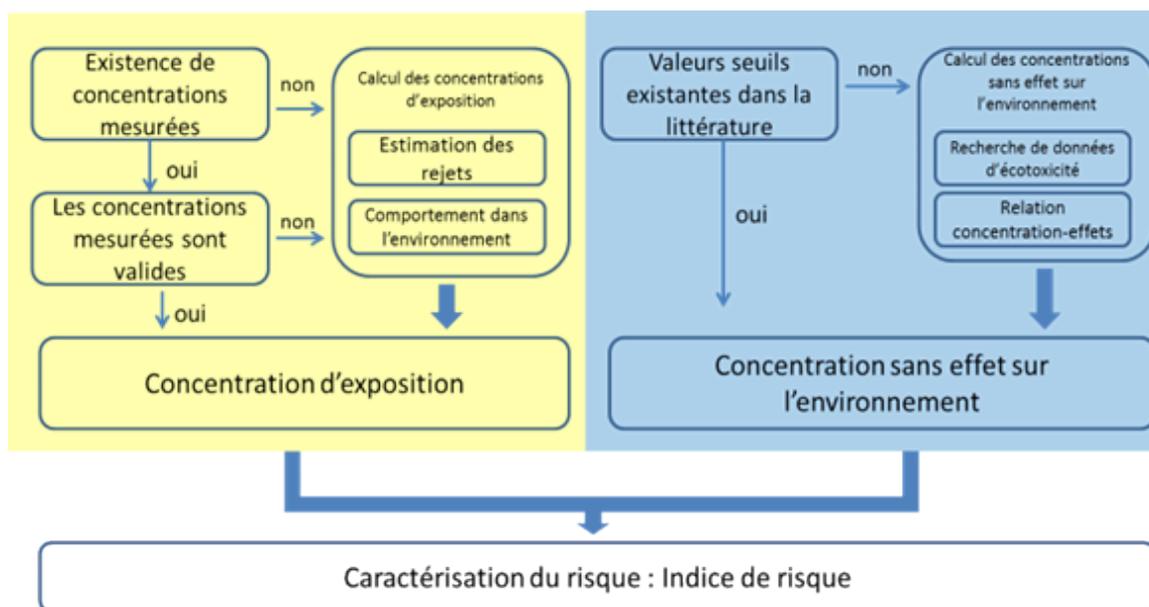


Figure 2 : Méthodologie générale de l'approche substance (Source : Guide technique Ineris, publication à venir)

5 Application de la démarche dans le cadre du projet PolluEcume

Le projet PolluEcume a été divisé en cinq tâches (Figure 2) correspondant aux différentes étapes nécessaires à la réalisation d'une évaluation du risque chimique pour l'environnement selon l'approche substance chimique tel que présentée ci-avant. Comme expliqué en introduction, le périmètre de cette étude est limité à la protection des organismes benthiques (compartiment sédimentaire) en complément des travaux réalisés dans le cadre du projet Anode qui s'intéressait quant à lui à la colonne d'eau.

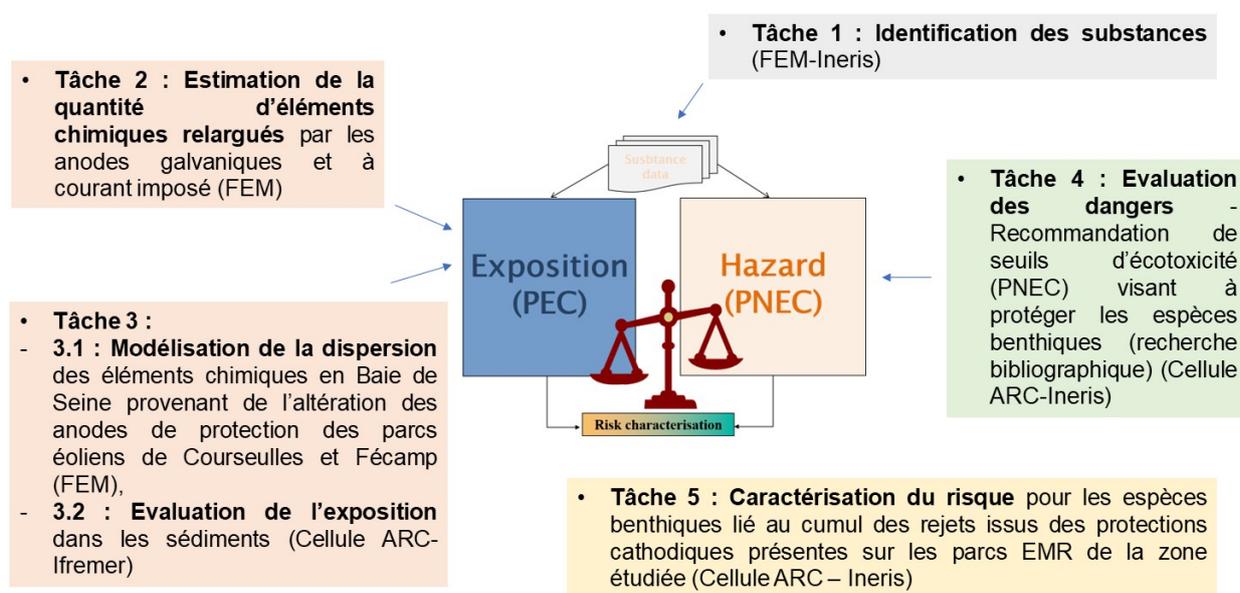


Figure 3 : Organisation du projet

5.1 Présentation des sites étudiés - Description des fondations et protections cathodiques des parcs de Courseulles, Fécamp et le Tréport

Dans le parc de Courseulles sur mer, les fondations choisies sont de type monopieu. Elles consistent en un pieu en acier fixé sur le fond marin. Dans le parc de Fécamp, les éoliennes seront installées sur des embases gravitaires. Elles sont constituées d'une large base en béton armé de forte inertie. Enfin dans le parc du Tréport, les éoliennes reposeront sur des fondations jacket, formées d'une structure en treillis d'acier tubulaire, reposant généralement sur quatre pieds ancrés par des pieux.

Il existe deux types de protection cathodique : les anodes sacrificielles ou galvaniques (GACP) et les anodes par courant imposé (ICCP).

Les anodes sacrificielles permettent, par leur oxydation plus rapide que celle du métal sur lequel elles sont posées, de protéger ce dernier de la corrosion. Elles sont majoritairement composées d'aluminium et de zinc avec des traces d'autres éléments. Contrairement aux anodes sacrificielles, les systèmes ICCP sont composés d'une anode en métal plus noble que la structure à protéger (généralement du titane) liée au côté positif d'un générateur. La structure à protéger est reliée au côté négatif du générateur. Ce dernier délivre donc directement l'intensité électrique nécessaire pour protéger la structure.

La masse d'anode sacrificielle et l'intensité des protections par courant imposé dépendent de la quantité d'élément métallique à protéger et donc du type de fondation de l'éolienne. La masse des anodes sacrificielles et l'intensité de courant sera plus forte pour le Tréport que pour Fécamp par exemple.

Masse d'anodes sacrificielles

- Dans le cadre de Courseulles-sur-Mer, le design initial présent dans l'étude d'impact de 2012, prévoyait l'installation de 30 anodes de 500 kg pour un total de 15 tonnes par fondation monopieu (Tableau 1),
- Dans le cas de Fécamp, il était prévu l'installation d'une tonne par fondation. Aucune information n'est donnée sur la répartition de celles-ci, cependant cela n'impacte pas le calcul des taux de relargages,
- Dans le cas du Tréport, le design décrit dans l'étude d'impact prévoyait l'installation de 16 unités d'anodes d'une tonne chacune pour un total de seize tonnes par fondation.

Les designs prévus en premier lieu sur ces trois parcs ont évolué depuis l'établissement des études d'impact. Les développeurs ont ainsi choisi de mettre en place des anodes par courant imposé (ICCP) à la place des anodes sacrificielles sur l'ensemble des trois parcs concernés par cette étude.

Intensité de courant appliqué par les ICCP

Les valeurs d'intensités du **parc de Tréport** utilisées dans ce rapport sont des informations provenant directement des porteurs de projet. Afin d'assurer la protection cathodique des fondations jacket, 8 dispositifs sont positionnés par fondation, chacune délivrant 75,4 A avec un total de 603,2 A pour une fondation.

N'ayant pas eu accès aux données du parc de Courseulles sur Mer et le parc de Fécamp nous avons estimé l'intensité minimale (I) nécessaire à assurer la protection de la structure en fonction des dimensions des fondations ces deux parcs. Cette intensité (I) dépend de la surface à protéger et peut être estimée comme suit :

$$I = A_c \cdot i_c \cdot f_c$$

(équation 1)

Avec A_c l'aire de la surface à protéger (la surface exposée à l'eau de mer), i_c la densité de design (le courant par unité de surface nécessaire pour assurer la protection) et f_c le facteur de recouvrement. Selon l'étude d'impact du projet de Courseulles-sur-Mer, aucune peinture anti-corrosion ne sera appliquée sur les parties immergées. Dans les cas des deux autres parcs, il n'est pas précisé que des peintures seront appliquées. On considère donc ici qu'aucune peinture ne sera appliquée sur les structures en fixant le facteur de recouvrement $f_c = 1$.

Pour Courseulles-sur-Mer, les fondations sont de type monopieu avec un diamètre de 7,5 m placé dans une zone avec une profondeur moyenne de 30 m. Il s'agit d'une fondation en acier et donc, d'après la recommandation DNVGL-RP-B401 (2017)¹⁰ du consultant spécialisé DNV, la densité de design de courant initial est de $i_c = 0,17 A.m^{-2}$. On peut donc déterminer que l'intensité nécessaire à la protection d'un monopieu est de 120,1 A. Cependant cette intensité n'est appliquée qu'au moment de l'installation sur une durée d'environ quelques semaines afin de polariser la structure. Après cette période d'initialisation, toujours d'après le DNVGL-RP-B401 (Corrosion protection design : RP-B401, 2017), la densité de design est réduite à $i_c = 0,08 A.m^{-2}$. Sur la majeure partie de la durée de vie des fondations, la charge appliquée sur l'ensemble de la structure serait donc de 56,52 A.

Pour le cas de Fécamp, les fondations sont de type gravitaire. Il s'agit d'une structure dont l'embase mesure 36 m de diamètre et la partie supérieur 6 m de diamètre. En simplifiant la géométrie et en la considérant conique, on peut déterminer que la surface à protéger est de 2213 m^2 . La protection cathodique est mise en place pour protéger les barres métalliques intégrées dans le béton et nécessite donc une intensité de courant bien plus faible. D'après le DNVGL-RP-B401 (2017), la polarisation n'est pas nécessaire dans ce cas et une intensité de design de 0,0015 $A.m^{-2}$ peut être appliqué de manière constante amenant l'intensité nécessaire pour assurer la protection à une valeur de 3,32 A.

Tableau 1 : Description des différents types d'anodes appliquées ou applicables aux fondations des parcs éolien en mer de Dieppe le Tréport, Fécamp et Courseulles sur Mer.

	Type de fondation	Masse d'anode galvanique par fondation	Intensité de courant des protections cathodique appliqué par fondation (en ampère)
Dieppe le Tréport	Jacket	16 t	603,2 A (cas réel)
Fécamp	Gravitaire	1 t	3,32 A (estimée, cas réel)
Courseulles sur mer	Monopieu	15 t	56,52 A (estimée, cas réel)

Dans le cadre de cette étude, et afin d'évaluer l'impact du choix des dispositifs anticorrosion appliqués sur les différents parcs, trois scénarios ont été testés sans se limiter à la situation réelle :

- Scénario 1 – Les trois parcs sont protégés par des anodes sacrificielles (GACP) en aluminium ;
- Scénario 2 – Les trois parcs sont protégés par des dispositifs de protection par courant imposé (ICCP) ;
- Scénario 3 – Mixte : Les parcs de Courseulles-sur-Mer et le Tréport sont protégés par dispositifs de protection par courant imposé (ICCP) et Fécamp par des anodes sacrificielles (GACP). *Ce scénario représentait le cas réel de la configuration des trois parcs lors de la soumission du projet. Cette configuration*

¹⁰ <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-b401-cathodic-protection-design/>. DNV-GL, 2017. Corrosion protection design : RP-B401, s.l.: s.n (en accès restreint).

a évolué depuis, le choix a été fait d'utiliser des anodes de type ICCP également sur le site de Fécamp.

5.2 Identification des substances

Cette étape concerne l'identification des substances potentiellement émises dans l'environnement lors de la phase de fonctionnement des différents types d'anodes anticorrosion mises en place sur les parcs EMR.

5.2.1 Éléments potentiellement émis dans l'environnement lors de l'utilisation d'un système de protection cathodique par anode sacrificielles (GACP)

Un travail bibliographique sur la composition des anodes sacrificielles de type Aluminium (Al) a permis d'établir une liste de composés métalliques majoritairement présents dans les alliages constituant l'anode et par conséquent susceptibles d'être émis dans l'environnement lors de l'utilisation de ce type de protection pour les parcs éoliens en mer. Une étude de Reese *et al.* (2020) s'est intéressée en particulier à la composition de différentes formulations commerciales d'anodes sacrificielles de type aluminium (n=4)). Le Tableau 2 présente les éléments métalliques retrouvés dans ce type d'anode.

Dans les anodes de type aluminium Al, un total de 26 éléments (Al, Zn, Fe, Bi, Mn, In, V, Ga, Ni, Pb, Cu, Mg, Cr, Cd, Co, Sn, La, U, Ce, Ag, Tl, Nd, Gd, Dy, Sm, Pr) ont été répertoriés au-delà des limites de quantification de la méthode analytique (Tableau 2). Ce type d'anode est préférentiellement utilisé dans les différents parcs éoliens offshore (Kirchgeorg *et al.*, 2018 ; Erdogan et Swain, 2021).

Tableau 2 : Fractions massiques (en mg par Kg d'anode) des éléments analysés dans quatre formulations commerciales d'anode de type aluminium. D'après Reese et al. (2020).

Elément	Anode de type aluminium							
	Minimum [mg/kg]		Maximum [mg/kg]		médian [mg/kg]		Moyen [mg/kg]	
Al	944000,0	±	37000,0	1010000,0	±	50000,0	1015000,0	1001000,0
Zn	26200,0	±	300,0	60700,0	±	300,0	33200,0	38325,0
Fe	526,0	±	16,0	1670,0	±	70,0	720,5	909,3
Bi	<0,052 (LD)		665,0	±	31,0	665,0	665,0	
Mn	7,6	±	0,3	2380,0	±	80,0	9,3	601,6
In	143,0	±	2,0	231,0	±	13,0	204,5	195,8
V	97,6	±	4,5	131,0	±	2,0	118,0	116,2
Ga	78,5	±	1,0	133,0	±	6,0	100,4	103,1
Ni	30,1	±	0,9	52,4	±	0,9	35,4	38,3
Pb	6,7	±	0,2	9,7	±	0,1	8,9	8,5
Cu	4,9	±	0,1	17,4	±	0,5	5,2	8,2
Mg	<2,5 (LQ)		7,2	±	0,5	5,2	5,2	
Cr	2,1	±	0,1	5,6	±	0,2	4,1	4,0
Cd	0,2	±	0,1	6,9	±	0,1	1,4	2,5
Co	1,8	±	0,1	3,4	±	0,1	2,1	2,4
Sn	0,5	±	0,4	3,4	±	2,1	1,2	1,6
La	1,0	±	0,1	1,3	±	0,1	1,1	1,1
U	0,3	±	0,0	1,8	±	0,0	0,6	0,8
Ce	0,5	±	0,0	1,2	±	0,1	0,6	0,7
Ag	<0,077 (LQ)		0,4	±	0,0	0,4	0,4	
Tl	<0,11 (LQ)		0,6	±	0,0	0,2	0,3	
Nd	0,1	±	0,0	0,3	±	0,0	0,1	0,2
Gd	<0,047 (LQ)		0,1	±	0,0	0,1	0,1	
Dy	<0,044 (LQ)		0,1	±	0,0	0,1	0,1	
Sm	<0,044 (LQ)		0,1	±	0,0	0,1	0,1	
Pr	<0,041 (LQ)		0,1	±	0,0	0,1	0,1	
K	<4,1 (LD)		<12 (LQ)		-	-	-	
Ba	<0,034 (LD)		<0,092 (LQ)		-	-	-	
Eu	<0,019 (LD)		-	-	-	-	-	
Tb	<0,0096 (LD)		-	-	-	-	-	
Be	<0,066 (LD)		<0,22 (LQ)		-	-	-	
As	<0,22 (LD)		-	-	-	-	-	
Se	<0,36 (LD)		-	-	-	-	-	
Rb	<0,021 (LD)		-	-	-	-	-	

Elément	Anode de type aluminium			
	Minimum [mg/kg]	Maximum [mg/kg]	médian [mg/kg]	Moyen [mg/kg]
Sr	<0,024 (LD)	-	-	-
Ho	<0,015 (LD)	-	-	-
Er	<0,019 (LD)	<0,062 (LQ)	-	-
Tm	<0,012 (LD)	-	-	-
Yb	<0,0065 (LD)	<0,022 (LQ)	-	-
Lu	<0,014 (LD)	-	-	-

LD : Limite de détection ; LQ : limite de quantification

Une recherche du statut réglementaire de chacune des substances présentées dans le tableau 2 dans le cadre des directives et règlements suivant, a été réalisée :

- Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE),
- Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE),
- Règlement REACH : « Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne,
- Règlement CLP - Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2000.

Les informations associées à cette recherche sont présentées en annexes 3.

5.2.2 Eléments potentiellement émis dans l'environnement lors de l'utilisation d'un système de protection cathodique par anode à courant imposé (ICCP)

5.2.2.1 Contexte

En l'absence d'étude publiée concernant l'usage d'anodes à courant imposé (ICCP) dans le cadre de parcs éolien en mer, les données présentées dans la suite du document sont issues d'études traitant de suivis environnementaux de l'utilisation de l'électro-chloration comme solution biocide pour le traitement avant rejet d'eaux de mer utilisées à des fins de refroidissement de centrales thermiques. Ce procédé d'électro-chloration consiste à réaliser une électrolyse de l'eau de mer pour générer du dichlore (Cl_2). Lors de l'utilisation d'un système de protection ICCP en mer, selon le même principe électrochimique que l'électro-chloration, une électrolyse de l'eau de mer va avoir lieu et conduire à la production de dichlore *via* les ions chlorures (Cl^-) présents dans l'eau de mer. Dans le cadre d'un traitement biocide dans une canalisation, les teneurs en dichlore initiaux sont de l'ordre de 0.5 à 0.8 mg/L. Ces teneurs ne sont pas du même ordre de grandeur que celles qui devraient être rencontrées lors l'utilisation d'un système ICCP dans le cadre d'un parc éolien en mer. En effet, le rapport *Eoliennes Flottantes du Golfe du Lion - Étude d'impact sur l'environnement au titre de l'article R.122-5 II 1 du code de l'environnement* considère qu'un flotteur protégé par de l'ICCP avec une surface d'encombrement de 800 m² dans la colonne d'eau émettra 1264 g de dichlore/h respectivement en phase de polarisation et 186 g de dichlore/h en phase d'exploitation. Les auteurs de ce rapport estiment qu'en raison des phénomènes de dilution la concentration en Cl_2 à l'aval direct du flotteur sera de 2 µg/L en phase de polarisation et de 0,3 µg/L en phase d'exploitation.

Le dichlore ajouté dans l'eau de mer va réagir rapidement pour former différents sous-produits de chloration (SPC). L'analyse de ces SPC dans un contexte de suivi des contaminations de l'environnement côtier par des procédés industriels a fait l'objet de plusieurs études qui nous offrent des éléments de réponses pertinents pour pallier le manque d'informations bibliographiques sur les éléments potentiellement émis dans l'environnement par l'usage d'anode par courant imposé (ICCP) dans le cadre de parcs éolien en mer.

5.2.2.2 Principaux sous-produits de chlorations retrouvés dans l'environnement

La caractérisation des différents sous-produits (SPC) dans les effluents de refroidissement des centrales nucléaires côtières française a été réalisée par Allonier *et al.* (1999). Les principaux résultats sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Concentrations moyennes des principaux composés halogénés mesurées dans les effluents de refroidissement de trois centrales nucléaires côtières. D'après Allonier *et al.* (1999).

Zone de rejet	Dichlore (mg/l) par électrolyse	Bromoforme (µg/L)	Dibromoacétonitrile (µg/L)	tribromophénol (µg/L)	Acide dibromoacétique (µg/L)
Gravelines	0,77 ± 0,12	26,75 ± 5,88	3,61 ± 1,11	0,37 ± 0,05	9,50 ± 1,96
Penly	0,57 ± 0,13	7,37 ± 1,66	0,94 ± 0,84	0,10 ± 0,04	7,25 ± 2,29
Paluel	0,20 ± 0,02	26,80 ± 5,62	2,83 ± 0,74	0,14 ± 0,05	10,19 ± 3,95

L'étude de Allonier *et al.* (1999) rapporte quatre principaux SPC halogénés dans les effluents de refroidissement de centrales nucléaires. Pour les trois sites d'études, le bromoforme apparait comme le SPC majoritaire suivi de l'acide dibromoacétique, puis le dibromoacétonitrile et enfin le tribromophénol (2,4,6-Tribromophénol). Ce travail peut être complété par une étude plus exhaustive de Boudjellaba *et al.* (2016) sur la présence de SPC dans les eaux du Golfe de Fos. Les auteurs ont pu mettre en évidence différents SPC à des teneurs variables selon les composés et les saisons. Le bromoforme est également le SPC ayant les plus fortes teneurs dans cette étude. Une liste des composés retrouvés est présentée dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Sous-produits de chlorations détectés dans le golfe de Fos. D'après Boudjellaba et al. (2016)

Famille	Molécule
Trihalométhane	Bromoforme
	Chloroforme
	Dibromochloroforme
Haloacétonitrile	Bromochloroacétonitrile
	Dibromoacétonitrile
Acide haloacétique	Acide dibromoacétique
	Acide dibromochloroacétique
	Acide tribromoacétique
Halophénols	2-Bromo-4-chlorophénol
	2,4-Dibromophénol
	2,6-Dibromophénol
	2,4,6-Tribromophénol

Enfin, en se basant entre autres sur les travaux de Boudjellaba et al. (2016), Lebaron (2020) dans son travail de thèse fait un état des lieux des différents SPC présents dans différentes matrices du Golfe de Fos. Il en ressort que 4 groupes de composés halogénés sont retrouvés : les trihalométhanes, les acides haloacétiques, les haloacétonitriles et les halophénols. Parmi ces quatre groupes, les trihalométhanes sont majoritaires (de 45 à 65% des SPC mesurés). Ce groupe est majoritairement constitué de bromoforme. Le deuxième groupe au niveau de l'abondance est celui des acides haloacétiques (entre 25 à 45% des SPC) avec l'acide dibromoacétique et l'acide tribromoacétique comme éléments majoritaires. Les haloacétonitriles arrivent en troisième position (de 6 à 9% des SPC) avec le dibromoacétonitrile comme composé majeur de ce groupe. Enfin les halophénols ferment le classement (< 1% des SPC) avec le 2,4,6-tribromophénol comme composé majoritaire (Dron et al., 2022). Toutefois, il convient de noter que la présence de ces molécules dans le golfe de Fos peut également être due à d'autres types de sources.

Une recherche du statut réglementaire de chacune des substances présentées dans le tableau 2 dans le cadre des directives et règlements suivant, a été réalisée :

- Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE),
- Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE),
- Règlement REACH : « Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne,
- Règlement CLP - Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2000.

Les informations associées à cette recherche sont présentées en annexes 3.

5.3 Evaluation de l'exposition

L'objectif ici est de proposer une méthodologie permettant d'estimer les concentrations des substances dans les sédiments, à partir des résultats de concentration dans l'eau marine obtenus lors de la modélisation réalisée dans le cadre de ce projet mais aussi de vérifier sa faisabilité technique.

5.3.1 Taux de relargage des éléments émis dans l'environnement

5.3.1.1 Utilisation d'un système de protection cathodique par anode sacrificielle (GACP)

5.3.1.1.1 Méthode

Afin de déterminer le taux de relargage de chacun des éléments composant les anodes sacrificielles, il existe deux méthodes. Chacune des deux méthodes donne les mêmes résultats et donc dans un souci de simplicité, nous ne prendrons en compte que celle décrite par la norme NF EN 12496 (AFNOR, 2013). Pour commencer, il est nécessaire de déterminer l'intensité du courant (I) traversant chaque anode en suivant l'équation suivante :

$$I = \frac{M_a \cdot \eta \cdot Q}{t_f} \quad (\text{équation 2})$$

Où I l'intensité du courant traversant l'anode (en ampère, A) est déterminée en fonction de M_a sa masse (kg), η son facteur d'efficacité (ici égale à 85% dans le cas d'une anode à base d'aluminium), Q sa capacité de courant (2500 Ah.kg⁻¹¹¹ et t_f la durée d'immersion des anodes généralement considérée égale à la durée d'exploitation du parc éolien soit 25 ans. Un fois ce courant déterminé, il suffit de le multiplier par le taux de consommation des anodes en aluminium par année soit 3.5 kg.an⁻¹ pour obtenir le taux de relargage par anode. A partir de ce taux de relargage par anode, il est possible de déterminer le taux de relargage de chaque élément de l'alliage anodique en considérant qu'il est proportionnel à la composition de l'anode.

5.3.1.1.2 Estimation des taux de relargage par éléments

Cette méthode est appliquée dans le cadre des trois parcs considérés dans cette étude. La composition des anodes en aluminium est variable en fonction de la fabrication. Par exemple, dans le cas d'anode à base d'aluminium, il est précisé que la part de l'aluminium varie entre 94 et 100 % de la masse totale de l'anode. En l'absence de données précises, les pourcentages maximums seront retenus pour déduire les taux de relargage afin de se placer en condition pire cas pour chacun des éléments. La méthode précédemment décrite est donc appliquée et les taux de relargage pour chacun des éléments sont résumés dans les trois tableaux suivants (tableaux 5, 6 et 7). Les concentrations maximales de certains éléments sont inférieures au seuil de détection (5.2.1). Ces éléments ne seront donc pas pris en compte ici.

Tableau 5. Taux de relargage estimé pour chaque élément pour les installations du parc de Courseulles-sur-Mer.

	Fraction massique considérées (mg/kg)	Pourcentages	Taux de relargage par anode (mg/h)	Taux de relargage par fondation (mg/h)
Total	-	100	1 939,31	58 179,33
Aluminium (Al)	1 000 000	100	1 939,31	58 179,33
Zinc (Zn)	61 000	6,1	118,3	3 548,94
Fer (Fe)	1 740	0,17	3,37	101,23
Bismuth (Bi)	696	6,96.10 ⁻²	1,35	40,49
Manganèse (Mn)	2 460	0,25	4,77	143,12
Indium (In)	244	2,4.10 ⁻²	0,47	14,2
Vanadium (V)	133	1,3.10 ⁻²	0,26	7,74
Gallium (Ga)	139	1,4.10 ⁻²	0,27	8,09
Nickel (Ni)	53,3	5,3.10 ⁻³	0,1	3,1
Plomb (Pb)	9,8	9,8.10 ⁻⁴	1,9.10 ⁻²	0,57

¹¹ Ampère-heure par kg

	Fraction massique considérées (mg/kg)	Pourcentages	Taux de relargage par anode (mg/h)	Taux de relargage par fondation (mg/h)
Cuivre (Cu)	17,9	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	1,04
Magnésium (Mg)	7,7	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,45
Chrome (Cr)	5,8	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,34
Cadmium (Cd)	7	$7 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,41
Cobalt (Co)	3,5	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	0,2
Etain (Sn)	5,5	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,32
Lanthane (La)	1,4	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-2}$
Uranium (U)	1,8	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	0,1
Cérium (Ce)	1,3	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-2}$
Argent (Ag)	0,4	$4 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Titane (Ti)	0,6	$6 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Néodyme (Nd)	0,3	$3 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
Gadolinium (Gd)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
Dysprosium (Dy)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
Samarium (Sm)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
Praseodymium (Pr)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$

Tableau 6. Taux de relargage estimé pour chaque élément pour les installations du parc de Fécamp.

	Fraction massique considérées (mg/kg)	Pourcentages	Taux de relargage par anode (mg/h)	Taux de relargage par fondation (mg/h)
Total	-	100	386,72	3 867,21
Aluminium (Al)	1 000 000	100	386,72	3 867,21
Zinc (Zn)	61 000	6,1	23,59	235,9
Fer (Fe)	1 740	0,17	0,67	6,73
Bismuth (Bi)	696	$6,96 \cdot 10^{-2}$	0,27	2,69
Manganèse (Mn)	2 460	0,25	0,95	9,51
Indium (In)	244	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-2}$	0,94
Vanadium (V)	133	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	0,51
Gallium (Ga)	139	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	0,54
Nickel (Ni)	53,3	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,21
Plomb (Pb)	9,8	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$
Cuivre (Cu)	17,9	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$
Magnésium (Mg)	7,7	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Chrome (Cr)	5,8	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
Cadmium (Cd)	7	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$
Cobalt (Co)	3,5	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Etain (Sn)	5,5	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
Lanthane (La)	1,4	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Uranium (U)	1,8	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$

	Fraction massique considérées (mg/kg)	Pourcentages	Taux de relargage par anode (mg/h)	Taux de relargage par fondation (mg/h)
Cérium (Ce)	1,3	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Argent (Ag)	0,4	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Titane (Ti)	0,6	$6 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
Néodyme (Nd)	0,3	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Gadolinium (Gd)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$
Dysprosium (Dy)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$
Samarium (Sm)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$
Praseodymium (Pr)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$

Tableau 7. Taux de relargage estimé pour chaque élément pour les installations du parc du Tréport.

	Fraction massique considérées (mg/kg)	Pourcentages	Taux de relargage par anode (mg/h)	Taux de relargage par fondation (mg/h)
Total	-	100	3 871,78	61 943,87
Aluminium (Al)	1 000 000	100	3 871,78	61 943,87
Zinc (Zn)	61 000	6,1	236,18	3 778,58
Fer (Fe)	1 740	0,17	6,74	107,78
Bismuth (Bi)	696	$6,96 \cdot 10^{-2}$	2,69	43,11
Manganèse (Mn)	2 460	0,25	9,52	152,38
Indium (In)	244	$2,4 \cdot 10^{-2}$	0,94	15,11
Vanadium (V)	133	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0,51	8,24
Gallium (Ga)	139	$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,54	8,61
Nickel (Ni)	53,3	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0,21	3,3
Plomb (Pb)	9,8	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,61
Cuivre (Cu)	17,9	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$	1,11
Magnésium (Mg)	7,7	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2}$	0,48
Chrome (Cr)	5,8	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	0,36
Cadmium (Cd)	7	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	0,43
Cobalt (Co)	3,5	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,22
Etain (Sn)	5,5	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,34
Lanthane (La)	1,4	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-2}$
Uranium (U)	1,8	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$	0,11
Cérium (Ce)	1,3	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$
Argent (Ag)	0,4	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Titane (Ti)	0,6	$6 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$
Néodyme (Nd)	0,3	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
Gadolinium (Gd)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Dysprosium (Dy)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Samarium (Sm)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Praseodymium (Pr)	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$

5.3.1.2 Utilisation d'un système de protection par courant imposé (ICCP)

5.3.1.2.1 Méthode

Contrairement aux anodes sacrificielles, les éléments relargués dans l'environnement dans le cas d'une utilisation d'un système par courant imposé ne dépendent pas de la composition de l'anode. Ces systèmes comportent effectivement des anodes (généralement en titane) mais les éléments relargués seront issus de l'électrochloration de l'eau de mer générant du dichlore. Le taux de relargage de dichlore peut être estimé en utilisant la loi électrochimique de Faraday suivante :

$$m_r = \frac{I \cdot M_{Cl^-}}{F} \quad (\text{équation 3})$$

Où m_r la masse de dichlore relarguée par seconde dépend de la charge I (intensité en ampère) passant à travers l'anode, la masse molaire du chlore ($M_{Cl^-} = 35.45 \text{ g.mol}^{-1}$) et la constante de Faraday ($F = 96485 \text{ A.s.mol}^{-1}$). La charge I dépend du dimensionnement de la protection appliquée à la structure.

5.3.1.2.2 Estimation des taux de relargage par éléments

Les taux de relargages sont estimés pour les trois parcs considérés dans cette étude (Courseulles-sur-Mer, Fécamp et le Tréport). Dans le cas de Courseulles-sur-Mer et de Fécamp, aucune information concernant le design de la protection par ICCP n'a été mise à disposition. L'intensité minimale pour assurer la protection des fondations a donc été estimée et présentée dans le tableau 1.

A partir des informations à disposition, l'équation 2 est appliquée à chacun des cas et les taux de relargage de dichlore pour chacun des parcs sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 8. Taux de relargage estimé pour le dichlore pour les trois parcs.

	Intensité de courant appliqué (en A)	Taux de relargage de Dichlore (en g/h)
Courseulles-sur-Mer	56,52	74,76
Fécamp	3,32	3,39
Le Tréport	603,2	797,85

D'après les travaux de Boudjellaba et al. (2016) et Lebaron (SOUS-PRODUITS DE CHLORATION DU GOLFE DE FOS, 2020), le dichlore se transforme 4 groupes de composés halogénés principaux : les trihalométhanes, les acides haloacétiques, les haloacétonitriles et les halophénols. Pour chacun de ces groupes, des taux de conversion sont estimés dans les travaux précédemment cités (Boudjellaba et al. (2016) et Lebaron (SOUS-PRODUITS DE CHLORATION DU GOLFE DE FOS, 2020)). Pour chacun des parcs, les taux de relargage de ces composés sont détaillés dans le tableau 9. Comme dans le cas des anodes galvaniques, on se positionne ici dans une situation de pire cas réaliste, les pourcentages maximaux estimés sont donc considérés. Ceci explique le taux de relargage total supérieur à 100% présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 9. Taux de relargage estimé pour chaque élément en fonction du taux de relargage en g/h du dichlore pour les trois parcs.

	Trihalométhane (65 %)	Acide haloacétique (45 %)	Haloacétonitrile (9 %)	Halophénol (1 %)
Courseulles-sur-Mer	48,59	33,64	6,73	0,75
Fécamp	2,2	1,53	0,31	3,3.10 ⁻²
Le Tréport	518,6	359,03	71,81	7,98

A noter que certains de ces éléments sont très volatils et les taux de relargage estimés ici ne prennent pas en compte l'influence de la volatilité, ou encore des éventuels phénomènes de dégradation dans l'environnement marin de ces éléments.

5.3.2 Présentation de la méthodologie proposée pour estimer les concentrations des substances dans les sédiments

L'objectif ici est de proposer une méthodologie permettant d'estimer les concentrations des substances dans les sédiments, à partir des résultats de concentration dans l'eau marine obtenus lors de la modélisation réalisée dans le cadre de ce projet mais aussi de vérifier sa faisabilité technique.

Les substances visées sont celles susceptibles d'être relarguées dans le milieu marin par les dispositifs anticorrosion listés ci-avant. La modélisation réalisée par France Energies Marines dans le cadre de ce projet est détaillée dans un document annexe accessible. Les principaux éléments sont repris dans ce rapport. Pour plus de détails concernant les hypothèses, paramètres et l'application du modèle, se référer au document spécifique rédigé par France Energies Marines (FEM), intitulé « *Projet PolluEcume-Tâche 3 - Rapport décrivant la méthodologie et les résultats des simulations numériques* ».

Les concentrations prédites totales auxquelles pourraient être exposés les espèces benthiques seront déterminées, en cumulant les concentrations prédites associées aux composés relargués par les dispositifs anticorrosion dans le cas des anodes galvaniques (GACP) ou différents sous-produits de chloration associés à l'utilisation des dispositifs d'électrochloration (ICCP) des parcs éoliens aux concentrations initiales présentes dans le milieu.

S'agissant d'une démarche d'évaluation de risque, ayant une finalité de protection des écosystèmes marins, une approche « pire cas réaliste » est privilégiée en première intention dans le respect des principes évoqués avant (4.1), aussi lorsque des choix sont à faire (en l'absence d'information plus précise), celui de maximiser la concentration prédite sera retenu.

La méthodologie proposée est décrite puis appliquée à la zone d'étude, la Baie de Seine, en considérant les parcs de Courseulles-sur-Mer, Le Tréport et Fécamp. Trois scénarios sont testés afin d'évaluer l'impact du choix des différents dispositifs appliqués sur les différents parc (anodes sacrificielles ou anodes par système de courant imposé (ICCP) :

- Scénario 1 – Anodes sacrificielles GACP : L'ensemble des trois parcs : Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport2 ; sont protégés par des anodes sacrificielles (GACP) en aluminium. Ce scénario représentait un cas fictif de la configuration des trois parcs lors de la soumission du projet ;
- Scénario 2 – Anodes par système de courant imposé (ICCP) : Les trois sites Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport sont protégés par des dispositifs de protection par courant imposé (ICCP). Ce scénario représentait un cas fictif de la configuration des trois parcs lors de la soumission du projet ;
- Scénario 3 – Mixte (Anodes sacrificielles (GACP) et par courant imposés (ICCP) : Les parcs de Courseulles-sur-Mer et le Tréport sont protégés par dispositifs de protection par courant imposé (ICCP) et Fécamp par des anodes sacrificielles (GACP). *Ce scénario représentait le cas réel de la configuration des trois parcs lors de la soumission du projet. Cette configuration a évolué depuis, le choix a été fait d'utiliser des anodes de type ICCP également sur le site de Fécamp.*

Le comportement biogéochimique d'une substance en milieu marin dépend de ses propriétés physico-chimiques et des conditions environnementales du milieu. Ce sont des relations complexes, d'autant plus lorsque plusieurs substances sont considérées. Afin d'aider à mieux décrire le comportement des substances organiques et métalliques en milieu marin, des modèles mathématiques ont été développés par Ifremer entre 1998 et 2011 (Gonzalez, 2017) : le modèle MORGAN : Modèle de comportements des contaminants ORGANIques en milieu aquatique et le modèle MOCO : Modèle de Complexation de surface pour les contaminants métalliques, tous deux regroupés ensuite au sein du modèle MOMO (MORGAN+MOCO), pour simuler les différents processus qui affectent le comportement des contaminants chimiques dans une masse d'eau homogène (biodégradation, adsorption/désorption,

photolyse, hydrolyse, volatilisation, complexation de surface, échange cationique, partage à l'équilibre, ...). La Figure 4 précise les différents processus et relations existantes entre les contaminants dissous et particulaires (Thouvenin, Gonzalez, 2021).

Pour être fiables, ces modèles ont besoin d'être alimentés par de nombreuses données d'entrée et les résultats en sortie de modèle doivent pouvoir être validés par des mesures *in situ*.

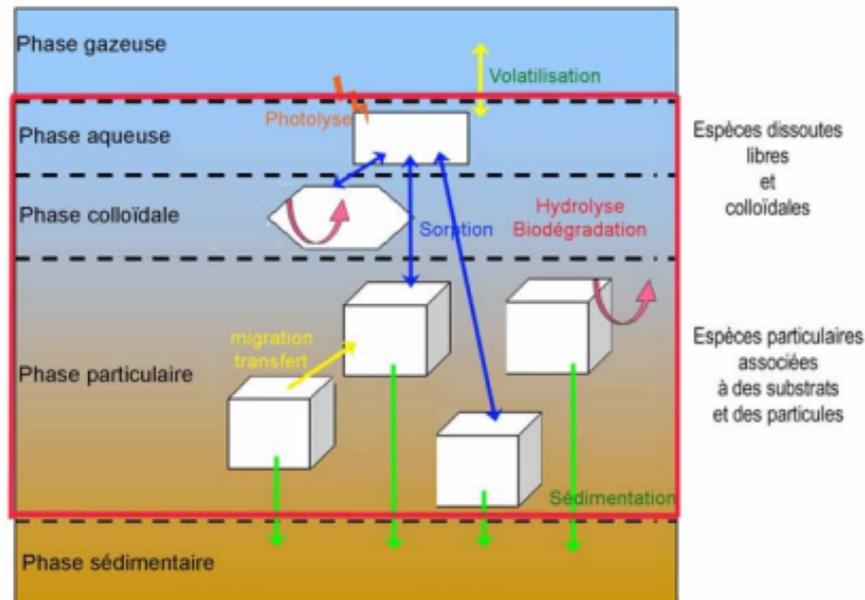


Figure 4: Schéma conceptuel général du modèle MOMO avec les différentes espèces chimiques pouvant être prises en compte et quelques processus possibles (Thouvenin, Gonzalez, 2021)

La méthodologie proposée dans ce document n'est pas basée sur ce type d'approche relativement complexe. En première intention, une approche générique est développée qui se veut pragmatique, applicable à différents secteurs et s'appuyant sur les connaissances disponibles avec en particulier les coefficients de transfert.

Seules les substances émises par les dispositifs anticorrosion des parcs EMR et susceptibles de s'accumuler dans les sédiments sont considérées. Leur capacité d'adsorption sur les particules est tout d'abord vérifiée, avec comme critère pour les substances organiques, un coefficient de partage entre le carbone organique et l'eau ($K_{oc} \geq 1000 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$ (ou $\log K_{oc} \geq 3$). Le K_{oc} n'est pas directement applicable aux métaux, pour lesquels l'adsorption sur les sédiments ou les particules en suspension varie selon différents paramètres tels que la teneur en matières organiques, le pH, le potentiel d'oxydoréduction, etc... C'est pourquoi, pour les métaux la démarche est réalisée systématiquement.

Le processus de base considéré est que les substances peuvent s'adsorber sur les particules en suspension (MES), particules qui peuvent ensuite sédimenter (*i.e.* il n'y a pas d'adsorption sans particules (MES) et pas de sédimentation sans particules (MES)).

L'approche générale proposée comprend cinq étapes décrites ci-après et reprises dans la Figure 5 :

① Caractérisation initiale de la zone : circulation hydrodynamique, caractérisation des fonds, localisation des zones d'accumulation de sédiments fins (< 0,63 mm) (la fraction fine des sédiments, riche en argiles et en matière organique, étant celle qui a les capacités de sorption les plus élevées). Identification des zones d'habitats benthiques, des zones conchylicoles, des zones protégées ou tout autre secteur d'intérêt permettant de cibler ceux nécessitant un zoom spécifique (voir étape 3 ci-après).

A noter que l'évolution de la dynamique sédimentaire en lien avec l'implantation d'un parc éolien en mer (travaux, fonctionnement, ...) n'étant pas connu, cet aspect est hors du périmètre du projet PolluEcume.

② Réalisation de l'étape de modélisation hydrodynamique - sur le secteur d'emprise considéré – simulation sur 10 ans de la dispersion spatio-temporelle des contaminants relargués par les dispositifs anticorrosion des parcs éoliens en mer suivant les trois scénarios testés (scénario 1 : Anode sacrificielles (GACP), scénario 2 : Anodes par système de courant imposé (ICCP), scénario 3 : Mixte, les deux types

d'Anodes sont utilisés). La modélisation prend en compte uniquement la contamination supplémentaire induite par les dispositifs anticorrosion des parcs EMR. Les résultats des modélisations permettent d'identifier les secteurs présentant les concentrations les plus élevées dans l'eau marine, ces secteurs sont situés au sein de chaque parc à proximité des éoliennes.

③ Sélection des points d'intérêt au sein du secteur étudié :

- Points présentant les concentrations prédites dans l'eau marine les plus élevées au sein de chaque parc : « Courseulles-sur-Mer, Le Tréport, Fécamp »,
- Points localisés dans des secteurs où les concentrations en MES sont les plus élevées, secteurs d'accumulation de sédiments fins. La caractérisation des fonds est réalisée sur la base de la bibliographie existante (cartographies SHOM, ...). L'identification de points sur lesquels le sédiment présente une portion minimale de fines (20%) est faite à l'aide des résultats du Réseau d'Observation de la Contamination Chimique sur le Sédiment (ROCCH SED), (<https://ccem.ifremer.fr/Observation/ROCCH-Depuis-1974>).
- Points localisés dans des secteurs d'intérêt particuliers : zones conchylicoles, zones protégées, zones d'habitats benthiques, ...

④ Pour chacun des points d'intérêt sélectionnés lors de l'étape 3 et pour chacune des substances relarguées, les résultats de la modélisation permettent de disposer de la concentration prédite dans l'eau marine : moyenne des concentrations, et concentration maximale sur 48 h consécutives.

⑤ Evaluation de la concentration prédite particulaire/sédimentaire en considérant les MES et la concentration moyenne la plus élevée dans l'eau marine.

Cette approche est basée sur les équations définies dans le modèle MOMO (Thouvenin, Gonzalez, 2021) faisant l'hypothèse (la plus simple) d'un partage à l'équilibre et linéaire régi par un coefficient de partage, en ne considérant qu'une seule espèce dissoute et une seule espèce particulaire.

$$C_s = K_p * C_{eau} \text{ (Equation n°4)} \quad \text{et} \quad C_T = C_p + C_{eau}$$

$$C_p = C_s * MES \text{ (Equation n° 5)}$$

$$C_{eau} = C_T / (1 + K_p MES) \text{ (Equation n° 6)}$$

C_{eau} : concentration de la substance dissoute (M/V)

C_p : concentration de la substance particulaire (M/V)

C_s : concentration de la substance particulaire par kg de matières en suspension (M/M)

C_T : concentration totale de la substance (dissous + particulaire) (M/V)

MES : concentrations en matières en suspension (masse de particules) (M/V)

K_p pour les éléments métalliques : coefficient de partage matière en suspension/ eau (V / M), K_{oc} pour les substances organiques : coefficient de partage carbone organique.

Les concentrations prédites dans l'eau marine par modélisation correspondent à la concentration totale rejetée (C_T) par les dispositifs anticorrosion dans le milieu, les substances vont ensuite réagir et s'adsorber sur les particules ou rester sous forme dissoute dans l'eau.

Aussi la concentration dans l'eau (C_{eau}) sera déterminée à partir de la concentration prédite par modélisation (concentration totale C_T) en utilisant l'équation 5. La concentration particulaire de la substance par masse de matière en suspension (C_s) sera déterminée en utilisant l'équation n°4. Puis la concentration de la substance particulaire (C_p) à partir de l'équation 5.

Hypothèses considérées :

1. Sur la base des résultats de la modélisation (étape 2), la concentration moyenne dans l'eau (C_T) la plus élevée est retenue pour la suite du processus, en cohérence avec une démarche d'évaluation d'exposition « pire cas réaliste » en première intention.

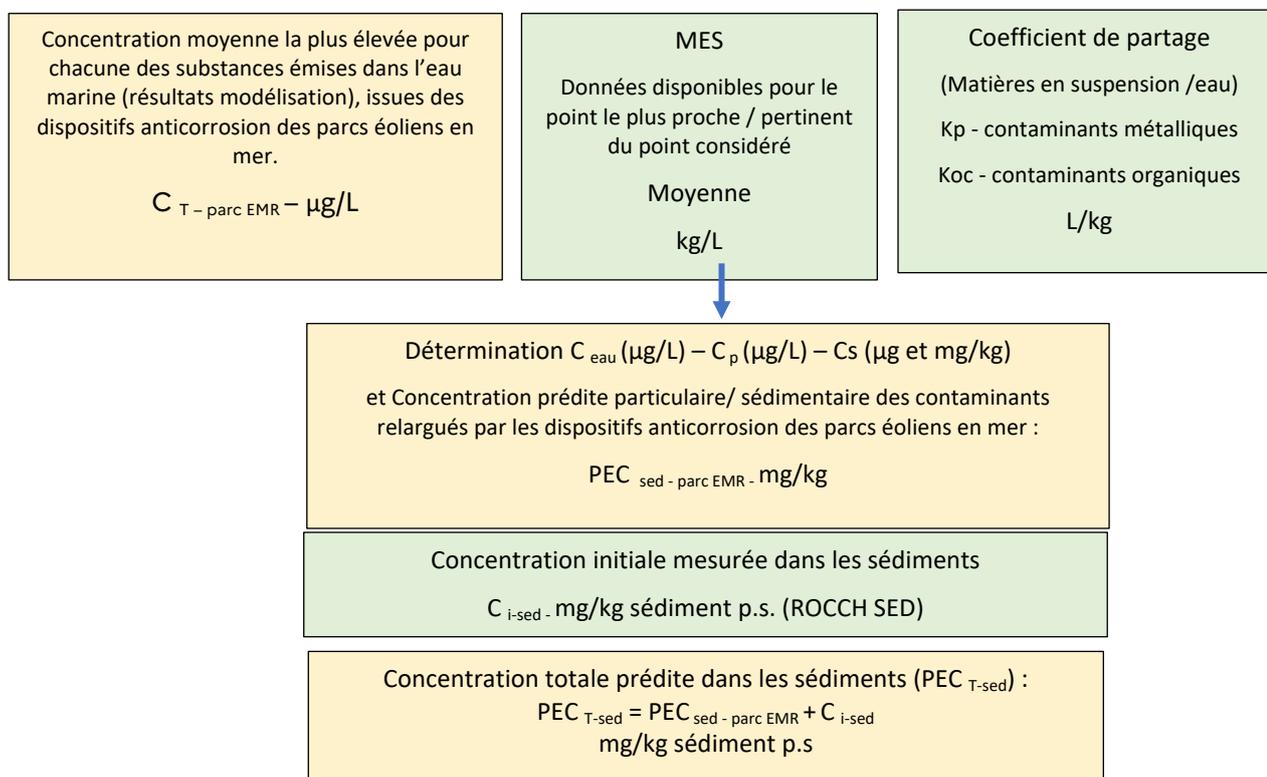
2. Répartition à l'équilibre et linéaire des contaminants suivant leur coefficient de partage (K_p matière en suspension / eau pour les éléments métalliques, K_{oc} pour les substances organiques).
3. Détermination de la concentration particulaire de la substance considérée par masse de matière en suspension (C_s).
4. Les MES sont considérées comme étant toutes des particules fines, qui vont toutes sédimenter. Ainsi il est considéré que la concentration particulaire (C_s) va correspondre à la concentration prédite dans le sédiment ($PEC_{sed - parc EMR}$), cette concentration est associée uniquement aux rejets de contaminants par les dispositifs anticorrosion des parcs EMR (i.e. elle ne tient pas compte de la concentration initiale dans l'eau de mer).

Afin d'évaluer la concentration prédite totale (PEC_{T-sed}) à laquelle pourraient être exposés les organismes benthiques : la $PEC_{sed - parc EMR}$ est ajoutée à la concentration initiale (C_{i-sed}) mesurée dans les sédiments pour la substance considérée. Les résultats du ROCCH SED (mg/kg sédiment p.s.) disponibles sont utilisés en première intention pour caractériser la concentration initiale. La PEC_{T-sed} est exprimée en mg/kg sédiment p.s.

1. Caractérisation de la zone Hydrodynamique ; Identification des zones d'accumulation de particules fines ; Habitats benthiques, zones conchylicoles, zones protégées...	2. Modélisation hydrodynamique Dispersion des éléments chimiques relargués par les dispositifs anticorrosion des parcs éoliens en mer sur les 10 ans de simulation.
3. Sélection des points d'intérêt <ul style="list-style-type: none"> - Points présentant les concentrations prédites dans l'eau marine les plus élevées (résultats de la modélisation, étape 2) pour les substances chimiques, - Points situés dans les secteurs d'accumulation de sédiments (fines > 20%), - Points situés dans des secteurs d'intérêt particulier : zones conchylicoles, zones protégées... 	
4. Pour chacun des points sélectionnés, disposer de la concentration prédite dans l'eau marine pour chaque substance (issue de la modélisation hydrodynamique) : distribution des concentrations, moyenne des concentrations, et concentration maximale sur 48 h consécutives	

5. Evaluation de la concentration prédite particulaire/sédimentaire en considérant les MES et la concentration moyenne la plus élevée en eau marine (C_T)

Approche par point de suivi et substance :



concentration prédite (par modélisation) dans l'eau marine.

Légende : case fond vert : données bibliographiques – case fond orange : données issues du projet.

5.3.2.1 Application de la méthodologie proposée à la Baie de Seine

5.3.2.1.1 Etape 1 : caractérisation de la zone étudiée

Cette étape de caractérisation a pour objectif de comprendre la circulation hydrodynamique au sein de la zone étudiée, d'identifier les zones d'accumulation des sédiments fins, d'identifier les secteurs d'intérêt complémentaires : zones conchylicoles, zones d'habitats benthiques spécifiques, autres zones spécifiques... S'agissant d'une évaluation visant à apprécier les pressions cumulées de trois parcs EMR, la zone considérée est large, et porte sur la Manche - Mer du Nord.

5.3.2.1.1.1 Généralités sur la sédimentologie de la Manche - Mer du Nord

Le document de synthèse réalisé par le SHOM en 2012 dans le cadre de la DCSMM « Caractéristiques et Etat Ecologique Manche - Mer du Nord » présente les principales caractéristiques des fonds marins (Garlan, Marchès, 2012), reprises ci-dessous (§ 3.1. et 3.2).

« La répartition des sédiments de la région Manche-Mer du Nord est essentiellement contrôlée par les courants extrêmement forts générés par les marées. Les sédiments sont de ce fait principalement constitués d'une couverture caillouteuse. Les sédiments fins représentent moins de 4% de la surface totale de la Manche et se trouvent cantonnés dans les secteurs abrités comme les baies ou les estuaires, ou peuvent être localement piégés dans les interstices des sédiments grossiers.

Près des côtes, l'énergie des courants de houle s'amenuise vers le large, provoquant une diminution de la taille des grains déposés. A proximité des côtes rocheuses, le gradient complet suivant peut être observé : des graviers, voire des galets sur la plage aérienne, les sables, puis le mélange de sables et de vases, puis enfin les vases localisées entre 8 et 10 m de profondeur d'eau. Ce gradient de granularité ne comportera que les sédiments les plus fins lorsque les graviers et cailloutis sont inexistant localement.

Plus au large, les fonds marins de Manche et de mer du Nord sont soumis aux courants de marée qui créent un second gradient. Issu de la zone à très forts courants situés entre Cherbourg et la Grande-Bretagne constituée, de fonds rocheux, de blocs et de cailloutis, ce gradient se développe de part et d'autre avec un affinement des sédiments jusqu'aux vases déposées aux abords des côtes du Cotentin et de Picardie (figure 6). Les marées et les houles engendrent donc deux courants qui convergent pour déposer les sédiments les plus fins dans la zone des 10 m de profondeur. Ces courants engendrent le transport des sédiments et jouent ainsi un rôle dans la diffusion des polluants. Aux abords des côtes, l'association des courants de marée et des houles engendre une dérive littorale de l'ouest vers l'est.

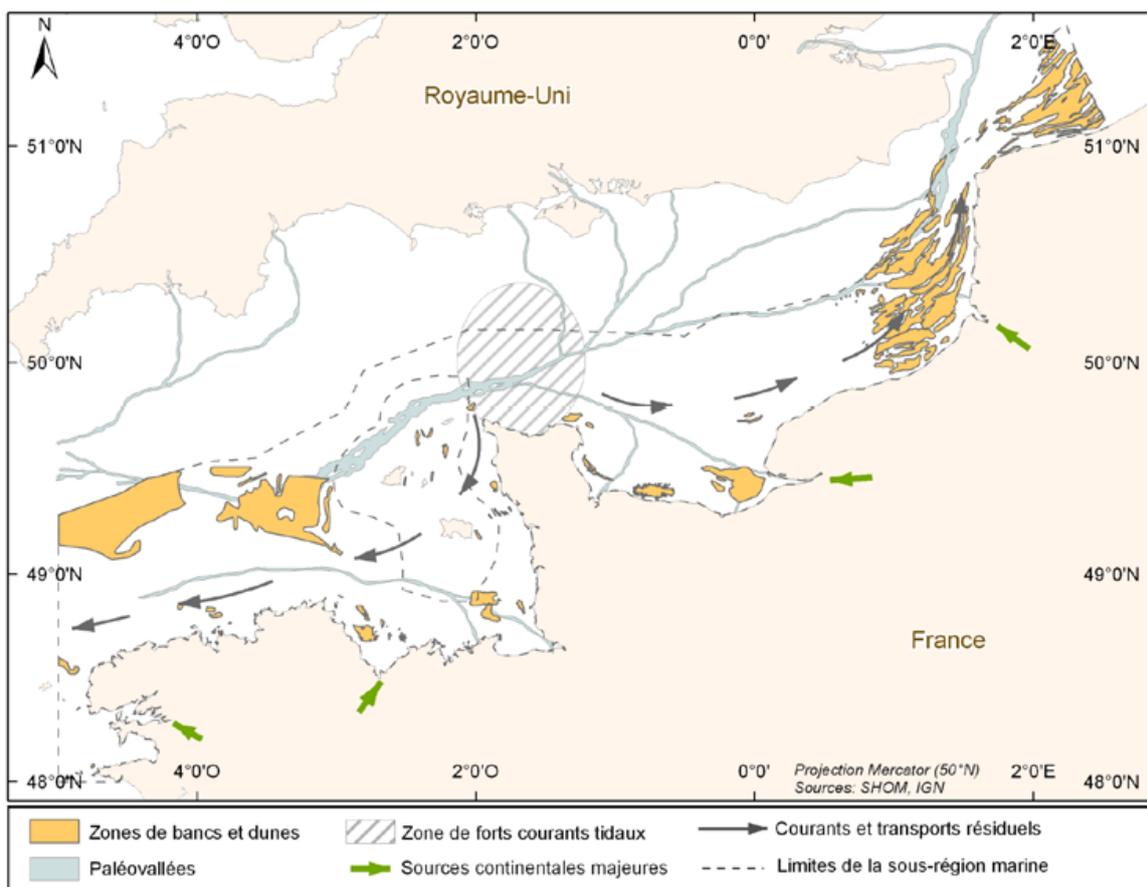


Figure 6 : Principales régions de transit et localisation des principales structures sédimentaires (bancs, dunes et fosses) de la Manche et de la mer du Nord (Garlan, Marchès, 2012).

D'une superficie d'environ 5 000 km², la Baie de Seine, d'une profondeur maximale de 40 m, est largement ouverte vers la Manche. Dans sa partie orientale, elle reçoit directement les eaux de la Seine, qui draine un bassin versant de 75 000 km², où se concentrent 40% des activités économiques françaises et 26% de la population. La Seine est ainsi le principal vecteur de polluants tant métalliques qu'organiques, qui ont fait l'objet d'une étude approfondie lors du programme Seine-Aval I et II (e.g. Chiffolleau et al., 1999 ; Servais et al., 1999 ; Chiffolleau, 2001) (extrait de Garnaud, 2003).

La Baie de Seine s'inscrit comme étant une plate-forme à faible taux de sédimentation, en milieu macrotidal. La Seine transporte une charge solide annuelle estimée à 600 000-700 000 tonnes par an (Lesourd, 2000). Si les sédiments sont en partie expulsés vers la Manche, les fonds adjacents de l'embouchure de la Seine peuvent néanmoins, dans des conditions spécifiques, présenter des envasements temporaires importants pouvant recouvrir de larges surfaces dans le domaine oriental (Avoine, 1981 ; Ehrhold & Auffret, 2002). La particularité de la Baie de Seine vient également de son régime de marée macrotidal, qui induit des couplages de transferts de matières importants entre l'estuaire, principale source de matière particulaire, et les fonds marins adjacents (extrait de Garnaud 2003) ».

Données disponibles dans la base de données Quadrigé concernant les taux de sédimentation sur la zone d'étude :

- Moyenne annuelle de résultats mensuels mesurés à Antifer « Ponton pétrolier » (17 mg/L) et Cabourg (12 mg/L) en 2018,
- Moyenne annuelle 2017-2022 de résultats mensuels mesurés à Luc-sur-Mer et Bouée Smile (4 mg/L).

5.3.2.1.1.2 Généralités sur la nature des fonds de la Manche - Mer du Nord

La Figure 7 présente la synthèse cartographique la plus récente de la nature des fonds de la Manche et de la mer du Nord, réalisée à l'échelle 1/500 000. Il faut souligner néanmoins que les données acquises ne sont pas homogènes sur l'ensemble de la zone considérée. *Garlan et Marchès (2012)* soulignent la nécessité d'acquérir des données complémentaires dans certains secteurs. Les principales caractéristiques de cette carte sont les suivantes :

- Les sédiments sont majoritairement grossiers à très grossiers, graviers et cailloutis d'origine glaciaire, lessivés de leurs particules fines par les forts courants de marée du centre de la Manche ;
- La roche est très présente dans la partie occidentale : les roches du Massif armoricain constituent des reliefs résistants ;
- Les zones de sable constituent des bancs et des dunes : la construction de structures sédimentaires est favorisée à la limite Manche-mer du Nord et au nord de la Bretagne ;
- Les dépôts permanents de vase et sable vaseux sont rares et limités aux zones protégées de la houle et des courants marins.

Une particularité de la Manche est la présence de sédiments biogènes contenant plus de 50 % de coquilles. Ces sédiments, inhabituels en domaine tempéré, proviennent d'accumulations séculaires de coquilles dans un environnement à faibles apports de sables actuels.

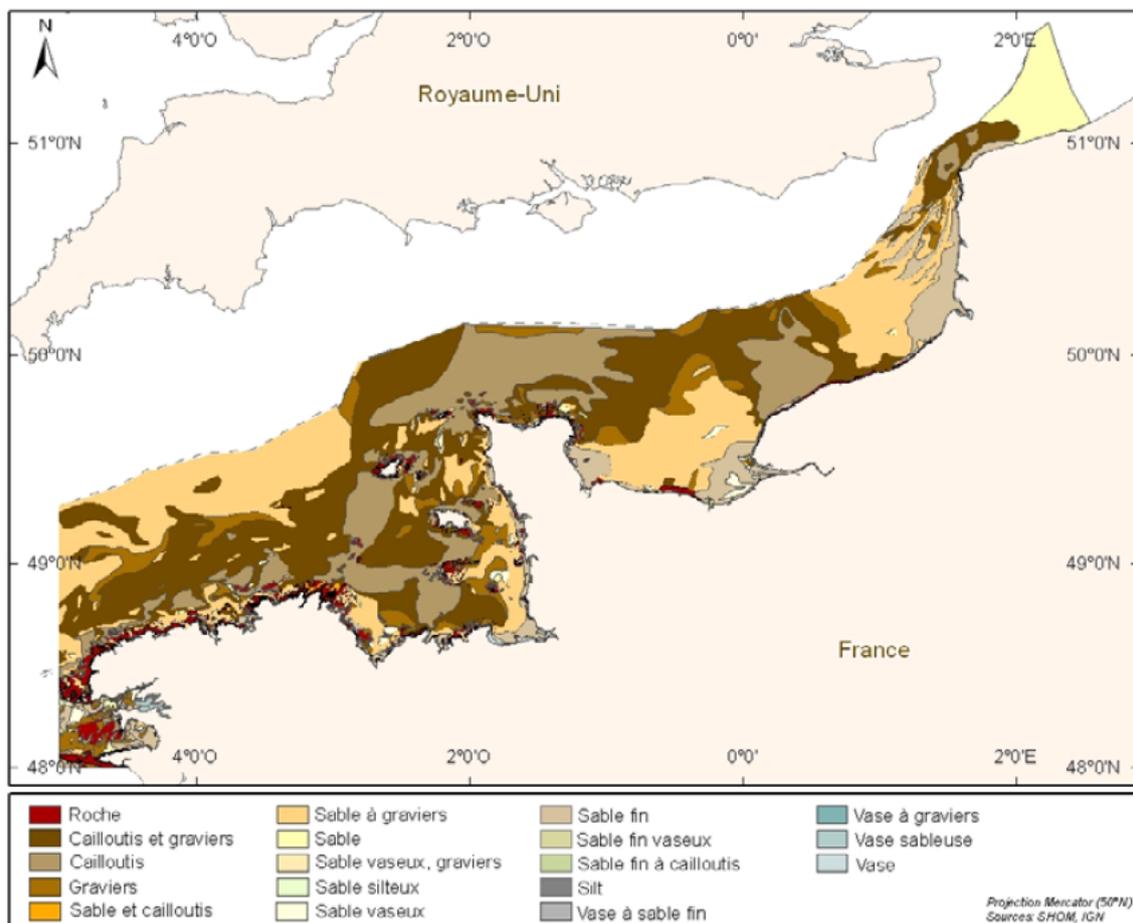


Figure 7 : Carte de nature des fonds basée sur les cartes publiées de 1970 à 2010 (Sources : Garlan, Marchès, 2012).

5.3.2.1.2 Etape 2 : Modélisation hydrodynamique

La Figure 8 permet de visualiser l'implantation des parc éoliens en mer, dont les trois parcs considérés dans la modélisation des rejets : Courseulles-sur-Mer, Le Tréport et Fécamp.

Evaluation de la concentration de contaminants chimiques dans les sédiments à partir des concentrations dans la colonne d'eau marine - 13.02.2025

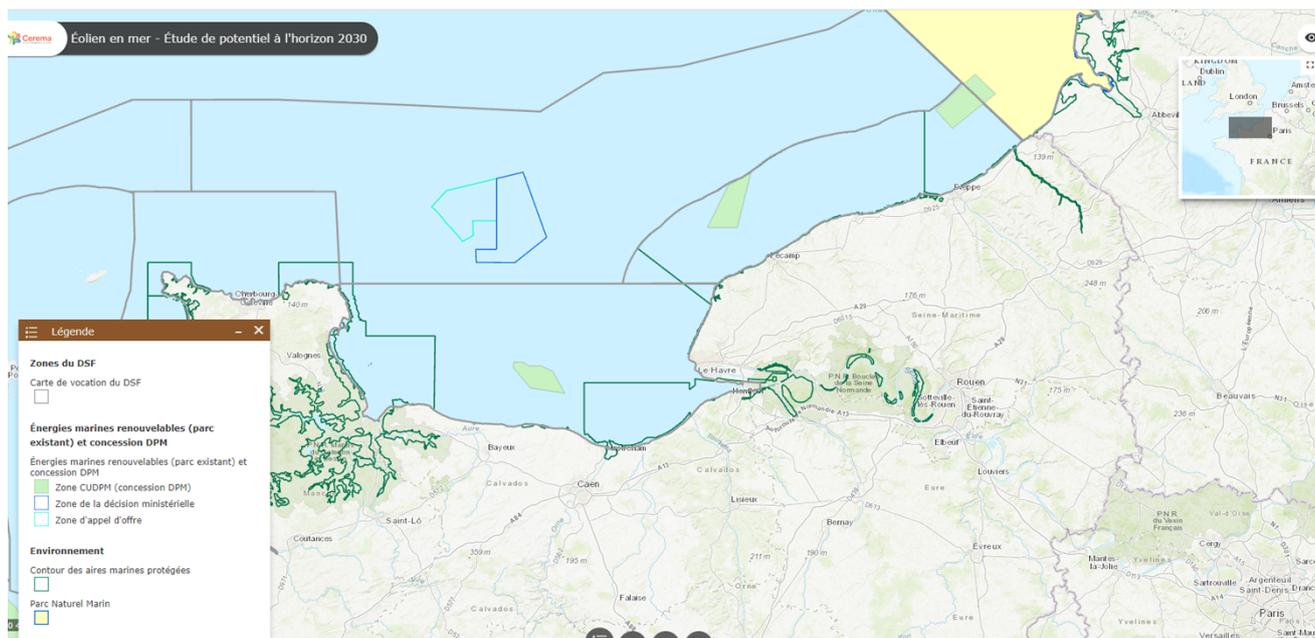


Figure 8 : Implantation des parcs éoliens en mer (polygones en fond vert)

La circulation hydrodynamique et les résultats précédemment acquis dans le cadre du projet ANODE¹² mettent en évidence une homogénéité des niveaux de concentration à différentes profondeurs. Le temps de résidence dans la zone d'étude (limites géographiques du modèle) des contaminants est évalué à 140 jours dans la colonne d'eau ; pour les sédiments, les contaminants vont s'accumuler avec le temps.

5.3.2.1.3 Etape 3 : Sélection des points d'intérêt et résultats ROCCH SED

Un point d'intérêt est sélectionné au sein de chaque parc. Ces points d'intérêt porteront, dans la suite du rapport, le nom du parc auquel il appartient : « Courseulles-sur-Mer », « Le Tréport » et « Fécamp ». Ces points sont sélectionnés car ils présentent les concentrations prédites (par le modèle) dans l'eau marine les plus élevées pour les substances rejetées par les dispositifs anti-corrosion des parcs EMR. Ils sont situés proches des parcs.

Compte tenu de la circulation hydrodynamique, de la localisation des zones d'accumulation de particules fines et de l'existence de secteurs d'intérêt particulier (zones conchylicoles, zones protégées), certains points de suivi du ROCCH SED (Tableau 10) sont identifiés comme pertinents pour le projet PolluEcume. Ces points permettront *in fine* (une fois que l'ensemble des parcs seront en phase d'exploitation) d'évaluer d'éventuels changements de tendance sur ces points pour lesquels des suivis sont réalisés depuis plusieurs années et donc de mettre en évidence l'impact des parcs EMR en terme de contamination chimique au niveau des sédiments.

Les résultats granulométriques du ROCCH SED (2019 et 2013) indiquent que seuls quatre de ces points de suivi disposent d'une fraction fine > 20%. Ces sites seront retenus dans la suite du processus pour estimer les concentrations initiales dans le sédiment. Le point Sud Fort de la Hougue (015-P-064) se situe dans la zone marine Ravenoville- Saint Vaast – Barfleur, tandis que les trois autres points Saint Jouin Château d'eau, Bouée Carosse et Seine – Estuaire 6 (010-P-034, 052 et 073) se situent dans la zone marine Baie de Seine et Orne (ces points sont surlignés en orange sur la Figure 9).

¹² https://www.france-energies-marines.org/wp-content/uploads/2020/12/rapport_reco_anode_EN_BD.pdf

Tableau 10 : Sélection de points de suivi ROCCH SED 2019 pour le projet PolluEcume et taux de fraction fine (fond orange, fraction fine < 20 %)

Mnémo Q2	Libellé	Latitude WGS84	Longitude WGS84	Fraction % < 63 µm ROCCH Sed - 2019 (*2013)
006-P-024	Cayeux-sur-Mer / Quend	50,1807664	1,45358379	2.6
009-P-081	Ouest Saint Valéry en Caux	49,879333	0,671317	2.8
010-P-034	Saint Jouin - Château d'eau	49,635084	0,106493	23.3
010-P-052	Bouée Carosse	49,484246	0,025329	56.3
010-P-073	Seine - Estuaire 6	49,422411	0,019663	69.2*
010-P-204	Estuaire de l'Orne - Pointe du Siège	49,278433	-0,241416	2.48
014-P-072	Baie des Veys - Banc de la Rouelle	49,364500	-1,114267	2.12
015-P-064	Sud Fort de la Hougue	49,555333	-1,261134	62.94

Le ROCCH SED permet de disposer des concentrations totales en composés métalliques dans les sédiments, incluant sans distinction la part associée à la fraction biogénique, la plus biodisponible pour les organismes, et la part venant de la fraction cristalline, non biodisponible.

Parmi les substances d'intérêt en lien avec les rejets des dispositifs anticorrosion des parcs EMR, le ROCCH SED dispose de résultats pour certains des composés métalliques : Al, Ag, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn, mais aucun pour les sous-produits de dégradation des dispositifs d'électro-chloration.

5.3.2.1.4 Etape 4 : Concentration prédite dans l'eau marine

Les concentrations prédites dans l'eau marine (C_T) déterminées par la modélisation réalisée concernent uniquement les substances émises par les dispositifs anticorrosion des parcs EMR. Les résultats obtenus pour les trois scénarios testés sont présentés ci-après. Ces résultats sont extraits du livrable intitulé « Projet PolluEcume-Tâche 3 - Rapport décrivant la méthodologie et les résultats des simulations numériques » rédigé par France Energies Marines dans le cadre du projet PolluEcume. Pour plus de détails concernant les hypothèses, paramètres et l'application du modèle, se référer au document spécifique rédigé par France Energies Marines (FEM).

5.3.2.1.4.1 Scénario 1 – Anodes sacrificielles GACP : L'ensemble des trois parcs : Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport2 ; sont protégés par des anodes sacrificielles (GACP) en aluminium.

Les résultats de la modélisation hydrodynamique sur 10 ans relatifs aux concentrations prédites en aluminium (et autres espèces métalliques) dans l'eau sont présentés Figure 9 et Tableau 11 (moyenne des concentrations, et concentration maximale sur 48 h consécutives).

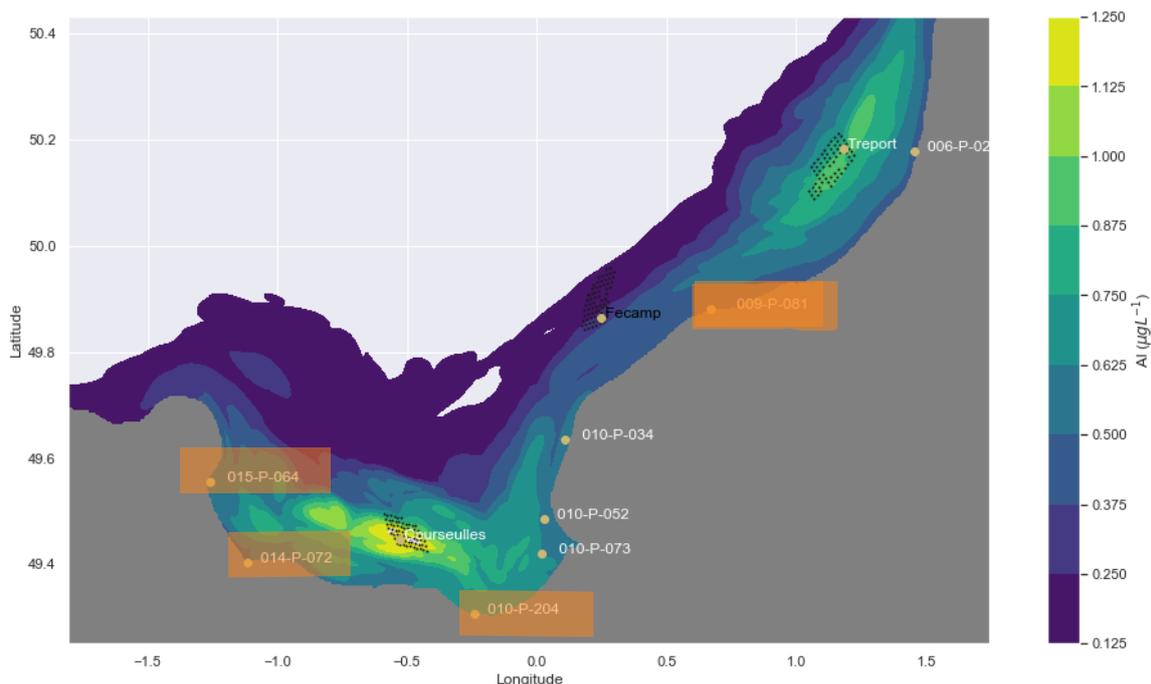


Figure 9 : Contribution des trois parcs à la concentration maximale en aluminium en Baie de Seine. Localisation des points de suivi d'intérêt (incluant points ROCCH SED) – Scénario 1 (Figure FEM – Livrable Projet PolluEcume-Tâche 3 - Rapport décrivant la méthodologie et les résultats des simulations numériques »)

Tableau 11 : Scénario 1 - Concentrations prédites dans l'eau marine par modélisation (C_T moyenne et maximale (sur 48 h consécutives)) – pour les contaminants issus des dispositifs GACP au niveau des points d'intérêt sélectionnés « Courseulles-sur-Mer », « Fécamp » et « Le Tréport » (points au sein de chaque parc présentant les concentrations les plus élevées)

	Courseulles-sur-Mer		Fécamp		Tréport	
	Concentration moyenne ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration maximale ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration moyenne ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration maximale ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration moyenne ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration maximale ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Aluminium (Al)	0,4243	1,2315	0,0105	0,0317	0,2272	0,6827
Zinc (Zn)	0,0259	0,0751	0,0006	0,0019	0,0139	0,0416
Fer (Fe)	0,0000	0,0001	1,12E-06	3,36E-06	2,41E-05	7,25E-05
Bismuth (Bi)	0,0003	0,0009	7,33E-06	2,21E-05	0,0002	0,0005
Manganèse (Mn)	0,0010	0,0030	2,59E-05	7,80E-05	0,0006	0,0017
Indium (In)	0,0001	0,0003	2,57E-06	7,73E-06	5,54E-05	0,0002
Vanadium (V)	5,64E-05	0,0002	1,40E-06	4,22E-06	3,02E-05	9,08E-05
Gallium (Ga)	5,90E-05	0,0002	1,46E-06	4,41E-06	3,16E-05	9,49E-05
Nickel (Ni)	2,26E-05	6,56E-05	5,61E-07	1,69E-06	1,21E-05	3,64E-05
Plomb (Pb)	4,16E-06	1,21E-05	1,03E-07	3,11E-07	2,23E-06	6,69E-06
Cuivre (Cu)	7,60E-06	2,20E-05	1,89E-07	5,67E-07	4,07E-06	1,22E-05
Magnésium (Mg)	3,27E-06	9,48E-06	8,11E-08	2,44E-07	1,75E-06	5,26E-06

	Courseulles-sur-Mer		Fécamp		Tréport	
	Concentration moyenne ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration maximale ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration moyenne ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration maximale ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration moyenne ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration maximale ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Chrome (Cr)	2,46E-06	7,14E-06	6,11E-08	1,84E-07	1,32E-06	3,96E-06
Cadmium (Cd)	2,97E-06	8,62E-06	7,37E-08	2,22E-07	1,59E-06	4,78E-06
Cobalt (Co)	1,49E-06	4,31E-06	3,69E-08	1,11E-07	7,95E-07	2,39E-06
Etain (Sn)	2,33E-06	6,77E-06	5,79E-08	1,74E-07	1,25E-06	3,75E-06
Lanthane (La)	5,94E-07	1,72E-06	1,47E-08	4,44E-08	3,18E-07	9,56E-07
Uranium (U)	7,64E-07	2,22E-06	1,90E-08	5,70E-08	4,09E-07	1,23E-06
Cérium (Ce)	5,52E-07	1,60E-06	1,37E-08	4,12E-08	2,95E-07	8,88E-07
Argent (Ag)	1,70E-07	4,93E-07	4,21E-09	1,27E-08	9,09E-08	2,73E-07
Titane (Ti)	2,55E-07	7,39E-07	6,32E-09	1,90E-08	1,36E-07	4,10E-07
Néodyme (Nd)	1,27E-07	3,69E-07	3,16E-09	9,51E-09	6,82E-08	2,05E-07
Gadolinium (Gd)	4,24E-08	1,23E-07	1,05E-09	3,17E-09	2,27E-08	6,83E-08
Dysprosium (Dy)	4,24E-08	1,23E-07	1,05E-09	3,17E-09	2,27E-08	6,83E-08
Samarium (Sm)	4,24E-08	1,23E-07	1,05E-09	3,17E-09	2,27E-08	6,83E-08
Praseodymium (Pr)	4,24E-08	1,23E-07	1,05E-09	3,17E-09	2,27E-08	6,83E-08

Les concentrations moyennes les plus élevées sont observées au niveau du parc de Courseulles-sur-Mer. Ces valeurs seront retenues pour la suite du processus.

5.3.2.1.4.2 Scénario 2 – Anodes par système de courant imposé (ICCP) : Les trois sites Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport sont protégés par des dispositifs de protection par courant imposé (ICCP).

Les résultats de la modélisation hydrodynamique sur 10 ans relatifs aux concentrations prédites dans l'eau marine (C_T) sont présentés Figure 10 et Tableau 12 (moyenne des concentrations, et concentrations maximales sur 48 h consécutives).

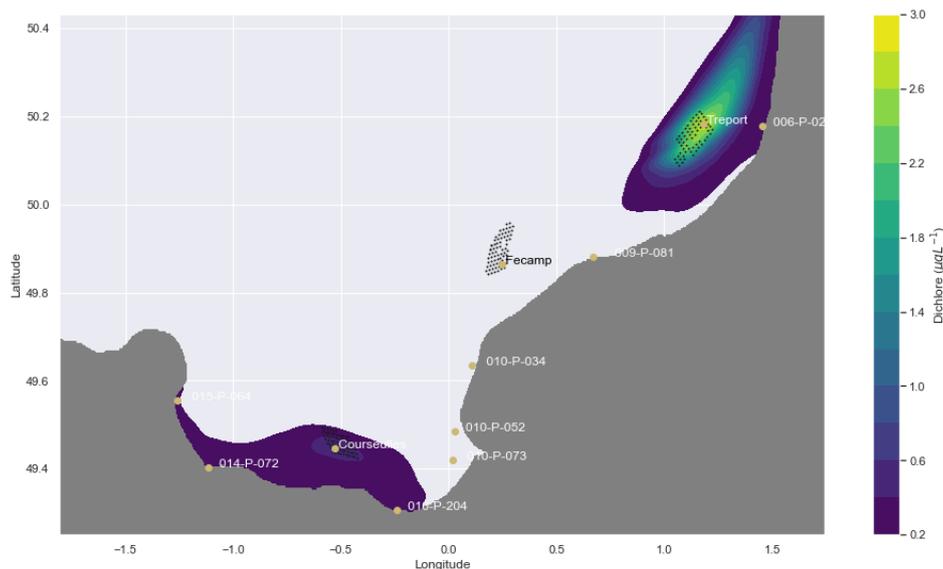


Figure 10 : Concentrations moyennes prédites dans l'eau marine (C_T) de dichlore dans la zone d'étude pendant les 10 ans de simulation – Scénario 2

Tableau 12 : Concentrations prédites dans l'eau marine obtenues par modélisation (C_T moyenne et maximale (sur 48 h consécutives)) pour chacune des substances émises par les systèmes ICCP au niveau des points d'intérêt sélectionnés « Courseulles-sur-Mer », « Fécamp » et « Le Tréport » (points au sein de chaque parc présentant les concentrations les plus élevées) – Scénario 2.

	Courseulles-sur-Mer		Fécamp		Tréport	
	Concentration moyenne ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration maximale (48h) ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration moyenne ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration maximale (48h) ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration moyenne ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration maximale (48h) ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
Dichlore	0,545	1,583	0,009	0,028	2,926	8,793
Trihalométhane	0,354	1,029	0,006	0,018	1,902	5,716
Acide haloacétique	0,245	0,712	0,004	0,013	1,317	3,957
Haloacétonitrile	0,049	0,142	0,001	0,003	0,263	0,791
Halophénol	0,005	0,016	0,000	0,000	0,029	0,088

Les concentrations moyennes les plus élevées sont observées au niveau du parc du Tréport, ces valeurs seront retenues pour la suite du processus.

5.3.2.1.4.3 Scénario 3 – Mixte (Anodes sacrificielles (GACP) et par courant imposés (ICCP) : Les parcs de Courseulles-sur-Mer et le Tréport sont protégés par dispositifs de protection par courant imposé (ICCP) et Fécamp par des anodes sacrificielles (GACP).

Les résultats de la modélisation hydrodynamique sur 10 ans : concentrations prédites dans l'eau marine (C_T) sont présentés sur les Figure 11, Figure 12. Les concentrations prédites dans l'eau marine (C_T)-moyenne et maximale (sur 48 h consécutifs) pour les contaminants issus du dispositif GACP et ICCP sont présentés dans les Tableau 13 et 14.

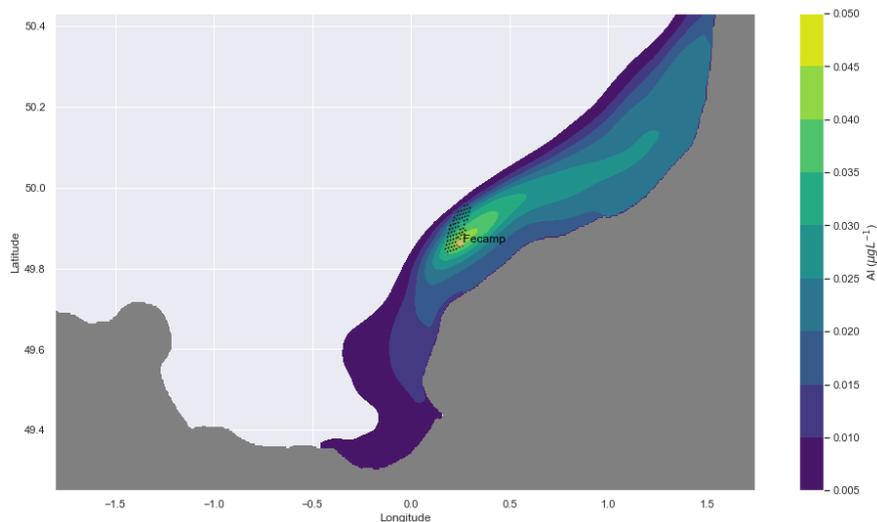


Figure 11 : Concentration moyenne prédite dans l'eau marine d'aluminium dans la zone d'étude – Scénario 3

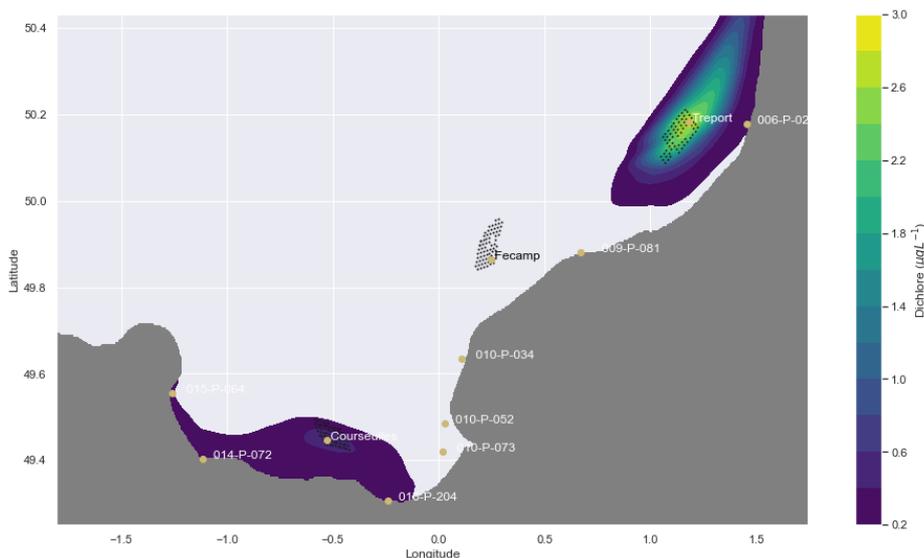


Figure 12 : Concentration moyenne prédite dans l'eau marine de dichlore dans la zone d'étude pendant la durée de la simulation (Courseulles-sur-Mer et Le Tréport).

Tableau 13 : Concentrations prédites dans l'eau marine (C_T) - moyenne et maximale (sur 48 h consécutifs) – pour les contaminants issus du dispositif GACP- Scénario 3.

	Concentration moyenne ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Concentration maximale ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Aluminium (Al)	0,0105	0,0317
Zinc (Zn)	0,0006405	0,0019337
Fer (Fe)	1,1145E-06	3,36464E-06
Bismuth (Bi)	7,308E-06	2,20632E-05
Manganèse (Mn)	0,00002583	0,000077982
Indium (In)	2,562E-06	7,7348E-06
Vanadium (V)	1,3965E-06	4,2161E-06

Gallium (Ga)	1,4595E-06	4,4063E-06
Nickel (Ni)	5,5965E-07	1,68961E-06
Plomb (Pb)	1,029E-07	3,1066E-07
Cuivre (Cu)	1,8795E-07	5,6743E-07
Magnésium (Mg)	8,085E-08	2,4409E-07
Chrome (Cr)	6,09E-08	1,8386E-07
Cadmium (Cd)	7,35E-08	2,219E-07
Cobalt (Co)	3,675E-08	1,1095E-07
Etain (Sn)	5,775E-08	1,7435E-07
Lanthane (La)	1,47E-08	4,438E-08
Uranium (U)	1,89E-08	5,706E-08
Cérium (Ce)	1,365E-08	4,121E-08
Argent (Ag)	4,2E-09	1,268E-08
Titane (Ti)	6,3E-09	1,902E-08
Néodyme (Nd)	3,15E-09	9,51E-09
Gadolinium (Gd)	1,05E-09	3,17E-09
Dysprosium (Dy)	1,05E-09	3,17E-09
Samarium (Sm)	1,05E-09	3,17E-09
Praseodymium (Pr)	1,05E-09	3,17E-09

Tableau 14 : Concentrations prédites dans l'eau marine (C_T) - moyenne et maximale (sur 48 h consécutifs) – de dichlore dans la zone d'étude pendant les 10 ans de simulation (Courseulles-sur-Mer et Le Tréport).

	Concentrations maximales (moyennes) ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentrations maximales (48h) ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
Dichlore	2,97	10,13
Trihalométhane	1,93	6,58
Acide haloacétique	1,34	4,56
Haloacétonitrile	0,27	0,91
Halophénol	0,03	0,1

Les concentrations moyennes, plus représentatives de la contamination de la zone (sur un pas de temps de 48h), sont retenues. Les concentrations moyennes les plus élevées sont observées au niveau du parc de Fécamp pour l'aluminium (GACP) et au niveau du Tréport pour l'ICCP. Ces valeurs seront utilisées dans le cadre de la méthodologie proposée et une approche pire cas réaliste.

5.3.2.1.5 Etape 5 : Estimation de la concentration dans les sédiments

5.3.2.1.5.1 Résultat pour le scénario 1 – Anodes sacrificielles GACP : L'ensemble des trois parcs : Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport2 ; sont protégés par des anodes sacrificielles (GACP) en aluminium.

❖ **Evaluation de la concentration prédite particulaire/sédimentaire en considérant les MES et la concentration moyenne la plus élevée dans l'eau marine.**

L'approche est décrite pour l'aluminium, composé majoritaire de l'anode. Elle est appliquée de la même façon à l'ensemble des composés.

- Taux de MES retenu pour l'étude 17 mg/L.
Données disponibles dans la base de données Quadriga :
 - Moyenne annuelle de résultats mensuels mesurés à Antifer « Ponton pétrolier » (17 mg/L) et Cabourg (12 mg/L) en 2018,
 - Moyenne annuelle 2017-2022 de résultats mensuels mesurés à Luc-sur-Mer et Bouée Smile (4 mg/L).

Les informations dont nous disposons concernant les taux de sédimentation sur la zone d'étude sont présentées ci-dessus. Les taux de sédimentation mesurés à Cabourg et Antifer sont sensiblement équivalents. La valeur obtenue à Luc-sur-Mer est, quant à elle, plus faible. Partant du principe que sans MES il n'y a pas de sédimentation et par conséquent peu ou pas de sédiments fins, dans un contexte d'évaluation des risques visant à protéger les organismes benthiques, la valeur à 17 mg/L est retenue dans le cadre de la présente étude.

- Concentration moyenne la plus élevée (résultat issu de la modélisation hydrodynamique) déterminée en eau marine pour l'aluminium au sein du Parc de Courseulles-sur-Mer :
 $C_{T\text{-eau marine-parc EMR}} = 0,42 \mu\text{g/L}$.
- Taux d'adsorption des substances : K_p (matière en suspension / eau) = 100 000 L/Kg (bibliographie, ECHA¹³).
- Evaluation pour l'aluminium de la concentration prédite particulaire/sédimentaire associée au relargage par les anodes des parcs EMR – $PEC_{\text{sed-Parc EMR}}$

Les substances rejetées dans l'eau marine (C_T) vont se répartir en concentration dissoute (C_{eau}) et concentration particulaire, celle-ci peut être exprimée en masse/volume : C_p ou en masse/masse de particules : C_s . Faisant l'hypothèse que toutes les matières en suspension sédimentent, C_s est équivalent à la concentration prédite dans le sédiment ($PEC_{\text{sed - parc EMR}}$) et correspond ici à l'augmentation de la masse de contaminants dans le sédiment induite par les dispositifs anticorrosion des parcs EMR.

Le Tableau 15 détaille les différents éléments : MES, K_p , C_T , et C_{eau} , C_p , C_s (= $PEC_{\text{sed - parc EMR}}$) pour l'ensemble des substances concernées par le projet. C_{eau} est calculée en utilisant l'équation n°6, C_p en utilisant l'équation n°5, C_s en utilisant l'équation 4.

Pour le gallium, aucun coefficient de partage n'est disponible dans les bases de données consultées aussi, il n'est pas possible de déterminer de C_s (ni donc de $PEC_{\text{sed - parc EMR}}$) avec la méthodologie proposée.

L'augmentation en Al total induite par les anodes galvaniques des parcs EMR est évaluée à 15,72 mg/kg sédiment au maximum.

¹³ Dossier d'enregistrement disponible sur le site de l'ECHA (European Chemical Agency)

Tableau 15 : Scénario 1 – Anodes sacrificielles (GACP) - Evaluation de la concentration prédite particulaire/sédimentaire des substances émises par les anodes sacrificielles (GACP) des parcs EMR. Indication par contaminant : de la concentration moyenne la plus élevée (C_T), K_p (matière en suspension/eau), MES, C_{eau} , C_{pr} , C_s (= $PEC_{sed - parc EMR}$)

	C_T ($\mu\text{g/L}$)	K_p (L/kg)	MES (kg/L)	C_{eau} ($\mu\text{g/L}$)	C_p ($\mu\text{g/L}$)	C_s ($\mu\text{g/kg}$)	$C_s = PEC_{sed}$ - parc EMR (mg/kg)
Aluminium (Al)	0,424	100000	1,70E-05	0,157	0,267	15716,08	15,716
Zinc (Zn)	0,026	10232	1,70E-05	0,022	0,004	225,61	0,226
Fer (Fe)	4,504E-05	3981071	1,70E-05	6,558E-07	4,438E-05	2,61	2,61E-03
Bismuth (Bi)	2,953E-04	457088	1,70E-05	3,367E-05	2,617E-04	15,39	1,54E-02
Manganèse (Mn)	1,044E-03	1000	1,70E-05	1,026E-03	1,745E-05	1,03	1,03E-03
Indium (In)	1,035E-04	794328	1,70E-05	7,139E-06	9,640E-05	5,67	5,67E-03
Vanadium (V)	5,64E-05	31622	1,70E-05	3,670E-05	1,973E-05	1,16	1,16E-03
Gallium (Ga)	5,90E-05	pas de donnée	1,70E-05	-	-	-	-
Nickel (Ni)	2,26E-05	6290	1,70E-05	2,043E-05	2,185E-06	0,13	1,29E-04
Plomb (Pb)	4,16E-06	1698244	1,70E-05	1,392E-07	4,019E-06	0,24	2,36E-04
Cuivre (Cu)	7,60E-06	131826	1,70E-05	2,344E-06	5,252E-06	0,31	3,09E-04
Magnésium (Mg)	3,27E-06	660	1,70E-05	3,231E-06	3,625E-08	0,00	2,13E-06
Chrome (Cr)	2,46E-06	191000	1,70E-05	5,792E-07	1,87E-06	0,11	1,29E-04
Cadmium (Cd)	2,97E-06	130000	1,70E-05	9,253E-07	2,045E-06	0,12	1,20E-04
Cobalt (Co)	1,49E-06	1584	1,70E-05	1,446E-06	3,894E-08	0,00	2,29E-06
Etain (Sn)	2,33E-06	389045	1,70E-05	3,065E-07	2,027E-06	0,12	1,19E-04
Lanthane (La)	5,94E-07	2344229	1,70E-05	1,454E-08	5,100E-07	0,03	3,0E-05
Uranium (U)	7,64E-07	1000	1,70E-05	7,508E-07	1,275E-08	0,00075	7,5E-07
Cérium (Ce)	5,52E-07	2041737	1,70E-05	1,545E-08	5,100E-07	0,03	3,0E-05
Argent (Ag)	1,70E-07	190546	1,70E-05	4,004E-08	1,297E-07	0,01	7,63E-06
Titane (Ti)	2,55E-07	229086	1,70E-05	5,202E-08	2,026E-07	0,01	1,19E-05
Néodyme (Nd)	1,27E-07	1862087	1,70E-05	3,889E-09	1,190E-07	0,007	7,0E-06
Gadolinium (Gd)	4,24E-08	512861	1,70E-05	4,362E-09	3,400E-07	0,002	2E-06
Dysprosium (Dy)	4,24E-08	812830	1,70E-05	2,861E-09	3,400E-07	0,002	2E-06
Samarium (Sm)	4,24E-08	426580	1,70E-05	5,138E-09	3,400E-07	0,002	2E-06
Praseodymium (Pr)	4,24E-08	2187761	1,70E-05	1,110E-09	3,400E-07	0,002	2E-06

Afin d'apprécier l'influence de la concentration de MES sur la concentration particulaire/sédimentaire, une simulation est faite en faisant varier le taux de MES entre 10 et 40 mg/L. Les résultats de cette simulation, présentés en annexe 1, montrent que la concentration particulaire C_s diminue en fonction de l'augmentation de la concentration en MES. Ainsi un taux de MES très faible entrainerait une C_s plus importante. Il est néanmoins important de mentionner également que s'il n'y a pas ou très peu de MES, il n'y a pas de sédimentation. Avoir une bonne connaissance du taux de MES sur la zone étudiée est donc un paramètre important à prendre en considération.

❖ Estimation de la PEC sed

Pour estimer la **concentration totale sédimentaire (PEC_{T-sed})** à laquelle seraient exposés les organismes benthiques, le principe est d'ajouter la **concentration prédite sédimentaire associée au relargage des substances par les anodes des parcs EMR (PEC_{sed-Parc EMR})** à la **concentration initiale existante sur le ou les points considérés (C_{i-sed})**.

Les concentrations mesurées par le ROCCH SED, extraites de la base de données Quadrigé, sont utilisées pour caractériser la concentration « initiale » sur les points considérés. Toutefois, il faut souligner ici que le ROCCH SED mesure la concentration particulaire totale (fraction échangeable + « non » échangeable correspondant au métal associé à la matrice cristalline, intégré dans la matière organique, coprécipité...) (Thouvenin, Gonzalez, 2021). Les résultats ROCCH SED déterminés sur la fraction brute (<2 mm) sont donc considérés en première intention, mais ils majorent la concentration à laquelle les organismes benthiques sont susceptibles d'être exposés, l'aluminium étant le métal le plus abondant de l'écorce terrestre, cette différence peut ne pas être négligeable. La teneur en Al est d'ailleurs utilisée dans le cadre du ROCCH pour normaliser les résultats (en cohérence avec les recommandations OSPAR) afin de permettre la comparaison spatio-temporelle des résultats.

La détermination de la PEC_{T-sed} est présentée dans le Tableau 16 sur les points ROCCH SED présentant un taux de fraction fine > 20% et pour les contaminants disposant de résultats ROCCH SED (mg/Kg p.s.). Une présentation est faite par substance par ordre de concentration dans l'eau (C_T) de la plus élevée à la moins élevée : aluminium, zinc, fer, manganèse, vanadium, nickel, plomb, cuivre, cadmium, cobalt, argent.

D'après ces projections, en considérant une exposition « pire cas réaliste », l'augmentation en Al dans les sédiments, associée aux émissions des anodes galvaniques des parcs EMR serait de 0,1% au maximum et de 0,5% pour le zinc. Pour les autres contaminants, l'augmentation est bien en deçà. Pour un résultat exprimé en mg de contaminant /kg de sédiment, il n'y a pas de différence notable entre la PEC_{T-sed} et la concentration initiale (C_{i-sed}).

Pour certains contaminants, la PEC ne peut être déterminée, ni l'augmentation induite par les anodes des parcs EMR, compte tenu de l'absence de résultats de concentrations initiales (C_{i-sed}) (Bismuth (Bi), Indium (In), Gallium (Ga), Magnésium (Mg), Etain (Sn), Lanthane (La), Uranium (U), Cérium (Ce), Titane (Ti), Néodyme (Nd), Gadolinium (Gd), Dysprosium (Dy), Samarium (Sm), Praseodymium (Pr)) et/ou de C_{sed-Parc EMR} (Chrome (Cr)). On note toutefois que les concentrations totales rejetées par les anodes restent faibles pour ces substances, la moyenne la plus élevée (au sein du parc de Courseulles-sur-Mer) étant comprise entre 5,90E-05 µg.L⁻¹ (Gallium) et 4,24E-08 µg.L⁻¹ (Gadolinium (Gd), Dysprosium (Dy), Samarium (Sm), Praseodymium (Pr)).

Tableau 16 : Scénario 1 – Anodes sacrificielles (GACP) - Evaluation de la concentration prédite totale dans les sédiments (PEC_{T-sed}) et pourcentage d'augmentation maximum de la concentration initiale en lien avec les contaminants rejetés par les Anodes sacrificielles (GACP) des parcs éoliens en mer.

Aluminium	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Al (mg.kg ⁻¹ p.s.)	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$ Al (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC_{T-Sed} Al (mg.kg ⁻¹ p.s.)	% d'augmentation $(C_{pr-sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}) * 100$
		Saint Jouin - Château d'eau	16 367	15,716	16 382,72
	Bouée Carosse	25 455	15,716	25 470,72	0,06
	Seine - Estuaire 6	25 199	15,716	25 214,72	0,06
	Sud Fort de la Hougue	24 692	15,716	24 707,72	0,06

Zinc	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Zn (mg.kg ⁻¹ p.s.)	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$ Zn (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC_{T-Sed} Zn (mg.kg ⁻¹ p.s.)	% d'augmentation $(C_{pr-sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}) * 100$
		Saint Jouin - Château d'eau	50	0,226	50,23
	Bouée Carosse	77	0,226	77,23	0,29
	Seine - Estuaire 6	71	0,226	71,23	0,32
	Sud Fort de la Hougue	47	0,226	47,23	0,48

Fer	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Fe (mg.kg ⁻¹ p.s.)	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$ Fe (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC_{T-Sed} Fe (mg.kg ⁻¹ p.s.)	% d'augmentation $(C_{pr-sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}) * 100$
		Saint Jouin - Château d'eau	13924	7,63E-06	13924
	Bouée Carosse	14861	7,63E-06	14861	5,13E-08
	Seine - Estuaire 6	13702	7,63E-06	13702	5,57E-08
	Sud Fort de la Hougue	11504	7,63E-06	11504	6,63E-08

Manganèse	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation
		Mn (mg.kg ⁻¹ p.s.)	Mn (mg.kg-1 p.s.)	Mn (mg.kg-1 p.s.)	(Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100
	Saint Jouin - Château d'eau	168	1,03E-03	168	6,13E-04
	Bouée Carosse	244	1,03E-03	244	4,22E-04
	Seine - Estuaire 6	311	1,03E-03	311	3,31E-04
	Sud Fort de la Hougue	234	1,03E-03	234	4,40E-04

Vanadium	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation
		V (mg.kg ⁻¹ p.s.)	V (mg.kg-1 p.s.)	V (mg.kg-1 p.s.)	(Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100
	Saint Jouin - Château d'eau	34	1,16E-03	34	3,41E-03
	Bouée Carosse	42	1,16E-03	42	2,76E-03
	Seine - Estuaire 6	38	1,16E-03	38	3,05E-03
	Sud Fort de la Hougue	42	1,16E-03	42	2,76E-03

Nickel	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation
		Ni (mg.kg ⁻¹ p.s.)	Ni (mg.kg-1 p.s.)	Ni (mg.kg-1 p.s.)	(Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100
	Saint Jouin - Château d'eau	9	1,29E-04	9,0	1,43E-03
	Bouée Carosse	13,7	1,29E-04	13,7	9,42E-04
	Seine - Estuaire 6	12,5	1,29E-04	12,5	1,03E-03
	Sud Fort de la Hougue	12,1	1,29E-04	12,1	1,07E-03

Plomb	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation
		Pb (mg.kg ⁻¹ p.s.)	Pb (mg.kg-1 p.s.)	Pb (mg.kg-1 p.s.)	(Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100
	Saint Jouin - Château d'eau	24,9	2,36E-04	24,9	9,48E-04
	Bouée Carosse	30,7	2,36E-04	30,7	7,69E-04
	Seine - Estuaire 6	26,7	2,36E-04	26,7	8,84E-04
	Sud Fort de la Hougue	20,2	2,36E-04	20,2	1,17E-03

Cuivre	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation
		Cu (mg.kg ⁻¹ p.s.)	Cu (mg.kg-1 p.s.)	Cu (mg.kg-1 p.s.)	(Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100
	Saint Jouin - Château d'eau	7,1	3,09E-04	7,1	9,48E-04
	Bouée Carosse	14,1	3,09E-04	14,1	7,69E-04
	Seine - Estuaire 6	14,3	3,09E-04	14,3	8,84E-04
	Sud Fort de la Hougue	7,7	3,09E-04	7,7	1,17E-03

Cadmium	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation
		Cd (mg.kg ⁻¹ p.s.)	Cd (mg.kg-1 p.s.)	Cd (mg.kg-1 p.s.)	(Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100
	Saint Jouin - Château d'eau	0,16	1,20E-04	0,16	7,50E-02
	Bouée Carosse	0,33	1,20E-04	0,33	3,64E-02
	Seine - Estuaire 6	0,32	1,20E-04	0,32	3,75E-02
	Sud Fort de la Hougue	0,14	1,20E-04	0,14	8,57E-02

Cobalt	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation
		Co (mg.kg ⁻¹ p.s.)	Co (mg.kg-1 p.s.)	Co (mg.kg-1 p.s.)	(Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100
	Saint Jouin - Château d'eau	4,3	2,29E-06	4,30	5,33E-05
	Bouée Carosse	6,4	2,29E-06	6,40	3,58E-05
	Seine - Estuaire 6	5,8	2,29E-06	5,80	3,95E-05
	Sud Fort de la Hougue	5,5	2,29E-06	5,50	4,16E-05

Argent	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation
		Ag (mg.kg ⁻¹ p.s.)	Ag (mg.kg-1 p.s.)	Ag (mg.kg-1 p.s.)	(Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100
	Saint Jouin - Château d'eau	0,36	7,63E-06	0,36	2,12E-03
	Bouée Carosse	1,11	7,63E-06	1,11	6,87E-04
	Seine - Estuaire 6	0,92	7,63E-06	0,92	8,29E-04
	Sud Fort de la Hougue	0,25	7,63E-06	0,25	3,05E-03

Les résultats ROCCH SED 2013 et 2019 sont extraits de la base de données Quadrige². Ces données sont accessibles et téléchargeables via SURVAL <https://surval.ifremer.fr/>.

5.3.2.1.5.2 Résultats pour le scénario 2 – Anodes par système de courant imposé (ICCP) : Les trois sites Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport sont protégés par des dispositifs de protection par courant imposé (ICCP).

L'utilisation d'anode par système de courant imposé (ICCP) génère du dichlore qui va réagir rapidement avec l'eau de mer pour former différents sous-produits de chloration. Les principaux contaminants identifiés (part. 5.2.2) sont le bromoforme, le dibromoacétonitrile, le tribromophénol et l'acide dibromoacétique. Les propriétés physico-chimiques des différentes substances en termes notamment de persistance en eau de mer ne sont pas considérées ici, mais l'affinité de ces substances vis-à-vis des particules est prise en considération afin de s'assurer de la pertinence, pour ces substances, d'une évaluation du risque pour le compartiment sédimentaire. Les substances disposant d'un Koc (coefficient d'adsorption du carbone organique) $\leq 1000 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\log \text{Koc} \leq 3$) ne sont pas susceptibles de s'adsorber sur le sédiment de façon significative. Les Koc du bromoforme ($116 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$) du dibromoacétonitrile ($13 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$) et de l'acide dibromoacétique ($32,5 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$) sont inférieurs à $1000 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$. Seul le tribromophénol ($2\,253 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$) apparaît susceptible de s'adsorber sur les sédiments, aussi l'évaluation de risque sur le compartiment sédimentaire est réalisée pour cette substance uniquement.

❖ **Evaluation de la concentration prédite particulaire/sédimentaire en considérant les MES et la concentration moyenne la plus élevée dans l'eau marine**

- **Taux de MES** retenu pour l'étude 17 mg/L .
- **Concentration prédite moyenne la plus élevée** déterminée par modélisation hydrodynamique, correspondant à la Concentration totale (C_T) au niveau du parc du Tréport pour les Halophénols. Les Halophénols regroupent plusieurs composés (2-Bromo-4-chlorophénol ; 2,4-Dibromophénol ; 2,6-Dibromophénol ; 2,4,6-Tribromophénol). Cette concentration en Halophénol sera considérée comme la concentration maximum pour le 2,4,6 Tribromophénol : $C_T = 0,029 \mu\text{g/L}$.
- **Taux d'adsorption des substances** : Koc du 2,4,6 Tribromophénol : $2\,253 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$ (bibliographie, ECHA¹⁴).
- **Evaluation pour le 2,4,6 Tribromophénol de la concentration prédite particulaire/sédimentaire associé à l'utilisation d'ICCP dans les parcs EMR** ($\text{PEC}_{\text{sed-Parc EMR}}$). Les substances émises dans l'eau marine (C_T) vont se répartir en concentration dissoute (C_{eau}) et concentration particulaire, celle-ci peut être exprimée en masse/volume : C_p ou en masse/masse de particules : C_s . Faisant l'hypothèse que toutes les matières en suspension sédimentent, C_s est équivalent à la concentration particulaire prédite ($\text{PEC}_{\text{sed - parc EMR}}$) et correspond ici à l'augmentation de masse de contaminants dans le sédiment induite par les dispositifs anticorrosion des parcs EMR.

L'augmentation de la concentration en 2,4,6 Tribromophénol induite par les dispositifs ICCP des parcs EMR, est évaluée à $63,50 \mu\text{g/kg}$ sédiment soit $0,063 \text{ mg/kg}$ sédiment au maximum (Tableau 17).

Tableau 17 : Scénario 2 – Anodes par courant imposé (ICCP) - Evaluation de la concentration prédite particulaire/ sédimentaire des contaminants associés aux ICCP des parcs EMR. Indication pour le 2,4,6 Tribromophénol de : la concentration moyenne la plus élevée (C_T), Koc, MES, C_{eau} , C_p , C_s (= $\text{PEC}_{\text{sed - parc EMR}}$).

	C_T ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Koc (L/kg)	MES (kg/L)	C_{eau} ($\mu\text{g/L}$)	C_p ($\mu\text{g/L}$)	C_s ($\mu\text{g/kg}$)	$C_s = \text{PEC}_{\text{sed - parc EMR}}$ (mg/kg)
2,4,6 Tribromophénol	0,029	2253	1,70E-05	0,028	0,001	63,50	0,063

¹⁴ Dossier d'enregistrement disponible sur le site de l'ECHA (European Chemical Agency)

❖ Evaluation de la PEC sed

Pour évaluer la concentration totale sédimentaire (PEC_{T-sed}) à laquelle seraient exposés les organismes benthiques, le principe est d'ajouter la concentration prédite sédimentaire des substances associées à l'utilisation de l'ICCP des parcs EMR – $PEC_{sed-Parc EMR}$ à la concentration initiale existante sur le ou les points considérés.

Aucun résultat n'est disponible sur les substances d'intérêt en lien avec les sous-produits de dégradation de chloration au niveau du ROCCH SED. La concentration initiale est considérée comme étant nulle.

La détermination de la PEC_{T-sed} est présentée dans le Tableau 18 au niveau du Tréport.

Tableau 18 : Scénario 2 – ICCP- Evaluation de la concentration prédite totale dans le sédiment (PEC sed) en 2,4,6 Tribromophénol

	C_T ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Koc (L/kg)	MES (kg/L)	C_{eau} ($\mu\text{g/L}$)	C_p ($\mu\text{g/L}$)	$C_s =$ $PEC_{sed-parc EMR}$ (mg/kg)	$C_{initiale-sed}$ mg.kg^{-1} p.s.	PEC_{T-sed} (mg/kg p.s.)
2,4,6 Tribromophénol	0,029	2253	1,70E-05	0,028	0,001	0,063	0	0,063

5.3.2.1.5.3 Résultats pour le scénario 3 – Mixte (Anodes sacrificielles (GACP) et par courant imposés (ICCP) : Les parcs de Courseulles-sur-Mer et le Tréport sont protégés par dispositifs de protection par courant imposé (ICCP) et Fécamp par des anodes sacrificielles (GACP).

❖ Evaluation de la concentration prédite particulaire/sédimentaire en considérant les MES et la concentration moyenne la plus élevée dans l'eau marine

Les démarches présentées en **Error! Reference source not found.** et **Error! Reference source not found.** sont appliquées ici.

- **Taux de MES** retenu pour l'étude 17 mg/L.
- **Concentration prédite moyenne la plus élevée** déterminée en eau marine. Les concentrations moyennes les plus élevées sont mises en évidence au niveau du parc de Fécamp pour l'aluminium (GACP) et au niveau du Tréport pour l'ICCP.

Aluminium : $C_{T-eau\ marine-parc\ EMR} = 0,0105 \mu\text{g/L}$.

Halophénols (2,4,6 Tribromophénol) : $C_{T-eau\ marine-parc\ EMR} = 0,029 \mu\text{g/L}$

- **Taux d'adsorption des substances** : K_p (matière en suspension / eau) Al : 100 000 L/Kg et Koc du 2,4,6 Tribromophénol : 2 253 L.kg^{-1}
- **Evaluation de la concentration prédite particulaire/sédimentaire associée aux substances dans le parc EMR ($PEC_{sed-Parc EMR}$)**
Hypothèses d'adsorption à l'équilibre des contaminants sur les particules (MES) et de sédimentation de toutes les particules, ainsi C_s est considéré égal à $PEC_{sed-Parc EMR}$.

Le Tableau 19 détaille les différents éléments : MES, K_p , C_T , et C_{eau} , C_p , $C_s (= PEC_{sed-parc EMR})$ pour l'ensemble des substances. C_{eau} étant calculé en utilisant l'équation n°6, C_p l'équation n°5, C_s l'équation 4. Tout comme pour le scénario 1, l'absence de coefficient de partage (K_p) pour certaines substances ne permet pas la détermination de C_s (ni donc de $PEC_{sed-parc EMR}$).

L'augmentation en Al induite par les anodes galvaniques du parc de Fécamp est évaluée à 0,390 mg/kg sédiment, et l'augmentation en 2,4,6 Tribromophénol des dispositifs ICCP (Parcs de Courseulles-sur-Mer et du Tréport) est évaluée à 0,063 mg/kg sédiment.

Tableau 19 : Scénario 3 – Mixte (Anodes sacrificielles (GACP) et par courant imposés (ICCP) : Evaluation de la concentration prédite particulaire/ sédimentaire des substances associées aux GACP du parc de Fécamp et ICCP des parcs de Courseulles-sur-Mer et Le Tréport. Indication par substances par ordre de c : la concentration moyenne croissante (C_T , Kp (matières en suspension/eau) ou Koc, MES, C_{eau} , C_p , C_s (= PEC sed - parc EMR)

	C_T ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Kp ou Koc (L/kg)	MES (kg/L)	C_{eau} ($\mu\text{g/L}$)	C_p ($\mu\text{g/L}$)	C_s ($\mu\text{g/kg}$)	$C_s = \text{PEC}_{pr-sed}$ - parc EMR (mg/kg)
Aluminium (Al)	0,0105	100000	1,70E-05	0,004	0,007	390,05	0,390
Zinc (Zn)	6,42E-04	10232	1,70E-05	0,001	0,000	5,60	0,006
Fer (Fe)	1,12E-06	3981071	1,70E-05	1,628E-08	1,102E-06	0,06	6,48E-05
Bismuth (Bi)	7,33E-06	457088	1,70E-05	8,357E-07	6,494E-06	0,38	3,82E-04
Manganèse (Mn)	2,59E-05	1000	1,70E-05	2,547E-05	4,331E-07	0,03	2,55E-05
Indium (In)	2,57E-06	794328	1,70E-05	1,772E-07	2,392E-06	0,14	1,41E-04
Vanadium (V)	1,40E-06	31622	1,70E-05	9,110E-07	4,897E-07	0,03	2,88E-05
Gallium (Ga)	1,46E-06	pas de donnée	1,70E-05	-	-	-	-
Nickel (Ni)	5,61E-07	6290	1,70E-05	5,071E-07	5,422E-08	0,00	3,19E-06
Plomb (Pb)	1,03E-07	1698244	1,70E-05	3,455E-09	9,975E-08	0,01	5,87E-06
Cuivre (Cu)	1,89E-07	131826	1,70E-05	5,816E-08	1,303E-07	0,01	7,67E-06
Magnésium (Mg)	8,11E-08	660	1,70E-05	8,019E-08	8,997E-10	0,00	5,29E-08
Chrome (Cr)	6,11E-08	191000	1,70E-05	1,438E-08	4,671E-08	0,002	2,0E-06
Cadmium (Cd)	7,37E-08	130000	1,70E-05	2,297E-08	5,075E-08	0,00	2,99E-06
Cobalt (Co)	3,69E-08	1584	1,70E-05	3,589E-08	9,665E-10	0,00	5,69E-08
Etain (Sn)	5,79E-08	389045	1,70E-05	7,608E-09	5,031E-08	0,00	2,96E-06
Lanthane (La)	1,47E-08	2344229	1,70E-05	3,598E-10	1,434E-08	0,00084	8,4E-07
Uranium (U)	1,90E-08	1000	1,70E-05	1,868E-08	3,176E-10	0,000018	1,8E-08
Cérium (Ce)	1,37E-08	2041737	1,70E-05	3,836E-10	1,331E-08	0,00078	7,8E-07
Argent (Ag)	4,21E-09	190546	1,70E-05	9,937E-10	3,219E-09	0,00	1,89E-07
Titane (Ti)	6,32E-09	229086	1,70E-05	1,291E-09	5,028E-09	0,00	2,96E-07
Néodyme (Nd)	3,16E-09	1862087	1,70E-05	9,493E-11	3,00E-09	0,00017	1,7E-07
Gadolinium (Gd)	1,05E-09	512861	1,70E-05	6,748E-11	5,883E-10	0,000034	3,4E-08
Dysprosium (Dy)	1,05E-09	812830	1,70E-05	6,748E-11	9,325E-10	0,000054	4,4E-08
Samarium (Sm)	1,05E-09	426580	1,70E-05	1,211E-10	8,788E-10	0,00005	5,0E-08
Praseodymium (Pr)	1,05E-09	2187761	1,70E-05	2,618E-11	9,738E-10	0,00005	5,0E-08
2,4,6 Tribromophénol	0,029	2253	1,70E-05	0,028	0,001	63,50	0,063

❖ Evaluation de la PEC sed

Pour évaluer la concentration totale sédimentaire (PEC_{T-sed}) à laquelle seraient exposés les organismes benthiques, le principe est d'ajouter la concentration prédite sédimentaire des substances associées à l'utilisation de dispositifs anticorrosion (GACP ou ICCP) des parcs EMR – $\text{PEC}_{sed-Parc EMR}$ à la concentration initiale existante sur le ou les points considérés.

L'évaluation de la concentration PEC_{T-sed} est présentée dans le Tableau 20 pour l'aluminium (Al), le zinc et le 2,4,6 Tribromophénol. Les concentrations prédites dans les sédiments PEC_{T-sed} pour les autres composés sont indiquées Annexe 2. L'ensemble des résultats seront repris dans la partie correspond à la caractérisation du risque.

La PEC T_{sed} la plus élevée se situe au niveau de la Bouée Carosse, avec une concentration de 25 455,39 mg/kg p.s. Compte tenu de la concentration initiale en Al (25 455 mg/kg p.s.), l'augmentation associée à l'utilisation d'anode galvanique dans le parc EMR de Fécamp (+0,002 % au maximum) apparaît très faible. L'augmentation de la teneur en zinc est de 0,01%, en ajoutant 0,006 mg/kg de zinc à la concentration initiale qui se situe entre 47 et 77 mg/kg p.s. Pour les autres contaminants métalliques, l'augmentation est bien en deçà. Pour un résultat exprimé en mg de contaminant /kg de sédiment, il n'y a pas de différence notable entre la PEC T_{sed} et la concentration initiale ($C_{i\ sed}$).

Tableau 20 : Scénario 3 – Mixte (Anodes sacrificielles (GACP) et par courant imposés (ICCP) : Evaluation de la concentration prédite totale dans les sédiments (PEC T_{sed}) (fond vert) et pourcentage d'augmentation maximum (fond orange) de la concentration initiale en lien avec les contaminants rejetés par les dispositifs anticorrosion des parcs éoliens en mer, pour l'aluminium, le zinc et le 2,4,6 Tribromophénol.

Aluminium	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC $_{sed-parc\ EMR}$ (mg.kg-1 p.s.)	PEC $_{Sed}$ (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC $_{sed-parc\ EMR}/C_i$) *100
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	16 367	0,390	16 367,39	2,38E-03
	Bouée Carosse	25 455	0,390	25 455,39	1,53E-03
	Seine - Estuaire 6	25 199	0,390	25 199,39	1,55E-03
015-Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	24 692	0,390	24 692,39	1,58E-03

Zinc	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC $_{sed-parc\ EMR}$ (mg.kg-1 p.s.)	PEC $_{Sed}$ (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC $_{sed-parc\ EMR}/C_i$) *100
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	50	0,006	50,01	0,01
	Bouée Carosse	77	0,006	77,01	0,01
	Seine - Estuaire 6	71	0,006	71,01	0,01
015-Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	47	0,006	47,01	0,01

2,4,6 Tribromophénol	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC $_{sed-parc\ EMR}$ (mg.kg-1 p.s.)	PEC $_{Sed}$ (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC $_{sed-parc\ EMR}/C_i$) *100
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	0	0,063	0,06	ND
	Bouée Carosse	0	0,063	0,06	ND
	Seine - Estuaire 6	0	0,063	0,06	ND
015-Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	0	0,063	0,06	ND

Les résultats ROCCH SED 2013 et 2019 sont extraits de la base de données Quadrigé². Ces données sont accessibles et téléchargeables via SURVAL <https://surval.ifremer.fr/>.

5.4 Evaluation des dangers pour les organismes benthiques

5.4.1 Substances candidates au transfert et à l'accumulation dans le sédiment

Selon le même raisonnement qu'à l'étape précédente (partie 5.3), les dangers sont évalués uniquement pour les substances susceptibles de s'adsorber sur les sédiments et donc celles auxquelles les organismes benthiques sont susceptibles d'être exposés. La détermination d'une valeur guide pour le sédiment est notamment pertinente pour les substances hydrophobes ou les métaux.

La protection des organismes benthiques passe par le calcul d'une valeur guide pour le sédiment ($PNEC_{\text{sédiment marin}}$).

5.4.2 Recherche et/ou dérivation de valeur seuil (PNEC)

Le danger est défini comme une propriété intrinsèque de la substance. Il s'agit de sa capacité à provoquer des effets toxiques sur un organisme.

Ainsi, l'évaluation des dangers (ou évaluation des effets) correspond, dans la démarche d'évaluation des risques pour les écosystèmes, à l'étape durant laquelle des informations sur l'écotoxicité des substances sont collectées. Ces données sont ensuite utilisées pour dériver une valeur seuil appelée PNEC pour « Predicted No Effect Concentration ».

La PNEC correspond à la concentration d'une substance chimique dans un compartiment environnemental (eau/sédiment/sol/proie) en dessous de laquelle aucun effet toxique sur les organismes n'est attendu. Elle est calculée à partir de résultats de bioessais via l'application d'un facteur d'extrapolation plus ou moins élevé en fonction de la qualité du jeu de données d'écotoxicité disponible. Cette approche repose sur une hypothèse simple : protéger l'espèce la plus sensible du milieu revient à protéger l'ensemble des espèces.

5.4.2.1 Les PNEC de la littérature

Les propriétés d'un grand nombre de substances ont déjà été évaluées dans le cadre de la réglementation européenne et/ou de programmes internationaux (REACH, DCE etc..). Ces évaluations incluent des données de physico-chimie, de comportement dans l'environnement et d'écotoxicité validées. Certaines proposent des valeurs de concentration sans effet pour l'environnement (PNEC ou équivalent). Ces valeurs, lorsqu'elles sont disponibles, et lorsqu'elles ont fait l'objet d'une expertise collective au niveau européen ou international, sont retenues de façon prioritaire. Le Tableau 21 rassemble les bases de données les plus fréquemment consultées lors de la recherche de valeurs seuils existantes.

Tableau 21 : Bases de données des concentrations prévisibles sans effet dans l'environnement.

Portail substances chimique de l'INERIS	http://www.ineris.fr/substances
Les rapports d'évaluation de risque de la communauté européenne (European Union Risk assessment report)	https://publications.europa.eu/fr/home
Agence européenne des substances chimiques (ECHA)	http://echa.europa.eu/information-on-chemicals
eChemPortal de l'OCDE	http://www.echemportal.org/echemportal/index (rassemble des données issues de différents sites dont ceux cités précédemment).
ETOX : Information System Ecotoxicology and Environmental Quality Targets (base de données de l'agence de l'environnement Allemande)	https://webetox.uba.de/webETOX/index.do?language=en&path=index
Base de données NORMAN	https://www.norman-network.com/nds/ecotox/lowestPnecsIndex.php

5.4.3 Méthode de calcul d'une PNEC

Si aucune valeur de PNEC n'est disponible dans la littérature, il est possible de les calculer selon la méthodologie préconisée dans les guides techniques de l'ECHA (ECHA, 2008).

5.4.3.1 Les données d'écotoxicité

Ces valeurs sont calculées à partir de données obtenues en laboratoire lors d'essais biologiques mono-spécifiques et plus rarement plurispécifiques. De tels essais ont pour objet la mise en évidence des effets toxiques d'une substance vis-à-vis d'organismes représentatifs de groupes d'espèces et appartenant si possible à différents niveaux trophiques. La dérivation des valeurs de PNEC, par le biais de cette approche, va donc s'appuyer sur une recherche bibliographique et une validation technique, méthodologique et scientifique des données expérimentales disponibles.

Les bioessais de laboratoire sur organismes aquatiques, y compris benthiques, peuvent être répartis en deux catégories :

- Les « essais à court terme », ou de « toxicité aiguë » permettent d'observer des effets se manifestant rapidement. Ils se caractérisent par une exposition relativement courte à des concentrations de polluant(s) pouvant induire des manifestations toxiques significatives, comme la mort des organismes (résultats exprimés sous forme de CE_{50}^{15} , CI_{50}^{16} , CL_{50}^{17} en fonction du critère d'effet mesuré). Les résultats de ces essais sont particulièrement pertinents lors de l'évaluation des effets de pollutions épisodiques ou accidentelles,
- Les « essais à long terme », ou de « toxicité chronique » vont mettre en évidence des effets visibles après une durée d'exposition prolongée. Ils correspondent à une exposition à des concentrations de polluants généralement plus faibles mais qui aboutissent, du fait de l'exposition prolongée, à des atteintes graves des organismes. Les effets physiologiques les plus couramment mesurés concernent la croissance, la reproduction mais également la survie à long terme des organismes exposés (résultats exprimés sous forme de $NOEC^{18}$, $LOEC^{19}$, CE_{10}^{20}).

Les méthodes utilisées se réfèrent généralement à des protocoles expérimentaux standardisés (OCDE²¹, UE²², US-EPA²³, ISO²⁴, AFNOR²⁵,...). Toutes les données collectées sont analysées afin d'évaluer la validité de l'étude et donc la pertinence de la donnée.

En fonction de la quantité de données disponibles pour la substance étudiée, trois approches peuvent être envisagées pour la dérivation d'une PNEC sédiment marin.

- Approche par facteur d'extrapolation,
- Approche statistique,
- Approche de l'équilibre de partage

Cette troisième approche est appliquée si seules des données d'écotoxicité sur organismes pélagiques sont disponibles ou que le nombre de données valides obtenues sur organismes benthiques est insuffisant. Ces trois méthodes sont décrites de façon détaillée dans les guides techniques de l'ECHA (ECHA, 2008) ainsi que ceux de l'Ineris (Ineris, 2022a).

¹⁵ Concentration d'Effet pour 50% des organismes testés.

¹⁶ Concentration d'Inhibition pour 50% des organismes testés.

¹⁷ Concentration Létale pour 50% des organismes testés.

¹⁸ Plus forte concentration testée à laquelle aucun effet n'a été observé sur les organismes testés

¹⁹ Plus faible concentration testée à laquelle un effet été observé sur les organismes testés

²⁰ Concentration d'Effet pour 10% des organismes testés.

²¹ http://www.oecd.org/findDocument/0,2350,fr_2649_34377_1_1_1_1_37465,00.html

²² <http://ecb.jrc.it/testing-methods/>

²³ <http://www.epa.gov/opptsfrs/home/guidelin.htm>

²⁴ <http://www.iso.org/iso/en/CatalogueListPage.CatalogueList?ICS1=13&ICS2=60&ICS3=70&scopelist=>

²⁵ <http://www.boutique.afnor.fr/Boutique.asp?url=NRM%5Fn%5Fhome%2Easp&lang=French&btq=HOM>

5.4.3.1.1 Approche par facteur d'extrapolation

Un facteur d'extrapolation s'applique sur la donnée d'écotoxicité obtenue sur l'espèce la plus sensible. Il permet de prendre en compte les incertitudes inhérentes à l'approche par exemple, les variations de la sensibilité intra et interspécifiques par rapport aux effets néfastes de la substance ou encore l'extrapolation de données aiguës à des valeurs de protection qui s'appliquent sur le long terme. Le facteur d'extrapolation retenu est fonction de la quantité et de la nature des données disponibles. Une synthèse des facteurs d'extrapolation utilisés pour calculer les PNEC sédiment marin est présentée dans le Tableau 22 (ECHA, 2008).

Tableau 22 : Facteurs d'extrapolation pour la détermination de la PNEC_{sédiment marin} (ECHA, 2008)

Jeu de données disponible	Facteur d'extrapolation
Une donnée court terme (EC ₅₀ ou LC ₅₀) pour des essais d'eau douce ou marins	10000
Deux données court terme (EC ₅₀ ou LC ₅₀) incluant au minimum un essai marin sur un organisme d'un taxon sensible	1000
Une donnée long terme (NOEC ou EC ₁₀) pour les sédiments d'eau douce	
Deux données long terme (NOEC ou EC ₁₀) pour les sédiments d'eau douce avec des espèces présentant des modes de vie et d'alimentation différents	500
Une donnée long terme (NOEC ou EC ₁₀) pour les sédiments d'eau douce et une pour les sédiments marins avec des espèces présentant des modes de vie et d'alimentation différents	100
Trois données long terme (NOEC ou EC ₁₀) pour les sédiments avec des espèces présentant des modes de vie et d'alimentation différents	50
Trois données long terme (NOEC ou EC ₁₀) avec des espèces présentant des modes de vie et d'alimentation différents et incluant au minimum deux essais pour des espèces marines	10

Ainsi, plus le jeu de données d'écotoxicité est réduit, plus l'incertitude est importante et plus le facteur d'extrapolation FE choisi sera élevé.

$$PNEC_{sed\ marin} = \frac{Min(donnée\ disponible)}{FE} \quad (Equation\ 7)$$

Avec :

PNEC sed marin = Concentration sans effet prévisible pour les organismes benthiques

FE = Facteur d'extrapolation (Tableau 22)

5.4.3.1.2 Approche par la méthode de l'équilibre de partage

La méthode de l'équilibre de partage permet la conversion des PNEC_{eau} en PNEC_{sédiment} par l'intermédiaire d'un certain nombre de coefficients de partition en supposant l'équilibre thermodynamique.

Ce modèle suppose que :

- Il existe un équilibre entre la fraction de substances adsorbées sur les particules sédimentaires et la fraction de substances dissoutes dans l'eau interstitielle du sédiment,
- La fraction de substances adsorbées sur les particules sédimentaires n'est pas biodisponible pour les organismes benthiques et seule la fraction de substances dissoutes dans l'eau interstitielle est susceptible d'impacter les organismes,
- La sensibilité intrinsèque des organismes benthiques aux substances toxiques est équivalente à celle des organismes vivants dans la colonne d'eau. Ainsi, la valeur guide pour la colonne d'eau peut être utilisée pour définir la concentration à ne pas dépasser dans l'eau interstitielle.

Conformément aux recommandations du guide technique (ECHA, 2008), une valeur guide pour la protection des organismes benthiques peut être alors calculée selon l'équation suivante :

$$PNEC_{\text{sédiment marin}} [\mu\text{g}/\text{kg ww}] = \frac{K_{\text{sed-eau}}}{RHO_{\text{sed}}} * PNEC_{\text{eau marine}} [\mu\text{g}/\text{L}] * 1000 \quad (\text{Equation n}^\circ 8)$$

Avec

RHO_{sed} : masse volumique du sédiment en $[\text{kg}_{\text{sed}}/\text{m}^3_{\text{sed}}]$. En l'absence d'une valeur exacte, la valeur générique proposée par le TGD EQS (E.C., 2018) est utilisée dans la cadre de cette étude lorsqu'un calcul a été réalisé : $1300 \text{ kg}/\text{m}^3$. A noter que nous n'avons pas investigué dans quelles mesures ces valeur de RHO étaient pertinentes pour notre zone d'étude.

$K_{\text{sed-eau}}$: coefficient de partage sédiment/eau en m^3/m^3 . En l'absence d'une valeur exacte, les valeurs génériques proposées par les guide techniques (ECHA, 2008) sont utilisées. Le coefficient est alors calculé selon la formule suivante : $0,8 + 0,025 * K_p$

Il faut rappeler que les incertitudes liées à l'application du modèle de l'équilibre de partage sont importantes. Les sédiments naturels peuvent avoir des propriétés très variables en termes de composition (nature et quantité de matières organiques, composition minéralogique), de granulométrie, de conditions physico-chimiques, de conditions dynamiques (taux de déposition/taux de remise en suspension). Par ailleurs ces propriétés peuvent évoluer dans le temps en fonction notamment des conditions climatiques et de la morphologie de la masse d'eau. Si bien que le partage entre la fraction de substance adsorbée et la fraction de substance dissoute peut être extrêmement variable d'un sédiment à un autre et l'hypothèse d'un équilibre entre ces deux fractions peut ne pas être très réaliste pour des conditions naturelles.

Par ailleurs, certains organismes benthiques peuvent ingérer les particules sédimentaires, et donc être contaminés par la fraction de substance adsorbée sur ces particules, ce qui n'est pas pris en compte lors de l'application de la méthode de l'équilibre de partage. C'est pour cette raison que dans le cas où la méthode de l'équilibre de partage est utilisée, un facteur additionnel de 10 sera pris en compte lors de la conversion des valeurs de valeurs guides entre phase aqueuse et matrice sédimentaire, dans les cas où le $\log K_{ow}$ de la substance étudiée est supérieur à 5.

5.4.4 Concentrations sans effet prévisible ($PNEC_{\text{sédiment marin}}$) pour les organismes benthiques

Dans le tableau ci-dessous sont reportées les $PNEC_{\text{sédiment marin}}$ retenues pour les substances concernées par l'étude. Une recherche a été réalisée sur les différentes bases de données listées avant (Tableau 21). Plusieurs cas de figure se sont présentés :

- Lorsqu'une seule valeur a été trouvée, celle-ci a été retenue pour l'étude,
- Lorsque qu'aucune $PNEC_{\text{sédiment marin}}$ n'a été trouvée celle-ci a été dérivée, pour le projet, à partir de la $PNEC_{\text{eau marine}}$ via la méthode de l'équilibre de partage décrite avant,
- Lorsque plusieurs $PNEC_{\text{sédiment marin}}$ ont été trouvées pour une même substance, un choix a été fait. Pour cela plusieurs critères sont regardés :
 - 1/ Le contexte dans le lequel la $PNEC$ a été établie : Les valeurs établies et/ou utilisées dans un cadre réglementaire (DCE, DCSMM, REACH) ou lors de la mise sur le marché de la substance (rapport d'évaluation des risque européen ou nationaux) ayant fait l'objet d'évaluation collective dans le cadre de groupes de travail européens et nationaux sont considérées de façon prioritaire.
 - 2/ La date de publication de la $PNEC$: Une date de publication plus récente implique souvent une mise à jour de la bibliographie avec la prise en compte de nouveaux résultats d'essais d'écotoxicité (publications récentes),
 - 3/ Le jeu données utilisé : Une évaluation de la qualité des données d'écotoxicité utilisées est réalisée. Ce jeu de données doit idéalement être composé d'essais d'écotoxicité chroniques couvrant diverses espèces de différents groupes taxonomiques.

Tableau 23 : Concentrations sans effet prévisible (PNEC) pour les organismes du sédiment marin.

	PNEC			
	PNEC _{eau marine} (µg L ⁻¹) (dissous)	Source	PNEC _{sédiment marin} (µg/kg poids sec)	Source
Aluminium (Al)	0,27 (aluminium dissous)	Danemark, 2020 (draft)	1350* (Equilibre de partage)	-
Zinc (Zn)	3	E.C., 2015	49 000	E.C., 2008
Fer (Fe)	1,6	UK-EA, 2007a	318 488* (Equilibre de partage)	-
Bismuth (Bi)	13,7	Norman Database	313 127* (Equilibre de partage)	-
Manganèse (Mn)	0,05	Peter <i>et al.</i> , 2012	12500 (Equilibre de partage)	Ineris, 2023b
Indium (In)	40.6	Dossier d'enregistrement (ECHA) SSD, AF 3	5 051 000 (Equilibre de partage)	Dossier d'enregistrement (ECHA)
Vanadium (V)	0,41	INERIS, 2007	2360 (Equilibre de partage)	INERIS, 2007
Gallium (Ga)	Pas de donnée	-	Pas de donnée	-
Nickel (Ni)	8,6	E.C., 2013	56 000	INERIS, 2012b
Plomb (Pb)	1,3	E.C., 2011a	123 000	E.C., 2011a
Cuivre (Cu)	0,7	E.C., 2014a	3 200	E.C., 2014a
Magnésium (Mg)	410	Dossier d'enregistrement (ECHA)	268 000 (Equilibre de partage)	Dossier d'enregistrement (ECHA)
Chrome (Cr) (assimilé au chrome VI)	0,6	E.C., 2014b	5730* (Equilibre de partage)	-
Cadmium (Cd)	0,21	E.C., 2005a	230	E.C., 2007
Cobalt (Co)	1,4	INERIS, 2016b	1 700	INERIS, 2022b
Etain (Sn)	0,3	INERIS 2023a	583 (Equilibre de partage)	INERIS, 2023a
Lanthane (La)	1,0	RIVM, 2000	468 000	RIVM, 2000
Uranium (U)	0,044	E.C., 2014c	2,27* (Equilibre de partage)	-
Cérium (Ce)	0,15	RIVM, 2000	128 000 (Equilibre de partage)	RIVM, 2000
Argent (Ag)	0,09	RIVM, 2012	438 130 (Méthode des facteurs d'extrapolation, AF 10)	Dossier d'enregistrement (ECHA)
Titane (Ti)	0,08	Calculée à partir du rapport INERIS, 2016a	60 000 (Méthode des facteurs d'extrapolation, AF 1000)	Dossier d'enregistrement (ECHA)
Néodyme (Nd)	0,85	RIVM, 2000	436 000 (Equilibre de partage)	RIVM, 2000
Gadolinium (Gd)	0,52	RIVM, 2000	137 000 (Equilibre de partage)	RIVM, 2000

	PNEC			
	PNEC _{eau marine} (µg L ⁻¹) (dissous)	Source	PNEC _{sediment marin} (µg/kg poids sec)	Source
Dysprosium (Dy)	3,6	RIVM, 2000	884 000	RIVM, 2000
Samarium (Sm)	0,42	RIVM, 2000	139 000 (Equilibre de partage)	RIVM, 2000
Praseodymium (Pr)	0,92	RIVM, 2000	594 000 (Equilibre de partage)	RIVM, 2000
2,4,6-Tribromophénol	0,025	Norwegian Environmental Agency, 2016	2,85 (Equilibre de partage)	-

*Dérivée dans le cadre de la présente étude à via la méthode de l'équilibre de partage à partir de la PNEC_{eau marine}

5.5 Caractérisation du risque

5.5.1 Principe

La méthode d'estimation du risque est déterministe, aboutissant à l'établissement d'un indice de risque (IR). C'est le ratio entre la concentration d'exposition dans un compartiment environnemental donné et la concentration prédite sans effet pour ce même compartiment obtenu avec la formule suivante :

$$IR = \frac{PEC}{PNEC} \quad (\text{Equation n° 9})$$

Les indices de risque spécifiques à chaque substance permettent d'identifier les substances qui sont préoccupantes du point de vue du risque pour les écosystèmes. Après avoir obtenu les IR, plusieurs cas peuvent se présenter :

Tableau 24 : Interprétation d'un indice de risque.

IR inférieur à 1*	Les concentrations d'exposition dans le milieu sont en dessous des concentrations susceptibles de provoquer un effet sur la biodiversité, le risque pour l'environnement est acceptable.
IR supérieur à 1*	Les concentrations d'exposition dans l'environnement sont supérieures aux concentrations susceptibles de représenter un danger, le risque pour l'environnement est inacceptable.

* : un IR dont la valeur est proche de 1 (0,9 ou 2 par exemple) signifie que les concentrations d'exposition dans l'environnement sont presque égales aux concentrations susceptibles de provoquer un effet sur la biodiversité. Ce résultat seul ne permet pas d'indiquer que le risque pour l'environnement est acceptable ou inacceptable. Toutefois, en fonction des incertitudes à ce niveau de l'étude et du caractère protecteur des scénarios d'exposition qui sont en place, il peut être possible de rendre une conclusion par la discussion.

La valeur théorique de 1 doit être considérée comme un outil d'évaluation. Un IR supérieur à 1 ne signifie pas que l'écosystème présente des impacts, il signifie qu'en prenant en compte les données présentées et les scénarios retenus, le risque ne peut pas être écarté. La valeur du rapport PEC/PNEC doit être interprétée en tenant compte des incertitudes sur la méthodologie d'évaluation des risques et des hypothèses retenues.

La démarche d'évaluation du risque est une démarche par étapes. Si l'interprétation des résultats indique que le risque pour l'environnement lié à l'émission de la substance considérée est inacceptable, il est possible d'introduire de nouvelles données et de prendre en considération des éléments plus fins pour recalculer cet IR. Ainsi, pour les substances dont les rejets sont les plus préoccupants, l'évaluation se détourne d'une approche volontairement très protectrice (première approche) pour correspondre à des conditions plus réalistes (approche affinée, voire approche la plus détaillée).

5.5.2 Indices de risque calculés dans le cadre du projet PolluEcume

Les indices de risque ont été calculés pour les substances disposant à la fois d'une PEC et d'une PNEC_{sed marin}. Conformément à la méthodologie présentée dans les guides techniques de l'ECHA (ECHA, 2008 et 2016), il n'est pas jugé pertinent d'évaluer le risque dans le sédiment pour les substances qui ne sont pas susceptibles de s'y adsorber.

Les résultats obtenus pour les différents scénarii testés sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 25 : Indices de risque Scénario 1 – Anodes sacrificielles GACP : L'ensemble des trois parcs : Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport2 ; sont protégés par des anodes sacrificielles (GACP) en aluminium.

Aluminium	Libellé	C _{i-sed} ROCCH SED - 2013 Al (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Al (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Al (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (C _{pr-sed-parc EMR} /C _{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
	Saint Jouin - Château d'eau	16 367	15,716	16 382,72	0,10	1,35*	12135	11, 6
Bouée Carosse	25 455	15,716	25 470,72	0,06	18877		11, 6	
Seine - Estuaire 6	25 199	15,716	25 214,72	0,06	18677		11, 6	
Sud Fort de la Hougue	24 692	15,716	24 707,72	0,06	18302		11, 6	

Zinc	Libellé	C _{i-sed} ROCCH SED - 2013 Zn (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Zn (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Zn (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (C _{pr-sed-parc EMR} /C _{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
	Saint Jouin - Château d'eau	50	0,226	50,23	0,45	49	1,025	0,0046
Bouée Carosse	77	0,226	77,23	0,29	1,576			
Seine - Estuaire 6	71	0,226	71,23	0,32	1,454			
Sud Fort de la Hougue	47	0,226	47,23	0,48	0,964			

Fer	Libellé	C _{i-sed} ROCCH SED - 2013 Fe (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Fe (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Fe (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (C _{pr-sed-parc EMR} /C _{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
	Saint Jouin - Château d'eau	13924	7,63E-06	13 924	5,48E-08	318,5*	43,7	2,39 E-08
Bouée Carosse	14861	7,63E-06	14 861	5,13E-08	46,6			
Seine - Estuaire 6	13702	7,63E-06	13 702	5,57E-08	43			
Sud Fort de la Hougue	11504	7,63E-06	11 504	6,63E-08	36			

*Obtenue par la méthode de l'équilibre de partage.

Manganèse	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Mn (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Mn (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Mn (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
	Saint Jouin - Château d'eau	168	1,03E-03	168	6,13E-04	12,5*	13,44	8 E-05
Bouée Carosse	244	1,03E-03	244	4,22E-04				
Seine - Estuaire 6	311	1,03E-03	311	3,31E-04				
Sud Fort de la Hougue	234	1,03E-03	234	4,40E-04				

Vanadium	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 V (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} V (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} V (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
	Saint Jouin - Château d'eau	34	1,16E-03	34	3,41E-03	2,362*	14,4	5,0 E-04
Bouée Carosse	42	1,16E-03	42	2,76E-03				
Seine - Estuaire 6	38	1,16E-03	38	3,05E-03				
Sud Fort de la Hougue	42	1,16E-03	42	2,76E-03				

Nickel	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Ni (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Ni (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Ni (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
	Saint Jouin - Château d'eau	9	1,29E-04	9,0	1,43E-03	56	0,16	2,3 E-06
Bouée Carosse	13,7	1,29E-04	13,7	9,42E-04				
Seine - Estuaire 6	12,5	1,29E-04	12,5	1,03E-03				
Sud Fort de la Hougue	12,1	1,29E-04	12,1	1,07E-03				

Plomb	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Pb (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Pb (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Pb (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		Saint Jouin - Château d'eau	24,9	2,36E-04	24,9	9,48E-04	123	0,20
	Bouée Carosse	30,7	2,36E-04	30,7	7,69E-04	0,25		
	Seine - Estuaire 6	26,7	2,36E-04	26,7	8,84E-04	0,21		
	Sud Fort de la Hougue	20,2	2,36E-04	20,2	1,17E-03	0,16		

Cuivre	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Cu (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Cu (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Cu (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		Saint Jouin - Château d'eau	7,1	3,09E-04	7,1	9,48E-04	3,2	2,22
	Bouée Carosse	14,1	3,09E-04	14,1	7,69E-04	4,40		
	Seine - Estuaire 6	14,3	3,09E-04	14,3	8,84E-04	4,47		
	Sud Fort de la Hougue	7,7	3,09E-04	7,7	1,17E-03	2,41		

Cadmium	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Cd (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Cd (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Cd (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (Cpr-sed-parc EMR/ C_{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		Saint Jouin - Château d'eau	0,16	1,20E-04	0,16	7,50E-02	0,230	0,70
	Bouée Carosse	0,33	1,20E-04	0,33	3,64E-02	1,43		
	Seine - Estuaire 6	0,32	1,20E-04	0,32	3,75E-02	1,39		
	Sud Fort de la Hougue	0,14	1,20E-04	0,14	8,57E-02	0,6		

Cobalt	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Co (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Co (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Co (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (Cpr-sed-parc EMR/ C _{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		Saint Jouin - Château d'eau	4,3	2,29E-06	4,30	5,33E-05	1,7	2,52
	Bouée Carosse	6,4	2,29E-06	6,40	3,58E-05	3,76		
	Seine - Estuaire 6	5,8	2,29E-06	5,80	3,95E-05	3,41		
	Sud Fort de la Hougue	5,5	2,29E-06	5,50	4,16E-05	3,23		

Argent	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 Ag (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} Ag (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} Ag (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (Cpr-sed-parc EMR/ C _{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		Saint Jouin - Château d'eau	0,36	7,63E-06	0,36	2,12E-03	438,13*	8,2 E-04
	Bouée Carosse	1,11	7,63E-06	1,11	6,87E-04	2,5 E-03		
	Seine - Estuaire 6	0,92	7,63E-06	0,92	8,29E-04	2,0 E-03		
	Sud Fort de la Hougue	0,25	7,63E-06	0,25	3,05E-03	5,7 E-04		

Tableau 26 : Indices de risque Scénario 2 – Anodes par système de courant imposé (ICCP) : Les trois sites Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport sont protégés par des dispositifs de protection par courant imposé (ICCP).

	C_T ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Koc (L/kg)	MES (kg/L)	C_{eau} ($\mu\text{g/L}$)	C_p ($\mu\text{g/L}$)	$C_s =$ PEC _{sed - parc EMR} (mg/kg)	$C_{initiale-sed}$ mg.kg ⁻¹ p.s.	PEC _{T-sed} (mg/kg p.s.)	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR
2,4,6 Tribromophénol	0,029	2253	1,70E-05	0,028	0,001	0,063	0	0,063	0,00285*	22,1

*Méthode Equilibre de partage

Tableau 27 : Indices de risque Scénario 3 – Mixte (Anodes sacrificielles (GACP) et par courant imposés (ICCP) : Les parcs de Courseulles-sur-Mer et le Tréport sont protégés par dispositifs de protection par courant imposé (ICCP) et Fécamp par des anodes sacrificielles (GACP).

Aluminium	Libellé	C _{i-sed}	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		ROCCH SED - 2013 Al (mg.kg ⁻¹ p.s.)	Al (mg.kg-1 p.s.)	Al (mg.kg-1 p.s.)	(PEC _{sed-parc EMR} /C _{i-sed}) *100			
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	16 367	0,390	16 367,39	2,38 E-03	1,35*	12123	0,28
	Bouée Carosse	25 455	0,390	25 455,39	1,53 E-03		18855	
	Seine - Estuaire 6	25 199	0,390	25 199,39	1,55 E-03		18666	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	24 692	0,390	24 692,39	1,58 E-03		18290	

Zinc	Libellé	C _{i-sed}	PEC _{Sed-parc EMR}	PEC _{T-Sed}	% d'augmentation	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(PEC _{sed-parc EMR} /C _{i-sed}) *100			
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	50	0,006	50,01	0,01	49	1,02	1,2 E-04
	Bouée Carosse	77	0,006	77,01	0,01		1,57	
	Seine - Estuaire 6	71	0,006	71,01	0,01		1,45	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	47	0,006	47,01	0,01		0,95	

Fer	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 (mg.kg⁻¹ p.s.)	PEC_{Sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC_{T-Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC_{Sed-parc EMR}/C_{i-sed}) *100	PNEC_{Sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR_{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	13924	6,48 E-05	13 924	4,65 E-07	318,5*	43,7	2,0 E-07
	Bouée Carosse	14861	6,48 E-05	14 861	4,36 E-07		46,6	
	Seine - Estuaire 6	13702	6,48 E-05	13 702	4,73 E-07		43,0	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	11504	6,48 E-05	11 504	5,63 E-07		36,1	

Manganèse	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 (mg.kg⁻¹ p.s.)	PEC_{Sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC_{T-Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC_{Sed-parc EMR}/C_{i-sed}) *100	PNEC_{Sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR_{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	168	2,55 E-05	168	1,52 E-05	12,5*	13,44	2,0 E-06
	Bouée Carosse	244	2,55 E-05	244	1,04 E-05		19,52	
	Seine - Estuaire 6	311	2,55 E-05	311	8,19 E-06		24,88	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	234	2,55 E-05	234	1,09 E-05		18,72	

Vanadium	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	$IR_{Sed-parc\ EMR}$ (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}$) *100			
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	34	2,88 E-05	34	8,47 E-05	2,362*	14,4	1,2 E-05
	Bouée Carosse	42	2,88 E-05	42	6,86 E-05		17,8	
	Seine - Estuaire 6	38	2,88 E-05	38	7,58 E-05		16,0	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	42	2,88 E-05	42	6,86 E-05		17,8	

Nickel	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	$IR_{Sed-parc\ EMR}$ (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}$) *100			
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	9	3,19 E-06	9	3,54 E-05	56	0,16	5,7 E-08
	Bouée Carosse	13,7	3,19 E-06	13,7	2,33 E-05		0,25	
	Seine - Estuaire 6	12,5	3,19 E-06	12,5	2,55 E-05		0,22	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	12,1	3,19 E-06	12,1	2,64 E-05		0,22	

Plomb	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed}	$IR_{Sed-parc\ EMR}$
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}$) *100		(Sur la base des concentrations totales)	(Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	24,9	5,87 E-06	24,9	2,36 E-05	123	0,2	4,7 E-08
	Bouée Carosse	30,7	5,87 E-06	30,7	1,91 E-05		0,25	
	Seine - Estuaire 6	26,7	5,87 E-06	26,7	2,20 E-05		0,22	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	20,2	5,87 E-06	20,2	2,90 E-05		0,16	

Cuivre	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed}	$IR_{Sed-parc\ EMR}$
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}$) *100		(Sur la base des concentrations totales)	(Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	7,1	7,67 E-06	7,1	1,08 E-04	3,2	2,2	2,4 E-06
	Bouée Carosse	14,1	7,67 E-06	14,1	5,44 E-05		4,4	
	Seine - Estuaire 6	14,3	7,67 E-06	14,3	5,36 E-05		4,5	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	7,7	7,67 E-06	7,7	9,96 E-05		2,4	

Cadmium	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed}	$IR_{Sed-parc EMR}$
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc EMR}/C_{i-sed}$) *100		(Sur la base des concentrations totales)	(Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	0,16	2,99 E-06	0,16	1,87 E-03	0,230	0,7	1,3 E-05
	Bouée Carosse	0,33	2,99 E-06	0,33	9,05 E-04		1,4	
	Seine - Estuaire 6	0,32	2,99 E-06	0,32	9,33 E-04		1,4	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	0,14	2,99 E-06	0,14	2,13 E-03		0,6	

Cobalt	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed}	$IR_{Sed-parc EMR}$
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc EMR}/C_{i-sed}$) *100		(Sur la base des concentrations totales)	(Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	4,3	5,69 E-08	4,3	1,32 E-06	1,7	2,5	3,3 E-08
	Bouée Carosse	6,4	5,69 E-08	6,4	8,88 E-07		3,7	
	Seine - Estuaire 6	5,8	5,69 E-08	5,8	9,80 E-07		3,4	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	5,5	5,69 E-08	5,5	1,03 E-06		3,2	

Lanthane	Libellé	C _{i-sed} ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC _{sed-parc EMR} /C _{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	Donnée non disponible / Non mesurée	8,4E-07	8,4E-07	-	468*	-	1,79E-09
	Bouée Carosse	Donnée non disponible / Non mesurée	8,4E-07	8,4E-07	-		-	
	Seine - Estuaire 6	Donnée non disponible / Non mesurée	8,4E-07	8,4E-07	-		-	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	Donnée non disponible / Non mesurée	8,4E-07	8,4E-07	-		-	

*Méthode Equilibre de partage

Uranium	Libellé	C _{i-sed} ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	PEC _{Sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{T-Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC _{sed-parc EMR} /C _{i-sed}) *100	PNEC _{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR _{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR _{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	Donnée non disponible / Non mesurée	1,8E-08	-	-	0,00227*	-	7,9E-06
	Bouée Carosse	Donnée non disponible / Non mesurée	1,8E-08	-	-		-	
	Seine - Estuaire 6	Donnée non disponible / Non mesurée	1,8E-08	-	-		-	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	Donnée non disponible / Non mesurée	1,8E-08	-	-		-	

*Méthode Equilibre de partage

Cerium	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	$IR_{Sed-parc\ EMR}$ (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}$) *100			
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	Donnée non disponible / Non mesurée	7,8E-07	-	-	128*		6,0E-09
	Bouée Carosse	Donnée non disponible / Non mesurée	7,8E-07	-	-		-	
	Seine - Estuaire 6	Donnée non disponible / Non mesurée	7,8E-07	-	-		-	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	Donnée non disponible / Non mesurée	7,8E-07	-	-		-	

*Méthode Equilibre de partage

Argent	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	$IR_{Sed-parc\ EMR}$ (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}$) *100			
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	0,36	1,89 E-07	0,36	5,26 E-05	438,13*	8 E-04	4,3 E-10
	Bouée Carosse	1,11	1,89 E-07	1,11	1,71 E-05		2,5 E-03	
	Seine - Estuaire 6	0,92	1,89 E-07	0,92	2,06 E-05		2 E-03	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	0,25	1,89 E-07	0,25	7,57 E-05		5,7 E-04	

*Méthode Equilibre de partage

Titane	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	$IR_{Sed-parc\ EMR}$ (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}$) *100			
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	Donnée non disponible / Non mesurée	2,96E-07	-	-	60*	-	4,9E-09
	Bouée Carosse	Donnée non disponible / Non mesurée	2,96E-07	-	-		-	
	Seine - Estuaire 6	Donnée non disponible / Non mesurée	2,96E-07	-	-		-	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	Donnée non disponible / Non mesurée	2,96E-07	-	-		-	

*Méthode Equilibre de partage

Néodyme (Nd)	Libellé	C_{i-sed}	$PEC_{Sed-parc\ EMR}$	PEC_{T-Sed}	% d'augmentation	$PNEC_{sed\ marin}$ (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	$IR_{Sed-parc\ EMR}$ (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
		ROCCH SED - 2013 (mg.kg ⁻¹ p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	(mg.kg-1 p.s.)	($PEC_{sed-parc\ EMR}/C_{i-sed}$) *100			
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	Donnée non disponible / Non mesurée	1,7E-07	-	-	436*	-	3,89E-10
	Bouée Carosse	Donnée non disponible / Non mesurée	1,7E-07	-	-		-	
	Seine - Estuaire 6	Donnée non disponible / Non mesurée	1,7E-07	-	-		-	
015-Ravenoville-Saint Vaast-Barfleur	Sud Fort de la Hougue	Donnée non disponible / Non mesurée	1,7E-07	-	-		-	

*Méthode Equilibre de partage

2,4,6 tribromophénol	Libellé	C_{i-sed} ROCCH SED - 2013 (mg.kg⁻¹ p.s.)	PEC_{Sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC_{T-Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC_{Sed-parc EMR}/C_{i-sed}) *100	PNEC_{sed marin} (mg.kg-1 p.s.)	IR_{T-Sed} (Sur la base des concentrations totales)	IR_{Sed-parc EMR} (Sur la base des concentrations attribuables aux parcs)
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	Donnée non disponible / Non mesurée	0,063	0,063	-	0,00285*	-	22,1
	Bouée Carosse	Donnée non disponible / Non mesurée	0,063	0,063	-			
	Seine - Estuaire 6	Donnée non disponible / Non mesurée	0,063	0,063	-			
015-Ravenoville- Saint Vaast- Barfleur	Sud Fort de la Hougue	Donnée non disponible / Non mesurée	0,063	0,063	-			

*Méthode Equilibre de partage

5.5.3 Présentation des résultats obtenus

Les indices de risque (IR) obtenus pour les différents scénarii testés sont présentés dans les tableaux présentés ci-avant. Pour rappel, trois scénarios ont été testés afin d'évaluer l'impact du choix des différents dispositifs appliqués sur les parcs EMR (anodes sacrificielles (GACP) ou anodes par système de courant imposé (ICCP) :

- Scénario 1 – Anodes sacrificielles (GACP) : L'ensemble des trois parcs : Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport2 ; sont protégés par des anodes sacrificielles (GACP) en aluminium. Ce scénario représentait un cas fictif de la configuration des trois parcs lors de la soumission du projet ;
- Scénario 2 – Anodes par système de courant imposé (ICCP) : Les trois sites Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Le Tréport sont protégés par des dispositifs de protection par courant imposé (ICCP). Ce scénario représentait un cas fictif de la configuration des trois parcs lors de la soumission du projet ;
- Scénario 3 – Mixte (Anodes sacrificielles (GACP) et par courant imposés (ICCP) : Les parcs de Courseulles-sur-Mer et le Tréport sont protégés par dispositifs de protection par courant imposé (ICCP) et Fécamp par des anodes sacrificielles (GACP). *Ce scénario représentait le cas réel de la configuration des trois parcs lors de la soumission du projet. Cette configuration a évolué depuis, le choix a été fait d'utiliser des anodes de type ICCP également sur le site de Fécamp.*

Résultats obtenus pour le scénario 1 :

- ➔ Sur la base des concentrations totales (concentration initiale + apport des anodes), les indices de risque calculés sont :
 - >1 pour l'aluminium (IR : 12135 - 18877), le fer (IR : 36 - 46,6), le manganèse (IR : 13,44 - 24,88) et le vanadium (IR : 14,4 - 17,8) mettant en évidence un risque associé au rejet de ces substances,
 - Egaux ou proches de 1 pour le zinc (IR : 0,964 - 1,576), le cuivre (IR : 2,2 - 4,47), le cadmium (IR : 0,6-1,43) et le cobalt (IR : 2,52 - 3,76) mettant en évidence un risque associé au rejet de ces substances mais dans une moindre mesure par rapport à celles présentés au point précédent,
 - <1 pour le nickel (IR : 0,16-2,25), le plomb (IR : 0,16-2,25), et l'argent (IR : $8,2 \cdot 10^{-04}$ – $2,0 \cdot 10^{-03}$) mettant en évidence une absence de risque pour ces substances.
- ➔ Sur la base des concentrations initiales (obtenues via les points ROCCH SED 2013), les indices de risque calculés sont sensiblement équivalents à ceux obtenus à partir des concentrations totales (concentration initiale + apport des anodes),
- ➔ Sur la base des concentrations exclusivement associées aux apports des anodes, les indices de risque sont tous <1 excepté pour l'aluminium pour lequel IR obtenu est de 11,6 et donc pour lequel un risque est mis en évidence.

Résultats obtenus pour le scénario 2 :

Parmi les sous-produits de chloration formé (Cf. **Error! Reference source not found.**), seul le 2,4,6-tribromophénol avec un Koc égale à $2\ 253\ \text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ apparaît susceptible de s'adsorber sur les sédiments, aussi l'évaluation de risque sur le compartiment sédimentaire est réalisée pour cette substance uniquement. Nous ne disposons pas de concentration initiale concernant cette substance. L'indice de risque a donc été calculé uniquement à partir des concentrations associées aux apports des anodes. L'indice de risque obtenu de 22,1 met en évidence un risque pour le compartiment sédimentaire associé aux rejets de 2,4,6-trobropmophénol.

Résultats obtenus pour le scénario 3 :

- Sur la base des concentrations totales (concentration initiale + apport des anodes), les indices de risque calculés sont :
 - >1 pour l'aluminium (IR : 12123 - 18666), le fer (IR : 36,1 - 46,6), le manganèse (IR : 13,44 - 24,88) et le vanadium (IR : 14,4 - 17,8) mettant en évidence un risque associé au rejet de ces substances,
 - Egaux ou proches de 1 pour le zinc (IR : 0,95 - 1,57), le cuivre (IR : 2,2 - 4,47), le cadmium (IR : 0,6-1,4) et le cobalt (IR : 2,5 - 3,7) mettant en évidence un risque associé au rejet de ces substances mais dans une moindre mesure par rapport à celles présentés au point précédent,
 - <1 pour le nickel (IR : 0,16-2,25), le plomb (IR : 0,16-2,25), et l'argent (IR : $8,2 \cdot 10^{-04}$ - $2,0 \cdot 10^{-03}$) mettant en évidence une absence de risque pour ces substances.
- Sur la base des concentrations initiales (obtenues via les points ROCCH SED 2013), les indices de risque calculés sont sensiblement équivalents aux IR obtenus à partir des concentrations totales (concentration initiale + apport des anodes) excepté pour les substances ne disposant pas de concentrations initiales,
- Sur la base des concentrations exclusivement associées aux apports des anodes, les indices de risque calculés sont tous <1 excepté pour le 2,4,6-tribromophénol dont l'IR obtenu est de 22,1 (équivalent au scénario 2). Dans le cadre du scénario utilisant les deux types d'anodes (ICCP et sacrificielle) l'IR obtenu pour l'Al repasse en dessous de 1.

6 Discussions

L'étude réalisée porte sur des substances (métaux, organohalogénés) pour la plupart (métaux) présentes naturellement dans l'environnement. La première analyse menée a porté sur l'estimation de l'apport propre des anodes indépendamment des concentrations déjà présentes sur la zone. Les concentrations initiales (C_{i-sed}) basées sur les mesures réalisées par le ROCCH SED sur les points d'intérêts sélectionnés, indiquent une concentration déjà très importante des différents métaux dans les sédiments au niveau de ces points, concentration souvent d'ores et déjà supérieure à la $PEC_{\text{sédiment marin}}$. D'après les projections réalisées, en considérant une exposition « pire cas réaliste » (sur la base des résultats de la modélisation, la concentration moyenne dans l'eau (C_T) la plus élevée est retenue), l'augmentation en Al dans les sédiments, associée aux émissions des anodes galvaniques des parcs EMR serait de 0,1% au maximum et de 0,5% pour le zinc. Pour les autres contaminants, l'augmentation est bien en deçà. Pour un résultat exprimé en mg de contaminant /kg de sédiment, il n'y a pas de différence notable entre la PEC_{T-sed} et la concentration initiale (C_{i-sed}).

Toutefois, il faut souligner ici que le ROCCH SED mesure la concentration particulaire totale (fraction échangeable + « non » échangeable correspondant au métal associé à la matrice cristalline, intégré dans la matière organique, copécipité...). Les résultats ROCCH SED déterminés sur la fraction brute (<2 mm) sont donc considérés en première intention, mais ils majorent la concentration à laquelle les organismes benthiques sont susceptibles d'être exposés, l'aluminium étant le métal le plus abondant de l'écorce terrestre, cette différence pourrait ne pas être négligeable. Ces points sont également situés sur des zones où l'apport d'autres sources de contamination peut être important, c'est le cas des estuaires notamment. Les organismes qui évoluent dans ces secteurs sont donc aussi exposés à des concentrations non attribuables aux rejets étudiés. Ces concentrations peuvent être d'origine naturelle comme c'est souvent le cas pour les métaux, constituants de l'écorce terrestre, on parle alors de fond géochimique ou de concentration environnementale. Elles peuvent également être d'origine anthropique si la zone étudiée est incluse dans un tissu industriel ou que le cours d'eau recevant l'effluent reçoit déjà d'autres rejets (urbains, industriels ou agricoles) dans sa partie amont, on parle alors de concentration ambiante. Néanmoins, bien que les anodes ne soient pas tenues comme responsables des concentrations naturelles ou ambiantes et du risque qu'elles représentent pour les organismes, ces dernières doivent être prises en compte lors du calcul des PEC. C'est ce qui a été réalisé dans le cadre du projet mené. Les indices de risque calculés à partir de la PEC_{T-sed} tenant compte de la concentration ambiante sont supérieurs ou proches de 1 pour : l'aluminium (IR : 12123 - 18666), le fer (IR : 36,1 - 46,6), le manganèse (IR : 13,44 - 24,88), le vanadium (IR : 14,4 - 17,8), le zinc (IR : 0,95 - 1,57), le cuivre (IR : 2,2 -

[Evaluation de la concentration de contaminants chimiques dans les sédiments à partir des concentrations dans la colonne d'eau marine - 13.02.2025](#)

4,47), le cadmium (IR : 0,6-1,4) et le cobalt (IR : 2,5 - 3,7). A contrario, les indices de risque calculés sur la base des concentrations issues des anodes exclusivement sont tous très largement inférieurs à 1 pour les métaux sauf pour l'aluminium dont le ratio est de 11,6.

Les indices de risques obtenus pour l'aluminium sur la base de la PEC_{T-sed} sont très importants. Ceci s'explique par des concentrations initiales déjà très importantes mais également par les fortes quantités d'aluminium présentes dans les anodes entraînant, de fait, des taux d'émission eux aussi importants. Notons également qu'en l'absence de résultat de bioessais sur organisme benthique, la $PNEC_{sediment\ marin}$ de l'aluminium a été dérivée à partir de la $PNEC_{eau\ marine}$ via la méthode de l'équilibre de partage associant un certain nombre d'incertitudes. La $PNEC_{eau\ marine}$ utilisée a été dérivée dans le cadre de travaux réalisés par les Danois en 2020, elle est cependant encore au stade de « draft version ». Aucune valeur de $PNEC_{eau\ marine}$ ou $PNEC_{sediment\ marin}$ « réglementaire » n'existe pour l'aluminium. L'aluminium ne fait l'objet d'aucune surveillance réglementaire que ce soit dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau ou de la Directive Cadre Stratégie Marine. En lien avec le projet Anode dans lequel la nécessité de retravailler la $PNEC_{eau\ marine}$ de l'aluminium avait été identifiée, le projet Ecocap²⁶ (coordonnée par France Energies Marines) en cours, a pour objectif, sur la base de la réalisation de bioessais sur organismes aquatiques marins, de proposer une valeur actualisée de la $PNEC_{eau\ marin}$ de l'aluminium. Si une valeur actualisée est proposée à l'issue de ce projet, il serait nécessaire d'actualiser la $PNEC_{sediment\ marin}$ également.

L'indice de risque obtenu pour le 2,4,6-tribromophénol est supérieur à 1 (= 22,1) ce qui indique que les concentrations d'exposition dans l'environnement sont supérieures aux concentrations susceptibles de représenter un danger pour les organismes benthiques. A noter que pour cette substance nous ne disposons pas de concentration initiale (C_{i-sed}), il n'est donc pas possible de conclure concernant l'apport de cette substance par les anodes vs l'apport provenant de potentielles autres sources. Néanmoins, l'apport seul des anodes permet déjà l'obtention d'un indice de risque supérieur à 1. Il est également important de mentionner qu'en l'absence de résultat de bioessais sur organismes benthiques, la $PNEC_{sediment\ marin}$ du 2,4,6-tribromophénol a été dérivée à partir de la $PNEC_{eau\ marine}$ via la méthode de l'équilibre de partage associant un certain nombre d'incertitudes. Soulignons également que la $PNEC_{eau\ marine}$ utilisée, a été dérivée à partir d'un facteur d'extrapolation de 1000 sous entendant un jeu de donnée d'écotoxicité peu fourni. Aucune valeur de $PNEC$ « réglementaire » existe pour cette substance. La valeur proposée a été dérivée dans le cadre de travaux réalisés par l'agence Environnementale Norvégienne. Il est également important de souligner que des données disponibles dans la littérature suggèrent que le 2,4,6-Tribromophénol est susceptible de provoquer des perturbations endocriniennes, des effets transgénérationnels et une toxicité aux premiers stades de la vie chez les poissons à de faibles concentrations. Des évaluations sont également en cours dans le cadre de la réglementation REACH, le 2,4,6-Tribromophénol étant suspecté d'être une substance Persistante, bioaccumulable et toxique (PBT) ou encore de présenter des effets perturbateurs endocriniens. Les conclusions de ces évaluations ne sont pas encore disponibles. Une évaluation est également en cours par l'ANSES²⁷ pour évaluer si le 2,4,6-tribromophénol est une substance PMT « persistante, mobile et toxique » PMT ou « très persistante, très mobile » vPvM.

7 Conclusion et recommandations

Afin d'évaluer le risque chimique sur le compartiment sédimentaire en lien avec l'implantation de parcs EMR en milieu marin, une méthodologie est proposée afin d'évaluer en première intention, dans une évaluation d'exposition « pire cas réaliste », une concentration dans les sédiments à partir des concentrations prédites dans l'eau marine. Cette méthodologie comprend cinq étapes : 1/ caractérisation de la zone, 2/ modélisation hydrodynamique, 3/ sélection des points d'intérêt, 4/ détermination par modélisation des concentrations prédites dans l'eau marine (par substance et par point) associées exclusivement aux contaminants rejetés par les dispositifs anti-corrosion des parcs EMR, et 5/ concentration prédite dans les particules et dans le sédiment (par substance et par point). L'approche proposée pour évaluer la concentration totale prédite particulaire/sédimentaire maximise les concentrations dans une approche d'évaluation de l'exposition « pire cas réaliste » ; elle est basée sur

²⁶ 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

²⁷ Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

les MES et la concentration moyenne la plus élevée dans l'eau marine (au niveau du /des points localisés au sein des parcs EMR). Cette méthodologie est appliquée à la Baie de Seine, en considérant trois parcs EMR : Courseulles-sur-Mer, Le Tréport et Fécamp, et selon 3 scénarios de dispositifs anticorrosion : scénario 1 – GACP ; scénario 2 - ICCP, scénario 3 – Mixte GACP + ICCP. Elle permet d'évaluer les concentrations prédites totales dans le sédiment en tenant compte des apports engendrés par les dispositifs anticorrosion des parcs EMR et de mettre en évidence les données d'entrée nécessaires.

En parallèle du travail mené pour définir les concentrations d'exposition, une évaluation du danger des substances concernées a été réalisée. Ce travail a permis de constater que peu de substances disposent de $PNEC_{\text{sédiment marin}}$ dérivées sur la base de résultats d'essais d'écotoxicité sur organismes benthiques c'est le cas pour le : zinc, nickel, plomb, cuivre, cadmium, cobalt, lanthane, argent, titane et dysprosium. Afin de permettre le calcul des indices de risque, des valeurs $PNEC_{\text{sédiment marin}}$ ont été dérivées à partir des $PNEC_{\text{eau marine}}$ disponibles. C'est le cas pour le : manganèse, indium, vanadium, magnésium, chrome, étain, uranium, cérium, néodyme, gadolinium, samarium, praseodymium et le 2,4,6-tribromophénol. Pour le gallium, aucune $PNEC_{\text{eau marine}}$ n'ayant été trouvée, il n'a pas été possible de dériver une $PNEC_{\text{sédiment marin}}$.

Quelques pistes de travail peuvent être dégagées afin de faciliter l'utilisation de cette méthodologie dans le cadre d'autres parcs et d'améliorer l'évaluation :

- Concernant l'évaluation de l'exposition ($PEC_{T\text{-sed}}$) :
 - Réalisation de modélisations hydrodynamiques par façade en cumulant les rejets des différents parcs de façon à disposer des concentrations moyenne et maximum pour les substances associées aux dispositifs anticorrosion des parcs EMR. Dans l'idéal (si connues) ces modélisations pourraient se baser sur les cas « réalistes »,
 - Réalisation d'une couche cartographique à partir des résultats ROCCH SED, permettant de visualiser plus facilement les points de suivi ROCCH SED présentant un taux de fines (< 0,63 mm) supérieur à 20%. Cette couche cartographique de visualisation des points de suivi ROCCH SED pourrait être mise à disposition via l'Atlas contamination chimique en milieu marin (<https://ccem.ifremer.fr/Risque-Chimique/Atlas-contamination-chimique-en-milieu-marin#/map>).
 - Comme souligné précédemment, le ROCCH SED permet de disposer des concentrations totales en composés métalliques des sédiments, sans distinction de la part associée à la fraction biogénique, la plus biodisponible pour les organismes, de la part associée à la fraction cristalline, non disponible. Afin de mieux définir la concentration initiale en ne considérant que la fraction biogénique, il est possible soit de réaliser des analyses spécifiques pour la déterminer ; soit de soustraire la concentration associée à la fraction cristalline de la concentration totale. Pour un secteur défini, la caractérisation de la fraction cristalline issue du fond géologique local peut s'appuyer sur l'analyse de carotte sédimentaire ou considérer la concentration en composés métalliques sur les échantillons ROCCH SED les plus grossiers, qui ont donc une fraction biogénique réputée négligeable, pour en tirer des valeurs de référence (RNO 2001).
 - Acquisition de mesures de concentration sur les différentes substances d'intérêt en eau marine et sédiment (sous réserve de disposer de méthodes d'analyses, avec une limite de quantification compatible) en lien avec les anodes par système de courant imposé (ICCP),
 - A plus long terme, il serait intéressant d'acquérir certaines données :
 - Taux de sédimentation sur les points d'intérêt, et caractérisation des particules.
 - Capacité d'adsorption des particules fines vis-à-vis des substances d'intérêt,
 - Affiner certains coefficients de partage.
- Concernant l'évaluation des dangers ($PNEC_{\text{sédiment marin}}$) :
 - Il serait nécessaire, de disposer de $PNEC_{\text{sédiment marin}}$ présentant un niveau d'incertitude moins élevé pour les substances disposants d'IR > 1 dans le cadre des différents scénarii testés. Cela passe par la réalisation d'essais d'écotoxicité sur organismes benthiques marins n'en disposant pas afin d'éviter l'emploi de la méthode de l'équilibre de partage qui présente de grandes incertitudes. Les substances concernées en priorité seraient : l'aluminium, fer, manganèse et le 2,4,6-tribromophénol,
 - Compte tenu des nombreux questionnements concernant la toxicité du 2,4,6-tribromophénol et des ratios de risque obtenus (>1), une attention particulière devrait être

portée à cette substance : recherche bibliographique exhaustive et validation des résultats d'essais d'écotoxicité disponibles, identification des données manquantes, réalisation d'essai d'écotoxicité selon les conclusions de la recherche bibliographique menée, dérivation de nouvelles valeurs de $PNEC_{\text{eau marine}}$ et $PNEC_{\text{sédiment marin}}$

- Une approche par modélisation QSAR de l'écotoxicité des substances pourrait également être appliquée en complément des données présentées dans ce rapport,
- Une mise à jour de certaines données tenant compte des travaux en cours pourrait être nécessaire (ex. $PNEC_{\text{eau marine}}$ aluminium).

8 Références

AFNOR, 2013. Anodes galvaniques pour la protection cathodique dans l'eau de mer et les boues salines, s.l.: s.n.

Allonier, Anne-Sophie, Michel Khalanski, Valérie Camel, et Alain Bermond. 1999. « Characterization of Chlorination By-Products in Cooling Effluents of Coastal Nuclear Power Stations ». *Marine Pollution Bulletin* 38, n° 12: 1232-41. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00168-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00168-X).

Boudjellaba, D., J. Dron, G. Revenko, C. Démelas, et J.-L. Boudenne. 2016. « Chlorination By-Product Concentration Levels in Seawater and Fish of an Industrialised Bay (Gulf of Fos, France) Exposed to Multiple Chlorinated Effluents ». *Science of The Total Environment* 541 : 391-99. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.046>.

Danemark (2020). Fastsettelse af kvalitetskriterier for vandmiljøet Aluminium, opløst uorganisk CAS nr. 7429-90-5. November 2020.

DNV-GL, 2017. *Corrosion protection design : RP-B401*, s.l.: s.n (en accès restreint).

Dron, Julien, Carine Demelas, Justine Mas, Amandine Durand, Anthony Pantalacci, Annabelle Austruy, Marine Périot, et al. 2022. « Assessment of the Contamination by 2,4,6-Tribromophenol of Marine Waters and Organisms Exposed to Chlorination Discharges ». *Environmental Pollution* 309: 119742. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119742>.

E.C. (2005a). Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive - Environmental Quality Standards (EQS) Substance Data Sheet - Priority Substance No. 6 :Cadmium and its Compounds (CAS-No. 7440-43-9). Brussels.

E.C. (2007). European Union Risk Assessment Report for Cadmium oxide and cadmium metal (CAS 1306-19-0 and 7440-43-9).Final report.

E.C. (2008). European Union Risk Assessment Report for Zinc metal (CAS-No.: 7440-66-6, EINECS-No.: 231-175-3)(Final report, Part I, Environment). Institute for Health and Consumer Protection - European Chemicals Bureau: 117.

E.C. (2011a). "Environmental Quality Standards (EQS). Substance Data Sheet. LEAD AND ITS COMPOUNDS."

E.C. (2013). "Directive (2013/39/CE) du 12/08/13 modifiant les directives (2000/60/CE) et (2008/105/CE) en ce qui concerne les substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau."

E.C. (2014a). "Environmental Quality Standards (EQS). Substance Data Sheet. Copper."

E.C. (2014c). EQS Datasheet: Environmental Quality Standard URANIUM: 48.

E.C. (2014b). "EQS Datasheet: Environmental Quality Standard CHROMIUM."

E.C. (2015). "EQS Datasheet: Environmental Quality Standard ZINC."

ECHA. Indium. Dossier d'enregistrement. <https://echa.europa.eu/fr/registration-dossier/-/registered-dossier/22264>

ECHA. Magnesium. Dossier d'enregistrement. <https://echa.europa.eu/fr/registration-dossier/-/registered-dossier/15545/6/1>

ECHA. Silver. Dossier d'enregistrement. <https://echa.europa.eu/fr/registration-dossier/-/registered-dossier/16155/6/1>.

ECHA. Titanium. Dossier d'enregistrement. <https://echa.europa.eu/fr/registration-dossier/-/registered-dossier/15537/6/1>

ECHA (2008). Chapter R.10: Characterisation of dose [concentration]-response for environment. Guidance on information requirements and chemical safety assessment., European Chemicals Agency: 65.

ECHA (2016). Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment Part E: Risk Characterisation Version 3.0. European Chemicals Agency, may 2016. https://echa.europa.eu/documents/10162/17224/information_requirements_part_e_en.pdf/1da6cadd-895a-46f0-884b-00307c0438fd?t=1463491823908

Eoliennes Flottantes du Golfe du Lion - Étude d'impact sur l'environnement au titre de l'article R.122-5 II 1 du code de l'environnement

Erdogan, Caglar, et Geoffrey Swain. 2021. « Conceptual Sacrificial Anode Cathodic Protection Design for Offshore Wind Monopiles ». *Ocean Engineering* 235 : 109339. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109339>.

France Energies Marines (2020). Recommendations for the quantitative assessment of metal inputs in the marine environment from the galvanic anodes of offshore renewable energy structures. Projet Anode 2020. https://www.france-energies-marines.org/wp-content/uploads/2020/12/rapport_reco_anode_EN_BD.pdf

Garlan T, Marchès E. 2012. Caractéristiques et Etat Ecologique Manche -Mer du Nord. Etat physique et Chimique. Caractéristiques physiques. Nature des fonds marins. 8 p. 2012.

Garnaud Sébastien 2003. La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale : la Baie de Seine sud-orientale (France). Océan, Atmosphère. Université de Caen, 2003. Français. ffNNT : 2003CAEN2009ff. fftel-00003489v2

GRNC (2002). Risques pour l'environnement - Evaluation des risques associés aux rejets chimiques des installations nucléaires du Nord-Cotentin. Volume 3 du rapport du Groupe Radioécologique Nord-Cotentin 2ème mission. Décembre 2002. Document confidentiel.

Gonzalez Jean-Louis (2017). Contribution à l'étude de la dynamique des contaminants chimiques et à la surveillance du milieu marin: apports de la modélisation et des techniques d'échantillonnage passif . HDR. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00380/49117/>

INERIS (2007). "Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Vanadium."

INERIS (2012b). "Mise à jour de l'Évaluation des Risques Environnementaux du site AREVA de La Hague, incluant le projet de reprise et conditionnement des boues STE2. DRC-12-126809-07288A." (document confidentiel)

INERIS (2014a). Addendum complétant les évaluations des risques environnementaux (ERE) et sanitaires (ERS) du site AREVA de La Hague. Document confidentiel.

INERIS (2016a). "Appui technique pour la détermination des paramètres d'écotoxicité nécessaires à l'évaluation des dangers sur l'environnement, des matériaux présents dans les satellites en fin de vie : Etude complémentaire." Document confidentiel.

INERIS (2016b). "Appui technique pour la détermination des paramètres d'écotoxicité nécessaires à l'évaluation des dangers sur l'environnement, des matériaux présents dans les satellites en fin de vie : Etude complémentaire." Document confidentiel.

Ineris (2022a). Document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes. Impact local des activités humaines sur les milieux naturels et la biodiversité. Ineris-229693-2806689-v1.0 Ineris (2022).

INERIS (2002b). Proposition de Valeur Guide Environnementale (VGE). Cobalt. Document interne.

Ineris (2023a). Proposition de Valeur Guide Environnementale (VGE). Etain. Document interne.

Ineris (2023b). Proposition de Valeur Guide Environnementale (VGE). Manganèse. Document interne.

Kirchgeorg, T., I. Weinberg, M. Hörnig, R. Baier, M.J. Schmid, et B. Brockmeyer. 2018. « Emissions from Corrosion Protection Systems of Offshore Wind Farms: Evaluation of the Potential Impact on the Marine Environment ». *Marine Pollution Bulletin* 136: 257-68. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.058>.

Koch, Christoph, et Bernd Sures. 2018. « Environmental Concentrations and Toxicology of 2,4,6-Tribromophenol (TBP) ». *Environmental Pollution* 233: 706-13. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.127>.

Lebaron, Karine. « SOUS-PRODUITS DE CHLORATION DU GOLFE DE FOS », s. d., 172. Thèse Aix Marseille Université. 2020.

Millero, Frank, Ryan Woosley, Benjamin DiTrollo, et Jason Waters. 2009. « Effect of Ocean Acidification on the Speciation of Metals in Seawater ». *Oceanography* 22, n° 4: 72-85. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.98>.

Norwegian Environmental Agency (2016). Substance Evaluation Conclusion as required by REACH Article 48 and Evaluation Report for 2,4,6-tribromophenol. EC No 204-278-6, CASNo 118-79-6. <https://echa.europa.eu/documents/10162/fd19d44e-7365-c189-d263-d3b0f4cc7dd9>.

Osvoll, Harald, Gro Østensen Lauvstad, et Troels Mathiesen. 2015. « CP Design and Retrofit for Offshore Wind Turbine Monopile Foundations », s. d.

Peters A., Crane M., Maycock D., Merrington G. et Simpson P. (2012). Proposed EQS for Water Framework Directive Annex VIII substances: manganese (bioavailable) (For Consultation). Water Framework Directive - United Kingdom Technical Advisory Group (WFD-UKTAG) [https://www.wfduk.org/sites/default/files/Media/Environmental%20standards/Manganese%20EQS%20Report%20-%20UKTAG%20\(2\).pdf](https://www.wfduk.org/sites/default/files/Media/Environmental%20standards/Manganese%20EQS%20Report%20-%20UKTAG%20(2).pdf). p.77.

Reese, Anna, Nathalie Voigt, Tristan Zimmermann, Johanna Irrgeher, et Daniel Pröfrock. 2020. « Characterization of Alloying Components in Galvanic Anodes as Potential Environmental Tracers for Heavy Metal Emissions from Offshore Wind Structures ». *Chemosphere* 257 : 127182. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127182>.

RIVM (2000). Sneller et al. Maximum Permissible Concentration and Negligible Concentrations for Rare Earth Elements (REEs). National Institute for Public Health and the Environment. June 2000. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/601501011.pdf>

RIVM (2005b). "Environmental Risk Limits For Nine Trace Elements. RijksInstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven, 601501029/2005."

RIVM (2012). Environmental Risk Limits For silver in water., RIVM: 100.

[Evaluation de la concentration de contaminants chimiques dans les sédiments à partir des concentrations dans la colonne d'eau marine - 13.02.2025](#)

RNO 2001. Surveillance du Milieu Marin. Travaux du RNO. Edition 2001. Ifremer et Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. ISSN 1620-1124.

Thouvenin Bénédicte (2021). **Modélisation des contaminants en milieu aquatique: Module MET&OR** . R.ODE., DYNECO/DHYSED 2021. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00688/79972/>

SHOM 2011.

Thouvenin Benedicte, [Gonzalez Jean-Louis](#) (2021). **Modélisation des contaminants chimiques dans une colonne d'eau. Modèle MOMO (MORGAN+MOCO)**. ODE/DYNECO/DHYSED 2021. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00686/79771/>

UK-EA (2007a). Preconsultation report: Proposed EQS for Water Framework Directive Annex VIII substances: iron (total dissolved), Environmental Agency: 67.

UK-EA (2007b). Proposed EQS for Water Framework Directive Annex VIII substances: aluminium (inorganic monomeric), Environmental Agency: 89.

UK-EA (2007c). Proposed EQS for Water Framework Directive Annex VIII substances: manganese (total dissolved), Environmental Agency: 72.

9 Annexes

9.1 Annexe 1 : Scénario 1 – Parcs EMR tous équipés GACP

Evaluation de la concentration prédite particulaire/ sédimentaire en lien avec les composés relargués par les anodes des parcs EMR : C_s (correspondant à $C_{pr-sed-parc\ EMR}$).

Influence de la concentration en MES sur la concentration particulaire C_s – simulation en faisant varier les MES entre 10 et 40 mg/L.

	Concentration moyenne C_T ($\mu\text{g L}^{-1}$)	C_s (mg/kg) - avec MES=10mg/L	C_s (mg/kg) - avec MES= 20 mg/L	C_s (mg/kg) - avec MES= 30 mg/L	C_s (mg/kg) - avec MES= 40 mg/L
Aluminium (Al)	0,424	21,217	14,144	10,608	8,487
Zinc (Zn)	0,026	0,240	0,220	0,203	0,188
Fer (Fe)	4,504E-05	4,39E-03	2,22E-03	1,49E-03	1,12E-03
Bismuth (Bi)	2,953E-04	2,42E-02	1,33E-02	9,18E-03	7,00E-03
Manganèse (Mn)	1,044E-03	1,03E-03	1,02E-03	1,01E-03	1,00E-03
Indium (In)	1,035E-04	9,20E-03	4,87E-03	3,31E-03	2,51E-03
Vanadium (V)	5,64E-05	1,36E-03	1,09E-03	9,16E-04	7,88E-04
Gallium (Ga)	5,90E-05	-	-	-	-
Nickel (Ni)	2,26E-05	1,34E-04	1,26E-04	1,20E-04	1,14E-04
Plomb (Pb)	4,16E-06	3,93E-04	2,02E-04	1,36E-04	1,02E-04
Cuivre (Cu)	7,60E-06	4,32E-04	2,75E-04	2,02E-04	1,60E-04
Magnésium (Mg)	3,27E-06	2,14E-06	2,13E-06	2,11E-06	2,10E-06
Chrome (Cr)	2,46E-06	-	-	-	-
Cadmium (Cd)	2,97E-06	1,68E-04	1,07E-04	7,88E-05	6,23E-05
Cobalt (Co)	1,49E-06	2,32E-06	2,28E-06	2,25E-06	2,21E-06
Etain (Sn)	2,33E-06	1,86E-04	1,03E-04	7,17E-05	5,48E-05
Lanthane (La)	5,94E-07	-	-	-	-
Uranium (U)	7,64E-07	-	-	-	-
Cérium (Ce)	5,52E-07	-	-	-	-
Argent (Ag)	1,70E-07	1,11E-05	6,72E-06	4,82E-06	3,75E-06
Titane (Ti)	2,55E-07	1,77E-05	1,04E-05	7,41E-06	5,74E-06
Néodyme (Nd)	1,27E-07	-	-	-	-
Gadolinium (Gd)	4,24E-08	-	-	-	-
Dysprosium (Dy)	4,24E-08	-	-	-	-
Samarium (Sm)	4,24E-08	-	-	-	-
Praseodymium (Pr)	4,24E-08	-	-	-	-

9.2 Annexe 2 – Scénario 3 – Parc de Fécamp équipé GACP

Evaluation de Concentrations prédites particulières/ sédimentaires en lien avec les composés relargués par les anodes GACP du parc EMR de Fécamp PEC_{sed-parc EMR}

Aluminium	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC _{sed-parc EMR} /Ci) *100
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	16 367	0,390	16 367,39	2,38E-03
	Bouée Carosse	25 455	0,390	25 455,39	1,53E-03
	Seine - Estuaire 6	25 199	0,390	25 199,39	1,55E-03
015-Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	24 692	0,390	24 692,39	1,58E-03

Zinc	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC _{sed-parc EMR} /Ci) *100
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	50	0,006	50,01	0,01
	Bouée Carosse	77	0,006	77,01	0,01
	Seine - Estuaire 6	71	0,006	71,01	0,01
015-Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	47	0,006	47,01	0,01

Fer	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC _{sed-parc EMR} /Ci) *100
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	13924	6,48E-05	13924	4,65E-07
	Bouée Carosse	14861	6,48E-05	14861	4,36E-07
	Seine - Estuaire 6	13702	6,48E-05	13702	4,73E-07
015-Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	11504	6,48E-05	11504	5,63E-07

Manganèse	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC _{Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC _{sed-parc EMR} /Ci) *100
010-Baie de Seine et Orne	Saint Jouin - Château d'eau	168	2,55E-05	168	1,52E-05
	Bouée Carosse	244	2,55E-05	244	1,04E-05
	Seine - Estuaire 6	311	2,55E-05	311	8,19E-06
015-Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	234	2,55E-05	234	1,09E-05

Vanadium	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC sed-parc EMR (mg.kg-1 p.s.)	PEC Sed (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC sed-parc EMR/Ci) *100
010-Baie de Seine er Orne	Saint Jouin - Château d'eau	34	2,88E-05	34	8,47E-05
	Bouée Carosse	42	2,88E-05	42	6,86E-05
	Seine - Estuaire 6	38	2,88E-05	38	7,58E-05
015- Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	42	2,88E-05	42	6,86E-05

Nickel	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC sed-parc EMR (mg.kg-1 p.s.)	PEC Sed (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC sed-parc EMR/Ci) *100
010-Baie de Seine er Orne	Saint Jouin - Château d'eau	9	3,19E-06	9,0	3,54E-05
	Bouée Carosse	13,7	3,19E-06	13,7	2,33E-05
	Seine - Estuaire 6	12,5	3,19E-06	12,5	2,55E-05
015- Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	12,1	3,19E-06	12,1	2,64E-05

Plomb	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC sed-parc EMR (mg.kg-1 p.s.)	PEC Sed (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC sed-parc EMR/Ci) *100
010-Baie de Seine er Orne	Saint Jouin - Château d'eau	24,9	5,87E-06	24,9	2,36E-05
	Bouée Carosse	30,7	5,87E-06	30,7	1,91E-05
	Seine - Estuaire 6	26,7	5,87E-06	26,7	2,20E-05
015- Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	20,2	5,87E-06	20,2	2,90E-05

Cuivre	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC sed-parc EMR (mg.kg-1 p.s.)	PEC Sed (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC sed-parc EMR/Ci) *100
010-Baie de Seine er Orne	Saint Jouin - Château d'eau	7,1	7,67E-06	7,1	1,08E-04
	Bouée Carosse	14,1	7,67E-06	14,1	5,44E-05
	Seine - Estuaire 6	14,3	7,67E-06	14,3	5,36E-05
015- Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	7,7	7,67E-06	7,7	9,96E-05

Cadmium	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC sed-parc EMR (mg.kg-1 p.s.)	PEC Sed (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC sed-parc EMR/Ci) *100
010-Baie de Seine er Orne	Saint Jouin - Château d'eau	0,16	2,99E-06	0,16	1,87E-03
	Bouée Carosse	0,33	2,99E-06	0,33	9,05E-04
	Seine - Estuaire 6	0,32	2,99E-06	0,32	9,33E-04
015- Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	0,14	2,99E-06	0,14	2,13E-03

Cobalt	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC_{sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC_{Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC sed-parc EMR/Ci) *100
010-Baie de Seine er Orne	Saint Jouin - Château d'eau	4,3	5,69E-08	4,30	1,32E-06
	Bouée Carosse	6,4	5,69E-08	6,40	8,88E-07
	Seine - Estuaire 6	5,8	5,69E-08	5,80	9,80E-07
015-Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	5,5	5,69E-08	5,50	1,03E-06

Argent	Libellé	C i-sed ROCCH SED - 2013 (mg.kg-1 p.s.)	PEC_{sed-parc EMR} (mg.kg-1 p.s.)	PEC_{Sed} (mg.kg-1 p.s.)	% d'augmentation (PEC sed-parc EMR/Ci) *100
010-Baie de Seine er Orne	Saint Jouin - Château d'eau	0,36	1,89E-07	0,36	5,26E-05
	Bouée Carosse	1,11	1,89E-07	1,11	1,71E-05
	Seine - Estuaire 6	0,92	1,89E-07	0,92	2,06E-05
015-Ravenoville - Saint Vaast - Barfleur	Sud Fort de la Hougue	0,25	1,89E-07	0,25	7,57E-05

9.3 Annexe 3 : Quel statut réglementaire pour les substances émises via les systèmes anticorrosion utilisés sur le Parcs éolien Offshore (DCE, DCSMM, REACH, CLP) ?

- Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)
- Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)
- Règlement REACH : « Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne
- Règlement CLP - Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/200

Anodes galvaniques (type Zinc et Aluminium)	Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)	Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)	Règlement REACH «Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne (règlement n°1907/2006)	Règlement CLH Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2008
Aluminium (Al) N°CAS : 7429-90-5	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Non concerné	Substance enregistrée : Dossier d'enregistrement disponible	Classification harmonisée : Poudre d'aluminium : Pyr. Sol. 1 : Matières solides pyrophoriques, catégorie 1 H250 : S'enflamme spontanément au contact de l'air Water-react. 2 : Substances et mélanges qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables, catégorie 2 H261 : Dégage au contact de l'eau des gaz inflammables. 
Zinc (Zn) CAS 7440-66-6	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Substance bon état écologique (D8)	Substance enregistrée : Dossier d'enregistrement disponible	Classification harmonisée : Pyr. Sol. 1 H250 Water-react. 1 H260 Aquatic Acute 1 H400 Aquatic Chronic 1 H410  
Fer (Fe) CAS : 7439-89-6	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Non concerné	Substance enregistrée : Dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée

Anodes galvaniques (type Zinc et Aluminium)	Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)	Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)	Règlement REACH «Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne (règlement n°1907/2006)	Règlement CLH Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2008
Bismuth (Bi) CAS : 7440-69-9	Non concernée	Non concerné	PACT - Public Activities Coordination Tool → dossier d'évaluation : testing proposal rat Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée
Manganèse (Mn) CAS 7439-96-5	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Non concerné	PACT - Public Activities Coordination Tool → Assessment of regulatory needs (dossier d'évaluation) Known or potential hazard for aquatic toxicity (en cours d'évaluation)	Pas de classification harmonisée
Indium (In) CAS 7440-74-6	Non concerné	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée
Vanadium (V) CAS : 7440-62-2	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Non concerné	PACT - Public Activities Coordination Tool → Assessment of regulatory needs (dossier d'évaluation) Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée

Anodes galvaniques (type Zinc et Aluminium)	Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)	Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)	Règlement REACH «Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne (règlement n°1907/2006)	Règlement CLH Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2008
Gallium (Ga) CAS : 7440-55-3	Non concerné	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée Notifications : Met. Corr. 1 H290 Acute Tox. 4 H302 Aquatic Chronic 3 H412
Nickel (Ni) CAS : 7440-02-0	Substance prioritaire (Réduction progressive de la pollution due aux substances prioritaires et l'arrêt ou la suppression progressive des rejets, émissions et pertes de substances dangereuses prioritaires)	Substance bon état écologique (D8)	PACT - Public Activities Coordination Tool → (dossier d'évaluation)	Classification Harmonisée : Skin Sens. 1 H317 Carc. 2 H351 STOT RE 1 H372** 
Plomb (Pb) CAS : 7439-92-1	Substance Prioritaire (Réduction progressive de la pollution due aux substances prioritaires et l'arrêt ou la suppression progressive des rejets, émissions et pertes de substances dangereuses prioritaires)	Substance bon état écologique (D8)	SVHC : Liste des substances extrêmement préoccupantes candidates en vue d'une autorisation. Substance enregistrée : Dossier d'enregistrement disponible	Classification harmonisée : Lact. H362 Aquatic Acute 1 H400 Aquatic Chronic 1 H410 Repr. 1A H360FD 

Anodes galvaniques (type Zinc et Aluminium)	Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)	Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)	Règlement REACH «Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne (règlement n°1907/2006)	Règlement CLH Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2008
Cuivre (Cu) CAS : 7440-50-8	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Substance bon état écologique (D8)	PACT - Public Activities Coordination Tool → Endocrine disruptor assessment – (en cours d'évaluation) Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Classification harmonisée : Aquatic Chronic 2 H411 
Magnésium (Mg) CAS : 7439-95-4	Paramètres physico-chimiques pour les cours d'eau (eau de surface) Arrêté du 26 avril 2022 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Classification harmonisée : Pyr. Sol. 1 H250 Water-react. 1 H260 
Chrome (Cr) CAS : 7440-47-3	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Substance bon état écologique (D8)	PACT - Public Activities Coordination Tool → Assessment of regulatory needs (dossier d'évaluation) Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée

Anodes galvaniques (type Zinc et Aluminium)	Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)	Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)	Règlement REACH «Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne (règlement n°1907/2006)	Règlement CLH Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2008
Cadmium (Cd) CAS : 7440-43-9	Substance Dangereuse Prioritaire (Réduction progressive de la pollution due aux substances prioritaires et l'arrêt ou la suppression progressive des rejets, émissions et pertes de substances dangereuses prioritaires)	Substance bon état écologique (D8)	SVHC : Liste des substances extrêmement préoccupantes candidates en vue d'une autorisation. Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Classification harmonisée : Pyr. Sol. 1 H250 Acute Tox. 2 * H330 Muta. 2 H341 Carc. 1B H350 STOT RE 1 H372 Aquatic Acute 1 H400 Aquatic Chronic 1 H410 Repr. 2 H361fd 
Cobalt (Co) CAS : 7440-48-4	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Non concernée	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible PACT - Public Activities Coordination Tool → Assessment of regulatory needs (dossier d'évaluation)	Classification harmonisée : Skin Sens. 1 H317 Resp. Sens. 1 H334 Muta. 2 H341 Carc. 1B H350 Aquatic Chronic 4 H413 Repr. 1B H360F 

Anodes galvaniques (type Zinc et Aluminium)	Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)	Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)	Règlement REACH «Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne (règlement n°1907/2006)	Règlement CLH Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2008
Etain (Sn) CAS : 7440-31-5	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Non concernée	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible PACT - Public Activities Coordination Tool → Assessment of regulatory needs (dossier d'évaluation) : évaluation stoppée	Pas de classification harmonisée
Lanthane (La) CAS : 7439-91-0	Non concerné	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible Lanthanum oxide (CAS : 1312-81-8) : PACT - Public Activities Coordination Tool → Assessment of regulatory needs (dossier d'évaluation) Lanthanum trinitrate (10099-59-9) : PACT - Public Activities Coordination Tool → Assessment of regulatory needs (dossier d'évaluation)	Lanthane : Pas de classification harmonisée Lanthanum trinitrate (10099-59-9) : Pas de classification harmonisée, notifications soumises : Eye Dam. 1 H318 Aquatic Acute 1 H400 Aquatic Chronic 1 H410
Uranium (U) CAS : 7440-61-1	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Non concerné	Pas d'enregistrement dans REACH	Classification harmonisée : Acute Tox. 2 * H300 Acute Tox. 2 * H330 STOT RE 2 * H373 ** Aquatic Chronic 4 H413 

Anodes galvaniques (type Zinc et Aluminium)	Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)	Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)	Règlement REACH «Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne (règlement n°1907/2006)	Règlement CLH Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2008
Cérium (Ce) CAS : 7440-45-1	Non concerné	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée
Argent (Ag) CAS : 7440-22-4	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible Endocrine disrupter : Under assessment as Endocrine Disrupting Substance included in the Community Rolling Action Plan (CoRAP). R : Some data submitters indicate they consider this substance as Toxic to Reproduction	En cours d'évaluation : classification proposée : Skin Sens. 1, H317, Muta. 2, H341, Repr. 1B, H360FD, Aquatic Acute 1, H400, M-factor=10 (for silver), Aquatic Acute 1, H400, M-factor=1000 (for nano silver), Aquatic Chronic 1, H410, M-factor=10 (for silver), Aquatic Chronic 1, H410, M-factor=100 (for nano silver)
Titane (Ti) CAS : 7440-32-6	Substances pertinentes à surveiller dans les eaux de surface continentales (SPAS)	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée
Néodyme (Nd) CAS : 7440-00-8	Non concerné	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible PACT - Public Activities Coordination Tool → Assessment of regulatory needs (dossier d'évaluation) Evaluation stoppée suite à la fourniture d'information par le notifiant	Pas de classification harmonisée
Gadolinium (Gd)	Non concerné	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée

Anodes galvaniques (type Zinc et Aluminium)	Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)	Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)	Règlement REACH «Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne (règlement n°1907/2006)	Règlement CLH Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2008
CAS : 7440-54-2				Notifications soumises : GHS02: flame H228: Flammable solid.
Dyprosium (Dy) CAS : 7429-91-6	Non concerné	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée
Samarium (Sm) CAS : 7440-19-9	Non concerné	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée Notifications soumises : GHS02: flame H261: In contact with water releases flammable gases.
Praseodymium (Pr) CAS : 7440-10-0	Non concerné	Non concerné	Substance enregistrée, dossier d'enregistrement disponible	Pas de classification harmonisée

Anodes à courant imposé (ICCP)		Directive Cadre sur l'Eau (DIRECTIVE 2013/39/UE)	Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Directive 2008/56/CE)	Règlement REACH « Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals » entré en vigueur le 1er juin 2007 au sein de l'Union Européenne (règlement n°1907/2006)	Règlement CLH Classification et étiquetage harmonisée selon le règlement 1272/2008
Trihalométhane 75-25-2	Bromoforme CAS 75-25-2	Paramètres de l'analyse photographique du contrôle de surveillance de l'état chimique des eaux souterraines communs métropole et DOM	Non concernée	Substance enregistrée : dossier d'enregistrement disponible	Classification harmonisée : Acute Tox. 4 * H302 Skin Irrit. 2 H315 Eye Irrit. 2 H319 Acute Tox. 3 * H331 Aquatic Chronic 2 H411 
	Chloroforme CAS : 67-66-3	Substance Dangereuse (Réduction progressive de la pollution due aux substances prioritaires et l'arrêt ou la suppression progressive des rejets, émissions et pertes de substances dangereuses prioritaires)	Non concernée	Substance enregistrée : dossier d'enregistrement disponible	Classification harmonisée : Acute Tox. 4 H302 Skin Irrit. 2 H315 Eye Irrit. 2 H319 Acute Tox. 3 H331 Carc. 2 H351 STOT RE 1 H372 Repr. 2 H361d 

	Dibromochloroforme CAS : 124-48-1	Non concerné	Non concernée	Non enregistré	Pas de classification harmonisée
Acide haloacétique	Acide dibromoacétique CAS : 79-08-3	Non concerné	Non concernée	Substance enregistrée : dossier d'enregistrement disponible	Classification harmonisée : Acute Tox. 3 * H301 Acute Tox. 3 * H311 Skin Corr. 1A H314 Skin Sens. 1 H317 Acute Tox. 3 * H331 Aquatic Acute 1 H400 
	Acide dibromochloroacétique CAS : 5278-95-5	Non concerné	Non concernée	Non enregistré	Pas de classification harmonisée
	Acide tribromoacétique CAS : 75-96-7	Non concerné	Non concernée	Non enregistré	Pas de classification harmonisée
Haloacétonitrile	Bromochloroacétonitrile CAS : 83463-62-1	Non concerné	Non concernée	Non enregistré	Pas de classification harmonisée
	Dibromoacétonitrile CAS : 3252-43-5	Non concerné	Non concernée	Non enregistré	Pas de classification harmonisée

Halophénols	2-Bromo-4-chlorophénol (CAS : 695-96-5)	Non concerné	Non concernée	Non enregistré	Pas de classification harmonisée
	2,4-Dibromophénol (CAS : 615-58-7)	Non concerné	Non concernée	Non enregistré	Pas de classification harmonisée
	2,6-Dibromophénol (CAS : 608-33-3)	Non concerné	Non concernée	Non enregistré	Pas de classification harmonisée
	2,4,6-Tribromophénol (CAS : 118-79-6)	Non concerné	Non concernée	Substance enregistrée (Dossier d'enregistrement disponible) PACT - Public Activities Coordination Tool → Assessment of regulatory needs (dossier d'évaluation) Suspectée d'être une substance Persistante, bioaccumulable et toxique (PBT) ou encore de présenter des effets perturbateurs endocriniens.	Pas de classification harmonisée : Notifications soumises : Skin Sens. 1 H317 Eye Irrit. 2 H319 Aquatic Acute 1 H400



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



©AdobeStock/Olivier PERON