

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes

<p>Année universitaire : 2020 - 2021</p> <p>Spécialité : Ingénieur agronome</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) : Sciences halieutiques et aquacoles, préparée à Agrocampus Ouest (Aquaculture)</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input type="checkbox"/> d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'Ingénieur de VetAgro Sup, Clermont-Ferrand (arrivée en M1)</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Evaluation des effets potentiels des métaux libérés par les anodes galvaniques sur l'ormeau *Haliotis tuberculata*

Par : Laureen NIVELAIS

Soutenu à Rennes, le 16 septembre 2021

Devant le jury composé de :

Président : Hervé Le Bris

Maître de stage : Olivier Basuyaux

Enseignant référent : Hervé Le Bris

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Bastien Sadoul- enseignant chercheur
Agrocampus Ouest

Marie-Agnès Coutellec- chercheuse INRAE,
Ecology and Ecosystem Health

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ : le 20/09/2021
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ⁽³⁾ (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).



Droits d'auteur

L'auteur ⁽³⁾ Nom Prénom NIVELAIS Laureen

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement ⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur :

21/09/2021

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement ⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

21/10/2021

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

Je tiens à remercier mon maître de stage Olivier Basuyaux pour son encadrement et ses conseils. Je tiens également à remercier l'ensemble de l'équipe du Smel pour leur accueil et les sorties terrains. Merci à Solveig Larssonneur et Gwendoline Guichard sans qui ces 6 mois n'auraient pas été aussi agréables !

Merci à toute l'équipe de Caen de m'avoir aidée sur les expérimentations et accueillie à Caen et Cherbourg pour l'analyse de certains résultats, et à Christelle Caplat pour les conseils concernant la partie chimie.

Merci à l'ensemble des contacts ayant pris le temps de participer à l'enquête sur les anodes galvaniques.

Table des matières

Introduction	1
1. Démarche d'évaluation du risque de toxicité	4
1.1. Evaluation de l'exposition	4
1.1.1. Estimation des quantités d'anodes sur les côtes françaises de la Manche et de la Mer du Nord	4
1.1.2. Détermination des formes chimiques et des concentrations en métaux libérés	4
1.2. Evaluation de la toxicité par contamination chronique d'organismes marins	6
1.2.1. Matériel biologique	6
1.2.1.1. Ormeaux, <i>Haliotis tuberculata</i>	6
1.2.1.2. Palmaria, <i>Palmaria palmata</i>	7
1.2.2. Structures et conditions d'expérimentation	7
1.2.2.1. Caractéristiques du mésocosme	7
1.2.2.2. Obtention des produits de dégradation des anodes galvaniques	8
1.2.3. Processus de contamination	9
1.2.4. Paramètres suivis	9
1.3. Analyse statistique	10
2. Résultats	11
2.1. Nature et intensité des apports en métaux par les anodes galvaniques	11
2.1.1. Nature et quantité des anodes galvaniques.....	11
2.1.2. Concentrations et formes chimiques des métaux libérés par les anodes galvaniques	14
2.2. Nature et intensité des effets des métaux sur les ormeaux	16
2.2.1. Ormeaux du groupe 50 mm	17
2.2.2. Ormeaux du groupe 20 mm	20
3. Discussion	25
3.1. Quantité d'anodes présentes le long des côtes françaises	25
3.2. Natures et formes chimiques des métaux libérés par l'anode galvanique	27
3.3. Impact des produits de dégradation des anodes galvaniques sur les ormeaux.....	28
Conclusion	30
Bibliographie.....	31
Annexes	

Liste des abréviations

Al : Aluminium

BCF : Bioconcentration Factor (facteur de bioconcentration)

CL : Croissance linéaire

DGT : Diffusive gradient in thin film (gradient de diffusion en couche mince)

DL50 : Dose létale médiane

IC : Intervalle de confiance

NOEC : No observed effect concentration (la plus forte concentration testée pour laquelle il n'y a pas d'effet sur l'individu)

PEC : Predicted environmental concentration (concentration prédite dans l'environnement)

PNEC : Predicted no effect concentration (concentration prédite sans effet pour l'environnement)

REACH : Registration, evaluation, authorisation, and restriction of chemicals (enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques)

TC : Taux de conversion

TCP : Taux de croissance pondérale

TI : Taux d'ingestion

TL50 : Temps létal médian

Zn : Zinc

Liste des figures

Figure 1 : Structure interne d'un DGT	4
Figure 2 : Mise en place des deux types de DGT et de leur support	5
Figure 3 : Exemple d'ormeaux marqués de la classe 20 mm (à gauche) et 50 mm (à droite) à T0.....	6
Figure 4 : Installation des différents bacs d'expérimentation pour les ormeaux (en haut) et les algues (en bas).....	7
Figure 5 : Dispositif d'utilisation de l'anode galvanique.....	8
Figure 6 : Quantités et types d'anodes installées sur les infrastructures portuaires le long de la Manche	11
Figure 7 : Emplacement des anodes galvaniques sur un navire de pêche	13
Figure 8 : Répartition des flottes de pêche (en nombre d'unité par port d'exploitation principal) et des places pour bateaux de plaisance dans les différents départements du nord de la France.....	13
Figure 9 : Evolution du taux de croissance pondérale moyen (en%.j ⁻¹) et de la croissance linéaire moyenne (en mm.j ⁻¹) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 50 mm après 12 semaines en fonction des concentrations.....	17
Figure 10 : Lot d'ormeaux du groupe 50 mm (1 de chaque condition) après 12 semaines d'expérimentation	18
Figure 11 : Evolution du taux d'ingestion moyen (en grammes d'aliments ingérés par individu) et du taux de conversion moyen (en grammes d'aliments ingérés par gramme de gain de poids frais) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 50 mm après 12 semaines en fonction des concentrations	19
Figure 12 : Taux de mortalité cumulé (en %) pour le groupe des 50 mm au cours des 12 semaines d'expérience	19
Figure 13 : Evolution du taux de croissance pondérale moyen (en %.j ⁻¹) et de la croissance linéaire moyenne (en mm.j ⁻¹) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 20 mm après 12 semaines en fonction des concentrations.....	20
Figure 14 : Gradient décroissant de la taille entre les ormeaux de chaque condition du groupe 20 mm et après 12 semaines d'expérience	21
Figure 15 : Différence de taille entre le lot d'ormeaux du groupe 20 mm du bac témoin (en haut) et du bac 2700 (en bas) après 12 semaines d'expérience	21
Figure 16 : Evolution du taux d'ingestion moyen (en grammes d'aliments ingérés par individu par jour) et du taux de conversion moyen (en grammes d'aliments ingérés par gramme de gain de poids frais) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 20 mm après 12 semaines en fonction des concentrations	22

Figure 17 : Taux de mortalité cumulé (en %) pour le groupe des 20 mm au cours des 12 semaines d'expérience	23
Figure 18 : Bioconcentrations moyennes et intervalles de confiance (IC95) en aluminium chez les ormeaux de classe 20 mm	23
Figure 19 : Bioconcentrations moyennes et intervalles de confiance (IC95) en zinc chez les ormeaux de classe 20 mm	24
Figure 20 : Phénomène de dépigmentation chez les ormeaux du groupe 50 mm (en haut) et 20 mm (en bas) pour la condition 2 700 µg.L ⁻¹	24
Figure 21 : Répartition en pourcentage des anodes installées sur les structures maritimes	25

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition des anodes en alliage zinc (Zn-base) et aluminium (Al-base).....	1
Tableau 2 : Répartition des anodes galvaniques (en kg) sur les bateaux de plaisance et de pêche	12
Tableau 3 : Parcs éoliens de la Manche et caractéristiques de protection cathodique	14
Tableau 4 : Concentrations moyennes en aluminium labile (à gauche) et en zinc (à droite) en $\mu\text{g.L}^{-1}$ et intervalle de confiance à 95% (IC95) selon le type de DGT (LSNM ou LSNX).....	15
Tableau 5 : Concentrations moyennes totales en aluminium (à gauche) et en zinc (à droite) en $\mu\text{g.L}^{-1}$ sans colloïde (acidifiée) et avec colloïdes (non acidifié) et intervalle de confiance (IC95).....	15
Tableau 6 : Fraction labile en aluminium et zinc en pourcentage et intervalle de confiance (IC95).....	16
Tableau 7 : Concentrations cibles, initiales et mesurées ($\mu\text{g.L}^{-1}$) en aluminium pour les bacs ormeaux	16
Tableau 8 : Concentrations cibles, initiales et mesurées ($\mu\text{g.L}^{-1}$) en en zinc pour les bacs ormeaux	16
Tableau 9 : Taux de croissance pondérale moyen (TCP en $\%.\text{j}^{-1}$) et croissance linéaire moyenne (CL en $\text{mm}.\text{j}^{-1}$) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 50 mm après 12 semaines en fonction des concentrations	17
Tableau 10 : Taux d'ingestion moyen (TI en grammes d'aliments ingérés par individu et par jour) et taux de conversion moyen (TC en grammes d'aliments ingérés par gramme de gain de poids frais) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 50mm après 12 semaines en fonction des concentrations	18
Tableau 11 : Taux de croissance pondérale moyen (TCP en $\%.\text{j}^{-1}$) et croissance linéaire moyenne (TI en $\text{mm}.\text{j}^{-1}$) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 20 mm après 12 semaines en fonction des concentrations	20
Tableau 12 : Taux d'ingestion moyen (TI en grammes d'aliments ingérés par individu par jour) et taux de conversion moyen (TC en grammes d'aliments ingérés par gramme de gain de poids frais) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 20 mm au après 12 semaines.....	22
Tableau 13 : Evaluation quantitative du risque dans le cas des parcs éoliens offshores de la Manche	27

Liste des annexes

Annexe I : Liste des contacts ayant participé à l'étude sur l'utilisation des anodes galvaniques en milieu maritime.....	1
Annexe II : Questionnaire envoyé aux gestionnaires des ports concernant l'installation des anodes galvaniques sur les structures portuaires	4
Annexe III : Caractéristiques des DGT LSNM et LSNX	5
Annexe IV : Suivi des concentrations ($\mu\text{g.L}^{-1}$) en aluminium et en zinc dans l'eau des bacs ormeaux.....	7
Annexe V : Suivi des températures, de la salinité et du pH des bacs ormeaux au cours des 12 semaines d'expérimentation	15
Annexe VI : Effectifs et caractéristiques des anodes galvaniques installées sur les structures portuaires de Dunkerque à Roscoff	17
Annexe VII : Capacité d'accueil des bateaux de plaisance et flottilles de pêche de Dunkerque à Batz.....	20
Annexe VIII : Suivi des concentrations ($\mu\text{g.L}^{-1}$) de l'eau de mer concentrée en produits de dégradation de l'anode.....	22

Introduction

Avec ses 5 500 km de littoral en métropole, la France compte aujourd'hui 564 ports (Boero, 2010) dont les activités de pêche, de plaisance ou de commerce, jouent un rôle majeur dans l'économie française. Pour assurer leur fonction ces derniers se composent d'infrastructures variées et complexes. Quai, palplanche ou encore écluse sont indispensables aux ports pour remplir leurs missions et rester performants. Ces ouvrages en partie immergés et composés d'acier sont soumis au phénomène de corrosion. En effet, la forte conductivité électrique de l'eau de mer favorise les phénomènes d'oxydation (Sciortino, 1996), les structures finissent alors rouillées et leur durée de vie est fortement diminuée. Les infrastructures portuaires ne sont pas les seules à être soumises à ce phénomène, toute structure en métal en contact avec l'eau de mer est concernée, comme les navires ou encore les fondations des éoliennes offshore. En France, sept parcs doivent être mis en fonction entre 2022 et 2027 (Wajsbrot, 2021), et un huitième projet va voir le jour sur la côte du Cotentin d'ici 2022 (Baillet, 2020). Avec une éolienne actuellement installée au large du Croisic (Wajsbrot, 2021) la France est assez loin derrière ses voisins (1 469 éoliennes offshore installées en Allemagne et 559 au Danemark) (Ramírez et al, 2019), les futurs parcs doivent donc être fonctionnels et résistants pour maintenir la dynamique de la filière.

Afin de pérenniser les ouvrages maritimes, plusieurs solutions existent pour les protéger de la corrosion, à savoir des revêtements de protection à base de résine epoxy, la protection cathodique par imposition de courant ou encore la protection cathodique par anodes galvaniques appelées aussi anodes sacrificielles (Parant, 2012). Ce dernier système est le plus fréquent dans le milieu maritime (Parc du Banc de Guérande, 2015). Facile d'installation il a pour objectif d'abaisser le potentiel de corrosion du métal à protéger par l'installation d'anodes. Cette technique fait intervenir deux métaux au potentiel de corrosion différents, l'acier de l'armature à protéger et le métal d'apport des anodes. Ces derniers sont mis en contact et plongés dans un même électrolyte à savoir l'eau de mer, ce qui déclenche une réaction d'oxydoréduction. Le métal principal constituant l'anode est choisi comme le moins noble, et donc le plus électro-négatif, il s'oxydera à la place de l'acier. Ainsi, la dégradation de l'anode permettra de protéger l'infrastructure dont la surface se conduira comme une cathode (Parc du Banc de Guérande, 2015; Caplat et al, 2020). Les anodes sont des alliages constitués d'un métal majoritaire le zinc (Zn), l'aluminium (Al) ou encore le magnésium (en eau douce) auquel s'ajoutent d'autres métaux en plus faible quantité. Un exemple d'alliage à base de zinc et d'aluminium est présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Composition des anodes en alliage zinc (Zn-base) et aluminium (Al-base) (Det Norske Veritas, 2010).

<i>Alloying/Impurity Element</i>	<i>Zn-base</i>	<i>Al-base</i>
Zn	rem.	2.5-5.75
Al	0.10-0.50	rem.
In	na	0.015-0.040
Cd	≤ 0.07	≤ 0.002
Si	na	≤ 0.12
Fe	≤ 0.005	≤ 0.09
Cu	≤ 0.005	≤ 0.003
Pb	≤ 0.006	na

Pour les navires et les infrastructures portuaires et offshores les anodes en alliage zinc ou aluminium seront préférées tandis que les structures en milieu fluvial seront équipées d'anodes en magnésium (Bardal, 2004 cité par Reese et al, 2020). Les anodes en alliage à base d'aluminium sont plus légères que les anodes à base de zinc et ont une capacité électrochimique plus importante (2 600 Ah/kg contre 780 Ah/kg pour le zinc) (Cathwell, 2021). Les anodes en zinc ont l'avantage d'être plus malléables et d'être produites sous des formes géométriques plus complexes, caractéristique intéressante pour certaines structures comme les anneaux d'anodes des garde-corps (Cathwell, 2021). Pour une protection efficace plusieurs paramètres sont à prendre en compte, la nature des anodes doit être adaptée à la structure à protéger, leur répartition et leur poids sont calculés selon des règles en vigueur et enfin leur fixation et leur forme doivent être pensées de façon à assurer une bonne conductibilité (Parant, 2012). Malgré leur forte présence sur les infrastructures portuaires et offshores (Parc du Banc de Guérande, 2015) les anodes présentent un inconvénient puisque 80 % des produits issus de leur dissolution est transféré dans l'environnement (Deborde et al, 2015). Les métaux libérés comme l'aluminium et le zinc, sont certes naturellement présents dans le milieu mais peuvent entraîner un enrichissement des différents compartiments (sédiments et organismes) pouvant conduire à des effets toxiques pour le vivant (Caplat et al, 2020). En effet, l'aluminium n'est pas considéré comme une substance dangereuse prioritaire par la directive cadre sur l'eau 2000/60/EC néanmoins il a été montré que cet élément sous forme particulaire et/ou dissoute pouvait être toxique pour certaines espèces de diatomées (Golding et al. 2016, cité par Kirchgeorga et al, 2018). De plus, si la spéciation de l'aluminium est assez complexe car liée aux conditions de concentrations, de pH et de la présence de matières organiques, elle est déterminante pour connaître les effets toxiques de l'élément (Caplat et al, 2020). Les formes labiles comme $[Al^{3+}]$, $[Al(OH)_2^+]$, $[Al(OH)_4^-]$ sont notamment considérées comme les plus toxiques (Gensemer & Playle, 1999; Pyrzynska et al., 1999 cité par Gabelle et al, 2012). En ce qui concerne le zinc, plusieurs études éco-toxicologiques ont été menées aboutissant à une toxicité à de faibles concentrations avec des effets visibles à partir de $65 \mu g.L^{-1}$ chez les larves d'oursins (Caplat et al, 2010 cité par Basuyaux et al, in prep) ou une DL50 relevée dès $26 mg.L^{-1}$ chez certains poissons (Zyadah & Abdel-Baky, 2000).

Au vue de l'intérêt grandissant pour l'utilisation des anodes galvaniques et des résultats déjà présents sur la toxicité du zinc et de l'aluminium, il semble intéressant d'apporter des compléments sur l'impact des métaux libérés dans les eaux par la dissolution des anodes galvaniques.

C'est dans ce cadre que le programme de recherche ANODE a été lancé. Ce dernier s'appuie sur la thèse d'Alexandre Levallois (Borea, Université de Caen lancée le 1^{er} décembre 2019) dont le but est l'étude des contaminants métalliques issus de la dégradation des anodes galvaniques dans le milieu marin et la mesure des effets potentiels sur quelques organismes marins. Alexandre Levallois s'est dans un premier temps concentré sur les micro-algues et l'huitre creuse, *Crassostrea gigas* (producteurs primaires et un filtreur). L'intérêt étant d'étudier les différents niveaux trophiques, après les producteurs primaires et les filtreurs, les brouteurs à savoir les ormeaux *Haliotis tuberculata* ont fait l'objet de cette nouvelle étude. Ce mollusque gastéropode vit préférentiellement à l'abri de la lumière dans les failles des rochers (Le Petit, 2009). Il est assez bien connu de Normandie et de Bretagne et le processus d'élevage est maîtrisé. La *Palmaria palmata* est l'une des algues qu'ils consomment préférentiellement (Basuyaux et al, 2018a) cette dernière sera donc utilisée pour l'alimentation des ormeaux. L'objectif est alors d'évaluer et caractériser l'impact sur l'ormeau *Haliotis tuberculata*, des principaux métaux (Al et Zn) libérés par les anodes galvaniques à base d'aluminium, le long des côtes françaises de la Manche.

Pour cela la démarche d'évaluation du risque de toxicité sera explicitée, démarche s'appuyant sur le guide technique REACH (Registration, Evaluation, Authorisation, and Restriction of Chemicals) décrit par l'ECHA (European Chemicals Agency, 2016). Elle comprendra notamment l'évaluation de l'exposition et de la toxicité. L'évaluation de

l'exposition consiste en une estimation des quantités d'anodes présentes sur les côtes françaises de la Manche et de la Mer du Nord et la détermination des formes chimiques et des concentrations en métaux libérés dans l'eau de mer. L'évaluation de la toxicité présentera les tests d'exposition d'organismes marins en condition de contamination chronique à l'aide d'une anode en aluminium-zinc. Les résultats seront par la suite exposés, analysés et discutés au regard d'expériences similaires et de la littérature.

1. Démarche d'évaluation du risque de toxicité

1.1. Evaluation de l'exposition

1.1.1. Estimation des quantités d'anodes sur les côtes françaises de la Manche et de la Mer du Nord

L'estimation des quantités d'anodes présentes sur les côtes françaises de la Manche et de la Mer du nord s'est faite à partir d'une étude auprès des gestionnaires des ports (Annexe I) ainsi que de recherches bibliographiques concernant notamment les installations offshores et le nombre de navires de pêche et de plaisance présents sur la côte.

L'étude a été réalisée auprès des gestionnaires des ports de Dunkerque jusqu'à Roscoff à partir d'un court questionnaire établi en amont (Annexe II) portant sur le nombre et les caractéristiques des anodes galvaniques. Des recherches bibliographiques ont permis de recenser l'ensemble des ports (plaisance, pêche, commerce) présents entre Dunkerque et Roscoff, de déterminer la structure ayant la gestion de ces ports et enfin de répertorier les contacts. Ces derniers ont par la suite été contactés par mail. Selon leur préférence les informations ont été recueillies suite à l'envoi des questions par mail ou lors d'un rendez-vous téléphonique. Pour chacun d'entre eux, le nombre d'anodes, le type d'alliage, le type de structures protégées, et la durée d'installation des anodes ont été recueillis.

Les recherches bibliographiques concernant l'utilisation des anodes dans les flottilles de pêche, la capacité d'accueil des bateaux de plaisance et les installations offshores ont été menées parallèlement à cette étude.

1.1.2. Détermination des formes chimiques et des concentrations en métaux libérés

Afin de déterminer la concentration d'un élément dans l'eau sur une période de temps donnée des systèmes d'échantillonneurs passifs ont été développés dans les années 1980 (Gourlay-Francé et al, 2010). Cette technique est basée sur « la diffusion (selon la première loi de Fick) de molécules présentes dans le milieu échantillonné vers une phase réceptrice » (Mazzella, 2014). La nature de la phase réceptrice sera dépendante des molécules recherchées, le but étant d'augmenter l'affinité des composés pour cette phase (Mazzella, 2014). Plusieurs dispositifs d'échantillonneurs passifs ont été créés, celui utilisé dans le cadre de cette étude est le gradient de diffusion en couche mince.

Le gradient de diffusion en couche mince (DGT, diffusive gradient in thin film) est un dispositif permettant d'évaluer la contamination chimique des eaux par accumulation des métaux « labiles » sur une durée allant de une à trois semaines. La forme labile est une des formes prise par les métaux dans l'eau, elle constitue une estimation de la partie biodisponible. Les DGT sont composés d'un gel de diffusion et d'une résine pour laquelle les cations métalliques ont une forte affinité (Figure 1). Au cours de l'immersion du dispositif, les cations vont venir se fixer et s'accumuler sur la résine. Celle-ci sera alors analysée en fin d'expérience afin de déterminer la masse des différents métaux présents dans la résine puis la concentration en métal dans le milieu qui a été testé.

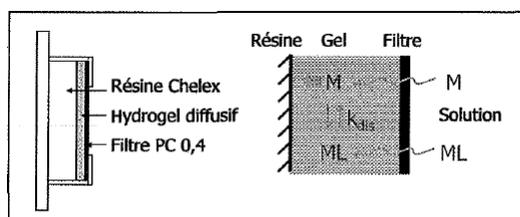


Figure 1 : Structure interne d'un DGT (Gourlay-Francé et al, 2010).

Selon les métaux recherchés, plusieurs types de DGT peuvent être utilisés. Dans cette étude des DGT LSNX spécialisés dans la fixation de l'aluminium et des DGT LSNM pour le zinc et les autres métaux de transition ont été choisis. Ces derniers se différencient par la nature et la porosité de la résine. Les DGT LSNX ont une porosité plus importante permettant de laisser passer des complexes métalliques de plus grande taille (Annexe III). Les DGT simulent les membranes organiques et permettent donc de déterminer ce qui est assimilable par l'organisme.

L'expérimentation s'est déroulée sur une semaine dans les mêmes conditions que celles des ormeaux (partie 1.2). Cinq conditions sont testées le témoin, $100 \mu\text{gAl.L}^{-1}$, $300 \mu\text{gAl.L}^{-1}$, $900 \mu\text{gAl.L}^{-1}$ et $2\,700 \mu\text{gAl.L}^{-1}$ dans cinq bacs de 40 L. Les mélanges sont obtenus par dilution d'une solution concentrée préparée à partir de la dégradation d'une anode (bac d'eau de mer contenant l'anode mise en activation). Dans les cinq bacs, les deux DGT, en triplicat chacun, sont fixés sur un support et immergés dans les 35 L de mélange (Figure 2). Les renouvellements d'eau se font tous les trois jours.

Fixation des DGT à leur support et aux tiges de maintien

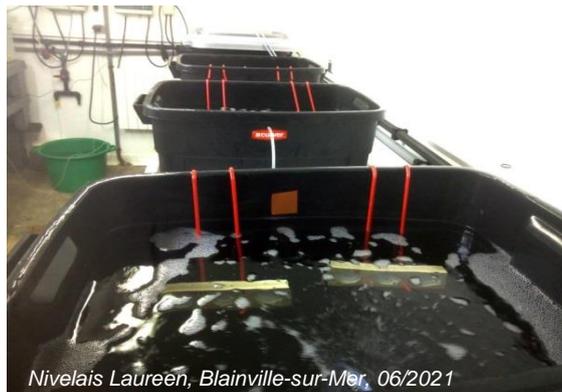


Nivelais Laureen, Blainville-sur-Mer, 06/2021

Fixation des supports aux bacs



Nivelais Laureen, Blainville-sur-Mer, 06/2021



Nivelais Laureen, Blainville-sur-Mer, 06/2021

Installation complète

Figure 2 : Mise en place des deux types de DGT et de leur support.

Après une semaine d'expérimentation, les DGT sont retirés puis transportés avec les échantillons d'eau prélevés des bacs, à Cherbourg au laboratoire Borea pour analyse. Les concentrations en zinc et aluminium sont déterminées par spectrométrie d'absorption atomique en mode flamme pour le zinc et en mode électrothermique pour l'aluminium. L'élément recherché est atomisé par l'intermédiaire d'une source de chaleur (flamme pour le zinc et four graphite pour l'aluminium), puis une lampe va émettre un rayonnement dans les longueurs d'ondes correspondant à l'élément recherché. La concentration en aluminium ou zinc sera alors déterminée par la loi de Beer-Lambert à partir de l'absorption de ce même élément.

1.2. Evaluation de la toxicité par contamination chronique d'organismes marins

Au cours de cette expérimentation d'une durée de 12 semaines, plusieurs groupes d'ormeaux sont placés dans des bacs contenant une solution réalisée à partir de l'eau de mer brute et des produits de dégradation de l'anode. Cinq concentrations sont testées. Les algues utilisées pour l'alimentation sont conditionnées pendant une semaine dans des bacs distincts contenant ces mêmes concentrations avant d'être distribuées aux ormeaux. Après les 12 semaines de contamination, les ormeaux sont placés dans des bacs de décontamination pendant 4 semaines.

1.2.1. Matériel biologique

1.2.1.1. Ormeaux, *Haliotis tuberculata*

Les ormeaux utilisés pour l'expérimentation sont issus de l'élevage France Haliotis situé à Plouguerneau (29, France), et sont séparés en deux classes de taille à savoir 20 à 25 mm (1 à 2 grammes) et 45 à 55 mm (15 à 25 grammes) (Figure 3). Après une période d'acclimatation de 7 semaines, les 954 ormeaux sont répartis dans les bacs d'expérimentation. Pour les ormeaux de plus grande taille, les bacs contiennent 18 ormeaux dont 15 marqués (utilisés pour le suivi de la croissance) et de taille homogène. Les marquages sont réalisés avec des étiquettes en plastique, numérotées, collées avec de la colle cyanoacrylate sur la coquille des individus préalablement séchée. Pour les ormeaux de 20 à 25 mm, 35 individus sont répartis dans les bacs dont 22 marqués (utilisés pour le suivi de la croissance), de taille homogène. Le marquage est réalisé avec du vernis à ongle, une petite tache ronde est disposée sur la coquille des individus (Figure 3). 10 ormeaux de chaque taille sont envoyés au laboratoire Borea de l'université de Caen pour le T0, puis 5 de chaque bac sont également envoyés sur Caen après 4 (T1), 8 (T2), 12 (T3) et 16 (T4) semaines. La dernière période correspond à la décontamination. Ces derniers sont utilisés pour un suivi de paramètres physiologiques (paramètres non développés dans ce rapport) et la bioconcentration.

Les ormeaux sont alimentés avec de l'algue rouge *Palmaria palmata*, 210 g d'algues sont distribués dans chaque bac les 4 premières semaines pour les 45/55 mm et 70 g pour les 20/25 mm. Par la suite le nombre d'individus diminue, les proportions sont donc adaptées (pour les 50 mm 200 g au T2 puis 100 g pour le T3).

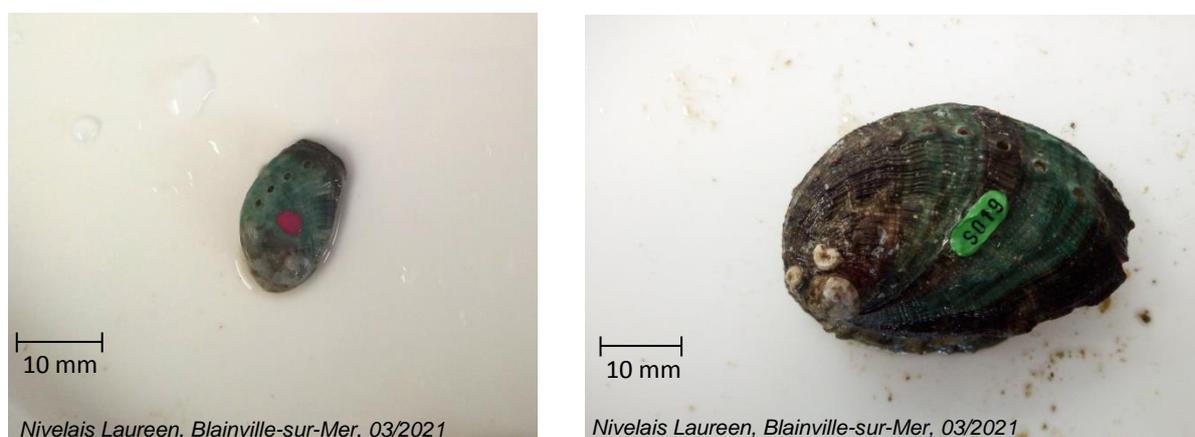


Figure 3 : Exemple d'ormeaux marqués de la classe 20 mm (à gauche) et 50 mm (à droite) à T0.

1.2.1.2. *Palmaria*, *Palmaria palmata*

Les algues sont récoltées tous les mois en fonction de la marée le long de la côte ouest du Cotentin. Ces dernières sont par la suite stockées dans des bacs à l'extérieur avec un système de brassage par aération. 58.5 kg d'algue ont été nécessaires pour les 16 semaines d'expérimentation.

1.2.2. Structures et conditions d'expérimentation

1.2.2.1. Caractéristiques du mésocosme

Différents types de bacs ont été utilisés en fonction de l'espèce, cinq bacs de 200 L pour le conditionnement des algues, 24 bacs de 20 L pour les ormeaux de 20/25 mm et 18 bacs de 40 L pour les ormeaux de 45/55 mm. Les bacs de 200 L sont installés à l'extérieur et ceux contenant les ormeaux sont placés dans une salle thermo régulée et répartis sur deux étagères à deux niveaux (Figure 4). Tous sont équipés d'un système d'aération par bullage ainsi que d'un couvercle pour les bacs ormeaux. Chaque bac est également marqué pour distinguer les différentes conditions, 4 sont testées : $100 \mu\text{g.L}^{-1}$, $300 \mu\text{g.L}^{-1}$, $900 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$ et chacune en triplicat pour les deux classes de taille. Plusieurs types de témoin sont également utilisés. Pour chaque classe de taille, trois témoins neutres (eau non contaminée, algue non contaminée, ormeaux) et trois témoins trophiques (eau non contaminée, algues conditionnées à $300 \mu\text{g.L}^{-1}$, ormeaux) sont utilisés, puis pour la classe 20/25 mm uniquement, cinq témoins ingestions (eau contaminée à la concentration X et algues contaminées à la concentration X) sont en plus installés.



Figure 4 : Installation des différents bacs d'expérimentation pour les ormeaux (en haut) et les algues (en bas).

En ce qui concerne les conditions d'expérimentation, la salle est maintenue à une température de 16°C tout comme l'eau de mer brute stockée avant utilisation dans une cuve de 1 700 L. Cela permet de maintenir l'eau des bacs ormeaux à une température moyenne de 16.4 ± 0.1 °C et d'éviter ainsi toute mortalité liée au *Vibrio harveyi* au-delà de 17°C (Travers, 2008). Concernant la photopériode, la salle est dans le noir permanent sauf pendant les jours de manutention. La salinité moyenne est de 34.0 ± 0 ‰, le pH moyen de 7.97 ± 0.04 . Ces paramètres sont suivis plusieurs fois par semaine (Annexe V).

1.2.2.2. Obtention des produits de dégradation des anodes galvaniques

Le dispositif permettant de reproduire la dégradation de l'anode se compose d'un bac de 140 L dans lequel est installé un montage électrochimique constitué d'une anode galvanique aluminium/zinc (provenant de la société BAC Corrosion, poids : 800g, surface : 450 cm²) une contre électrode en titane platiné, ainsi qu'une électrode de référence au calomel saturé l'ensemble des électrodes étant relié à un galvanostat universel (Figure 5). Le brassage de l'eau est assuré par un diffuseur d'air. L'anode galvanique se caractérise par un alliage aluminium-zinc, avec plus de 95 % d'aluminium, environ 4.5 % de zinc ainsi que des traces d'indium à moins de 0.02 %. Afin d'accélérer la dissolution de l'anode, cette dernière est soumise à un courant électrique d'intensité 0.2 mA sur une période de 22 heures. La durée de fonctionnement du galvanostat est contrôlée par un programmeur et l'électrode au calomel saturé stabilise le potentiel de corrosion l'anode.

Chaque jour pendant les 2 heures d'arrêt du galvanostat, la cuve de 140 L est vidée, rincée et remplie avec de l'eau de mer brute. Trois fois par semaine l'eau récupérée est utilisée pour réaliser les différentes concentrations testées lors de l'expérimentation.

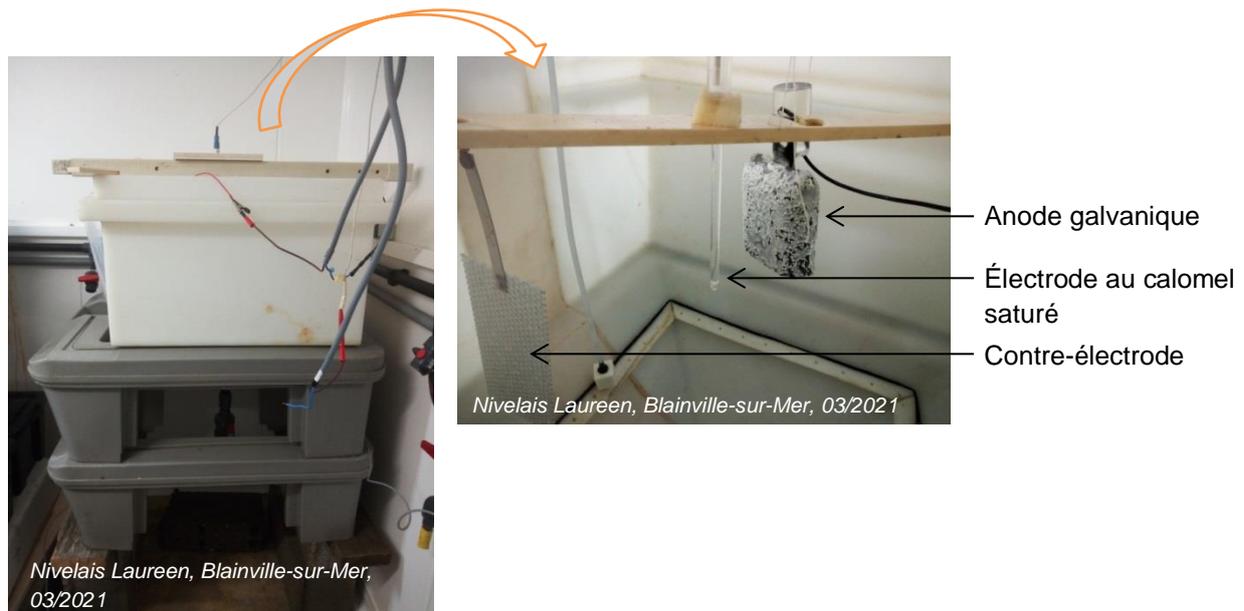


Figure 5 : Dispositif d'utilisation de l'anode galvanique.

1.2.3. Processus de contamination

Pour réaliser les concentrations attendues, la solution d'eau de mer concentrée en produits de dégradation de l'anode est récupérée à une concentration de l'ordre de 10 000 $\mu\text{g.L}^{-1}$ puis les dilutions sont réalisées dans un volume de 200 L. Chaque bac d'ormeaux est par la suite rempli à raison de 10 L pour les ormeaux de 20/25 mm et 35 L pour les 50/55 mm.

Concernant le conditionnement des algues, la dilution se fait directement dans leurs bacs extérieurs, dans un volume de 100 L pour le témoin, 100 $\mu\text{g.L}^{-1}$, 900 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et 2700 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et 200 L pour le 300 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Après essorage, la quantité d'algue nécessaire est disposée dans les bacs. Celle-ci a varié au cours de l'expérimentation sachant que tous les mois des ormeaux sont prélevés pour les analyses au laboratoire Borea. Le conditionnement dans les bacs extérieurs dure une semaine, puis les algues sont réparties dans les bacs ormeaux de concentration similaire. Le renouvellement de l'eau des bacs ormeaux est effectué à 100 % trois fois par semaine. Au bout d'une semaine les algues restantes sont retirées, essorées, pesées et remplacées.

Des prélèvements d'eau sont effectués une fois par semaine pour contrôler les concentrations (Annexe IV), les analyses sont réalisées par la méthode de spectrométrie d'absorption atomique comme pour les échantillons DGT (Partie I) A) b.)

1.2.4. Paramètres suivis

Au cours de l'expérimentation, plusieurs paramètres biologiques sont suivis à savoir la mortalité, la croissance linéaire et pondérale, la quantité d'algue ingérée et le taux de conversion. Des paramètres physiologiques telle que la bioconcentration sont également suivis par le laboratoire Borea. La bioconcentration correspond à « l'accumulation d'une substance chimique uniquement via l'eau, par la respiration ou par le contact direct avec la peau » (Sire & Amouroux, 2016).

Croissance :

Mesure de la taille :

La mesure de la taille correspond à la longueur maximale de la coquille de l'animal. Ces mesures sont réalisées à T0, T1, T2, T3 et T4. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un pied à coulisse (précision de 0.01 mm) et toujours par la même personne.

Mesure du poids :

Les individus sont pesés sur une balance de précision (précision 0.01 g) après égouttage sur du papier absorbant pendant deux minutes. Ces mesures sont répétées à T1, T2, et T3 et T4.

Taux de croissance :

La croissance des individus est analysée à travers le taux de croissance pondérale (TCP en $\% \cdot \text{j}^{-1}$) et la croissance linéaire (CL en $\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$) de la coquille à partir des formules ci-dessous :

$$TCP = \left(\left(\frac{W_f}{W_i} \right)^{\frac{1}{t}} - 1 \right) \times 100$$

$$CL = \frac{Lf - Li}{t}$$

Avec W_i et W_f les poids initiaux et finaux (en gramme), L_i et L_f les longueurs initiales et finales de la coquille (en millimètre) et t le durée de l'expérimentation (en jour).

Ces valeurs sont calculées individuellement pour les ormeaux marqués de la classe 50 mm puis une moyenne est réalisée par bac puis par concentration. Pour la classe des 20 mm, les calculs se font à partir des poids et tailles moyens des individus de chaque bac, puis une moyenne est réalisée entre les trois bacs d'une même concentration.

Taux d'ingestion et taux de conversion :

Après une semaine, les algues restantes de chaque bac sont recueillies dans un tamis, égouttées à l'aide d'une essoreuse à salade puis pesées. La quantité ingérée, T_i en gramme d'aliment ingéré par individu et par jour, et le taux de conversion, T_c en gramme d'aliment ingéré par gramme de gain de poids frais sont déterminés après les 12 semaines d'expérimentation par les formules ci-dessous.

$$T_i = \frac{(T_{in} - T_r) - T_d}{n \times t}$$

$$T_c = \frac{(T_{in} - T_r) - T_d}{g}$$

Avec T_{in} la somme des quantités initiales fournies (en gramme), T_r la somme des quantités restantes dans les bacs après une semaine (en gramme), T_d la somme des quantités qui ont été dégradées dans les témoins ingestion (en gramme), n le nombre d'individu pondéré au cours des 12 semaines, t la durée de l'expérimentation (en jour) et g le gain de poids (en gramme par jour), frais entre T_3 et T_0 .

Mortalité :

Un suivi journalier est réalisé pour comptabiliser et répertorier les potentiels individus morts.

1.3. Analyse statistique

Des tests Anova ont dans un premier temps été réalisés afin de vérifier l'homogénéité des ormeaux marqués de chaque lot en terme de taille et de poids. Une p.value supérieure à 0.05 indique une variance homogène et confirme donc l'homogénéité des individus. L'hypothèse de normalité des résidus est vérifiée avec un test de Shapiro et celle de l'homogénéité des variances avec un test de Bartlett. Des p.value supérieures à 0.05 permettent de valider les hypothèses.

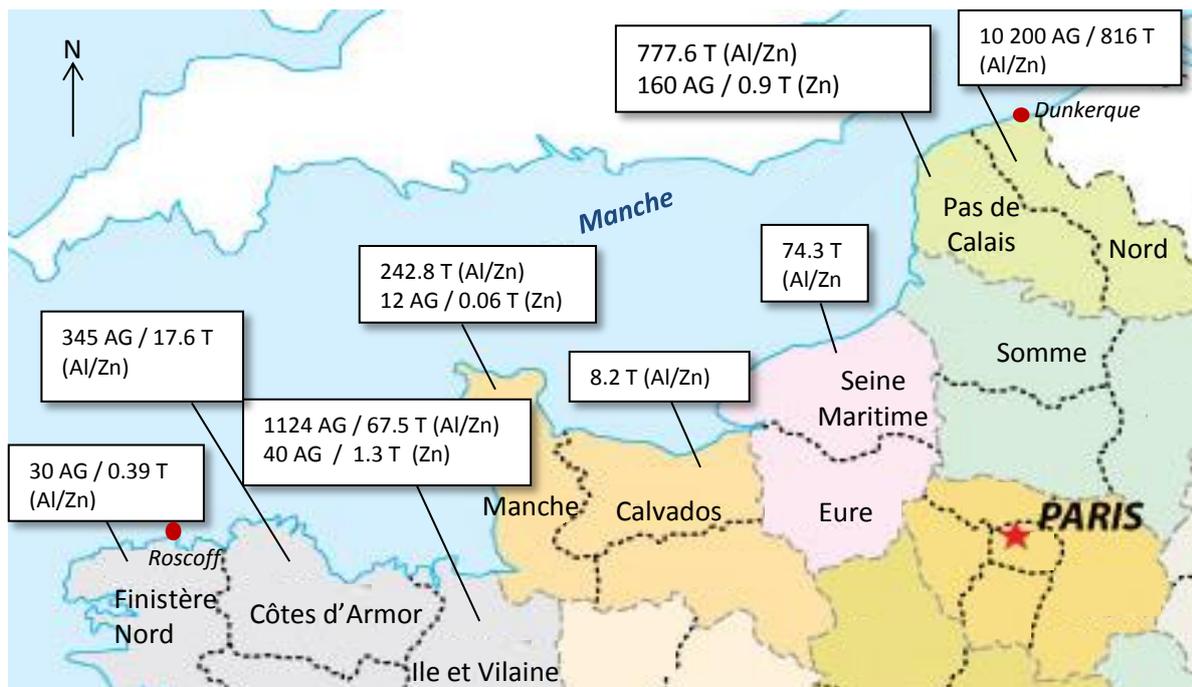
Les résultats sur l'évolution de la taille et du poids sont analysés par un test Anova à un facteur. Un test de comparaisons multiples celui de Holm est effectué pour déterminer l'effet de chaque condition.

2. Résultats

2.1. Nature et intensité des apports en métaux par les anodes galvaniques

2.1.1. Nature et quantité des anodes galvaniques

L'étude auprès des gestionnaires des ports a permis d'avoir une première idée des quantités et types d'anodes installées sur les infrastructures portuaires et les navires. Sur les 40 gestionnaires contactés, 21 ont pu répondre aux questions (Annexe I). Tous les ports concernés par l'étude sont équipés d'anodes à l'exception de trois, Gravelines qui est un port exutoire (évacuation d'eau du fleuve), Rouen plaisance dont les pontons sont en aluminium, ainsi que Courseulles-sur-Mer qui devrait cependant être équipé d'anodes galvaniques prochainement (Annexe VI). Parmi ceux ayant des anodes galvaniques, la quantité présente dépend de la taille du port, du style d'infrastructures présentes, des surfaces à protéger, de la conductivité du milieu (Basuyaux et al, 2018b). Les pontons, les quais ainsi que les portes des écluses sont les principales structures protégées. Au total 2004.4 T d'anodes Al/Zn et 2.2 T en alliage Zn sont installées entre le port de Dunkerque et celui de Roscoff (Figure 6). L'alliage Al/Zn représente donc 99.9% des 2006.6 T d'anodes présentes sur les infrastructures. En effet, l'anode en zinc est de moins en moins utilisée, pour obtenir une efficacité similaire à celle en l'aluminium, il faut trois fois plus de zinc. Aujourd'hui, le prix au kg de ces deux métaux est quasiment identique, néanmoins sachant qu'il faut mettre davantage de zinc pour une même efficacité, celui-ci devient plus onéreux. De plus le zinc est plus nocif pour l'environnement, les anodes en aluminium sont donc préférées (Crouzillac J, BAC Corrosion control). Le poids des anodes varie entre 1 et 80 kg et sont prévues en moyenne pour 15 ans même si cela peut aller de 5 à 20 ans en fonction des structures. Des projets sont actuellement en cours dans certains ports pour renouveler les anodes ou équiper de nouvelles structures.



AG = anode galvanique

Figure 6 : Quantités et types d'anodes installées sur les infrastructures portuaires le long de la Manche.

En plus des structures portuaires, les navires ayant une coque en acier sont également protégés par des anodes galvaniques. La plupart des bateaux de plaisance possède une coque en composite, cependant le propulseur peut être protégé par une petite anode en Zn de 200 g à 1 kg (Crouzillac J, BAC Corrosion control). Concernant les navires de plus de 50 m, ces derniers sont protégés par le système de courant imposé, une protection par anode galvanique nécessiterait une quantité d'anodes trop importante. Les autres navires de pêche, commerce, plaisance ou autres sont protégés par des anodes en alliage aluminium/zinc. Ces dernières sont réparties sur des zones stratégiques des parties immergées du bateau (tuyère, safran, coque) (Figure 7). En moyenne un navire de 18 m est équipé de 14 anodes pour un poids total de 114 kg (Videau F, Responsable maintenance des outillages portuaires Saint-Malo) mais cela est très variable en fonction de la présence ou non de peinture sur la coque, de la durée de vie souhaitée... (Denis A, Ingénieur Projets BAC corrosion control). Il est donc difficile d'estimer la quantité totale installée sur l'ensemble des bateaux. Néanmoins au vue des effectifs des flottes de bateaux de pêche, plaisance et de leur taille (Figure 8 et Annexe VII), ces derniers représentent une source importante de métaux libérés par les anodes. Au total, entre 4 688 et 22 713 T d'anodes sont installés sur l'ensemble des bateaux de plaisance et 100 214 T sur les bateaux de pêche (Tableau 2).

Tableau 2 : Répartition des anodes galvaniques en kg sur les bateaux de plaisance et de pêche.

Type de bateaux de plaisance(1)	Nombre de bateaux (1)	Poids des anodes par bateau (kg)	Total (kg)
≤10m	995	0.200	182
>10m	22 531	De 0.200 à 1	4 506 à 22 531
Total			4 688 à 22 713

Type de bateaux de pêche(2)	Nombre de bateaux (2)	Poids des anodes par bateau (kg)	Total (kg)
≤12m	825	80	66 000
13 à 24m	175	114	19 494
25 à 40m	81	160	14 720
Total			100 214

¹ source : Moreau et al, 2019.

² source : Ifremer, 2020a ; Ifremer, 2020b ; Ifremer, 2020c ; Ifremer, 2020d ; Ifremer, 2020e ; Ifremer, 2020f ; Ifremer, 2020g ; Ifremer, 2020h ; Ifremer, 2020i ; Ifremer, 2020j ; Ifremer, 2020k.



Figure 7 : Emplacement des anodes galvaniques sur un navire de pêche.

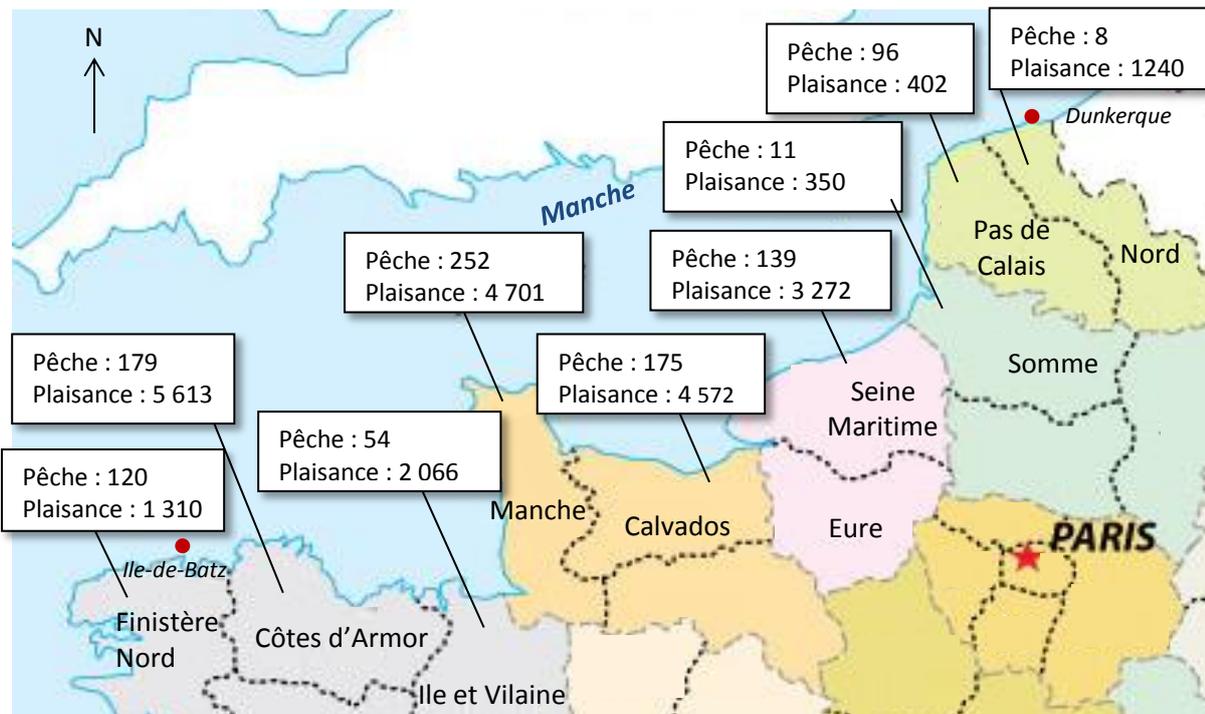


Figure 8 : Répartition des flottes de pêche (en nombre d'unité par port d'exploitation principal) et des places pour bateaux de plaisance dans les différents départements du nord de la France.

Les dernières structures à prendre en compte sont les parcs éoliens offshore. La France ne possède pour l'instant aucun parc en fonctionnement, mais plusieurs projets vont voir le jour d'ici 2023 (Tableau 3). Différents sites sont concernés, Dunkerque, Dieppe-Le Tréport, Fécamp, Courseulles-sur-Mer ainsi que Saint-Brieuc, un 8^{ème} projet est en court dans le Cotentin, la sélection du candidat est prévue pour 2022. Tous n'ont pas choisi les anodes sacrificielles comme protection contre la corrosion, c'est notamment le cas pour le parc de Dieppe-Le Tréport qui a préféré une protection par courant imposé. Cette technique est parfois utilisée car contrairement aux anodes galvaniques, il n'y a pas de rejet de métaux dans l'environnement marin. Cependant, des ions d'oxygène, d'hydrogène et de chlore sont libérés suite à la réaction d'électrolyse de l'eau de mer (Seine-Maritime.gouv, 2018). Pour les parcs de Fécamp, Courseulles-sur-Mer et Saint-Brieuc des anodes galvaniques en alliage Al/Zn protégeront les fondations. Au total, 3 610 T d'anodes seront installées sur les fondations des parcs de Fécamp, Courseulles-sur-Mer et Saint-Brieuc.

Tableau 3 : Parcs éoliens de la Manche et caractéristiques de protection cathodique.

Localisation du parc éolien	Date de mise en service	Nombre d'éoliennes par parc	Type de protection
Dunkerque	2026/2027	46	Réflexion toujours en court entre anode sacrificielle et courant imposé
Dieppe – Le Tréport	2023	62	Courant imposé 16 à 20 anodes en titane par fondation
Fécamp	2023	83	Anode sacrificielle 15 T / fondation Total : 1 245 T Alliage : Al/Zn
Courseulles-sur-Mer	2024	75	Anode sacrificielle 15 T / fondation Total : 1 125 T Alliage : Al/Zn
Saint-Brieuc	2023	62	Anode sacrificielle 20 T / fondation Total : 1240 T Alliage : Al/Zn
Projet d'un 8 ^{ème} parc sur la cote du Cotentin, à plus de 32 km des côtes et 40 km des tours-observatoires Vauban de Saint-Vaast-La-Hougue. Sélection du candidat en 2022			

Source : Autorité environnementale, 2015a ; Autorité environnementale, 2015b ; Baillet, 2020 ; BIOTOPE Nord-littoral, 2018 ; Eolien en mer Dunkerque, Réseau de transport d'électricité, 2020 ; Seine-Maritime.gouv, 2018 ; Tribunal Administratif de Rennes, 2016.

2.1.2. Concentrations et formes chimiques des métaux libérés par les anodes galvaniques

La mise en place de DGT a permis de déterminer les concentrations et les formes chimiques de métaux libérés suite à la dégradation de l'anode. Les concentrations en aluminium labile augmentent avec les concentrations et sont plus importantes avec le DGT LSNX que le LSNM (Tableau 4). Pour la condition 2 700 µg.L⁻¹, celle-ci est multipliée par 15 entre les deux dispositifs. La partie labile de l'aluminium se trouve donc sous plusieurs formes. En effet, la porosité de la résine du dispositif LSNX est plus importante, elle laisse donc passer les complexes de plus grande taille (aluminium complexé à de la matière organique). Concernant le zinc, il n'y a pas de différence notable entre les deux

échantillonneurs passifs (Tableau 4). Pour les deux types de DGT et les deux métaux, un plateau est atteint à partir de la condition 900 $\mu\text{g.L}^{-1}$.

Tableau 4 : Concentrations moyennes en aluminium labile (à gauche) et en zinc (à droite) en $\mu\text{g.L}^{-1}$ et intervalle de confiance à 95% (IC95) selon le type de DGT (LSNM ou LSNX).

Conditions	$C_{\text{Al}} \text{LSNM}$ ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	$C_{\text{Al}} \text{LSNX}$ ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Conditions	$C_{\text{Zn}} \text{LSNM}$ ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	$C_{\text{Zn}} \text{LSNX}$ ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
Témoin	0.58 ± 0.83	5.24 ± 2.45	Témoin	4.63 ± 0.21	4.07 ± 0.87
100	1.52 ± 2.67	8.18 ± 3.61	100	9.05 ± 22.0	6.18 ± 1.24
300	4.70 ± 3.17	146.7 ± 26.25	300	12.81 ± 1.31	10.04 ± 1.27
900	14.32 ± 9.05	309.8 ± 30.12	900	20.15 ± 1.12	15.22 ± 2.12
2700	19.39 ± 3.22	296.18 ± 656.15	2700	19.01 ± 0.60	15.42 ± 6.89

En plus des DGT, l'eau de mer des différents bacs a également été analysée. Les concentrations totales mesurées sont différentes des concentrations théoriques. Des échantillons acidifiés et non acidifiés ont été réalisés, l'acide permet de casser les liaisons des potentiels colloïdes formés (particules qui chevauchent la partie dissoute (inférieur à 0.45 μm) et la partie particulaire (supérieur à 0.45 μm) et qui restent en suspension). Les résultats pour l'aluminium ont alors révélé pour l'ensemble des conditions une concentration totale plus élevée avec les échantillons acidifiés (Tableau 5). Concernant le zinc, il n'y a pas de différence entre les deux types d'échantillons.

Tableau 5 : Concentrations moyennes totales en aluminium (à gauche) et en zinc (à droite) en $\mu\text{g.L}^{-1}$ sans colloïde (acidifiée) et avec colloïdes (non acidifié) et intervalle de confiance (IC95).

Conditions	$C_{\text{Al}} \text{acidifié}$ ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	$C_{\text{Al}} \text{non acidifié}$ ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Conditions	$C_{\text{Zn}} \text{acidifié}$ ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	$C_{\text{Zn}} \text{non acidifié}$ ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
Témoin	9.3 ± 8.98	1.5 ± 4.51	Témoin	6.3 ± 16.65	1.6 ± 2.08
100	62.6 ± 32.86	20.3 ± 7.81	100	3.9 ± 1.20	4.6 ± 2.71
300	212.7 ± 51.57	94.7 ± 18.54	300	12.6 ± 3.86	11.9 ± 2.53
900	746.9 ± 510.46	365 ± 93.91	900	43.9 ± 7.12	46.5 ± 23.12
2700	1480.6 ± 44.53	952.3 ± 389.94	2700	118.5 ± 20.27	107.85 ± 27.57

A partir des valeurs en concentration labile et de la concentration totale calculée dans l'eau, la fraction labile a pu être déterminée (Tableau 6). Celle-ci augmente entre une concentration totale de 62 et 200 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (valeur mesurée pour une concentration théorique de 300 $\mu\text{g.L}^{-1}$) puis atteint son maximum de 69 ± 12.3 % à 200 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Enfin, la fraction labile diminue avec les plus fortes valeurs. Cela peut s'expliquer par le fait que l'aluminium précipite et passe dans la phase particulaire.

Tableau 6 : Fraction labile en aluminium et zinc en pourcentage et intervalle de confiance (IC95).

Conditions	Fraction labile aluminium (%)	Fraction labile zinc (%)
Témoin	56.1 ± 26.38	65.2 ± 13.98
100	13.1 ± 5.77	-
300	69.0 ± 12.34	79.7 ± 9.38
900	41.5 ± 4.03	34.7 ± 4.82
2700	20.0 ± 44.32	13.0 ± 2.14

2.2. Nature et intensité des effets des métaux sur les ormeaux

Plusieurs concentrations ont été testées lors de l'expérimentation, ces dernières restent des concentrations théoriques qui, du fait des variations de la concentration de l'eau de mer en produits de dégradation de l'anode (Annexe VIII) ne sont pas forcément celles auxquelles les ormeaux sont exposés. La « concentration initiale » correspond à la concentration de l'eau de mer provenant directement du bac anode à laquelle est appliqué le facteur de dilution, la « concentration mesurée » est celle qui est directement mesurée dans les bacs ormeaux (tableau 7 et 8).

Tableau 7 : Concentrations cibles, initiales et mesurées ($\mu\text{g.L}^{-1}$) en aluminium pour les bacs ormeaux.

Conditions	Concentration cible ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration initiale ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration mesurée ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
100	100	76.2 ± 13.8	65.5 ± 9.2
300	300	228.7 ± 41.5	175.2 ± 26.0
900	900	686.2 ± 124.7	457.8 ± 86.8
2700	2700	2058.5 ± 374.2	907.5 ± 312.9

Tableau 8 : Concentrations cibles, initiales et mesurées ($\mu\text{g.L}^{-1}$) en zinc pour les bacs ormeaux.

Conditions	Concentration cible ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration initiale ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration mesurée ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
100	5	3.6 ± 0.8	11.1 ± 1.1
300	15	10.7 ± 2.4	15.9 ± 1.4
900	40	32.2 ± 7.2	25.3 ± 3.5
2700	120	96.7 ± 21.6	33.2 ± 14.3

2.2.1. Ormeaux du groupe 50mm

Croissance pondérale et linéaire

La croissance linéaire diminue pour les concentrations supérieures à 900 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (figure 9), visuellement il y a en effet une légère différence entre le témoin et le 2 700 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (figure 10). Toutefois les différences ne sont pas statistiquement significatives (tableau 9).

La concentration influence de façon significative le taux de croissance pondérale (Test Anova $p.\text{value}<0.05$) Celui-ci tend à diminuer avec l'augmentation de la concentration (Figure 9). Les effets sont significatifs à partir de 900 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Le taux de croissance pondérale diminue de 90% entre le témoin et la concentration 900 $\mu\text{g.L}^{-1}$, passant de $0.206 \pm 0.078 \text{ \%.j}^{-1}$ à $0.023 \pm 0.08 \text{ \%.j}^{-1}$. Pour la concentration 2700 $\mu\text{g.L}^{-1}$, la valeur négative indique une perte de poids sur les 12 semaines (Tableau 9).

Tableau 9 : Taux de croissance pondérale moyen (TCP en \%.j^{-1}) et croissance linéaire moyenne (CL en mm.j^{-1}) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 50 mm après 12 semaines en fonction des concentrations.

Conditions	TCP (\%.j^{-1})	CL (mm.j^{-1})
Témoin	0.206 ± 0.078	0.027 ± 0.019
Témoin trophique	0.210 ± 0.108	0.032 ± 0.015
100	0.226 ± 0.062	0.031 ± 0.019
300	0.150 ± 0.089	0.031 ± 0.015
900	0.023 ± 0.08	0.019 ± 0.021
2700	-0.073 ± 0.137	0.016 ± 0.004

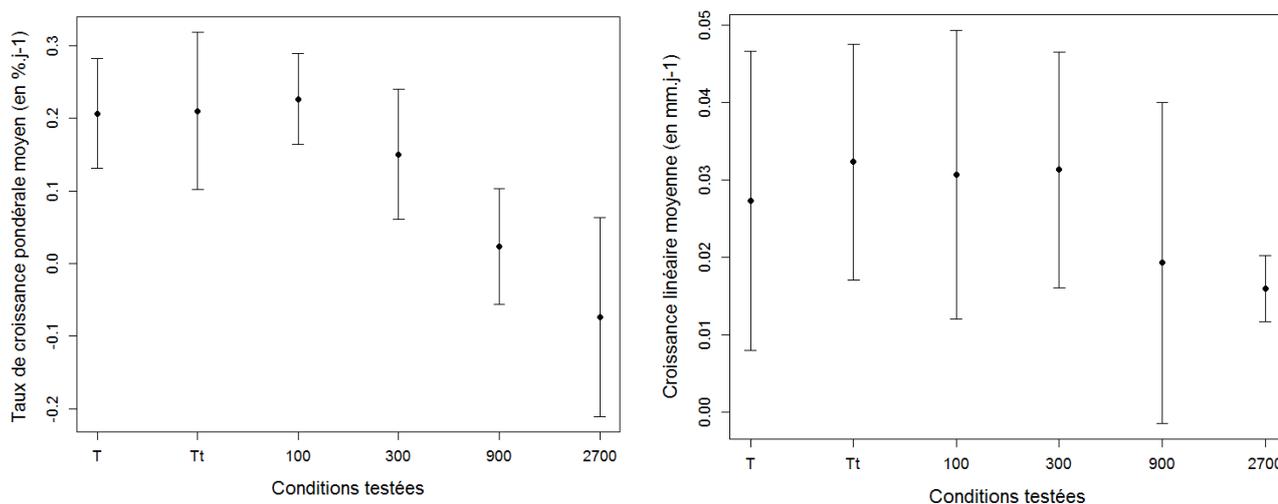


Figure 9 : Evolution du taux de croissance pondérale moyen (en \%.j^{-1}) et de la croissance linéaire moyenne (en mm.j^{-1}) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 50 mm après 12 semaines en fonction des concentrations.

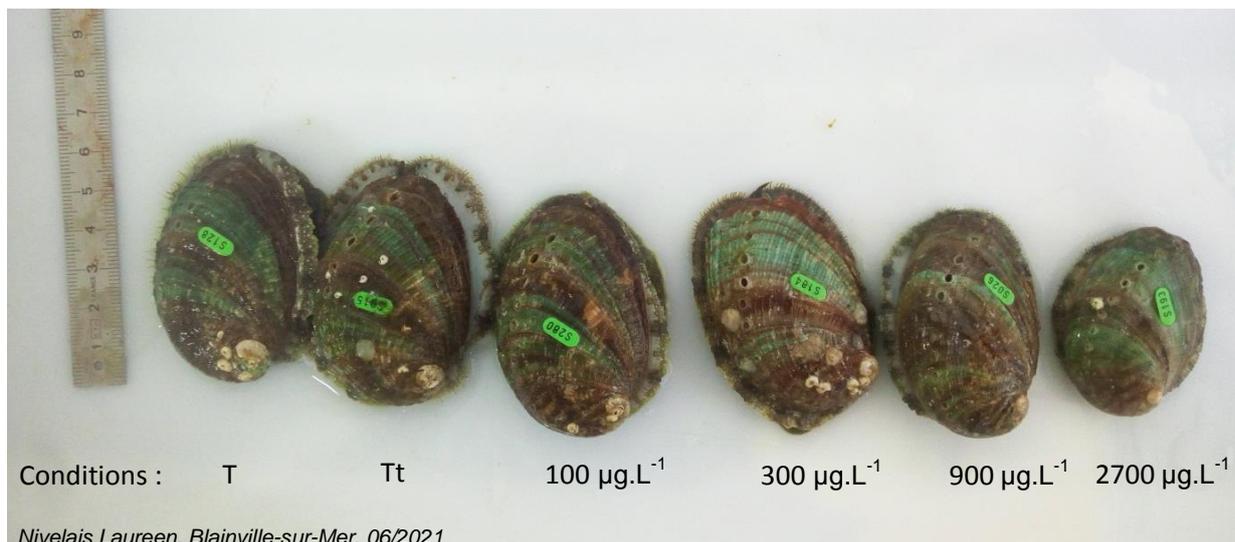


Figure 10 : Lot d'ormeaux du groupe 50 mm (1 de chaque condition) après 12 semaines d'expérimentation.

Taux d'ingestion et taux de conversion

Le taux de conversion a pour objectif d'évaluer « l'efficacité » de l'aliment ingéré. Un taux faible indique une bonne utilisation de l'aliment pour la croissance. Plusieurs paramètres peuvent jouer sur cette valeur comme la qualité de l'aliment ou encore la physiologie de l'animal.

Le taux d'ingestion varie de façon significative ($p.value < 0.05$), il diminue avec l'augmentation des concentrations (Figure 11). L'écart est significatif entre les témoins et les bacs $900 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$. Il passe de 0.65 ± 0.07 pour les témoins à 0.46 ± 0.09 pour les bacs $900 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Tableau 10). Cela peut expliquer les taux de croissance pondérale moyens plus faibles dans ces bacs par rapport au témoin visible sur les graphiques précédents. Il n'y a pas de différence entre le témoin et le témoin trophique, il ne semble donc pas y avoir de problème d'appétence pour des algues contaminées par rapport à des algues saines.

Les concentrations n'influencent pas de façon significative le taux de conversion (Test Anova $p.value > 0.05$) même si les valeurs moyennes des bacs $900 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$ plus élevées que les autres amènent à penser à une moins bonne utilisation des algues (Figure 11).

Tableau 10 : Taux d'ingestion moyen (TI en grammes d'aliments ingérés par individu et par jour) et taux de conversion moyen (TC en grammes d'aliments ingérés par gramme de gain de poids frais) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 50 mm après 12 semaines en fonction des concentrations.

Conditions	TI (gi/ind/jour)	TC (gi/gp)
Témoin	0.65 ± 0.07	13.4 ± 2.51
Témoin trophique	0.69 ± 0.18	14.18 ± 5.23
100	0.67 ± 0.20	14.42 ± 3.97
300	0.59 ± 0.09	15.18 ± 11.14
900	0.46 ± 0.09	134.78 ± 327.18
2700	0.46 ± 0.09	63.27 ± 256.90

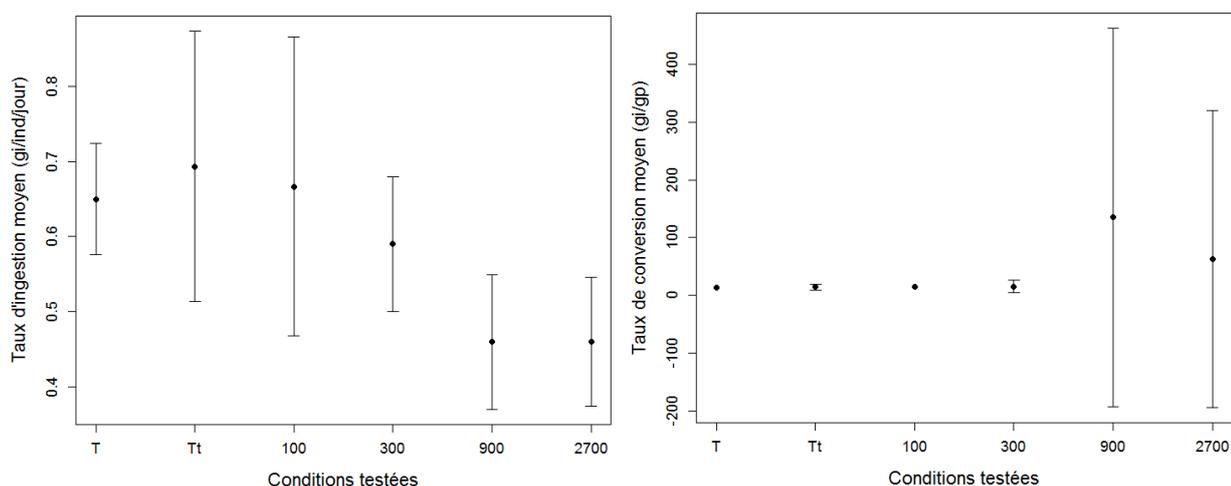


Figure 11 : Evolution du taux d'ingestion moyen (en grammes d'aliments ingérés par individu et par jour) et taux de conversion moyen (en grammes d'aliments ingérés par gramme de gain de poids frais) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 50 mm après 12 semaines en fonction des concentrations.

Mortalité :

Le taux de mortalité pour les bacs témoins est de 7.4%, il est plus faible dans les bacs témoins trophiques, 100 $\mu\text{g.L}^{-1}$, 300 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et 900 $\mu\text{g.L}^{-1}$ où il atteint respectivement 0%, 0%, 3.7% et 3.7% (Figure 12).

Concernant les bacs 2700 $\mu\text{g.L}^{-1}$ le taux de mortalité est de 22.7% au bout des 12 semaines, c'est la valeur la plus élevée, il n'est cependant pas possible de déterminer un TL50.

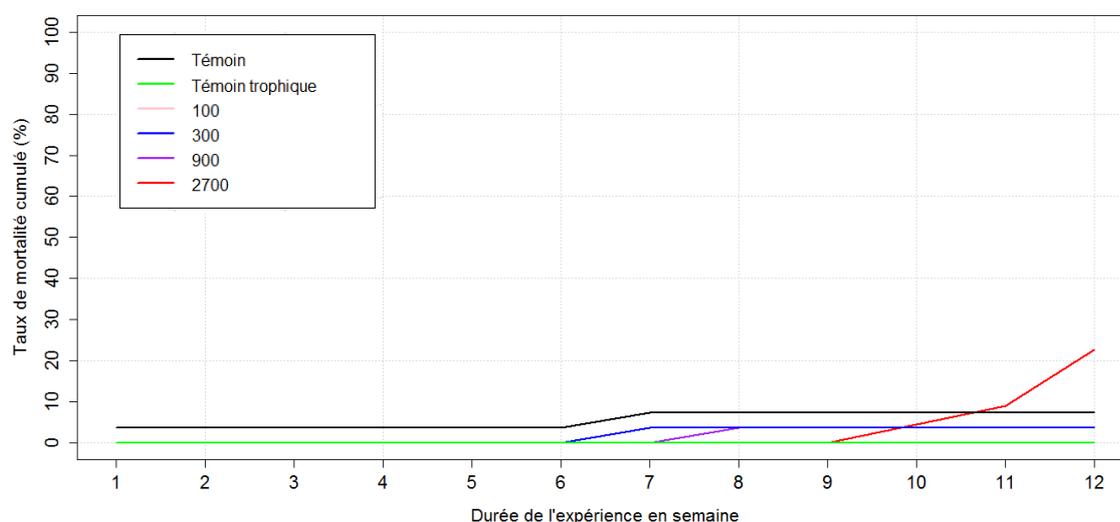


Figure 12 : Taux de mortalité cumulé (en %) pour le groupe des 50 mm au cours des 12 semaines d'expérience.

2.2.2. Ormeaux du groupe 20 mm

Croissance pondérale et linéaire

Pour les graphiques suivants (Figure 13), les valeurs concernant la condition 2700 $\mu\text{g.L}^{-1}$ sont basées sur deux réplicas les individus étant tous morts dans le 3^{ème} bac.

L'analyse de la variance montre que la concentration influence de façon significative le taux de croissance pondérale et la croissance linéaire (p.value <0.05) au bout des 12 semaines d'expérience. Dans les deux cas les valeurs diminuent avec l'augmentation des concentrations (Figure 13).

Concernant le taux de croissance pondérale, les effets sont significatifs entre 900 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et le témoin et 2700 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et le témoin. Le taux de croissance pondérale chute de 80 % entre le témoin et 2700 $\mu\text{g.L}^{-1}$, il passe de $1.26 \pm 0.13 \text{ \%}.\text{j}^{-1}$ à $0.26 \pm 0.62 \text{ \%}.\text{j}^{-1}$ (Tableau 11). L'intervalle de confiance élevé des bacs de 2700 $\mu\text{g.L}^{-1}$ s'explique par le fait qu'il ne restait plus que deux bacs de cette condition avec deux valeurs moyennes assez différentes.

Pour la croissance linéaire moyenne, les effets sont significatifs dès 900 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Celle-ci diminue de 70 % entre le témoin et la condition 2700 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (Tableau 11).

Tableau 11: Taux de croissance pondérale moyen (TCP en $\text{\%}.\text{j}^{-1}$) et croissance linéaire moyenne (TL en $\text{mm}.\text{j}^{-1}$) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 20 mm après 12 semaines en fonction des concentrations.

Conditions	TCP ($\text{\%}.\text{j}^{-1}$)	CL ($\text{mm}.\text{j}^{-1}$)
Témoin	1.26 ± 0.13	0.10 ± 0.01
Témoin trophique	1.21 ± 0.22	0.11 ± 0.01
100	1.23 ± 0.16	0.10 ± 0.01
300	1.01 ± 0.15	0.08 ± 0.01
900	0.85 ± 0.24	0.07 ± 0.01
2700	0.26 ± 0.62	0.03 ± 0.07

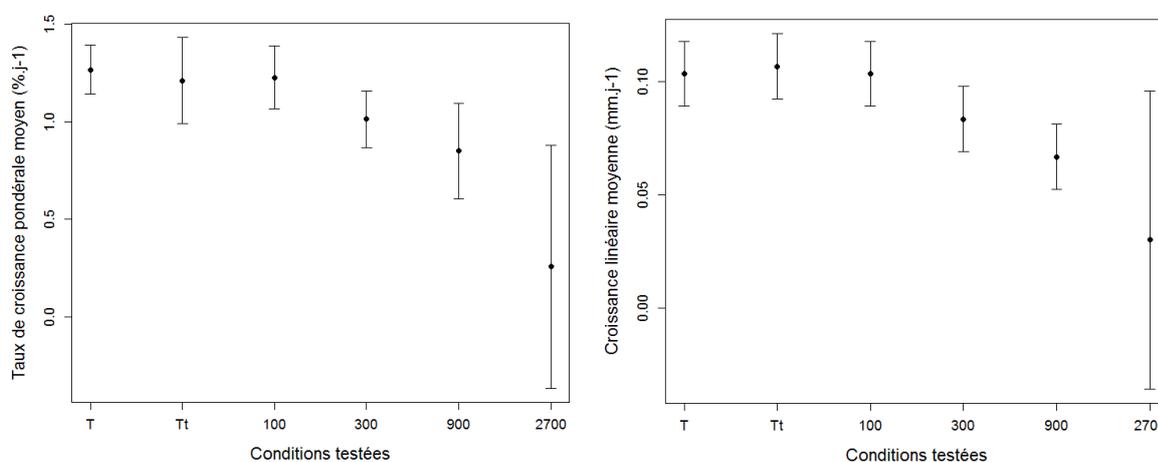


Figure 13 : Evolution du taux de croissance pondérale moyen (en $\text{\%}.\text{j}^{-1}$) et de la croissance linéaire moyenne (en $\text{mm}.\text{j}^{-1}$) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 20 mm après 12 semaines en fonction des concentrations.

Ces résultats sont cohérents avec l'aspect visuel des ormeaux où le gradient décroissant de la taille entre les individus des différentes conditions (Figure 14) et la différence de taille entre les témoins et ceux de la condition 2 700 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (Figure 15) après 12 semaines d'expérience sont nettement visibles. Les lots de chaque bac étant homogènes au début, les individus des photos représentent le lot marqué dans sa totalité

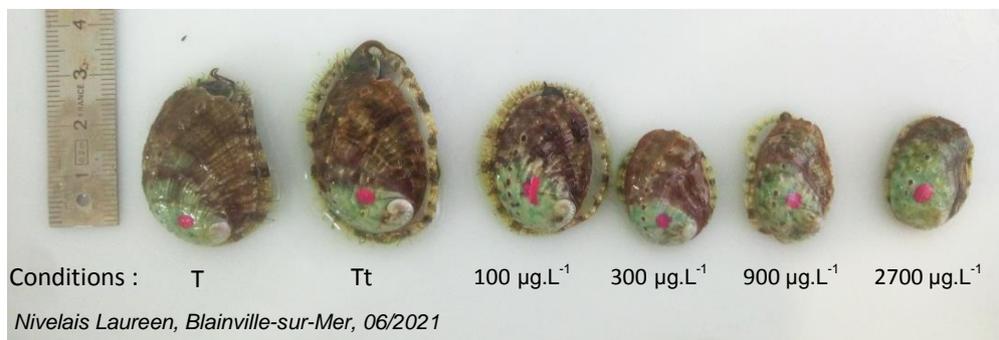


Figure 14 : Gradient décroissant de la taille entre les ormeaux de chaque condition du groupe 20 mm et après 12 semaines d'expérience.



Figure 15 : Différence de taille entre le lot d'ormeaux du groupe 20 mm du bac témoin (en haut) et du bac 2700 (en bas) après 12 semaines d'expérience.

Taux ingestion et conversion :

Le taux d'ingestion et le taux de conversion varient significativement ($p.\text{value} < 0.05$).

Le taux d'ingestion diminue avec l'augmentation de la concentration (Figure 16). Il passe de 0.16 ± 0.04 pour le témoin à 0.08 ± 0.00 pour la condition $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$ et 0.12 ± 0.01 pour $900 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Tableau 12).

A l'inverse, le taux de conversion augmente et atteint une valeur de 11 ± 4.57 pour la condition $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$ signe d'une mauvaise efficacité de l'alimentation (Figure 16). Il n'y a

pas de différence significative entre les valeurs des autres conditions et le témoin, ces dernières sont comprises entre 5.76 ± 0.14 et 7.23 ± 1.07 .

Tableau 12 : Taux d'ingestion moyen (TI en grammes d'aliments ingérés par individu par jour) et taux de conversion moyen (TC en grammes d'aliments ingérés par gramme de gain de poids frais) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 20 mm au après 12 semaines.

Conditions	TI (gi/ind/jour)	TC (gi/gp)
Témoin	0.16 ± 0.04	5.76 ± 0.14
Témoin trophique	0.19 ± 0.02	6.23 ± 0.62
100	0.17 ± 0.02	6.23 ± 0.44
300	0.14 ± 0.02	6.40 ± 1.60
900	0.12 ± 0.01	7.23 ± 1.07
2700	0.08 ± 0.00	11.1 ± 4.57

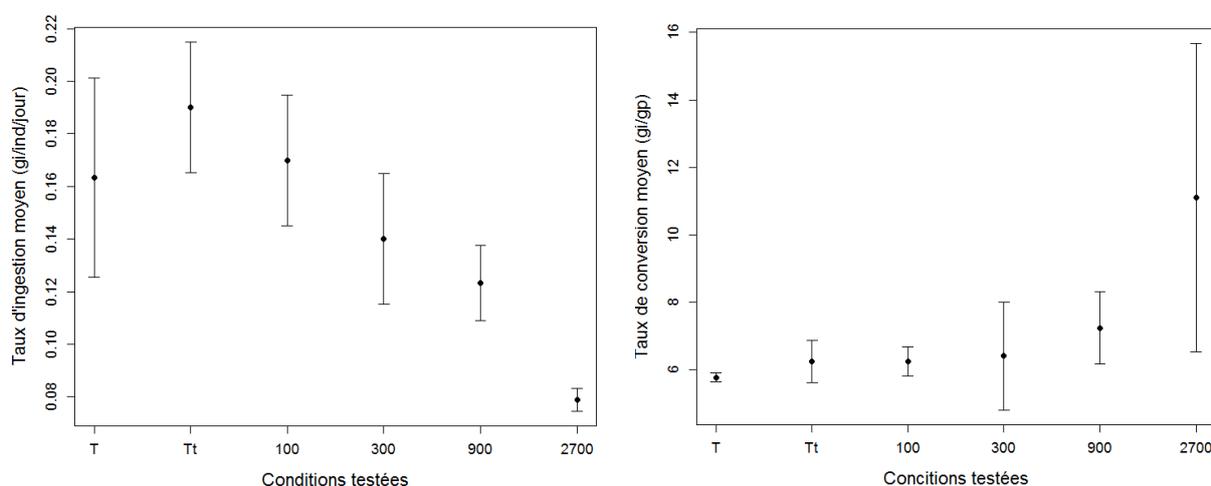


Figure 16 : Evolution du taux d'ingestion moyen (en grammes d'aliments ingérés par individu par jour) et taux de conversion moyen (en grammes d'aliments ingérés par gramme de gain de poids frais) avec intervalle de confiance (IC95) chez les ormeaux du groupe 20 mm après 12 semaines en fonction des concentrations.

Mortalité :

Dans les bacs témoins, la mortalité cumulée a atteint 5.3% au bout des 12 semaines d'expérience (Figure 17).

La mortalité des bacs témoins trophiques, $100 \mu\text{g.L}^{-1}$, $300 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $900 \mu\text{g.L}^{-1}$ est faible et atteint respectivement 2.7%, 1.3%, 2.7% et 0%.

Le taux de mortalité des bacs $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$ est lui plus important et atteint 57%. Les valeurs permettent d'établir un TL50 (temps à partir duquel la mortalité atteint 50%) de 11 semaines et demie.

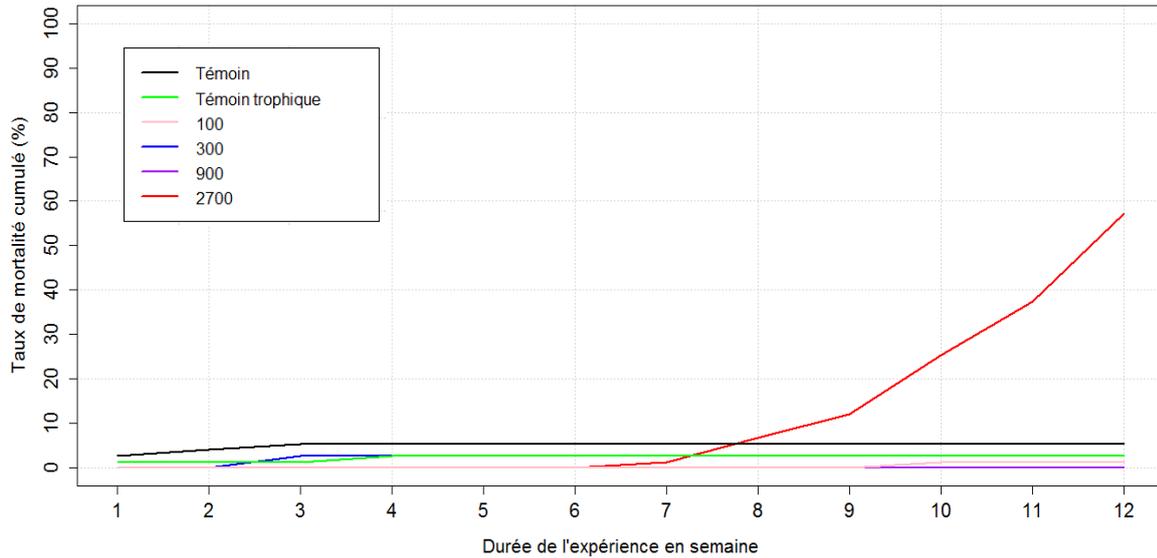


Figure 17 : Taux de mortalité cumulé (en %) pour le groupe des 20 mm au cours des 12 semaines d'expérience.

Bioconcentration :

Les résultats de la bioconcentration montrent une nette augmentation de la quantité moyenne d'aluminium accumulée dans les tissus des ormeaux en fonction des concentrations (Figure 18). Elle est 48 fois plus élevée dans la condition 2700 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (T1) que dans le témoin (T1). Au cours du temps la bioconcentration n'évolue pas sauf pour la condition 100 $\mu\text{g.L}^{-1}$ où il y a une légère baisse significative entre le T1 et le T2, un palier est atteint après 4 semaines pour les autres concentrations.

Le rapport entre la concentration en aluminium dans les ormeaux (mg.kg^{-1} de PS) et la concentration moyenne en aluminium dans le milieu (mg.L^{-1}) a permis de calculer un facteur de bioconcentration moyen sur les 12 semaines d'expérience pour l'ensemble des conditions de 1358 ± 323 .

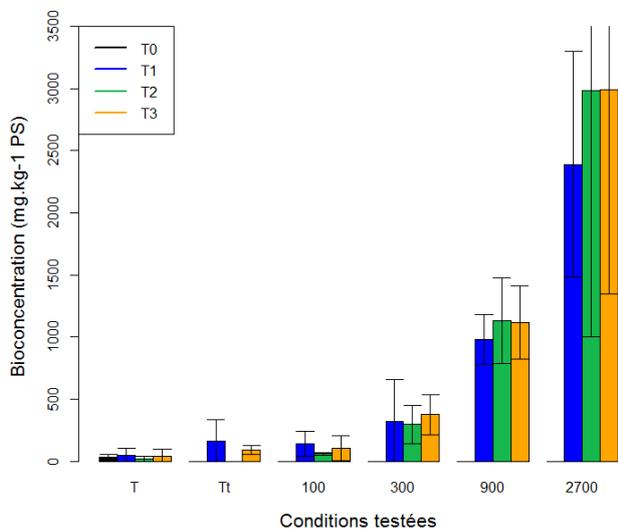


Figure 18 : Bioconcentrations moyennes et intervalles de confiance (IC95) en aluminium chez les ormeaux de classe 20 mm.

Concernant le zinc, pour le T1, T2 et T3, les valeurs de bioconcentration ne sont pas significativement différentes entre les concentrations, seule la condition 2700 présente une valeur supérieure aux autres (Figure 19). L'évolution au cours du temps indique une diminution des valeurs de bioconcentration pour l'ensemble des concentrations.

Un facteur de bioconcentration moyen de 5426 ± 3610 a également été calculé.

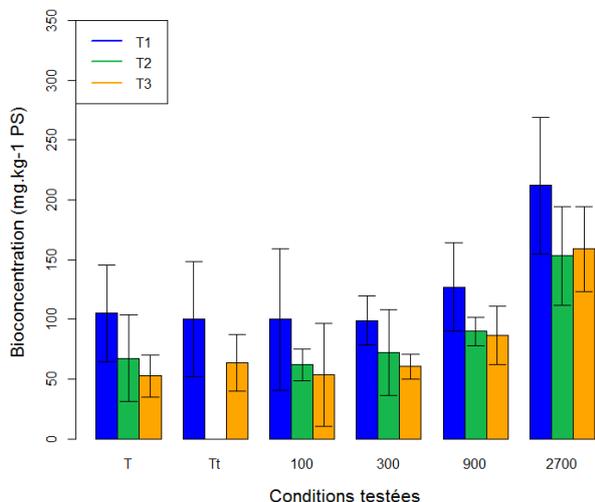


Figure 19 : Bioconcentrations moyennes et intervalles de confiance (IC95) en zinc chez les ormeaux de classe 20 mm.

En plus de ces derniers résultats, des phénomènes de dépigmentation ont été observés au niveau du pied de certains ormeaux des deux groupes pour les concentrations $900 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$. Ce phénomène est apparu à la fin de la phase de contamination et est plus ou moins marqué selon les individus (Figure 21). La présence de métaux en plus forte concentration dans ces bacs peut être à l'origine de cette dépigmentation, d'autant plus que le pied est au contact permanent avec les parois du bac, zone où les métaux sont peut-être davantage présents.

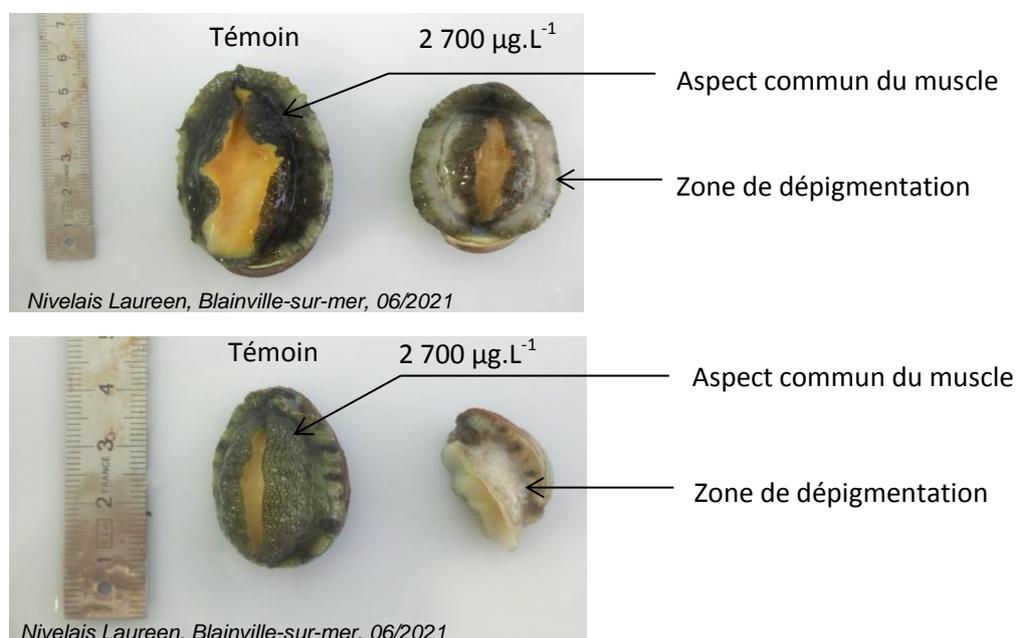


Figure 20 : Phénomène de dépigmentation chez les ormeaux du groupe 50 mm (en haut) et 20 mm (en bas) pour la condition $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$.

Concernant la phase de décontamination, les résultats sont en cours d'analyse.

3. Discussion

3.1. Quantités d'anodes présentes le long des côtes françaises

Au total, la quantité d'anodes présente sur l'ensemble des infrastructures maritimes des côtes françaises de la Mer du Nord et de la Manche (Parcs éoliens offshore, structures portuaires, bateaux de pêche et bateaux de plaisance) est estimée à 5040 T. 72 % seront installés sur les parcs éoliens offshore, 25% protègent les structures portuaires et 3% les bateaux de pêche et de plaisance (figure 21).

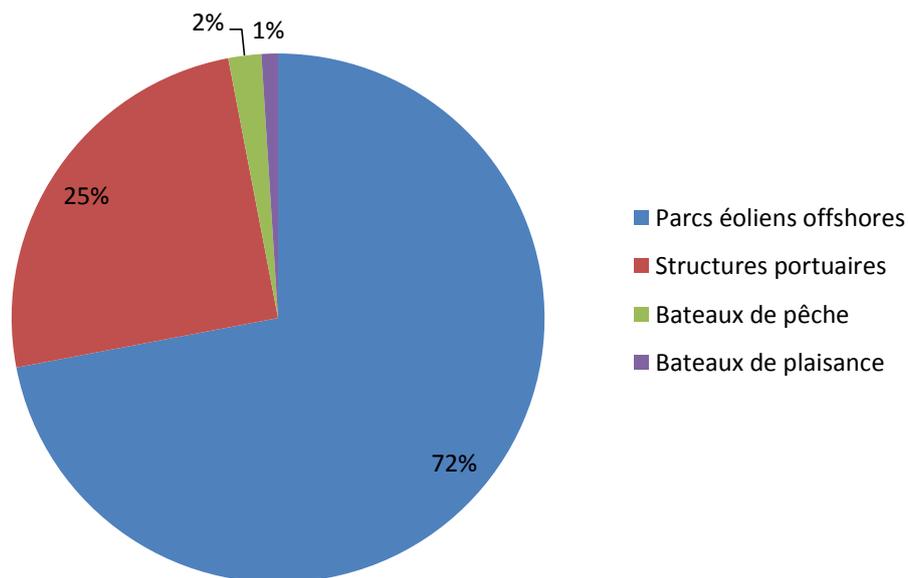


Figure 21 : Répartition en pourcentage des anodes installées sur les structures maritimes.

Avec les objectifs actuels de développement des énergies renouvelables, les parcs éoliens offshore sont amenés à fortement se développer dans les années à venir. C'est le cas notamment avec le nouveau projet au large du Cotentin dont la sélection du candidat se fera en 2022. La protection par anodes galvaniques n'est certes pas toujours choisie (Courant imposé pour le parc de Dieppe-Le Tréport) mais reste majoritaire et présente des avantages de maintenance et d'installation (Autorité environnementale, 2015c) en faveur de son utilisation sur les futurs parcs offshore.

Concernant les infrastructures portuaires, les anodes galvaniques ont là aussi tendance à être de plus en plus utilisées. Certaines structures en seront bientôt équipées comme à Grandcamp-Maisy ou à Courseulles-sur-Mer et des renouvellements d'anciennes anodes par des nouvelles sont en cours dans plusieurs ports (Apports des discussions avec les gestionnaires des ports).

Les flottilles de bateaux ne sont pas amenées à fortement évoluer, la part d'anode sur les navires va donc rester sensiblement la même.

La tendance actuelle, avec une majorité d'anodes installée sur les structures offshore puis dans un 2nd temps sur les infrastructures portuaires, va globalement se maintenir au cours des prochaines années avec une augmentation du nombre total d'anodes

dans chacun de ces secteurs. Une attention particulière sera donc à porter sur ces structures qui pourront représenter d'importantes sources de libération de métaux.

En effet, en s'appuyant sur les formules données par le standard DNVGL-RP-B401 (Det Norske Veritas, 2010) des anodes galvaniques, il est possible d'estimer la masse d'anode perdue en fin de vie et donc la quantité de métaux relarguée dans le milieu. Des calculs similaires ont été effectués dans le cadre d'une étude sur l'impact environnemental du parc offshore de Courseulles-sur-Mer (Autorité environnementale, 2015a). La quantité d'aluminium libérée quotidiennement dans le milieu serait de 100 kg.j^{-1} pour 1 125 T d'anodes sur une durée de 15 ans. Toutefois en prenant en compte le facteur de dilution, la concentration en aluminium du fait de la présence d'anodes serait de $0.014 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Autorité environnementale, 2015a) valeur inférieure à celle retrouvée dans le milieu (entre 2 et $150 \mu\text{g.L}^{-1}$, Joyner, 1964 cité par Mao, 2011). Des calculs semblables ont été réalisés pour le parc de Saint-Nazaire comptant 960 T d'anodes installés pour 25 ans. Les résultats montrent que la quantité d'aluminium transférée au milieu est de $0,0061 \mu\text{g.L}^{-1}$ sur 24h (Autorité environnementale, 2015c). Ces chiffres sont à prendre avec précaution car pour l'instant aucun suivi de la qualité de l'eau n'a été effectué dans le cadre d'un parc éolien offshore.

De plus, tout comme à Calais et Le Havre (Basuyaux et al, 2018b ; Gabelle et al, 2012) un suivi environnemental a été réalisé en lien avec la pose d'anodes dans le port de Saint-Malo (Nebout, 2021). Les résultats mettent également en avant le rôle de la dilution dans la dispersion des métaux. Le suivi environnemental a été réalisé à partir de cinq campagnes de prélèvements suivant les différentes phases d'installation des anodes. Le dernier rapport de mai 2021 montre que les concentrations en aluminium oscillent entre 14 et $19 \mu\text{g.L}^{-1}$ (selon les bassins) contre $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ en septembre 2018 avant la pose des anodes. Cela est cohérent avec les résultats de l'étude menée au port du Havre et de Calais où la présence des anodes n'entraînait pas d'augmentation significative d'aluminium dans la masse d'eau. En effet, les produits de dégradation sont rapidement dissous du fait des phénomènes d'agitation ou stockés dans le sédiment (Caplat et al, 2020 ; Gabelle et al, 2012). Concernant le zinc les prélèvements réalisés à Saint-Malo montrent une augmentation de la concentration dans les différents bassins passant de 5 à $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ (selon bassins) en septembre 2018 à 17 à $55 \mu\text{g.L}^{-1}$ en mai 2021 sans pour autant être sûr que cela provienne des anodes. Les prélèvements sont réalisés dans un port, d'autres sources de zinc peuvent donc être à l'origine de cette augmentation.

Enfin en reprenant la méthode REACH (European Chemical Agency, 2016), une caractérisation quantitative du risque peut être effectuée pour les deux sources majeures d'anodes galvaniques (parcs éoliens offshore et structures portuaires). Celle-ci se calcule à partir du rapport de la concentration estimée du milieu en métal (PEC) sur la concentration prédite de ce même métal n'ayant pas d'effet sur le milieu (PNEC).

D'après Michelet et al (2020) la concentration en aluminium dans la masse d'eau du fait de la présence d'anodes du parc éolien de Courseulles-sur-Mer (1 125T d'anodes) et des apports de la Seine serait de $70.65 \mu\text{g.L}^{-1}$ et de $2.8 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour le zinc (l'apport des anodes est de $0.65 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour l'aluminium et $0.068 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour le zinc) (Tableau 13). A plus grande échelle, en supposant que les apports de la Seine transitent dans les masses d'eau de la Manche et en prenant en compte les 3 610T d'anodes installées sur les autres parcs, la concentration totale estimée dans la masse d'eau (PEC) en aluminium serait de $72.08 \mu\text{g.L}^{-1}$ et de $3 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour le zinc. De plus, d'après cette étude, la plus forte valeur de PNEC pour les ormeaux est de $175.20 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour l'aluminium et de $15.91 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour le zinc. Le rapport PEC/PNEC serait alors de 0.41 pour l'aluminium et 0.18 pour le zinc. Ces calculs peuvent être repris mais en s'intéressant uniquement à la fraction labile et donc biodisponible. Le tableau 6 et les fractions labiles pour le témoin et la condition $300 \mu\text{g.L}^{-1}$ permettent de déterminer les nouvelles valeurs du PEC et PNEC. En prenant en compte la forme des métaux ayant un impact direct sur les ormeaux, les rapports PEC/PNEC sont plus faibles que les précédents. Toutefois tous sont inférieurs à 1, il n'y aurait pas de risque de toxicité

pour les ormeaux du fait de la libération des métaux par les anodes galvaniques des parcs offshore.

Tableau 13 : Evaluation quantitative du risque dans le cas des parcs éoliens offshore de la Manche.

	PNEC ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration en métaux ($\mu\text{g.L}^{-1}$) dans la masse d'eau à l'échelle du parc de Courseulles-sur-Mer	Concentration en métaux ($\mu\text{g.L}^{-1}$) dans la masse d'eau pour l'ensemble des parcs de la Manche (PEC)	Rapport PEC/PNEC
Aluminium				
Total	175.20	70.65	72.08	0.41<1
Fraction labile	120.89		40.36	0.34<1
Zinc				
Total	15.91	2.8	3	0.18<1
Fraction labile	11.96		1.95	0.16<1

Cette méthode peut s'appliquer aux ports qui sont des milieux plus fermés, avec moins de brassage des masses d'eau mais avec des quantités d'anodes galvaniques plus faibles que sur les parcs offshore. En prenant l'exemple du port de Saint-Malo, suite à l'installation d'anodes, la concentration totale moyenne en aluminium est de $20 \mu\text{g.L}^{-1}$ et de $55 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour le zinc. Le rapport PEC/PNEC serait alors de 0.1 pour l'aluminium et 1.5 pour le zinc. Pour la fraction labile, le rapport est de 2.93 pour le zinc et de 0.09 pour l'aluminium. Pour l'aluminium il n'y aurait toujours pas de risque contrairement au zinc qui semble être davantage présent dans les milieux fermés comme les ports.

3.2. Natures et formes chimiques des métaux libérés par l'anode galvanique

La quantité de métaux libérée est un paramètre indispensable pour évaluer le risque de contamination de l'environnement, mais il convient également de s'intéresser à l'aspect forme chimique de ces composés. En effet pour qu'un produit ait un impact sur un organisme il doit être sous une forme chimique qui puisse être assimilée, c'est à dire biodisponible (Le Goff et al, 2004). Les éléments métalliques, une fois assimilés, ont la capacité de se fixer sur des protéines entraînant des modifications des structures pouvant être bénéfiques ou non. Des mécanismes de régulation existent afin de contrôler la concentration de ces éléments, avec notamment un stockage de ces derniers dans les vésicules ou les granules (Le Goff et al, 2004). Même s'ils ne sont plus toxiques pour l'organisme ils peuvent s'accumuler et présenter un risque pour les prédateurs et le reste de la chaîne alimentaire. Lorsque les mécanismes de régulation ne fonctionnent pas ou arrivent à saturation, des effets toxiques peuvent alors apparaître chez les organismes exposés. Les résultats de cette étude ont montré que la fraction labile augmente avec les concentrations. Cela explique les effets visibles sur les ormeaux de plus en plus marqués à partir de la condition 900. De plus, les concentrations théoriques sont différentes de celles mesurées. En effet une partie de l'aluminium est sous forme colloïdale et donc non détectable lors des mesures, les métaux peuvent également avoir été bio accumulés par les ormeaux, les algues, ou stockés dans les parois des bacs. Dans le milieu naturel, les concentrations mesurées dans la masse d'eau ne retranscrivent donc pas exactement les quantités présentes sachant qu'une partie peut être stockée dans le compartiment biote et sédiment avec des possibilités de relargage et d'impact sur les organismes fouisseurs.

3.3. Impact des produits de dégradation des anodes galvaniques sur les ormeaux

La dernière phase de l'étude s'est intéressée à la nature et à l'intensité des effets potentiels des métaux sur les ormeaux. Pour le groupe des 20 mm dans les bacs témoins, le taux de croissance pondérale est de $1.35 \pm 0.25 \text{ \%} \cdot \text{j}^{-1}$ et la croissance linéaire de $0.11 \pm 0.02 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$, contre $0.93 \text{ \%} \cdot \text{j}^{-1}$ pour des ormeaux de 30 à 40 mm (Basuyaux, 1997) et $0.06 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ pour des ormeaux de 23 mm (Basuyaux et al, in prep). Pour le groupe des 50 mm, le taux de croissance pondérale atteint $0.21 \pm 0.08 \text{ \%} \cdot \text{j}^{-1}$ pour les bacs témoins et $0.027 \pm 0.02 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ pour la croissance linéaire ce qui est en-dessous des valeurs de la littérature ($0.5 \text{ \%} \cdot \text{j}^{-1}$ et $0.05 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ pour des ormeaux de 50 à 60mm (Basuyaux, 1997)). Au cours des 12 semaines d'expérience, des pontes ont été observées dans tous les bacs et parfois plusieurs fois par bacs, cela a engendré un ralentissement de croissance expliquant cette valeur plus faible.

Concernant les différentes conditions testées, biologiquement parlant des effets sont visibles dès la condition $300 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ avec des diminutions de croissance et d'ingestion, néanmoins ils ne deviennent statistiquement significatifs qu'à partir de la condition $900 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. Pour ce qui est du taux de mortalité, un TL50 de 11 semaines et demie pour la condition $2700 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ a été établi pour le groupe des 20 mm. Ces résultats peuvent être mis en parallèle avec ceux des DGT qui ont mis en évidence plusieurs formes biodisponibles d'aluminium pouvant impacter l'organisme des ormeaux. Le principe de contamination n'est pas établi, néanmoins l'assimilation de ces métaux peut avoir un impact à plusieurs échelles sur le développement des individus, en jouant directement sur la croissance ou bien en modifiant l'ingestion et l'assimilation des nutriments. A partir de la condition $900 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ les quantités ingérées diminuent de façon significative entraînant un déficit d'énergie et donc une croissance ralentie. En plus de cette baisse de consommation, une mauvaise assimilation des nutriments peut être à l'origine des faibles taux de croissance. D'une part, la contamination des algues peut entraîner une diminution de la teneur de certains composés ou de leur biodisponibilité. D'autre part les ormeaux pourraient avoir des difficultés à assimiler les nutriments lors de l'ingestion des algues. Enfin, le taux d'ingestion du témoin trophique supérieur à celui du témoin pour les ormeaux de la classe 20 mm peut s'apparenter à un effet d'hormèse. Une faible dose de métaux serait bénéfique aux ormeaux, ce phénomène est souvent présent dans le cas d'étude éco toxicologique (Nguimgou Signing, 2017 ; Perez-Benito, 2006 ; Kurta & Palestis, 2010). Les analyses complémentaires réalisées au laboratoire Borea permettront d'en savoir davantage sur les mécanismes des contaminations.

Les indicateurs de croissance, d'ingestion et de mortalité indiquent que les produits de dégradation de l'anode ont un impact sur la croissance des ormeaux. Concernant le zinc, plusieurs études ont démontré une toxicité à de faibles concentrations avec notamment des effets sur les oursins après 72h de contamination dès $65 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (Caplat C, 2010 cité par Basuyaux et al, in prep), une diminution de la croissance chez la moule *Mytillus edulis* pour une concentration de $10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (Strömngren, 1982 cité par Basuyaux et al, in prep). Dans le cas de l'étude, les mesures réalisées durant l'expérimentation ont relevé une concentration maximale moyenne de $33.2 \pm 14.28 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ pour la condition $2700 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. A partir du coefficient de Sprague (1971), Basuyaux (1997) a établi une concentration « acceptable » pour les ormeaux à $37 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, les concentrations de cette étude ne semblent donc pas présenter de risques pour les individus. L'aluminium est considéré comme moins toxique que le zinc mais peut néanmoins présenter un risque pour certaines espèces. Une CE50 de $554 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (144h) a été établie pour le crabe *Coenobita variabilis* (Dam (van) et al, 2018 cité par

Basuyaux et al, in prep) et des effets toxiques ont été détectés après 72h chez des larves d'oursin dès $81 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Caplat et al 2010 cité par Basuyaux et al, in prep). Etant davantage présent dans les produits de dégradation de l'anode, il peut présenter un plus fort risque de toxicité pour les ormeaux. Des effets significatifs, comme une baisse de la croissance, chez les individus de 20mm sont en effet observés dès une concentration moyenne mesurée $494.9 \pm 105.18 \mu\text{g.L}^{-1}$. A titre de comparaison, une étude menée sur la toxicité de différents types d'anodes (Basuyaux et al, in prep) a montré des baisses de croissance chez des ormeaux de tailles moyennes de 23 mm à partir d'une concentration mesurée à $299 \mu\text{g.L}^{-1}$ (réalisée avec une anode Al/Zn).

Les concentrations en aluminium dans l'ensemble des tissus des ormeaux augmentent significativement à partir d'une concentration moyenne mesurée de $349.2 \pm 100.13 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour atteindre $980 \pm 198.61 \text{mg.kg}^{-1}$ PS dès les 4 premières semaines. Cette valeur est légèrement au-dessus de celle mesurée par Basuyaux et al (in prep) de 620mg.kg^{-1} PS pour une concentration en aluminium dans le milieu de $463 \mu\text{g.L}^{-1}$. En comparaison avec d'autres organismes telles que les moules *Mytilus edulis*, souvent utilisées pour suivre la qualité des eaux, les valeurs de bioconcentration des ormeaux sont plus faibles. Pineau et al (2011) a montré que la concentration en aluminium dans la glande digestive des moules *Mytilus edulis* augmentent très rapidement. Le maximum de 1706mg.kg^{-1} PS est atteint au bout de 13 jours dans une eau contaminée en aluminium à $530 \mu\text{g.L}^{-1}$ en moyenne. Pour les tissus mous le maximum de 300mg.kg^{-1} PS est atteint au bout de 8 jours. Les ormeaux semblent donc accumuler moins rapidement l'aluminium que les moules et en plus faible quantité, en effet les valeurs restent similaires entre le T1 et le T3 signe d'une saturation. Une expérience de 4 semaines aurait sans doute suffi dans le cas de la bioconcentration.

Concernant le zinc, les concentrations dans les tissus diminuent légèrement entre le T1 et le T3. La valeur maximale obtenue est de $211 \pm 57.23 \text{mg.kg}^{-1}$ PS pour la condition $2700 \mu\text{g.L}^{-1}$ (concentration moyenne mesurée en zinc de $46.9 \pm 18.63 \mu\text{g.L}^{-1}$) au T1. Basuyaux et al (in prep) a montré que pour une concentration en zinc du milieu inférieure à $30 \mu\text{g.L}^{-1}$ la concentration dans la glande digestive est de 270mg.kg^{-1} PS et dans les viscères de 30mg.kg^{-1} PS. Dans le cadre de l'étude de Pineau et al (2011), la concentration en zinc dans la glande digestive des moules *Mytilus edulis* atteint 220mg.kg^{-1} PS et 160mg.kg^{-1} PS pour les tissus mous en 13 jours pour une concentration en zinc dans l'eau proche des $50 \mu\text{g.L}^{-1}$. La concentration médiane en zinc établie par Ifremer en 2013 est de 2250mg.kg^{-1} PS chez les huitres et de 105mg/kg PS pour les moules sur le littoral français (Daniel, 2015) sachant que la concentration de ce métal dans le milieu est très variable de 0.3 à $300 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Motin et al, 2012 cité par Kirchgeorga et al 2018), dans le port de Saint-Malo par exemple des valeurs de 10 à $55 \mu\text{g.L}^{-1}$ ont été relevées (Nebout, 2021).

Un facteur de bioconcentration moyen des tissus de l'ormeau en aluminium de 1358 ± 323 a pu être calculé pour l'ensemble des concentrations. Cette valeur est inférieure à celle estimée pour les glandes digestives des moules *Mytilus edulis* de l'ordre de 3400 à une concentration moyenne en aluminium de l'eau de $530 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Pineau et al, 2011). Pour le zinc, le facteur de bioconcentration de 5426 ± 3610 est supérieur à celui de l'aluminium. Il en est de même pour les moules dont le facteur de bioconcentration atteint 4000 dans les glandes digestives (Pineau et al, 2011). Dans les deux cas le zinc est davantage concentré dans les tissus que l'aluminium. Le zinc fait partie des oligoéléments et est un métal essentiel au fonctionnement de l'organisme (Pineau et al, 2011), cela peut expliquer qu'il soit davantage assimilé.

Pour compléter cette évaluation, la méthode REACH propose une caractérisation qualitative du risque à partir du facteur de bioconcentration (BCF) et de la NOEC (la plus forte concentration testée pour laquelle il n'y a pas d'effet sur l'individu). Dans le cadre de cette étude, l'aluminium ne remplit pas les critères d'une substance bioaccumulable ($\text{BCF} < 2000$) et toxique ($\text{NOEC} > 0.01 \text{mg.L}^{-1}$), le zinc quant à lui est considéré comme une

substance bioaccumulable (BCF > 2 000) mais non toxique (NOEC > 0.01 mg.L⁻¹). Associée à la caractérisation quantitative du risque, cette évaluation montre que les métaux libérés ne semblent pas toxiques pour l'ormeau, la bioconcentration en zinc peut cependant impacter le reste de la chaîne alimentaire.

Conclusion

L'objectif de cette étude est d'évaluer et caractériser l'impact des métaux libérés par les anodes galvaniques le long des côtes françaises de la Manche sur l'ormeau *Haliotis tuberculata*. Une évaluation du risque de toxicité a été effectuée à partir de la démarche REACH. Dans un premier temps, l'évaluation de l'exposition a été réalisée en estimant les quantités d'anodes présentes sur les côtes françaises de la Manche et Mer du Nord. Plus de 5 000 T sont installés sur l'ensemble des infrastructures maritimes (72 % sur les parcs éoliens offshore, 25% sur les structures portuaires et 3% sur les bateaux de pêche et de plaisance). Toutes les données n'ont pas pu être recueillies du fait de l'indisponibilité de certains contacts ou du manque d'information sur le sujet. Les navires militaires et de commerce n'ont pas été pris en compte dans cette étude, une grande partie mesurant plus de 50 m, la protection par anodes galvaniques est sans doute minoritaire.

Concernant la 2^{ème} phase sur les tests d'exposition d'organismes marins, les résultats ont montré une baisse significative de la croissance, du taux d'ingestion et des phénomènes de bioconcentration dès une concentration moyenne de $457.8 \pm 86.8 \mu\text{g.L}^{-1}$. Les pontes observées après la 4^{ème} semaine chez les individus de la classe 50 mm ont pu perturber certains des résultats notamment ceux sur la croissance. L'ensemble des bacs a été touché et pour certains plusieurs fois, il n'a donc pas été possible d'écarter les individus ayant pondus. Les concentrations présentant un risque lors de l'expérimentation semblent très supérieures à celles estimées dans le milieu naturel.

Au vu des résultats cette étude et des concentrations estimées dans le milieu, les produits de dégradation des anodes galvaniques ne semblent pas présenter de risque de toxicité pour l'ormeau.

Pour avoir une vision complète et un score de Klimisch validant cette évaluation du risque de toxicité, il convient de s'intéresser à d'autres espèces, stades de développement et compartiments. Certaines études ont déjà montré que les produits de dégradation ont tendance à s'accumuler dans le sédiment. Le comportement des métaux dans ce compartiment n'est pas encore clairement établi, il peut être à l'origine de phénomènes de relargage ou avoir un impact sur les organismes qui y vivent notamment les vers fousseurs. De plus, les anodes galvaniques vont être davantage utilisées les années à venir notamment sur les parcs éoliens offshore et au niveau des structures portuaires. Cela pourrait modifier les concentrations en métaux dans la masse d'eau notamment dans les ports ou dans les zones fermées avec de faibles mouvements d'eau. L'évaluation du risque passe aussi par le contrôle et la régulation de celui-ci, qui deviendront alors d'autant plus importants dans les années à venir.

Bibliographie

Autorité environnementale. 2015a. Parc éolien en mer de Courseulles-sur-Mer et son raccordement. Avis délibéré n°Ae 2015-003. 30 p. URL : [http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/150325 - Parc eolien offshore de Courseulles-sur-Mer 14 - delibere_cle1632c3.pdf](http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/150325_Parc_eolien_offshore_de_Courseulles-sur-Mer_14_-_delibere_cle1632c3.pdf)

Autorité environnementale.2015b. Projet de parc éolien en mer de Fécamp (76). Avis délibéré n°Ae 2015-24. 33 p. URL : [http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/150624 - Parc eolien offshore de Fecamp 76 - delibere_cle086ae9.pdf](http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/150624_Parc_eolien_offshore_de_Fecamp_76_-_delibere_cle086ae9.pdf)

Autorité environnementale.2015c. Parc éolien en mer au large de Saint-Nazaire (Parc du Banc de Guérande) et raccordement au réseau électrique (RTE). Précisions suite à l'avis de l'Autorité environnementale. 41 p. URL : [http://www.prosimar.org/EP%20eole/ Mémoire Avis AE 20juillet2015.pdf](http://www.prosimar.org/EP%20eole/Memoire_Avis_AE_20juillet2015.pdf)

Baillet Z. 2020. « Normandie. Un nouveau parc éolien offshore verra le jour au large du Cotentin en 2022 ». *Ouest-France*. URL: <https://www.ouest-france.fr/normandie/cherbourg-en-cotentin-50100/normandie-un-nouveau-parc-eolien-verra-le-jour-au-large-du-cotentin-en-2022-7074366>.

Basuyaux O.1997. Etude et modélisation des paramètres physico-chimiques sur la croissance de l'ormeau (*Haliotis tuberculata*) en élevage en circuit semi-fermé. Thèse doctorat Chimie-Biologie-spécialité sciences. Université de Caen Basse-Normandie. 237 p. URL : https://www.smel.fr/wp-content/uploads/2015/07/Basuyaux_these_1997.pdf

Basuyaux O, Blin J-L, Costil K, Richard O, Lebel J-M, Serpentine A.2018a. Assessing the impacts of several algae-based diets on cultured European abalone (*Haliotis tuberculata*). *Aquatic Living Resources*. Vol 31, n°13, 28 p. URL : <https://doi.org/10.1051/alr/2018018>

Basuyaux O, Caplat C, Grolleau A-M, Honore P, Mahaut M-L, Pineau S, Refait P. 2018b. Transfert d'éléments métalliques constitutifs d'anodes galvaniques aluminium-indium vers l'environnement. Rapport de synthèse, programme TALINE. Ref 1545RAP.107 p.

Basuyaux O, Lemaitre T, Passignat C, Francois E, Mahaut M-L, Grolleau A-M, Caplat C. in prep. Analyses comparatives des effets de dissolution de 3 anodes galvaniques par tests éco toxicologiques en milieu contrôlé. Rapport d'étude Naval-Group. 42 p.

BIOTOPE Nord-littoral.2018. Parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport : Demande de dérogation au titre des articles L.411-1 et suivants du Code de l'environnement. Dossier de demande de dérogation. Ref : 800752_TRE_CNPN_VFC_siemens18. 834 p. URL : http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/17-00837_emdt_offshore-derogation-demande_cerfa-r.pdf

Boero J. 2010. Fiabilité des infrastructures portuaires : approche innovante d'analyse et de modélisation probabiliste des données d'inspection. Application à la corrosion des structures

métalliques. Thèse Doctorat Sciences de l'ingénieur Génie Civil – Mécanique. Université de Nantes-UFR sciences et techniques. 211 p. DOI : [10.13140/RG.2.2.19432.62720](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19432.62720)

Caplat C, Basuyaux O, Pineau S, Deborde J, Grolleau A.M, Leglatin S, Mahaut M.L.2020. Transfer of elements released by aluminum galvanic anodes in a marine sedimentary compartment after long-term monitoring in harbor and laboratory environments. *Chemosphere*. Vol 239, n°124720, 13 p. DOI : [10.1016/j.chemosphere.2019.124720](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124720)

Daniel A, Belin C, Claisse D, Fleury E, Miossec L, Piquet J-C, Ropert M. 2015. Qualité du milieu marin littoral (données 2013). Synthèse Nationale de la Surveillance 2013, Ifremer. 75 p. URL : <https://www.eaufrance.fr/publications/qualite-du-milieu-marin-littoral-donnees-2013>

Deborde J, Refait P, Bustamante P, Caplat C, Basuyaux O, Grolleau A.M, Mahaut M.L, Brach-Papa C, Gonzalez J.L, Pineau S .2015. Impact of galvanic anode dissolution on metal trace element concentrations in marine waters. *Water Air Soil Pollution*. Vol 226, n°423, p.1-14. DOI: [10.1007/s11270-015-2694-x](https://doi.org/10.1007/s11270-015-2694-x)

Det Norske Veritas. 2010. Recommended Practice DNV-RP-B401: cathodic protection design. 28 p URL: [https://www.engr.mun.ca/~sbruneau/teaching/8751ocean/DNV %20cathode%20design.pdf](https://www.engr.mun.ca/~sbruneau/teaching/8751ocean/DNV%20cathode%20design.pdf)

Eolien en mer Dunkerque, Réseau de transport d'électricité.2020. Projet de parc éolien en mer au large de Dunkerque et son raccordement électrique. Dossier des maitres d'ouvrages dans le cadre du débat publique. 127 p. URL : <https://dunkerque-eolien.debatpublic.fr/images/documents/mo/DunkerqueEolienMer-DMO.pdf>

European Chemicals Agency. 2016. Guidance on information requirements and Chemical Safety Assessment, Part E : Risk Characterisation. 49 p. URL : <https://echa.europa.eu/fr/guidance-documents/guidance-on-information-requirements-and-chemical-safety-assessment>

Gabelle C, Baraud F, Biree L, Gouali S, Hamdoun H, Rousseau C, van Veen E, Leleyter L. 2012.The impact of aluminium sacrificial anodes on the marine environment: A case study. *Geochemistry* .p 2088-2095. DOI : [10.1016/j.apgeochem.2012.07.001](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.07.001)

Gourlay-Francé C, Gonzalez J.-L. 2010. L'utilisation des échantillonneurs passifs. Une nouvelle méthode pour évaluer la contamination chimique des masses d'eau. *Techniques-Sciences-Méthodes*.n°3, p 24-35. DOI : [10.1051/tsm/201003024](https://doi.org/10.1051/tsm/201003024)

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020a.Quartier maritime Boulogne-sur-Mer,2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76195. 13 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76195/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020b.Quartier maritime Caen, 2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76197. 13 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76197/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020c.Quartier maritime Cherbourg, 2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76199. 13 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76199/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020d.Quartier maritime Dieppe, 2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76201. 12 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76201/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020e.Quartier maritime Dunkerque,2019, activité des navires de pêche. Rapport n°76203. 12 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76203/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020f.Quartier maritime Fécamp, 2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76204.12 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76204/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020g.Quartier maritime Le Havre, 2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76209. 12 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76209/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020h.Quartier maritime Morlaix, 2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76213. 13 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76213/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020i.Quartier maritime Paimpol, 2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76216. 12 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76216/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020j.Quartier maritime Saint-Brieuc, 2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76217. 13 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76217/>

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020k.Quartier maritime Saint-Malo, 2019, activité des navires de pêche. Rapport n° 76218. 13 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00650/76218/>

Kirchgeorga T, Weinberga I, Hörnigb M, Baierb R, Schmidb M.J, Brockmeyerc B. 2018. Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms : Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*. Vol 136, p. 257-268. URL : <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.058>

Kurta A, Palestis BG.2010.Effects of Ethanol on the Shoaling Behavior of Zebrafish (*Danio Rerio*). *Dose-Response*. p. 527-533. DOI : [10.2203/dose-response.10-008.Palestis](https://doi.org/10.2203/dose-response.10-008.Palestis)

Le Goff F, Bonnomet V.2004. Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM. Rapport technique. INERIS. REF : DRC-03-46822-FLg/JL-03.0693. 85 p. URL : https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/03_0693_Rapp_Technique_biodisp_ecot.pdf

Le Petit M.2009. Monographie et étude de la dynamique de la population d'*Haliotis tuberculata* au Sénégal. Thèse doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire d'Alfort. 95 p. URL : <http://theses.vet-alfort.fr/telecharger.php?id=1295>

Mao A, Mahaut M-L, Pineau S, Barillier D, Caplat C. 2011. Assessment of sacrificial anode impact by aluminum accumulation in mussel *Mytilus edulis*: A large-scale laboratory test. *Marine Pollution Bulletin*. Vol 62, p.2707–2713. DOI : [10.1016/j.marpolbul.2011.09.017](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.017)

Mazzella N. 2014. Etat de l'art sur l'échantillonnage passif des composés organiques ionisables. Rapport AQUAREF. 36 p. URL : https://www.aquaref.fr/system/files/Note_synthese_ech_passifs_composes_ionisables_VF.pdf

Michelet N, Naïs J, Amouroux I, Dallet M, Burgeot T, Caplat C, Gonzalez J-L. 2020. Lot 4 Tâche 1 Livrable 1: Conclusion and recommendations from the ANODE project. Document public, version 3. 27p.

Moreau N, Mas E, Brel A, Langlade G. 2019. Bloc Marine 2020 - Manche Atlantique, guide nautique du plaisancier, cartographie marine et plans des ports. 56^{ème} éd. Vernouillet. *Figaro Nautisme*. 912 p.

Nebout T, 2021. Port de Saint-Malo : Suivi environnemental-Pose d'anodes sacrificielles. IDRA Bio & Littoral, rapport d'étude n°5. Région Bretagne (document interne). 20 p.

Nguimgou Signing B. 2017. Evaluation de la toxicité de deux lanthanides (La et Ce) chez les algues vertes unicellulaires à l'aide d'une source organique de phosphore. Mémoire de maîtrise en sciences de l'eau. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique. 102 p. URL : <http://espace.inrs.ca/id/eprint/6530/1/T00841.pdf>

Parant L. 2012. La corrosion, un fléau pour les navires. Dossier technique, production maintenance. *Maintenance and co*. p.25-28. URL : https://www.maintenanceandco.com/files/avis_experts/La_corrosion_un_fleau_pour_les_navires_janvier_2012.pdf

Parc du Banc de Guérande. 2015. Parc éolien en mer au large de Saint- Nazaire (Parc du Banc de Guérande) et raccordement au réseau électrique (RTE). Précisions suite à l'avis de l'Autorité environnementale. 40 p. URL : http://www.prosimar.org/EP%20eole/Memoire_reponse_AvisAE_20juillet2015.pdf

Perez-Benito JF. 2006. Effects of chromium(VI) and vanadium(V) on the lifespan of fish. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. Vol 20, n° 3, p.161-170. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2006.04.001>

Pineau S, Mao A, Masson D, Cruzillac J, Caplat C. 2011. Transfert d'éléments constitutifs d'anodes sacrificielles Al-In vers l'environnement. Rapport 5^{èmes} journées d'Aix de la Protection Cathodique-Théorie et pratique pour tous secteurs d'application. 11 p. URL : http://www.accoast.fr/images/publications/Article_Aix_2011_impact_anodes.pdf

Ramírez L, Fraile D, Brindley G. 2019. Offshore Wind in Europe. Key trends and statistics 2019. *WindEurope*. 38 p. <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2019.pdf>

Reese A, Voigt N, Zimmermann T, Irrgeher J, Pröfrock D. 2020. Characterization of alloying components in galvanic anodes as potential environmental tracers for heavy metal emissions from offshore wind structures. *Chemosphere*. Vol 257, 10 p. URL : <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127182>

Région Hauts-de-France, 2018. Demande d'autorisation formulée au titre de la loi sur l'eau de Travaux de protection anticorrosion des parties métalliques des ouvrages du site

portuaire de Boulogne-sur-Mer. Rapport d'enquête publique. 41 p. URL : <https://www.pas-de-calais.gouv.fr/content/download/32439/212558/file/RAPPORT%20FINALTravaux%20de%20protection%20anticorrosion%20site.pdf>

Sciortino J.A. 1996. Construction et entretien des petits ports de pêche et débarcadères de village. *Collection FAO: Formation*. n° 25, chap 8. ISBN 92-5-203609-1. URL : <http://www.fao.org/3/v5270f/v5270f00.htm>

Seine-Maritime.gouv.2018. Parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport. Mémoire en réponse du maître d'ouvrage au procès-verbal de la commission d'enquête du 10/12/2018. 184 p. URL : https://www.seine-maritime.gouv.fr/content/download/33152/227714/file/MER_EMDT_PV-Commission%20et%20annexes_VF.pdf

Sire A, Amouroux I.2016. Avantages et limites du recours aux BCF - BAF pour produire des VGE mollusques équivalentes aux NQE définies dans l'eau (DCE 2013/39/UE). ONEMA, Ref : RBE/BE/ARC-16.02. 9 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00333/44379/>

Travers M-A.2008. Interaction de la bactérie *Vibrio harveyi* avec son hôte, l'ormeau *Haliotis tuberculata* : approches physiologiques, cellulaires et moléculaires. Thèse de microbiologie : Université de Bretagne occidentale-Brest. 266 p. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00176/28729/>

Tribunal Administratif de Rennes .2016. « Projet de construction d'un parc éolien en mer en baie de Saint Brieuc ». Enquête publique unique .Ordonnance du Tribunal Administratif de Rennes du 28 juin 2016 - N° E16000187/35. 80 p. URL : <http://gardezlescaps.org/wp-content/uploads/2014/10/2017-01-05-AM-PARTIE-2-CONCLUSIONS-ET-AVIS.pdf>

Wajsbrodt S. 2021. « Eolien en mer : la France tente un nouveau départ ». *Les Echos*. URL : <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/eolien-en-mer-la-france-tente-un-nouveau-depart-1310105>.

Zyadah M, Abdel-Baky T. 2000. Toxicity and Bioconcentration of Copper, Zinc, and Cadmium in Some Aquatic Organisms. *Environmental contamination and toxicology*. Vol 64, p.740-747. DOI : [10.1007/s001280000066](https://doi.org/10.1007/s001280000066)

Sitographie :

Cathwell. 2021. Aluminium vs. zinc anodes. [En ligne]. Disponible sur : <https://cathwell.com/aluminium-vs-zinc-anodes/#:~:text=Avantages%20of%20aluminium%20anodes&text=Capacity%3A%20The%20electrochemical%20capacity%20is,for%20aluminium%20alloyed%20sacrificial%20anodes.&text=This%20means%20that%20it%20provides,the%20current%2C%20compared%20with%20zinc>. Consulté le 25/03/2021.

Annexes

Annexe I : Liste des contacts ayant participé à l'étude sur l'utilisation des anodes galvaniques en milieu maritime.

Port	Nom du contact	Coordonnées
Boulogne pêche	Mr Bruchet, Chef du Service Maintenance de Boulogne	Tel : 03 21 99 66 59 GAUTHIER.BRUCHET@portboulognecalais.fr
Boulogne plaisance	Mr Sylvain, Responsable VRD service technique plaisance	Tel : 03 21 10 36 36 Communauté d'Agglomération du Boulonnais
Roscoff commerce, plaisance	Mr Stéphane Carre, Directeur des ports – commerce – plaisance	Tel : 02 98 61 27 85 Stephane.CARRE@bretagne-ouest.cci.bzh
Etaples	Mr Guillaume Routier, Responsable technique port d'Étaples	routier.guillaume@pasdecals.fr
Dinan	Mr Damien Vincent, Maitre de port	Tel : 06 11 43 51 52 port@dinan.fr
Dinard	Mr Galland, Technicien mairie de Dinard	Tel : 06 84 93 52 06
Dunkerque commerce	Mr Frédéric Marechal, Responsable maintenance infrastructure	Tel : 03 28 28 76 17 fmarechal@PortdeDunkerque.fr
Gravelines	Mr Pascal De Corte	p.decorte@ville-gravelines.fr
Légué	Mr Laurent Kernivinen Responsable d'exploitation ports de commerce & réparation navale Mr Nicolas Desbois Responsable Réparation Navale Saint-Brieuc - Le Légué	Tel : 02 96 68 93 21 laurent.kernivinen@cotesdarmor.cci.fr Tel : 06 76 33 56 66 nicolas.desbois@cotesdarmor.cci.fr
Évaluation des effets potentiels des métaux libérés par les anodes galvaniques sur l'ormeau <i>Haliotis tuberculata</i> . Nivelais Laureen- Septembre 2021		

Saint-Cast / Saint-Quay	Mr Nicolas Desbois Responsable Réparation Navale Saint-Brieuc - Le Légué	Tel : 06 76 33 56 66 nicolas.desbois@cotesdarmor.cci.fr
Saint-Malo plaisance	Mr Yann Scoubart, Responsable technique port des Sablons	Tel : 06 22 16 23 34 yscoubart@saint-malo.fr
Saint-Malo Cancalle port de commerce	Mr Fabrice Videau Responsable maintenance des outillages portuaires	Tel : 02 99 20 51 00 Fabrice.Videau@saintmalo-cancalle.port.bzh
Saint-Vaast-la- Hougue, Barfleur, La Hague	Mr Florent Duloir, Maitre de port	Tel : 07 72 50 29 77 florent.duloir@ports-manche.fr
Tréguier	Mme Tiphenn Le Bitoux, Agent de port	Tel : 06 45 59 45 17 tiphenn.lebitoux@gmail.com
Tréport /Fécamp/Le havre	Mr Didier Jegoud, Chef du Service des Ports Départementaux, Direction des Ports Départementaux, Bacs et Voies Vertes	Tel : 02.35.28.23.76 didier.jegou@seinemaritime.fr
Grandcamp- Maisy/ Port en Bessin /Dives/ Deauville / Honfleur / Courseulles sur mer	Mr Nathanaël Delporte, Responsable ingénierie portuaire	Tel : 02 31 57 15 51 Nathanael.DELPORTE@calvados.fr
Granville / Goury / Barneville	Mr Laurent Clergeau, Responsable ingénierie portuaire au département	Tel : 06 14 80 51 47 Laurent.clergeau@manche.fr
Rouen plaisance	Agent du port	Tel : 07 61 03 66 18
Dieppe	Mr Josselin Derrien Responsable unités techniques de Dieppe	Tel : 02.32.14.47.14 josselin.derrien@portsdenormandie.fr
Cherbourg/ Caen	Mr Philippe Hubert Responsable Aménagement et Programmation des Investissements et Management Environnemental	Tel : 02.31.53.64.52 / 06.73.60.69.15

Autres contacts		
Société d'installation anode BAC	Mr Jérôme Cruzillac Directeur France BAC	Tel : 01 30 57 45 67 j.cruzillac@bacfrance.com
Société d'installation anode BAC	Mr Alexandre Denis Ingénieur d'étude	Tel : 06 33 95 87 03 a.denis@bacfrance.com
Conseil Régional de Bretagne	Mme Nadège Pennors	Tel : 02 90 09 16 06 nadege.pennors@bretagne.bzh
Société ACCOAST	Mr Samuel Pineau Directeur ACCOAST	Tél : 02 97 73 88 62 samuel.pineau@accoast.fr

Annexe II : Questionnaire envoyé aux gestionnaires des ports concernant l'installation des anodes galvaniques sur les structures portuaires.

Nivelais Laureen-2021

Étude sur l'utilisation des anodes galvaniques au sein des ports

Contexte :

Dans le cadre de mon stage de fin d'étude, une étude expérimentale a été lancée au Smel (synergie mer et littoral, Blainville-sur-mer) afin d'étudier l'effet potentiel des métaux libérés par les anodes galvaniques sur les organismes marins tels que les ormeaux. Répertorier le nombre et les types d'anodes galvaniques installés sur les structures portuaires permettrait alors de déterminer l'intensité du risque potentiel de contamination pour les organismes marins dans leur milieu naturel.

Questions :

- Existe-t-il des systèmes de protection d'anode galvanique sur les structures portuaires et maritimes du port dont vous avez la gestion ?
- Si oui, quel est le type d'anode utilisé (type d'alliage) ?
- Sur quelles structures ces anodes sont-elles utilisées (quai, pieux, palplanche...) ?
- Quelle est la quantité (nombre et/ou masse) d'anode utilisée sur ces structures (répartition par structure si possible) et pour quelle durée ?

Merci de votre participation

Annexe III : Caractéristiques des DGT LSNM et LSNX.



LSNM-NP Loaded DGT device for metals (A) in solution

Type:	LSNM-NP
Measurable analytes:	Al, Ca, Cd, Co, Cr(III), Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn, U, REEs
Holder:	Standard DGT holder
Filter :	Polyethersulphone membrane (thickness: 0.14 mm)
Diffusive gel:	0.8 mm APA diffusive gel (0.4 – 2.0 mm available on request)
Binding layer:	Chelex (iminodiacetate)

Water types

Freshwater through to seawater

Limiting conditions (LSNM-NP (Chelex) Specific)

pH: the recommended pH range is 5 to 9, but strong binding metal such as Pb and Cu are quantitative down to pH 2.

Ionic strength: the recommended range is 1 to 700 mM. Control tests, where devices are deployed in known solutions with the same ionic strength as the field solution, should be performed for waters with ultra low ionic strengths (< 1 mmol L⁻¹).

Binding limitations: Weakly binding cations, such as Ca and Mg, can usually only be measured using short deployment times of a day. A TiO₂ binding agent gives better performance for determining U, but Chelex will work.

Deployment time: Optimum deployment time depends on the quantification limits of the analytical technique used to determine analyte concentrations. Deployment times between 3 and 21 days are generally optimal. If the concentrations of the metals are low (less than a few micrograms per litre), as in an offshore marine environment, and there is no indication of biofilm growth on the surface of the devices, longer deployment times may be appropriate.

Organic complexes: Care should be taken in waters with a high quantity of organic complexes to ensure the longer equilibrium time to reach steady state accumulation does not affect the results.

Storage

Store the units in a refrigerator (4°C), but avoid freezing them as performance can be affected. The DGT units provided are kept in the sealed clean plastic bags containing a few drops of 0.01M NaNO₃ (or 0.01M NaCl) solution. Do not open them until immediately prior to deployment. Check the units about once a week to make sure they are under moist conditions. Add a few more drops of trace metal clean 0.01M NaNO₃ (or 0.01M NaCl) solution if it is necessary.

Handling

The main consideration when using DGT devices is to prevent contamination of the sample. Clean handling procedures should be adopted during deployment and recovery of the DGT devices and all subsequent handling during the sample treatment step. In general, the highest quality reagents should be used and all equipment and laboratory apparatus cleaned appropriately.

DGT Research Ltd

Skelmorlie, Bay Horse Rd, Quernmore, Lancaster, Lancashire, LA2 0QJ
Phone : +44 (1524) 593899, 2nd Phone : 01524 751451
Email : info@dgtresearch.com

1

LSNX-NP Loaded DGT device for metals and phosphate in solution

Type:	LSNX-NP
Measurable analytes:	Al, Ca, Cd, Co, Cr(III), Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn, U, REEs, As(III), As(V), Mo(VI), P(V), Sb(V), Se?, V(V), W(VI), glyphosate
Holder:	Standard DGT holder
Filter :	Polyethersulphone membrane (thickness: 0.14 mm)
Diffusive gel:	0.8 mm APA diffusive gel
Binding layer:	Chelex (iminodiacetate) and TiO ₂ (Metsorb) mixture

Water types and Limiting Conditions

Appropriate waters: Suitable for freshwater through to seawater. pH: recommended range is 5 to 8.5, but strong binding metals such as Pb and Cu are quantitative down to pH 2. Ionic strength: recommended range 1 to 700 mM. Can be used at lower ionic strengths, but as there is a possibility of gel charge affecting performance, control tests at low ionic strength are then advised.

Binding limitations: Weakly binding cations, such as Ca and Mg, can usually only be measured using short deployment times of a day. Measurement of Mo in seawater is not recommended unless very short deployment times of <24 hours are used. Measurement of Se is not straight forward: Se(IV) binds quantitatively, but Se(VI) binds inefficiently. Consequently total Se and Se(IV) cannot be estimated accurately unless the proportion of Se(VI) present in solution is low (Bennett et al, 2010).

Deployment time: Optimum deployment time depends on analyte concentrations as longer times increases sensitivity. Deployment times between 3 and 21 days are generally optimal, but shorter times of a day can be used (see FAQs). If the concentrations of the metals are low (less than a few micrograms per litre), as in an offshore marine environment, and there is no indication of biofilm growth on the surface of the devices, longer deployment times may be appropriate.

Organic complexes: Care should be taken in waters with a high quantity of organic complexes to ensure the longer equilibrium time to reach steady state accumulation does not affect the results.

Measured species: All species in solution for the specified oxidation states, within the given pH and ionic strength ranges. For P the dominant forms are the various protonation states of phosphate, which is considered to be the analyte measured in most cases. Total As in solution, that is As(III) + As(V), is measured by LSNX-NP. A separate DGT device with a different binding layer is available for the selective measurement of As(III) (LSNB-AP). DGT with a TiO₂ binding layer has been used successfully for measuring glyphosate. See the publication on this by Fauvelle et al (2015).

Storage

Store the DGTs in a refrigerator (4°C). Do not freeze. They are provided in sealed clean plastic bags containing a few drops of 0.01M NaNO₃ (or 0.01M NaCl) solution. Do not open them prior to deployment. Check the units about once a week to ensure they are moist. Add a few more drops of trace-metal-clean 0.01M NaNO₃ (or 0.01M NaCl) solution if it is necessary.

Handling

The main consideration when using DGT devices is to prevent contamination of the sample. Clean handling procedures should be adopted during deployment and recovery of the DGT devices and all subsequent handling during the sample treatment step. In general, the highest quality reagents should be used and all equipment and laboratory apparatus cleaned appropriately.

DGT Research Ltd

Skelmorlie, Bay Horse Rd, Quernmore, Lancaster, Lancashire, LA2 0QJ
Phone : +44 (1524) 593899, 2nd Phone : 01524 751451
Email : info@dgtresearch.com

1

Annexe IV : Suivi des concentrations ($\mu\text{g.L}^{-1}$) en aluminium et en zinc dans l'eau des bacs ormeaux.

Concentration en aluminium ($\mu\text{g.L}^{-1}$) dans les bacs ormeaux 20mm :

LD Al = $8 \mu\text{g.L}^{-1}$

Condition	Date	Ti1	Ti2	R1	R2	R3
Bac Témoin	01/04/2021	11,4	11,8	8,0	4,8	2,4
Bac Témoin	02/04/2021	1,8	2,5	-	5,4	1,6
Bac Témoin	14/04/2021	<LD	-	<LD	-	-
Bac Témoin	15/04/2021	<LD	-	10,1	-	-
Bac Témoin	16/04/2021	-	3,7	2,8	-	-
Bac Témoin	21/04/2021	-	-	<LD	-	-
Bac Témoin	22/04/2021	<LD	14,3	<LD	<LD	<LD
Bac Témoin	23/04/2021	<LD	2,5	<LD	<LD	<LD
Bac Témoin	05/05/2021	-	-	<LD	-	-
Bac Témoin	14/05/2021	-	-	20,7	-	-
Bac Témoin	21/05/2021	-	-	<LD	-	-
Bac Témoin	28/05/2021	-	-	-	-	-
Bac Témoin	21/06/2021	-	-	8,8	-	-
Bac Témoin	22/06/2021	5,8	9,0	-	-	-
Bac Témoin	23/06/2021	7,7	8,6	-	-	-

Ti = témoin ingestion R = réplica

Condition	Date	Ti1	Ti2	R1	R2	R3
Bac 100	24/03/2021	-	-	-	-	-
Bac 100	01/04/2021	49,3	-	38,6	62,8	61,4
Bac 100	02/04/2021	53,7	-	75,1	61,6	69,7
Bac 100	14/04/2021	-	-	46,4	-	-
Bac 100	15/04/2021	40,3	-	30,8	-	-
Bac 100	16/04/2021	27,6	-	29,7	-	-
Bac 100	21/04/2021	-	-	79,3	-	-
Bac 100	22/04/2021	69,2	-	55,4	49,7	27,6
Bac 100	23/04/2021	63,0	-	66,4	52,1	103,2
Bac 100	05/05/2021	-	-	71,5	-	-
Bac 100	14/05/2021	-	-	-	-	-
Bac 100	21/05/2021	-	-	65,7	-	-
Bac 100	28/05/2021	-	-	54,6	-	-
Bac 100	04/06/2021	-	-	72,0	-	-
Bac 100	11/06/2021	-	-	88,9	-	-
Bac 100	21/06/2021	-	-	145,0	-	-
Bac 100	22/06/2021	118,1	-	111,7	120,7	122,5
Bac 100	23/06/2021	115,6	-	138	122,4	99,1

Évaluation des effets potentiels des métaux libérés par les anodes galvaniques sur l'ormeau *Haliotis tuberculata*.
Nivelais Laureen- Septembre 2021

Condition	Date	Ti1	Ti2	R1	R2	R3
Bac 300	24/03/2021	-	-	-	-	-
Bac 300	01/04/2021	127,1	-	110,3	120,8	123,8
Bac 300	02/04/2021	125,6	-	111,2	121,8	109,1
Bac 300	14/04/2021	-	-	144,6	-	-
Bac 300	15/04/2021	95,6	-	107,4	-	-
Bac 300	16/04/2021	90,5	-	95,7	-	-
Bac 300	21/04/2021	-	-	169,0	-	-
Bac 300	22/04/2021	114,5	-	100,5	96,2	114,2
Bac 300	23/04/2021	121,3	-	105,5	129,1	122,5
Bac 300	05/05/2021	-	-	-	-	-
Bac 300	14/05/2021	-	-	269,2	-	-
Bac 300	21/05/2021	-	-	225,8	-	-
Bac 300	28/05/2021	-	-	225,1	-	-
Bac 300	04/06/2021	-	-	225,8	-	-
Bac 300	11/06/2021	-	-	205,0	-	-
Bac 300	21/06/2021	-	-	256,7	-	-
Bac 300	22/06/2021	225,6	-	228,3	248,4	247,4
Bac 300	23/06/2021	205,7	-	208,0	207,3	205,8

Condition	Date	Ti1	Ti2	R1	R2	R3
Bac 900	24/03/2021	-	-	-	-	-
Bac 900	01/04/2021	408,1	-	355,6	244,8	249,7
Bac 900	02/04/2021	395,0	-	278,2	184,0	200,2
Bac 900	14/04/2021	-	-	750,3	-	-
Bac 900	15/04/2021	445,0	-	315,4	-	-
Bac 900	16/04/2021	449,5	-	287,0	-	-
Bac 900	21/04/2021	-	-	866,0	-	-
Bac 900	22/04/2021	406,7	-	388,8	324,9	310,0
Bac 900	23/04/2021	460,0	-	242,7	282,3	307,4
Bac 900	05/05/2021	-	-	919,7	-	-
Bac 900	14/05/2021	-	-	-	-	-
Bac 900	21/05/2021	-	-	694,4	-	-
Bac 900	28/05/2021	-	-	763,7	-	-
Bac 900	04/06/2021	-	-	661,0	-	-
Bac 900	11/06/2021	-	-	769,0	-	-
Bac 900	21/06/2021	-	-	1301,3	-	-
Bac 900	22/06/2021	452,6	-	452,6	685,2	663,9
Bac 900	23/06/2021	424,1	-	445,0	448,0	467,4

Condition	Date	Ti1	Ti2	R1	R2	R3
Bac 2700	24/03/2021	-	-	-	-	-
Bac 2700	01/04/2021	627,4	-	240	157,8	352,8
Bac 2700	02/04/2021	560,8	-	-	-	565,9
Bac 2700	14/04/2021	-	-	1852	-	-
Bac 2700	15/04/2021	324,3	-	168	-	-
Bac 2700	16/04/2021	193,8	-	101	-	-
Bac 2700	21/04/2021	-	-	2682	-	-
Bac 2700	22/04/2021	534	-	277	208	446
Bac 2700	23/04/2021	729,9	-	316	303	383
Bac 2700	05/05/2021	-	-	2405	-	-
Bac 2700	14/05/2021	-	-	957	-	-
Bac 2700	21/05/2021	-	-	2385	-	-
Bac 2700	28/05/2021	-	-	2139	-	-
Bac 2700	04/06/2021	-	-	2416	-	-
Bac 2700	11/06/2021	-	-	2214	-	-
Bac 2700	21/06/2021	-	-	3798	-	-
Bac 2700	22/06/2021	2245	-	440	1831	2305
Bac 2700	23/06/2021	1448	-	508	711	201

Condition	Date	Ti1	Ti2	R1	R2	R3
Bac Témoin trophique	24/03/2021	-	-	-	-	-
Bac Témoin trophique	01/04/2021	-	-	5,6	4,2	10,8
Bac Témoin trophique	02/04/2021	-	-	14,9	5,4	4,5
Bac Témoin trophique	15/04/2021	-	-	20,1	-	-
Bac Témoin trophique	16/04/2021	-	-	13,2	-	-
Bac Témoin trophique	21/04/2021	-	-	?	-	-
Bac Témoin trophique	22/04/2021	-	-	31,5	49,4	53,0
Bac Témoin trophique	23/04/2021	-	-	31,2	31,1	69,2
Bac Témoin trophique	05/05/2021	-	-	-	-	-

Concentration en zinc ($\mu\text{g.L}^{-1}$) dans les bacs ormeaux 20mm :

LD Zn = $3.0 \mu\text{g.L}^{-1}$

Condition	Date	Ti1	Ti2	R1	R2	R3
Bac Témoin	01/04/2021	9,7	9,1	9,2	9,7	9,7
Bac Témoin	02/04/2021	7,5	7,8	10,5	9,2	10,2
Bac Témoin	14/04/2021	-		6,3	-	-
Bac Témoin	15/04/2021	8,4	9,2	8,7	-	-
Bac Témoin	16/04/2021	20,4	7,5	10,2	-	-
Bac Témoin	21/04/2021	-		11,1	-	-
Bac Témoin	22/04/2021	11,9	9,1	12,6	10,4	11,4
Bac Témoin	23/04/2021	14,8	13,5	16,2	14,3	16,2
Bac Témoin	05/05/2021	-		13,0	-	-
Bac Témoin	14/05/2021	-		12,9	-	-

Condition	Date	Ti1	R1	R2	R3
Bac 100	01/04/2021	12,0	13,3	12,3	12,9
Bac 100	02/04/2021	13,0	12,4	11,4	11,1
Bac 100	14/04/2021	-	11,9	-	-
Bac 100	15/04/2021	9,5	14,1	-	-
Bac 100	16/04/2021	10,0	12,3	-	-
Bac 100	21/04/2021	17,5	-	-	-
Bac 100	22/04/2021	14,9	17,1	17,2	17,7
Bac 100	23/04/2021	11,8	13,3	15,2	16,3
Bac 100	05/05/2021	-	14,3	-	-
Bac 100	14/05/2021	-	18,4	-	-

Condition	Date	Ti1	R1	R2	R3
Bac 300	01/04/2021	13,8	14,0	15,7	14,1
Bac 300	02/04/2021	12,9	14,0	13,8	12,0
Bac 300	14/04/2021	-	21,3	-	-
Bac 300	15/04/2021	10,5	13,9	-	-
Bac 300	16/04/2021	10,0	14,3	-	-
Bac 300	21/04/2021	-	21,5	-	-
Bac 300	22/04/2021	15,4	17,5	16,5	17,2
Bac 300	23/04/2021	10,5	15,2	14,7	15,7
Bac 300	05/05/2021	-	23,2	-	-
Bac 300	14/05/2021	-	21,9	-	-

Condition	Date	Ti1	R1	R2	R3
Bac 900	01/04/2021	25,7	27,9	21,1	19,1
Bac 900	02/04/2021	19,4	18,8	17,1	15,8
Bac 900	14/04/2021	-	40,8	-	-
Bac 900	15/04/2021	16,9		-	-
Bac 900	16/04/2021	14,5	20,4	-	-
Bac 900	21/04/2021	-	45,5	-	-
Bac 900	22/04/2021	22,4	25,4	22,0	21,6
Bac 900	23/04/2021	13,8	21,2	19,9	24,2
Bac 900	05/05/2021	-	42,7	-	-
Bac 900	14/05/2021	-	47,1	-	-

Condition	Date	Ti1	R1	R2	R3
Bac 2700	01/04/2021	23,6	28,9	29,4	31,1
Bac 2700	02/04/2021	18,3	20,3	23,6	20,9
Bac 2700	14/04/2021	-	98,1	-	-
Bac 2700	15/04/2021	29,6	30,1	-	-
Bac 2700	16/04/2021	23,5	27,4	-	-
Bac 2700	21/04/2021	-	109,6	-	-
Bac 2700	22/04/2021	22,1	35,7	27,2	35,3
Bac 2700	23/04/2021	21,3	30,2	25,9	22,1
Bac 2700	05/05/2021	-	121,1	-	-
Bac 2700	14/05/2021	-	126,6	-	-

Condition	Date	R1	R2	R3
Bac Témoin trophique	01/04/2021	10,9	9,8	10,4
Bac Témoin trophique	02/04/2021	10,3	10,5	10,9
Bac Témoin trophique	15/04/2021	11,4	-	-
Bac Témoin trophique	16/04/2021	11,3	-	-
Bac Témoin trophique	22/04/2021	11,9	11,7	12,4
Bac Témoin trophique	23/04/2021	12,4	11,4	12,6

Concentration en aluminium ($\mu\text{g.L}^{-1}$) dans les bacs ormeaux 50mm :

LD Al = $8 \mu\text{g.L}^{-1}$

R= réplica

Condition	Date	R1	R2	R3
Bac Témoin	24/03/2021	<LD	-	-
Bac Témoin	25/03/2021	1,6	1,1	2,1
Bac Témoin	26/03/2021	1,6	<LD	-
Bac Témoin	28/04/2021	<LD	-	-
Bac Témoin	29/04/2021	<LD	<LD	<LD
Bac Témoin	30/04/2021	<LD	<LD	<LD

Condition	Date	R1	R2	R3
Bac 100	24/03/2021	91,3	-	-
Bac 100	25/03/2021	35,6	35,5	37,7
Bac 100	26/03/2021	43,3	43,5	44,4
Bac 100	28/04/2021	37,7	-	-
Bac 100	29/04/2021	30,5	48,2	51,7
Bac 100	30/04/2021	28,1	47,9	57,4

Condition	Date	R1	R2	R3
Bac 300	24/03/2021	-	-	-
Bac 300	25/03/2021	88,2	91,1	105,8
Bac 300	26/03/2021	118	83,2	111,5
Bac 300	15/04/2021	78,3	-	-
Bac 300	16/04/2021	123	-	-
Bac 300	28/04/2021	156	-	-
Bac 300	29/04/2021	118	130,3	127,5
Bac 300	30/04/2021	133	130,0	141,2
Bac 300	14/06/2021	-	-	-
Bac 300	15/06/2021	348	403	414
Bac 300	16/06/2021	335	390	330

Condition	Date	R1	R2	R3
Bac 900	24/03/2021	904	-	-
Bac 900	25/03/2021	201	212,8	299,8
Bac 900	26/03/2021	154	170,8	167,5
Bac 900	15/04/2021	201	-	-
Bac 900	16/04/2021	315	-	-
Bac 900	16/06/2021	840	436	552

Évaluation des effets potentiels des métaux libérés par les anodes galvaniques sur l'ormeau *Haliotis tuberculata*.
Nivelais Laureen- Septembre 2021

Condition	date	R1	R2	R3
Bac 2700	24/03/2021	2670	-	-
Bac 2700	25/03/2021	168,2	253,3	-
Bac 2700	26/03/2021	257,8	377,7	-
Bac 2700	15/04/2021	337,8	-	-
Bac 2700	16/04/2021	264,3	-	-
Bac 2700	28/04/2021	1194	-	-
Bac 2700	29/04/2021	161,2	113,8	141,9
Bac 2700	30/04/2021	111,2	525,6	280,5

Concentration en zinc ($\mu\text{g.L}^{-1}$) dans les bacs ormeaux 50mm :

LD Zn = $3.0 \mu\text{g.L}^{-1}$

Condition	Date	R1	R2	R3
Bac Témoin	24/03/2021	8,5	-	-
Bac Témoin	25/03/2021	10,8	10,9	10,3
Bac Témoin	26/03/2021	10,5	11,1	11,1
Bac Témoin	15/04/2021	10,1	11,1	-
Bac Témoin	16/04/2021	10,5	-	-
Bac Témoin	28/04/2021	8,5	-	-
Bac Témoin	29/04/2021	9,2	10,0	9,8
Bac Témoin	30/04/2021	9,7	11,1	10,0

Condition	date	R1	R2	R3
Bac 100	24/03/2021	11,8	-	-
Bac 100	25/03/2021	8,2	8,0	7,1
Bac 100	26/03/2021	9,7	11,2	9,5
Bac 100	15/04/2021	8,8	-	-
Bac 100	16/04/2021	7,7	-	-
Bac 100	28/04/2021	9,1	-	-
Bac 100	29/04/2021	11,0	9,4	10,7
Bac 100	30/04/2021	9,4	10,4	10,1

Condition	Date	R1	R2	R3
Bac 300	24/03/2021	29,9	-	-
Bac 300	25/03/2021	13,6	13,1	13,3
Bac 300	26/03/2021	13,5	13,2	11,7
Bac 300	15/04/2021	12,5	-	-
Bac 300	16/04/2021	12,2	-	-
Bac 300	28/04/2021	20,9	-	-
Bac 300	29/04/2021	15,4	16,9	16,3

Évaluation des effets potentiels des métaux libérés par les anodes galvaniques sur l'ormeau *Haliotis tuberculata*.
Nivelais Laureen- Septembre 2021

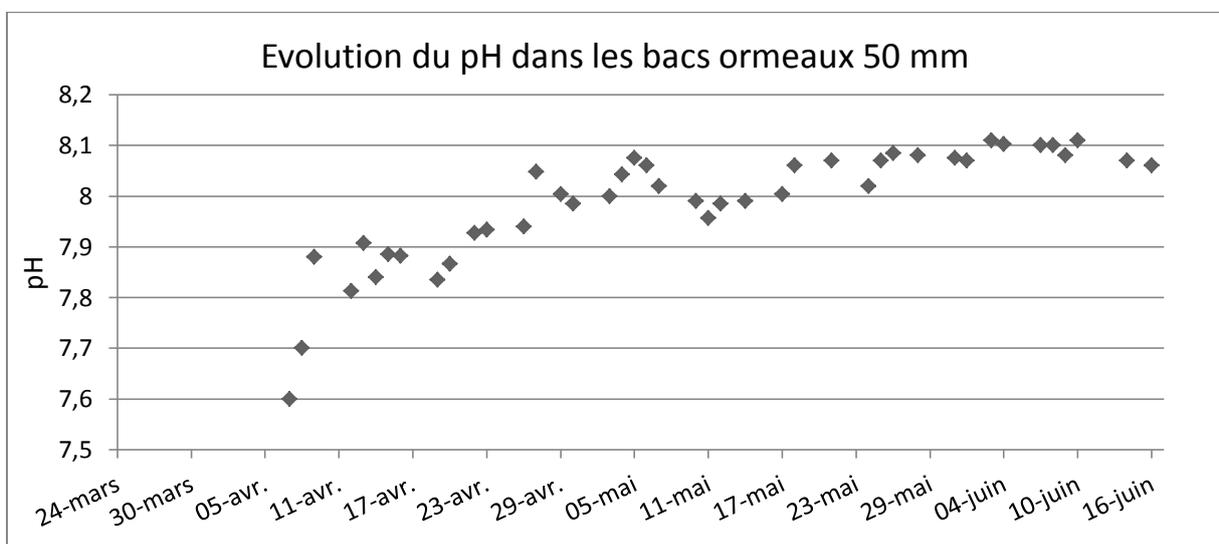
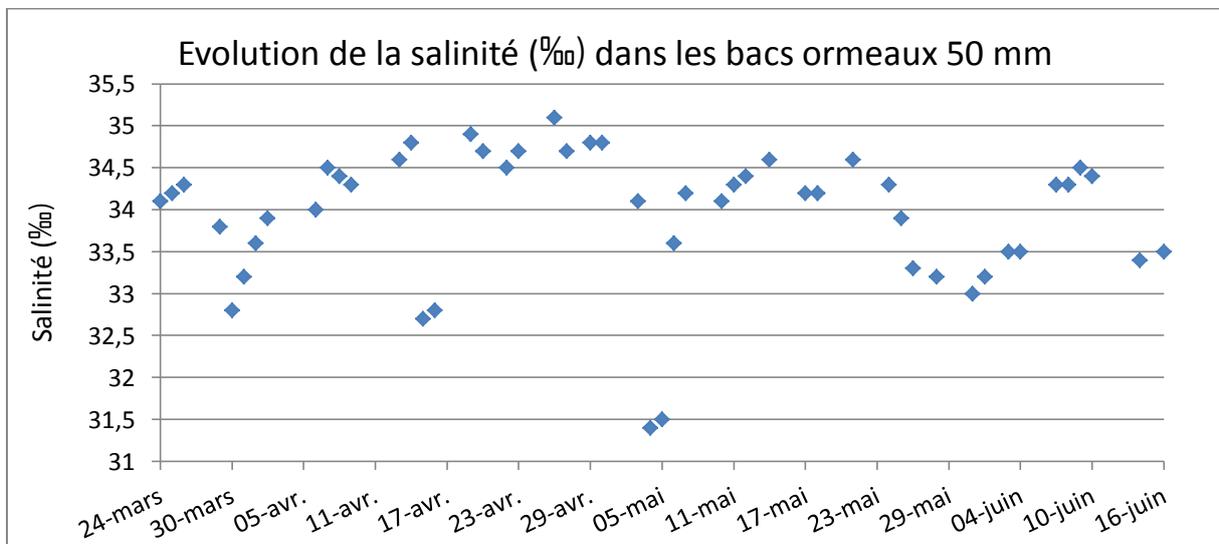
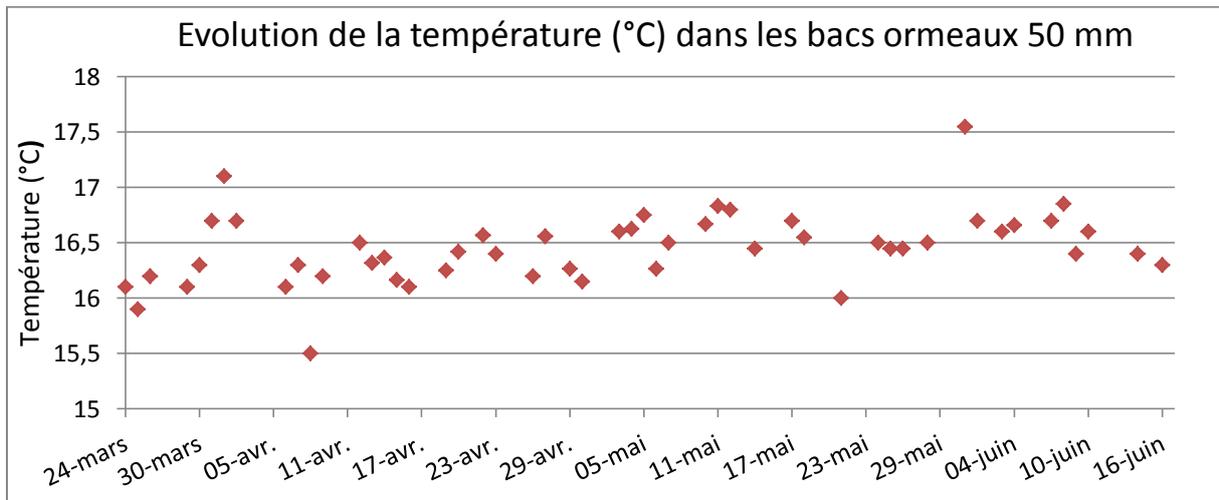
Bac 300	30/04/2021	14,1	15,5	14,1
---------	------------	------	------	------

Condition	Date	R1	R2	R3
Bac 900	24/03/2021	50,1	-	-
Bac 900	25/03/2021	20,7	20,2	19,0
Bac 900	26/03/2021	24,6	18,2	17,4
Bac 900	15/04/2021	20,9	-	-
Bac 900	16/04/2021	17,3	-	-
Bac 900	28/04/2021	44,1	-	-
Bac 900	29/04/2021	25,2	21,6	25,2
Bac 900	30/04/2021	21,7	18,2	20,6

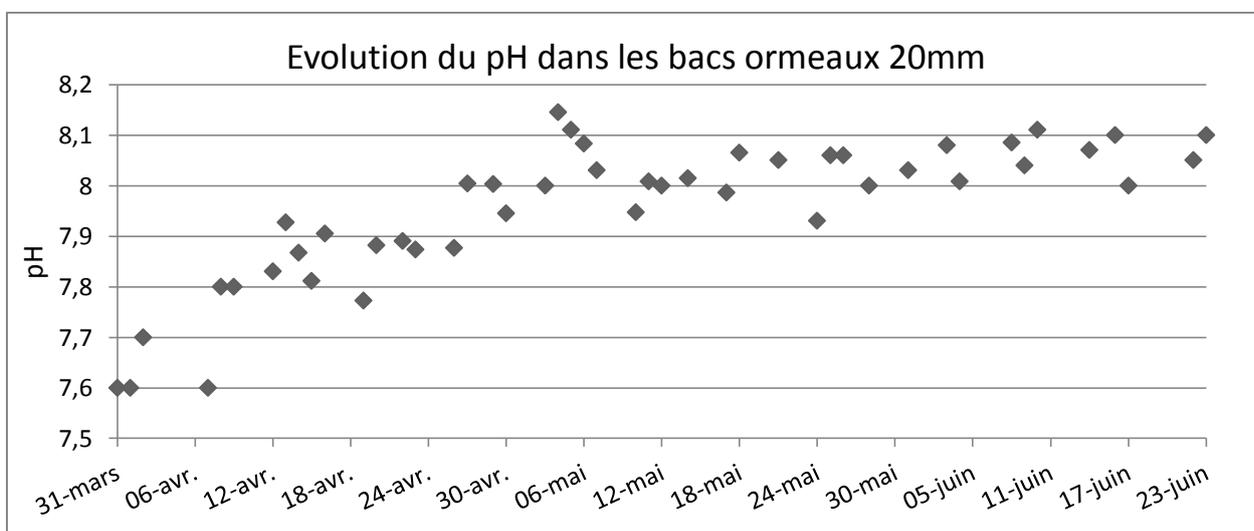
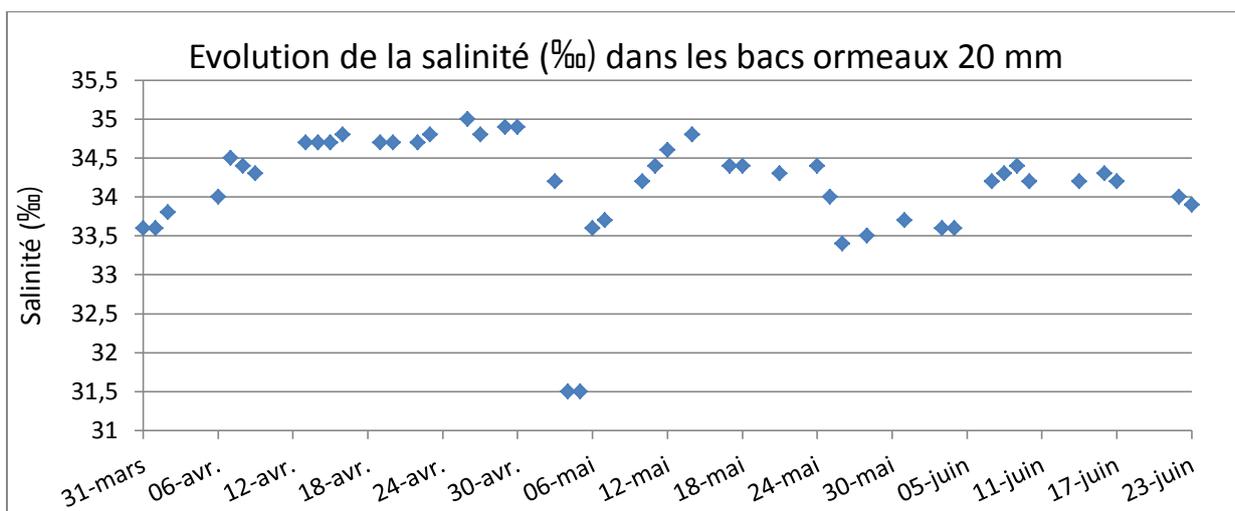
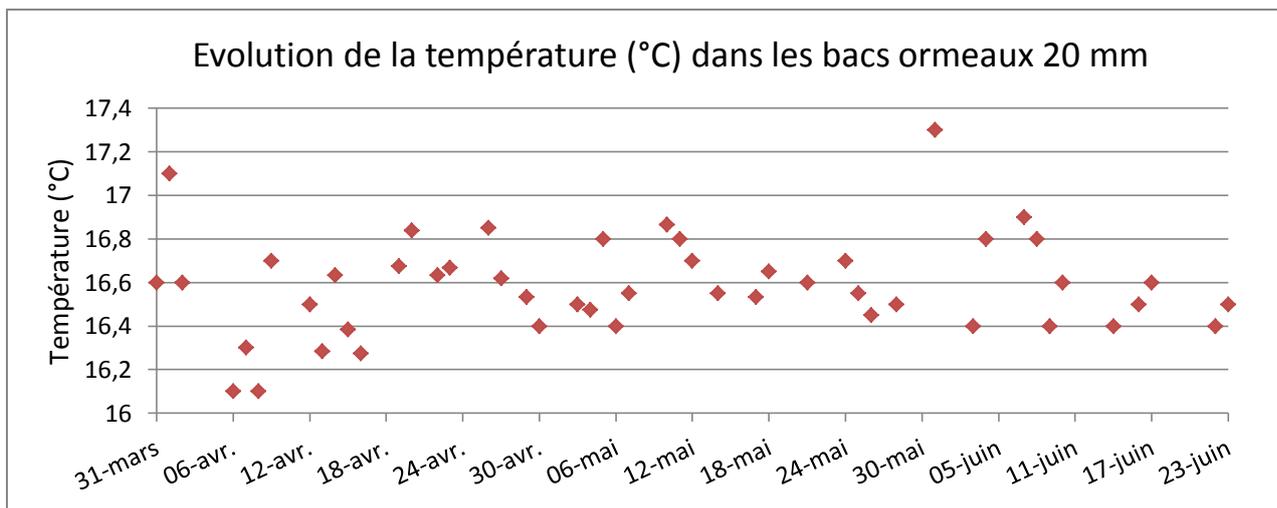
Condition	Date	R1	R2	R3
Bac 2700	24/03/2021	130,9	-	-
Bac 2700	25/03/2021	23,9	23,8	26,3
Bac 2700	26/03/2021	24,4	28,5	25,6
Bac 2700	15/04/2021	37,0	-	-
Bac 2700	16/04/2021	31,1	-	-

Condition	Date	R1	R2	R3
Bac Témoin trophique	24/03/2021	-	-	-
Bac Témoin trophique	25/03/2021	8,7	9,0	8,7
Bac Témoin trophique	26/03/2021	9,5	11,0	9,5
Bac Témoin trophique	15/04/2021	9,5	-	-
Bac Témoin trophique	16/04/2021	13,8	-	-
Bac Témoin trophique	28/04/2021	-	-	-
Bac Témoin trophique	29/04/2021	9,1	9,5	10,2
Bac Témoin trophique	30/04/2021	9,8	10,4	9,6

Annexe V : Suivi des températures, de la salinité et du pH des bacs ormeaux au cours des 12 semaines d'expérimentation.



Évaluation des effets potentiels des métaux libérés par les anodes galvaniques sur l'ormeau *Haliotis tuberculata*. Nivelais Laureen- Septembre 2021



Évaluation des effets potentiels des métaux libérés par les anodes galvaniques sur l'ormeau *Haliotis tuberculata*.
 Nivelais Laureen- Septembre 2021

Annexe VI : Effectifs et caractéristiques des anodes galvaniques installées sur les structures portuaires de Dunkerque à Roscoff.

Département	Nom du port	Structures protégées	Quantité d'anodes par structure (kg)	Alliage	Durée de vie	Quantité totale d'anodes (kg)
Nord	Dunkerque commerce	Quai en palplanche	816 000 kg (10 200*80kg)	Al/Zn	Prévues pour 15 ans Installée en 2009	816 000 kg
	Gravelines	Port exutoire, évacuation d'eau du fleuve, pas d'anode				0
Pas-de-Calais	Calais (1)		615 000 kg	Al/Zn	Prévues pour 15 ans	615 000 kg
	Boulogne pêche	Passerelle immergée	336 kg (16*21 kg)	Al/Zn		160 477 kg
		Pontons Bonvoisin	197 kg (84*2.34 kg)	Al/Zn		
		Slipway	944 kg (160*5.9 kg)	Zn		
		Quai (2)	159 000 kg	Al/Zn		
	Boulogne plaisance	Pieux	1 904 kg (40*47.6 kg)	Al/Zn	Prévues pour 15 ans Installée en 2018	1 904 kg
Etaples	Pontons	218 kg (16*13.6 kg)	Al/Zn		218 kg	
Seine Maritime	Le Havre (3)		65 000 kg	Al/Zn	Prévues pour 25 ans	65 000 kg
	Dieppe	Passerelle transmanche	1830 kg	Al/Zn	Prévues pour 5 ans	9 360 kg
		Portes bassin de canada	2670 kg (108*17kg+56*9kg+30*114kg)	Al/Zn		
		Pieux pontons plaisance	4 860 kg (81*6 kg)	Al/Zn	Prévues pour 10ans	
		Autres structures données non récupérées				
Rouen plaisance	Pas d'anode car ponton en aluminium				0	
Calvados	Honfleur	Porte écluse	1 900 kg (82* 23.2 kg)	Al/Zn	Prévues pour 15 ans	2 510 kg

					Installées en 2015	
		Pieux passerelle de l'embarcadère	610 kg (10*39.9kg+4*52.8 kg)	Al/Zn	Prévues pour 15 ans	
	Deauville	Porte écluse	600 kg (34*17.5 kg)	Al/Zn	Prévues pour 15 ans Installées en 2015	600 kg
	Dives	Porte écluse	288 kg (24*12 kg)	Al/Zn	Prévues pour 15 ans Installées en 2016	288 kg
	Caen - Ouistreham pêche/commerce	Ecluse	4 200 kg	Al/Zn	Prévues pour 15 ans	4 200 kg
	Courseulles-sur-Mer	Prochainement				
	Port en Bessin	Porte écluse	240 kg (17*14 kg)	Al/Zn	Prévues pour 15 ans Installées en 2015	240 kg
	Grandcamp-Maisy	Porte écluse	390 kg (52*7.5 kg)	Al/Zn		390 kg
		Seuil de rabattage	Prochainement			
Manche	Saint-Vaast-La-Hougue, Barfleur, La Hague	Pieux	530 kg (106*5 kg)	Al/Zn		610 kg
		Portes écluse	80 kg (4*20 kg)			
	Cherbourg pêche/commerce	Quais/pontons	236 913 kg	Al/Zn	Prévues pour 15 ans	236 913 kg
	Goury	Raille rampe de lancement canaux SNSM	60 kg (12*5 kg)	Zn	Renouvellement annuel par 6	60 kg
	Barneville-Carteret	Pieux	1 121 kg (38*29.5 kg)	Al/Zn	Prévues pour 15 ans	2 375 kg
			1 110 kg (26*21.7 kg)	Al/Zn	Prévues pour 15 ans	
		Porte abattante	144 kg (9*16 kg)	Al/Zn	Installées en 2020	
	Granville	Pieux port plaisance	1 536 kg (48*32 kg)	Al/Zn	Prévues pour 20 ans	2924 kg
		Porte abattante	8 kg (8*1 kg)	Al/Zn	Prévues pour 20 ans	
		Porte écluse côté mer	300 kg (10*30 kg)	Al/Zn	Prévues pour 20 ans	
Porte écluse côté bassin		1 080 kg (108*10 kg)	Al/Zn	Prévues pour 20 ans		

Ille-et-Vilaine	Saint-Malo plaisance	Pieux	5 500 kg (94*57.7 kg)	Zn	Certaines anodes date de 1980, plusieurs sont changées (3 à 5 tous les ans)	5 964 kg
		Pontons	50 kg (20*2.5 kg)	Al/Zn		
		Estacade	414 kg (18*23 kg)	Al/Zn		
	Saint-Malo Cancale	Pontons plaisance	36 kg (48*0.750)	Al/Zn	Prévues pour 15ans	62 900 kg
		Quais	61 600 kg (944 anodes réparties sur 8 quais)	Al/Zn	Prévues pour 15ans	
		Porte écluse	1320 kg (40*33 kg)	Zn		
Port de commerce Dinard	Informations pas trouvées par le contact					
Côtes d'Armor	Saint-Cast	Pontons	9 000kg (181*50 kg)	Al/Zn	Prévue pour 10ans	10 000 kg
		Darse	1 000kg (20*50 kg)	Al/Zn	Prévue pour 10ans	
	Légué	Pontons	2 000 kg (40*50 kg)	Al/Zn	Prévue pour 10ans	2 000 kg
	Tréguier	Pieux	2 400 kg (4*46 kg+9*63 kg+27*78 kg)	Al/Zn	Prévues pour 15ans	2 400 kg
	Saint-Quay-Portrieux	Pontons	3 200 kg (64*50 kg)	Al/Zn	Prévue pour 10ans	3 200 kg
Finistère	Roscoff commerce, plaisance		390 kg (30*13 kg)	Al/Zn		390 kg

Source : Informations recueillies lors des interviews des contacts de l'annexe 1.

- (1) Basuyaux et al, 2018b
- (2) Région Hauts-de-France, 2018
- (3) Gabelle et al, 2012

Annexe VII : Capacité d'accueil des bateaux de plaisance et flottilles de pêche de Dunkerque à Batz.

Département	Port	Plaisance (1)	Caractéristiques des bateaux (1)	Pêche (par port d'exploitation principal) (2)	Caractéristiques des bateaux (2)	Total
Nord	Dunkerque	250 140 170 250	} 810 <20m <13m <13m <20m	8	7C, 1M	Pê : 8 PI : 1 240
	Gravelines	430				
Pas-de-Calais	Calais	242	<30m	9	9 C	Pê : 96 PI : 402
	Boulogne-sur-Mer	70	<20m	74 13 (sans PEP)	31 C, 35 M, 8 L 8C, 1M, 4L	
	Etaples- Le Touquet	90	<8.5m			
Somme	Le Crotoy Le Hourdel	100	<9m	11	11C	Pê : 11 PI : 350
	Saintt-Valery-sur-Sommès	250	<20m			
Seine maritime	Le tréport	110	<15m	34	23 C, 11M	Pê : 139 PI : 3 272
	Dieppe	532	<25m	50 8 (sans PEP)	20C, 25M, 5L 7C, 1M	
	Saint-Valéry-en-Caux	550	<20m	7	4C, 3M	
	Fécamp	720	<20m	18 7 (sans PEP)	11C, 7L 3C,1M,3L	
	Le Havre	1 360	<45m	15	14C, 1M	
Calvados	Honfleur	90	<14m	15	9C, 6M	Pê : 175 PI : 4 572
	Trouville-sur-Mer			22	19C, 3M	
	Deauville	700 700	} 1 400 <32m <18m			
	Dives sur mer	910		<20m		
	Caen	92	<40m	35 (sans PEP)	29C, 6M	
	Ouistreham	650	<15m	19	17C, 2M	
	Courseulles	750	<12m			
	Port-en-Bessin	70		48	28C, 17M, 3L	
	Grandcamp-Maisy	265	<14m	36	24C, 12M	
	Isigny-sur-Mer	45				
Manche	Carentan les Marais	310	<25m			Pê : 252 PI : 4 701
	Saint-Vaast-la-Hogue	765	<35m	37	25C, 12M	
	Barfleur	130		19	15C, 4M	

	Cherbourg	1600	<25m	22 110 (sans PEP)	13C, 3M, 6L 95C, 15M	
	Diélette-Tréauville	480				
	Barneville-Carteret	406				
	Portbail	310				
	Pirou			15	15C	
	Granville	1000	<15m	49	43C, 6M	
Ile-et-Vilaine	Saint-Malo	1200 (Les sablons)	<15m	45 9 (sans PEP)	40C, 3M, 2L 6C, 2M, 1L	Pê : 54 PI : 2 066
		196 (Port Vauban)	<150m			
	Dinard	670				
Côtes d'Armor	Lancieux	400				Pê : 179 PI 5 613
	Saint-Cast- Le-Guildo	825		26	26C	
	Erquy	500	<11m	53	53C	
	Dahouet	329 169	<17m à l'échouage			
	Saint-Brieuc	208	<15m	12 (sans PEP)	11C, 1L	
	Binic	517	<20m			
	Saint-Quay- Portrieux	1 030	6 à 25m	4	79C, 1L	
	Paimpol	370	<20m (à quai)	55 (sans PEP)	55C	
	Pors-Even			20	20C	
	Perros- Guirec	615	<5.5m	9	9C	
	Trébeurden	650				
Finistère	Plougasnou	190	<8m	11	11C	Pê : 120 PI : 1 310
	Morlaix	190 +25 à quai	<12m	32(sans PEP)	25C, 1M, 8L	
	Roscoff	625 (Bloscon) 280 (Vieux port)	<25m	66	21C, 2M, 43L	
	Batz			11	11C	

¹ source : Moreau et al, 2019.

² source : Ifremer, 2020a ; Ifremer, 2020b ; Ifremer, 2020c ; Ifremer, 2020d ; Ifremer, 2020e; Ifremer, 2020f ; Ifremer, 2020g ; Ifremer, 2020h ; Ifremer, 2020i ; Ifremer, 2020j ; Ifremer, 2020k.

Annexe VIII : Suivi des concentrations (en $\mu\text{g.L}^{-1}$) de l'eau de mer enrichie en produits de dégradation de l'anode.

Bac Anode	Al	Zn
04/04/2021	1336	-
05/04/2021	905	-
07/04/2021	8849	247
12/04/2021	4921	229
16/04/2021	6386	-
19/04/2021	8174	265
23/04/2021	9498	324
28/04/2021	-	299
05/05/2021	11591	379
14/05/2021	10413	361
21/05/2021	8889	-
28/05/2021	8086	-
04/06/2021	7438	-
11/06/2021	7742	-
18/06/2021	8690	-
21/06/2021	8698	
28/06/2021	7194	332
30/06/2021	-	660
02/07/2021	9051	438
05/07/2021	9379	401
Moyenne	7624	358

 	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Ingénieur agronome Spécialisation / option : Sciences halieutiques et aquacoles, préparée à Agrocampus Ouest /Aquaculture Enseignant référent : Hervé Le Bris
Auteur(s) : Nivelais Laureen Date de naissance* : 11/12/1998	Organisme d'accueil : SMEL Adresse : Zone conchylicole, Parcelle n°45 50560 BLAINVILLE-SUR-MER
Nb pages : 30 Annexe(s) :8	Maître de stage : Olivier Basuyaux
Année de soutenance : 2021	
Titre français : Evaluation des effets potentiels des métaux libérés par les anodes galvaniques sur l'ormeau <i>Haliotis tuberculata</i> . Titre anglais : Evaluation of potential effect of metals released form galvanic anodes on the abalone <i>Haliotis tuberculata</i> .	
Résumé (1600 caractères maximum) : Les anodes galvaniques sont largement utilisées sur les infrastructures maritimes afin de les protéger de la corrosion. Ces dernières sont constituées d'alliage à base de métaux (aluminium ou zinc) qui vont s'oxyder à la place de l'acier à protéger. La quantité totale d'anode présente sur l'ensemble des infrastructures maritimes est estimée à 5040 T (72 % installés sur les parcs éoliens offshore, 25% au niveau des infrastructures portuaires et 3 % en surface des coques de bateaux de pêche et de plaisance). La dégradation des anodes engendre une libération des métaux dans l'environnement pouvant entraîner un enrichissement des différents compartiments et s'accompagner d'effets toxiques sur le vivant. Une évaluation du risque de toxicité sur l'ormeau <i>Haliotis tuberculata</i> a été réalisée à partir de la méthode REACH en exposant des individus de différentes tailles, à différentes concentrations d'eau de mer contaminée par une anode. Une concentration expérimentale moyenne en aluminium de $457,8 \pm 86,8 \mu\text{g L}^{-1}$ a été mesurée et associée à des baisses significatives de la croissance linéaire (40% chez les 20 mm) et pondérale (90% chez les 50 mm et 40% chez les 20 mm) des individus exposés. Une bioaccumulation des principaux métaux constituant l'anode a été observée. Concernant la mortalité, un TL50 de 11,5 semaines a été déterminée pour la condition la plus forte de $2700 \mu\text{g L}^{-1}$. Cette concentration est très supérieure à celles estimées dans les masses d'eau du milieu naturel, indiquant que les produits de dégradation des anodes ne semblent pas présenter de risque pour l'ormeau.	
Abstract (1600 caractères maximum) : Galvanic anodes are widely used on marine infrastructure to protect them from corrosion. The latter are made of alloy based on metals (aluminum or zinc) which will oxidize instead of the steel to be protected. In total, the quantity of anodes present on all maritime infrastructures is estimated at 5040 T (72% installed on wind farms, 25% on port infrastructures and 3% on fishing boats and pleasure boats). The degradation of anodes results in the release of metals into the environment, which can lead to enrichment of the various compartments and be accompanied by toxic effects on living organisms. An evaluation of the toxicity risk for the abalone <i>Haliotis tuberculata</i> was carried out using the REACH method by exposing individuals of different sizes to different concentrations of anode-contaminated seawater. A mean experimental aluminum concentration of $457.8 \pm 86.8 \mu\text{g L}^{-1}$ was measured and associated with significant decreases in linear (40% in 20 mm) and weight (90% in 50 mm and 40% in 20 mm) growth in exposed individuals. Bioaccumulation phenomena were also observed. Concerning mortality, a TL50 of 11.5 weeks was determined for the strongest condition of $2700 \mu\text{g L}^{-1}$. This concentration is much higher than estimated in water bodies in the natural environment, indicating that anode degradation products do not appear to pose a risk to abalone.	
Mots-clés : Anodes galvaniques, Ormeau <i>Haliotis tuberculata</i> , aluminium, zinc, toxicité, infrastructures maritimes Key Words: Galvanics anodes, Abalone <i>Haliotis tuberculata</i> , aluminum, zinc, toxicity, maritime structures	