

SUIVI DCSMM DE LA CONTAMINATION DES OISEAUX MARINS

Résultats de la contamination au mercure



©Audren Morel

1- Contexte et objectifs.....	3
2- Méthodes.....	4
2-1. Protocole terrain.....	5
2-2. Protocoles d’analyses	5
2-2.1. Préparations des échantillons.....	5
2-2.2. Dosage du mercure.....	5
2-2.3. Analyses isotopiques du carbone et de l’azote	6
2-3. Statistiques	6
2-4. Classes de risque.....	6
3 – Résultats et discussion	7
3-1. Goéland argenté	7
3-1-1. Plumes 2019	7
3-1-2. Plumes 2020	10
3-1-3. Sang 2021	13
3-2. Goéland brun	17
3-2-1. Plumes 2019	17
3-2-2. Plumes 2020	19
3-2-3. Sang 2021	21
3-3. Goéland leucophée.....	23
3-3-1. Plumes 2019	23
3-3-2. Plumes 2020	25
3-3-3. Sang 2021	27
3-4. Goéland marin	29
3-4-1. Plumes 2019	29
3-4-2. Plumes 2020	32
3-4-3. Sang 2021	34
3-5. Puffin de Scopoli.....	36
3-5-1. Sang 2020	36
3-5-2. Plumes 2020	38
3-6. Cormoran huppé.....	41
3-6-1. Plumes 2019	41
3-6-2. Plumes 2020	43
3-6-3. Sang 2021	45
3-7. Fou de Bassan	48
3-7-1. Plumes et sang 2020.....	48
3-8. Mouette tridactyle.....	49
3-9. Sterne caugek	50
3 – Synthèse	51

3-1. Plumes.....	51
3-2. Sang.....	53
3-2. Risques.....	54
4 – Conclusion.....	55

1- Contexte et objectifs

La contamination des écosystèmes est aujourd’hui visible à l’échelle mondiale, et même les lieux éloignés des activités humaines sont concernés (Huber et al., 2015). De nombreux polluants se retrouvent en des endroits du globe où aucune émission n’est observée, tels que les régions polaires (Jörundsdóttir et al., 2013). Ces polluants sont en effet transportés sur de longues distances via l’atmosphère et les courants océaniques (Letcher et al., 2010), et transférés le long des réseaux trophiques (Jones et De Voogt 1999). Ainsi, si les polluants les moins mobiles et persistants sont retrouvés à proximité de leur lieu d’émission, les plus mobiles et persistants montrent une distribution globale (Harrisson et al., 2003). Ce transport est d’autant plus facilité par la tendance des contaminants à la volatilité (Morel et al., 1998; Sosnowska et al. 2014, Bogdal et al. 2013), et à leur longue demi-vie dans l’environnement (Rice et al. 2014; Sinkkonen et Paasivirta 2000).

Parmi les polluants, les plus toxiques/problématiques pour les organismes et les écosystèmes ont fait l’objet d’interdictions et de restrictions, mais sont toujours présents aujourd’hui dans l’environnement du fait de leur persistance (Bustnes et al., 2015). De ce fait, ils sont bioaccumulés par les organismes (augmentation des concentrations avec l’âge) et bioamplifiés (augmentation des concentrations avec le niveau trophique) le long des chaînes alimentaires aquatiques (Clatterbuck et al., 2018). D’autres composés chimiques, utilisés en remplacement des premiers, ont fait leur apparition. Ces molécules, appelés polluants émergents, restent un danger pour l’environnement et la faune sauvage dans la mesure où ils sont généralement bioaccumulables et souvent bioamplifiables, mais leur production et leur utilisation récente conduit à un manque de connaissance sur leur rémanence dans l’environnement et sur leurs effets à long terme sur les organismes et sur les écosystèmes (Huber et al., 2015).

Dans ce contexte, le suivi de la contamination est primordial, afin de pouvoir évaluer les effets et proposer des mesures de remédiation aux fortes concentrations retrouvées en certains endroits (Dittmann et al., 2012). La Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (**DCSMM**) vise à atteindre ou maintenir un Bon Etat Écologique (BEE) dans les eaux marines européennes. Dans cette optique, des **programmes de surveillance** ont été mis en place, visant à collecter les données nécessaires à l’évaluation de l’état des milieux côtiers et hauturiers. Parmi les 11 descripteurs du BEE, le descripteur 8 (D8) suit les contaminants et leurs effets sur les organismes. Ces programmes de surveillance ciblent différentes matrices : sédiment et biote. Dans le biote, les bivalves et les poissons font déjà l’objet d’une surveillance, mais un indicateur de niveau trophique élevé est souhaitable pour avoir des informations plus intégrées sur la contamination des réseaux trophiques, notamment pour les contaminants bioamplifiables mal documentés par les organismes de bas niveau trophique.

Ainsi, afin de renseigner le BEE pour la contamination chimique du milieu, il est indispensable de s’intéresser aux différentes composantes de l’écosystème marin, et de suivre cette contamination à **différents niveaux trophiques** (afin de prendre en compte la bioamplification), chez des espèces aux **caractéristiques écologiques diverses**, qui n’utilisent pas l’habitat de la même manière (fixes vs mobiles par exemple). La qualification du milieu marin doit passer par le suivi dans des organismes allant des espèces filtreuses fixes (bivalves) aux prédateurs supérieurs mobiles (oiseaux, mammifères) en passant par des consommateurs intermédiaires aux écologies variées (poissons).

Les **oiseaux marins**, en tant que prédateurs supérieurs, apportent des informations intégrées sur le niveau de contamination du milieu marin du fait de leur capacité à bioaccumuler les contaminants dans leurs tissus tout au long de leur vie, et de leur position trophique élevée qui fait qu’ils sont soumis au processus de bioamplification (Furness & Camphuysen, 1997). En choisissant d’effectuer des prélèvements sur des poussins peu avant l’envol, il est possible

d'évaluer la contamination locale du site suivi ; celle-ci reflètera les apports alimentaires amenés par les parents lors de la croissance (Carravieri et al., 2014). Ils apparaissent donc comme des **bioindicateurs pertinents** de la contamination marine dans le cadre de la DCSMM.

Dans ce contexte, les oiseaux marins ont été utilisés pour déterminer le degré de contamination du milieu marin des côtes françaises et les effets des polluants sur les oiseaux en deux étapes : dans un premier temps, une étude pilote a été conduite sur le mercure (Hg) afin de valider la faisabilité de l'étude puis dans un second temps, une étude étendue aux différents contaminants métalliques et organiques a été lancée. En parallèle des mesures des contaminants, les isotopes stables du carbone et de l'azote ont été mesurés afin de déterminer l'habitat d'alimentation (carbone) et la position trophique (azote) des oiseaux, ce qui est essentiel pour prendre en compte le processus de bioamplification et l'origine des polluants. Les analyses des valeurs isotopiques du carbone et de l'azote apportent respectivement des informations sur l'origine géographique d'alimentation, et sur la position trophique des oiseaux. L'augmentation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ traduit une alimentation d'origine marine (Gebbinck et al., 2011; Ramos et al., 2013; Roscales et al., 2016). L'augmentation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ traduit une élévation de la position trophique (Hobson et al., 1994; Thompson et al., 1998). Ces informations sont à nuancer si les sites sont éloignés les uns des autres, notamment entre les grands systèmes océanographiques (Méditerranée vs. Atlantique), car les lignes de base isotopiques peuvent varier (Dubois et al., 2007).

Le Hg étant bioamplifiable (Wiener et al., 2002), le niveau de contamination augmente à chaque niveau trophique. Le Hg rentre dans les réseaux trophiques sous la forme méthylmercure MeHg suite à la méthylation du Hg inorganique par les microorganismes du sédiment et de la colonne d'eau. Du fait du nombre plus élevé de niveaux trophiques qu'en milieu terrestre, les prédateurs marins présentent généralement des concentrations élevées de Hg.

Ce document présente les résultats des concentrations en Hg et des analyses isotopiques de l'azote et du carbone dans les plumes et le sang de poussins d'oiseaux marins, pour les années 2019, 2020 et 2021.

2- Méthodes

Afin de créer un réseau national de suivi des contaminants dans les oiseaux marins, une étude pilote financée par l'Agence Française pour la Biodiversité et l'Université de La Rochelle a été lancée en 2019. Pour minimiser le dérangement des oiseaux, les prélèvements étaient réalisés lors de captures effectuées pour les programmes personnels de baguage des oiseaux marins déjà en place pour d'autres projets scientifiques. Le but était de prélever des **plumes** sur ces oiseaux afin de doser le Hg.

Par la suite, l'étude a visé à élargir le spectre des contaminants suivis (éléments traces essentiels et non essentiels, pesticides organochlorés (DDT), PCBs, PBDEs, PFAS (molécules chlorées, bromées et fluorées), par la réalisation de prises de **sang**. La séparation des cellules sanguines du plasma du sang permet de suivre des nombreux polluants, les éléments traces dans les cellules sanguines et les polluants organiques persistants (POPs) dans le plasma où ils partitionnent. De plus, de nouvelles colonies d'oiseaux qui ne font pas l'objet de programmes de baguage, ont également été ajoutées à celles de 2019. Le but est d'avoir un réel observatoire de la contamination chez les oiseaux marins à l'échelle du littoral français.

Les espèces suivies étant migratrices, des échantillons prélevés sur des adultes sont susceptibles de refléter en partie la contamination des sites d'hivernage. Afin de renseigner une contamination locale, seuls les **poussins** ont été échantillonnés.

Les espèces ont été choisies selon plusieurs critères : régime alimentaire, distance d'alimentation autour de la colonie, répartition géographique, tendances populationnelles et statut de conservation. Trois cortèges ont été définis :

Spécialistes côtiers :	Généralistes côtiers :	Spécialistes hauturiers :
- Cormoran huppé (<i>Phalacrocorax aristotelis</i>)	- Goéland marin (<i>Larus marinus</i>)	- Mouette tridactyle (<i>Rissa tridactyla</i>)
- Sterne caugek (<i>Thalasseus sandvicensis</i>)	- Goéland brun (<i>Larus fuscus</i>)	- Fou de Bassan (<i>Morus bassanus</i>)
	- Goéland argenté (<i>Larus argentatus</i>)	- Puffin de Scopoli (<i>Calonectris diomedea</i>)

2-1. Protocole terrain

La méthode de prélèvement sur le terrain, toujours accompagnée des acteurs locaux qui participaient ou non à la manipulation, avait pour priorité la limitation au maximum du dérangement. Les captures étaient calées sur des sorties des gestionnaires, pour des suivis de terrain, de gestion des sites ou des actions de baguage.

Une fois capturé, l'oiseau est éventuellement bagué si la capture est faite lors d'une action de baguage, puis mesuré (longueur bec, tête-bec, tarse, ailes droite et gauche, masse), enfin un prélèvement de plumes (3-5) et de sang (2-3 ml) est réalisé. Dès les manipulations terminées, l'oiseau est immédiatement relâché.

2-2. Protocoles d'analyses

Ci-dessous sont détaillés les protocoles de préparation des échantillons, et les protocoles pour l'analyse du Hg qui est réalisée au laboratoire LIENSs.

2-2.1. Préparations des échantillons

- Conditionnement des échantillons

Le jour même du prélèvement, au retour du terrain, les échantillons sanguins nécessitent un conditionnement pour le stockage.

En premier lieu, pour chaque individu, une goutte de sang total est déposée sur une lame de microscope, pour la réalisation d'un frottis sanguin nécessaire à la quantification des micronoyaux. Les lames sont fixées dans l'éthanol absolu. Puis 2µl de sang total sont placés dans un liquide de cryoconservation pour le test des comètes.

Ensuite, le sang est centrifugé 10 min à 6500 rpm, afin de séparer le plasma des cellules sanguines. Le plasma est placé dans un tube séparé de cellules sanguines et réservé pour l'analyse des POPs.

Les trois tubes pour chaque individu (un tube sang total + liquide cryoconservation, un tube plasma et un tube cellules sanguines) sont ensuite placés dans de l'azote liquide jusqu'au retour au laboratoire, où ils sont conservés au congélateur (-20°C pour les cellules sanguines, -80°C pour le plasma et les tubes comètes).

Les plumes sont stockées à température ambiante jusqu'à leur analyse.

- Préparation pour les analyses

Les cellules sanguines sont lyophilisées, puis broyées en une poudre fine qui sera la matrice utilisée pour les dosages de Hg, des éléments traces et des isotopes stables.

Les plumes nécessitent un travail de préparation avant de pouvoir être analysées. En effet, elles doivent d'abord être débarrassées manuellement des déchets grossiers ainsi que des duvets éventuels, et la base du rachis est coupée (cette base contient un peu de sang et peut servir par la suite au sexage de l'oiseau).

Puis, afin d'éliminer la contamination adsorbée à la surface des plumes, celles-ci sont lavées dans des bains de solvants. Un premier trempage, dans un mélange chloroforme : méthanol (2 : 1), est réalisé dans un bain à ultrasons. Deux rinçages sont ensuite effectués dans un bain de méthanol pur. Les plumes sont égouttées puis séchées 48h dans une étuve à 45°C, puis elles sont réduites en une poudre fine sur laquelle seront réalisés les dosages.

2-2.2. Dosage du mercure

Le dosage du Hg total est réalisé grâce à un spectrophotomètre d'absorption atomique dédié à l'analyse du mercure, l'AMA 254 de Altec (Advanced Mercury Analyser). Le Hg est dosé sur des aliquotes de masse variant de 0,2 à 2 mg. Chaque échantillon est analysé en double, voire en triple, afin d'obtenir un coefficient de variation entre les mesures qui soit inférieur à 10%. La valeur retenue est la moyenne des concentrations en Hg. Les mesures sont validées par la mesure régulière (au moins trois fois par jour) de matériaux de référence certifiés pour leur concentration en Hg :

DOLT-5, (Dogfish Liver, National Research Council Canada) et TORT-3 (Lobster Hepatopancreas, National Research Council Canada).

La limite de quantification (LOQ) de l'appareil est de 0,1 ng de mercure.

2-2.3. Analyses isotopiques du carbone et de l'azote

Les analyses sont sur des aliquotes de masses comprises entre 0,2 et 0,4 mg de poids sec. Les mesures sont réalisées au moyen d'un analyseur élémentaire (Flash 2000, Thermo Scientific, Milan, Italy) couplé à un spectromètre de masse à rapport isotopique (Delta V Plus with a Conflo IV interface, Thermo Scientific, Bremen, Germany). La calibration de l'appareil est réalisée au moyen de matériaux de référence certifiés (USGS-61 et USGS-62). Les résultats sont exprimés en ‰ dans la notation conventionnelle δ en relation avec des matériaux de référence : le Vienna PeeDee Belemnite pour le carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et l'azote atmosphérique pour l'azote ($\delta^{15}\text{N}$).

2-3. Statistiques

Afin de faire un choix entre tests paramétriques et non-paramétriques, deux tests sont réalisés. Un test de Shapiro-Wilk permet de déterminer si la distribution des données suit une loi normale. Si ce test est validé (si H_0 est validée, soit avec une valeur- $p > 0.05$), un test de Levene est appliqué pour tester l'homogénéité des variances. En parallèles, une exploration visuelle est effectuée sur les données (diagramme quantile-quantile pour l'observation de la normalité des résidus).

Pour nos données, toutes ne respectaient pas ces conditions. Afin d'homogénéiser les analyses statistiques, un test non-paramétrique a été appliqué. Un test de Kruskal-Wallis est utilisé pour détecter les différences entre groupes, et quantifier l'effet de la variable site sur les concentrations en Hg. Ensuite, un test de comparaison deux à deux de Wilcoxon est appliqué, avec une valeur- $p < 0.05$.

Pour quantifier les corrélations entre variables quantitatives, le coefficient de détermination est calculé.

2-4. Classes de risque

Pour interpréter les niveaux de contamination et les relier aux risques encourus pour les oiseaux, les moyennes des concentrations en Hg dans chaque matrice ont été classées au sein des catégories proposées par Dietz et al., 2021 ; ceux-ci proposent plusieurs valeurs seuils (tirées des travaux d'Ackerman et al., 2016), et les catégories de risque qui en découlent :

- pas de risque (No Risk Category ou NRC) : $<0,2 \mu\text{g/g pf}$ ($<0,95 \mu\text{g/g ps}$) pour le sang, $<1,58 \mu\text{g/g pf}$ pour les plumes
- risque faible (Low Risk Category ou LRC) : $0,2 - 1,0 \mu\text{g/g pf}$ ($0,95 - 4,76 \mu\text{g/g ps}$) pour le sang, $1,58 - 7,92 \mu\text{g/g pf}$ pour les plumes
- risque modéré (Moderate Risk Category ou MRC) : $1,0 - 3,0 \mu\text{g/g pf}$ ($4,76 - 14,29 \mu\text{g/g ps}$) pour le sang, $7,92 - 23,75 \mu\text{g/g pf}$ pour les plumes

Deux autres catégories sont listées, risque fort (High Risk Category) et sévère (Severe Risk Category), mais aucun oiseau prélevé dans le cadre du suivi DCSMM ne se trouve au sein de ces dernières.

3 – Résultats et discussion

3-1. Goéland argenté

3-1-1. Plumes 2019

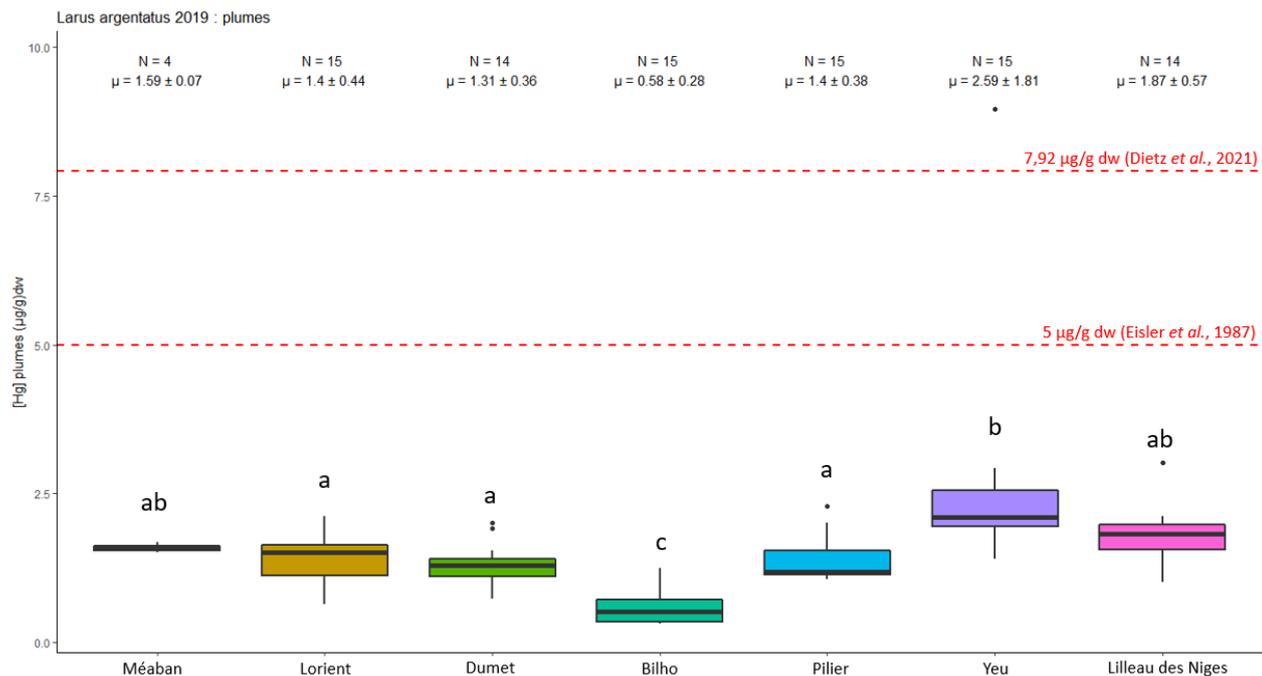


Figure 1 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure dans les plumes de goéland argenté (2019)

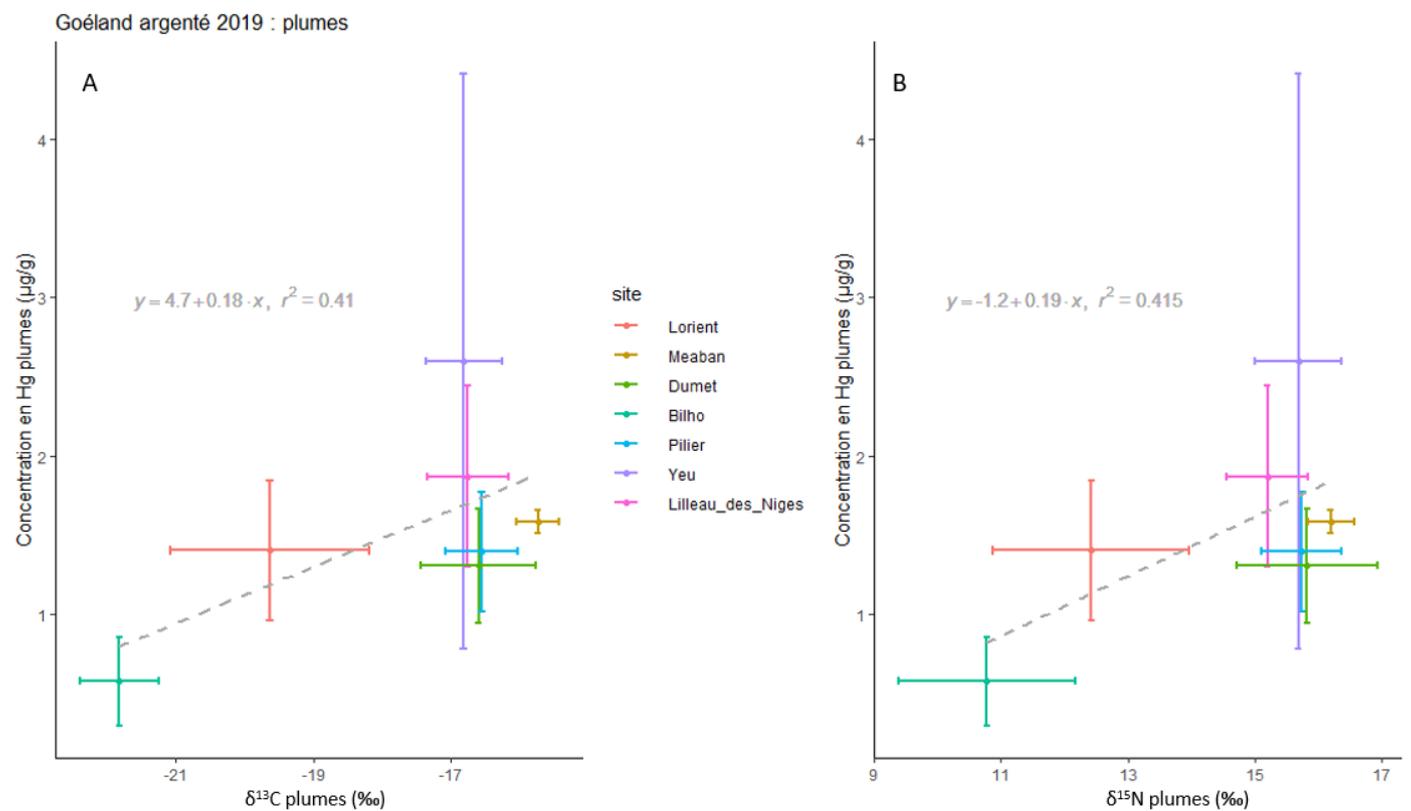


Figure 2 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de goéland argenté (2019)

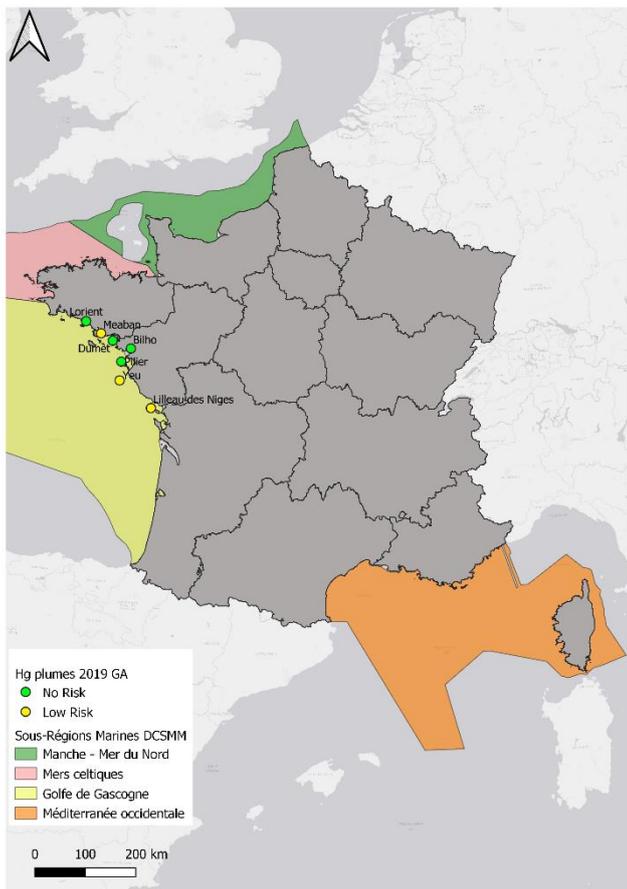


Figure 3 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations moyennes en mercure dans les plumes de goéland argenté classées selon Dietz et al., 2021

Pour 2019, les concentrations en Hg dans les plumes de goéland argenté (Figure 1) varient significativement entre les sites. On peut distinguer trois groupes : a - banc de Bilho (estuaire de Loire) < b - ville de Lorient (toit de la base de sous-marins K3), île de Dumet, îlot du Pilier (Noirmoutier) < c - île d'Yeu. Les sites de l'île de Méaban (sortie du Golfe du Morbihan) et de la réserve de Lilleau des Niges (Fiers d'Ars sur l'île de Ré) ne diffèrent significativement ni de groupe a, ni du groupe b.

La Figure 2 montre une augmentation globale des concentrations de Hg avec des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ moins négatives (proies plus marines) et l'augmentation des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ (proies de position trophique plus élevée). Sur les Figure 2A et B, trois groupes se dégagent :

- Les oiseaux les moins contaminés par le Hg, ceux du banc de Bilho, sont placés dans la partie gauche des figures 2A et 2B. les valeurs isotopiques du carbone et de l'azote correspondent à une alimentation moins marine que sur les autres sites, et d'un niveau trophique moins élevé. Cela a pu être constaté sur le terrain (observation personnelle, Romain Bâtard com. pers.) : des régurgitas d'écrevisses impliquaient que les poussins étaient nourris avec des ressources issues des marais doux autour de la colonie.

- Le site de Lorient se place au centre des graphiques. Les valeurs isotopiques du carbone et de l'azote pour cette colonie urbaine indiquent des apports de nourriture issus de

différentes sources, marines et terrestres.

- Le troisième groupe comporte les autres sites, qui s'alimentent de proies d'un plus haut niveau trophique et qui sont principalement d'origine marine. Ces ressources marines conduisent à des niveaux de contamination en Hg plus importants pour les oiseaux de l'île d'Yeu, de l'île de Ré (Lilleau des Niges) et Méaban. On remarque cependant les sites de l'îlot du Pilier et de l'île de Dumet ont des concentrations de Hg équivalentes à celles de Lorient bien que les valeurs isotopiques en carbone et azote soient comparables à ceux des sites précédents. Cela semble impliquer une différence de contamination qui n'est pas uniquement liée à l'origine et au niveau trophique des proies.

Pour interpréter les niveaux de contamination, la moyenne des concentrations en Hg par site ont été classées au sein des catégories de risque de Dietz et al., 2021 (Figure 3). Le pourcentage d'individus au sein de chaque classe apparaît en Tableau 1.

Les moyennes des concentrations en Hg des goélands argentés en 2019 (Figure 3) appartiennent aux classes « pas de risque » (Lorient, Dumet, Bilho, Pilier) et « risque faible » (Méaban, Yeu et Lilleau des Niges). Un individu de l'île d'Yeu dépasse la valeur seuil d'apparition des effets de $5 \mu\text{g/g ps}$ (Eisler, 1987), et se place dans la classe « risque modéré » (Dietz et al., 2021), bien que la majorité des individus soient dans la catégorie « risque faible » (Tableau 1).

Tableau 1 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland argentés en 2019 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Méaban	2 (50 %)	2 (50 %)	0
Lorient	9 (60 %)	6 (40 %)	0
Dumet	12 (86 %)	2 (14 %)	0
Bilho	15 (100 %)	0	0
Pilier	11 (73 %)	4 (27 %)	0
Yeu	2 (13 %)	12 (80 %)	1 (7 %)
Lilleau des Niges	4 (29 %)	10 (71 %)	0

Dans ce tableau, on voit aussi que les concentrations en Hg des individus se répartissent entre les catégories « pas de risque » et « risque faible », sauf pour les individus du banc de Bilho où 100% des individus sont en NRC.

3-1-2. Plumes 2020

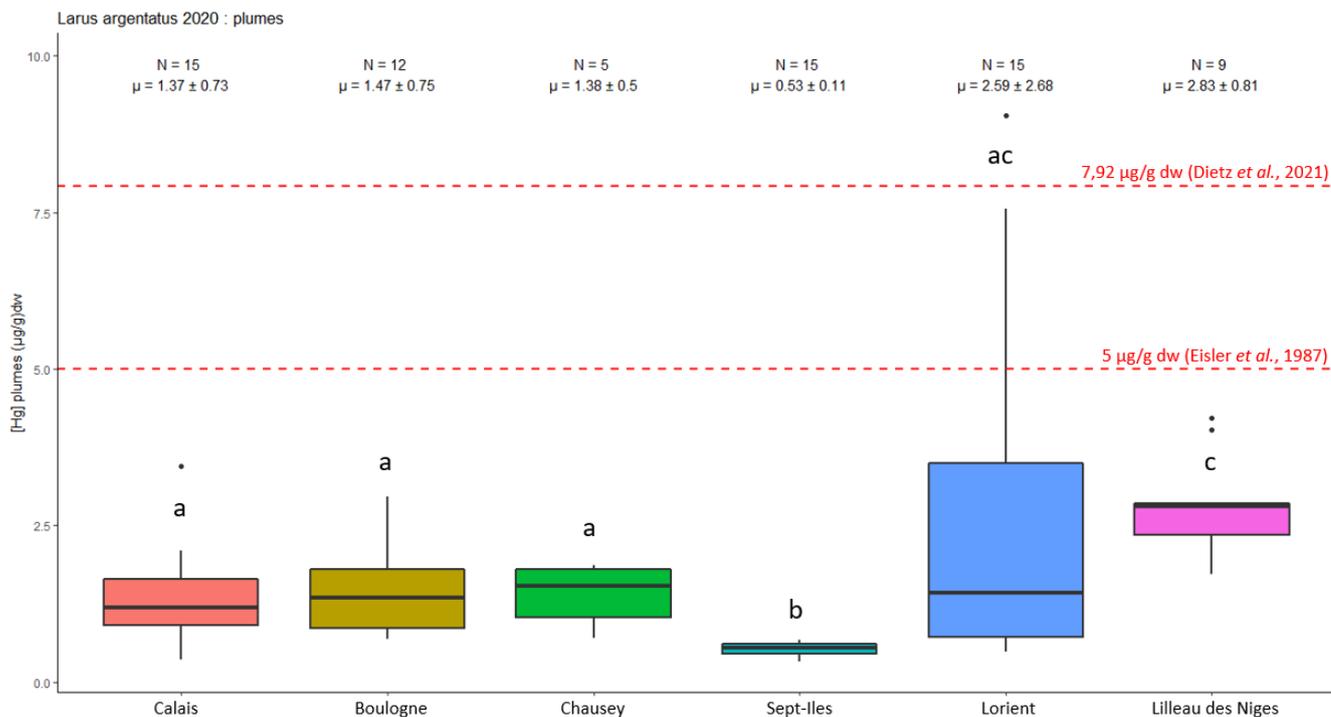


Figure 4 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en Hg dans les plumes de goéland argenté (2020)

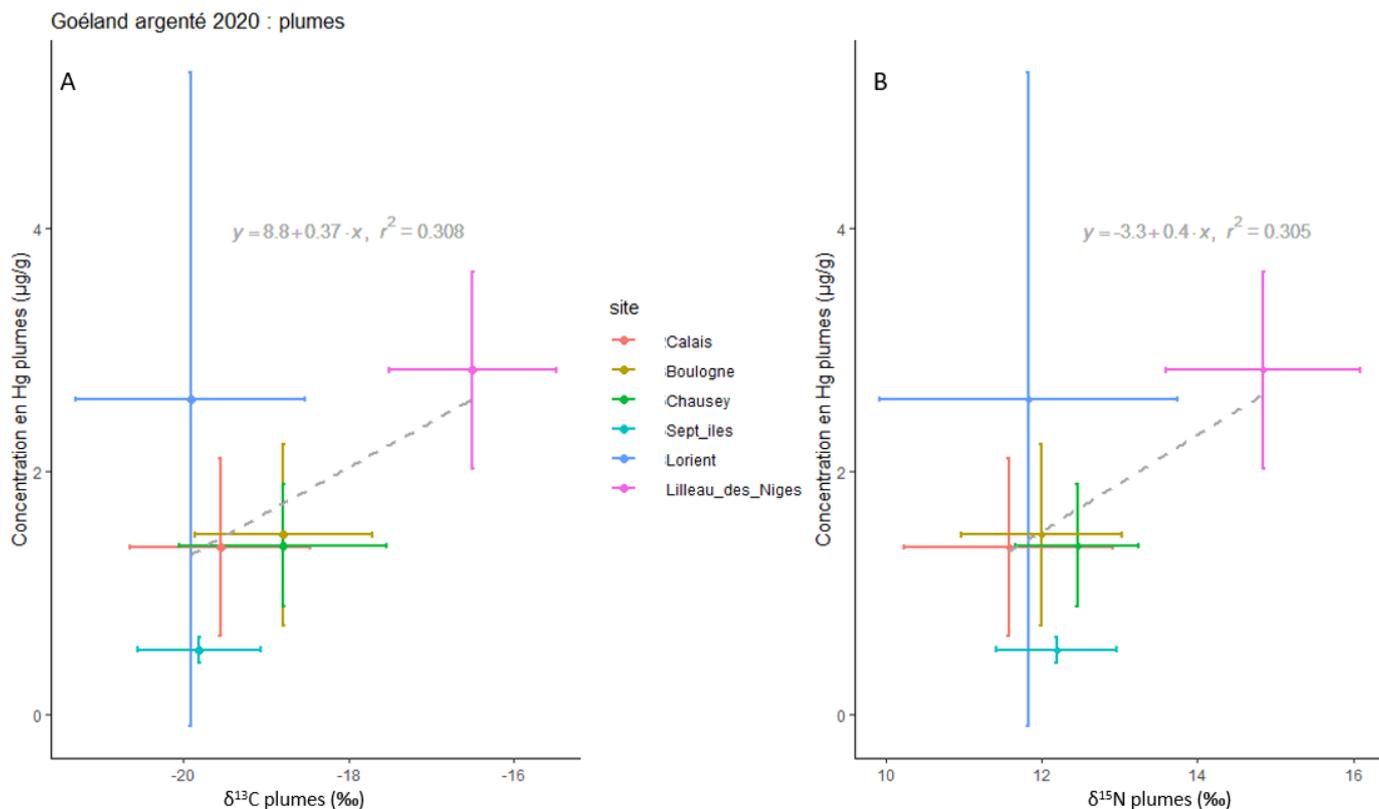


Figure 5 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de goéland argenté (2020)

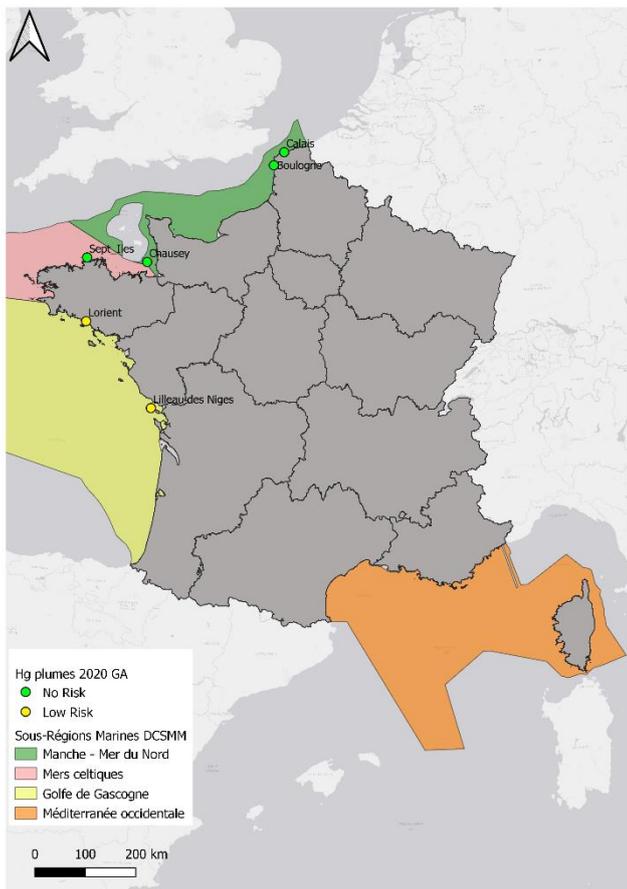


Figure 6 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland argenté (2020) classées selon Dietz et al., 2021

contraire, à Lorient, cette gamme de proies est beaucoup plus large. La localisation des sites (colonie naturelle éloignée de la côte pour les Sept-Iles, et colonie urbaine pour Lorient) explique clairement cette différence, avec des ressources alimentaires variées mises à disposition pour les goélands « citadins ». Les goélands des Sept-Iles ne semblent pas de focaliser sur des proies marines ; le $\delta^{13}\text{C}$ est bas, et des régurgitas de lombrics ont été constatés sur le terrain (observation personnelle). Les valeurs isotopiques ne diffèrent d'ailleurs pas de celles des autres sites. La différence de contamination au Hg de ces oiseaux dépend donc d'un facteur autre (contamination de la ressource alimentaire sans lien trophique). Les variabilités interindividuelles sont intermédiaires pour les autres sites (CV compris entre 29 et 53%).

Pour les deux sites échantillonnés en 2019 et 2020, Lorient et Lilleau des Niges, les concentrations moyennes sont plus élevées en 2020 qu'en 2019. Cette augmentation ne semble pas être due à un changement d'alimentation, puisque les valeurs isotopiques sont comparables entre années.

Le risque est approché par le classement des moyennes de Hg au sein des catégories de Dietz et al., 2021 (Figure 6). Le nombre d'individus au sein de chaque catégorie figure dans le Tableau 2.

Les moyennes des concentrations en Hg des goélands argentés en 2019 (Figure 6) appartiennent aux classes « pas de risque » (Calais, Boulogne, Chausey, Sept-Iles), et « risque faible » (Lorient, Lilleau des Niges). Deux individus dépassent la valeur seuil d'apparition des effets de $5 \mu\text{g/g ps}$ (Eisler, 1987), dont un se place dans la classe « risque modéré » (Dietz et al., 2021).

En 2020, six sites ont fait l'objet de prélèvements pour le goéland argenté. Les niveaux de Hg dans les plumes (Figure 4) forment trois groupes : b - Sept-Iles (Bono) < a - Calais (friche du quai de la Loire), Boulogne (port de commerce), Chausey < c - réserve de Lilleau des Niges (Fiers d'Ars sur l'île de Ré). Les concentrations en Hg dans les plumes des goélands de Lorient (toit de la base de sous-marins K3) ne diffèrent pas significativement des groupes a et c. La variabilité interindividuelle sur ce site est très grande, comparativement aux autres sites.

L'analyse des valeurs isotopiques (Figure 5) permet de voir un groupe constitué de toutes les stations à l'exception de Lilleau des Niges, dont les $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ sont supérieurs aux autres. La contamination au Hg supérieure de Lilleau des Niges peut donc être expliquée par une alimentation plus marine (concentrations du Hg plus élevées dans les proies (Fitzgerald et al., 2007)) et d'un plus haut niveau trophique que les autres sites (bioamplification du Hg (Morel et al., 1998)).

La figure 5 permet également de mettre en évidence des différences importantes de variabilité des concentrations de Hg entre les individus suivants les sites. Ainsi, la variabilité inter-individuelle est très faible pour les oiseaux des Sept-Iles (coefficient de variation CV = 21%), et très forte pour ceux de Lorient (CV = 103%). Les oiseaux des Sept-Iles semblent avoir un régime alimentaire comparable entre individus, spécialisé sur un nombre d'espèces ou types de proies réduit. Au

Tableau 2 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland argentés en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Calais	10 (67 %)	5 (33 %)	0
Boulogne	8 (67 %)	4 (33 %)	0
Chausey	3 (60 %)	2 (40 %)	0
Sept-Iles	15 (100 %)	0	0
Lorient	8 (53 %)	6 (40 %)	1 (7 %)
Lilleau des Niges	0	9 (100 %)	0

Les concentrations en Hg dans les plumes de 2020 classent les goélands argentés dans principalement deux catégories de risque, « pas de risque » et « risque faible », à l'exception de ceux des Sept-Iles qui sont tous en « pas de risque », ceux des Lilleau des Niges qui sont tous en « risque faible », et un individu à Lorient en « risque modéré ».

3-1-3. Sang 2021

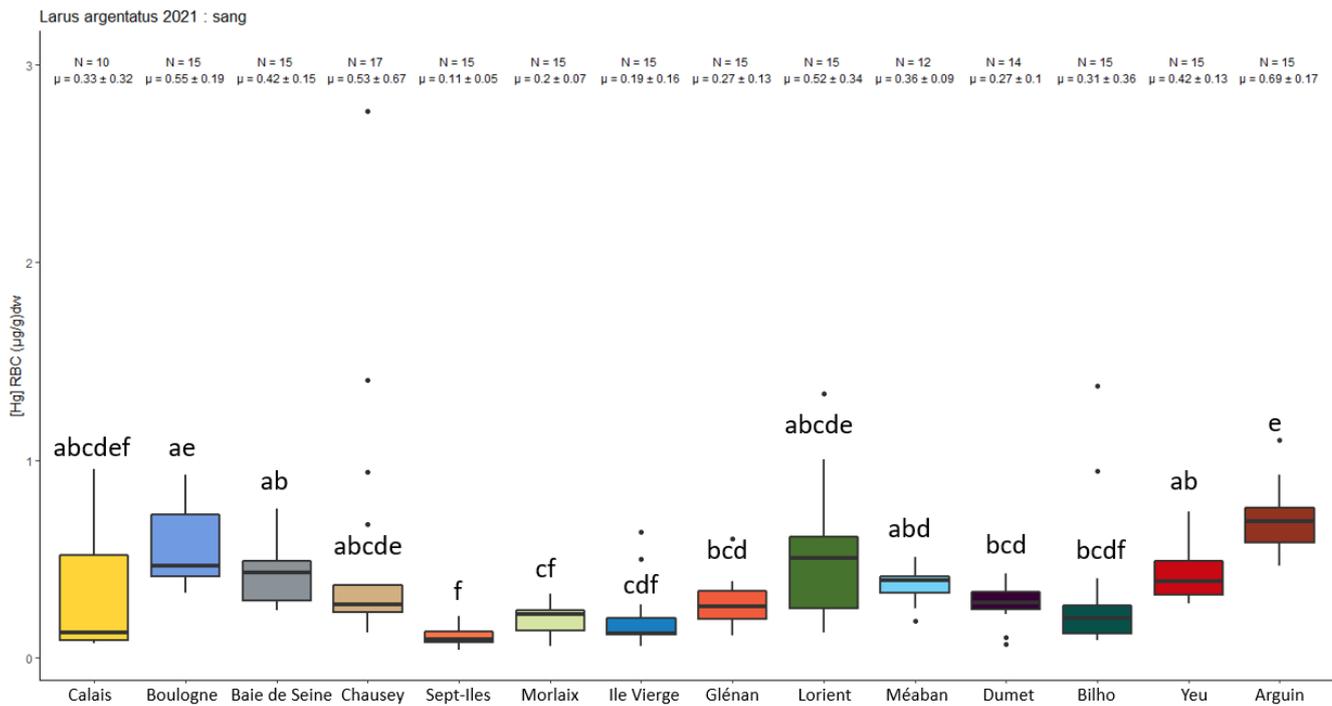


Figure 7 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland argenté (2021) - ordre géographique

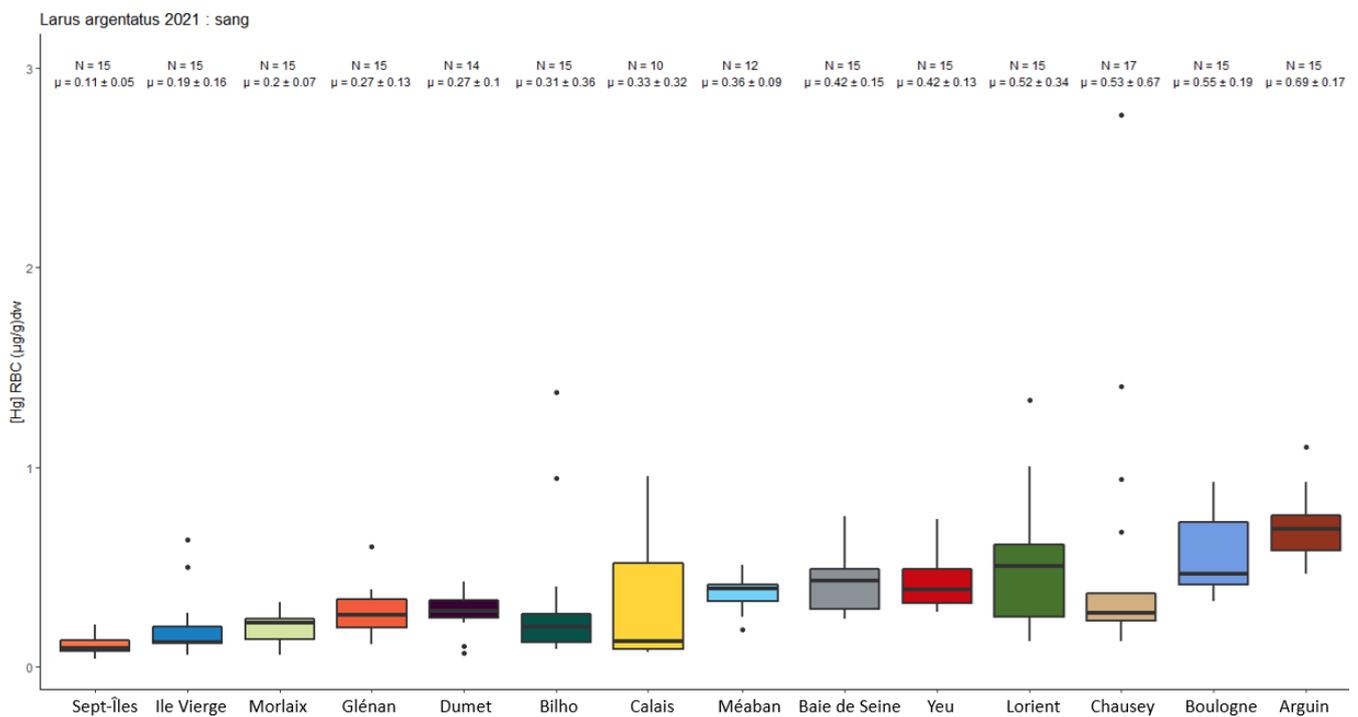


Figure 8 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland argenté (2021) - ordre croissant des moyennes

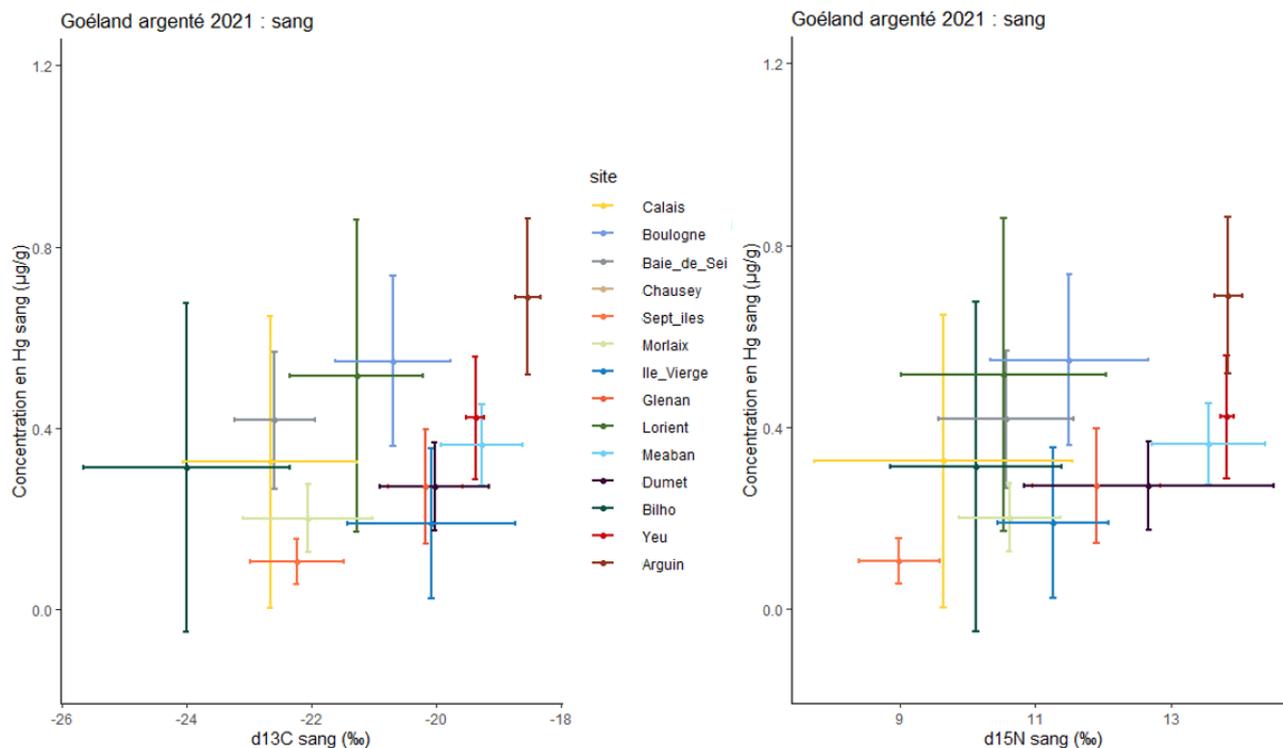


Figure 9 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans le sang de goéland argenté (2021)

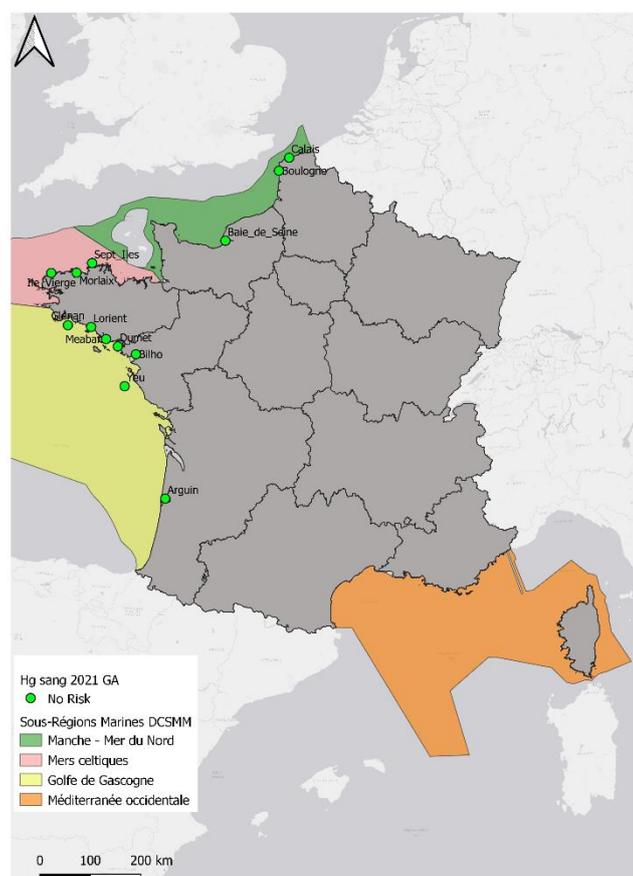


Figure 10 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland argenté (2021) classées selon Dietz et al., 2021

En 2021, des goélands argentés ont fait l'objet de prises de sang sur 14 sites. Sur la Figure 7, comme sur les graphiques des années précédentes, des sites qui partagent une lettre ne présentent pas de différence significative. Le nombre de sites rend la lecture du graphique compliquée ; une approche graphique reprenant tous les sites classés non plus par ordre géographique comme en Figure 7, mais par ordre croissant des moyennes de contamination (Figure 8) permet de mieux y voir. On peut remarquer que les goélands des Sept-Iles, comme en 2020 pour les plumes, ont le niveau de Hg dans le sang le plus bas par rapport aux autres sites. Il ne diffère pas significativement des niveaux de contamination au Hg de Calais (friche quai de la Loire), de la baie de Morlaix (île aux Dames), de l'île Vierge dans les Abers et du banc de Bilho en estuaire de Loire. Le niveau de Hg le plus élevé est observé chez les goélands du Banc d'Arguin. Ce niveau n'est pas significativement différent de celui de Calais, de Boulogne, de Chausey et de Lorient.

Les concentrations sanguines en Hg des goélands de Calais présentent une forte variabilité (CV = 96%), ce qui a pour conséquence qu'elles ne diffèrent significativement d'aucun autre site. On note également une forte variabilité à Chausey (CV = 126%), sur l'île Vierge (CV = 84%), à Lorient (CV = 65%) et au banc de Bilho (CV = 116%).

Les valeurs isotopiques (Figure 9) semblent indiquer que les individus du banc d'Arguin se nourrissent sur des ressources marines ($\delta^{13}\text{C}$ moins négatif) de plus haut trophique ($\delta^{15}\text{N}$ élevé) que sur les autres sites, ce qui peut expliquer le plus haut niveau de Hg sur ce site (concentrations supérieures dues à la bioamplification du Hg). Cette information est corroborée par des observations de terrain : en effet, les goélands d'Arguin suivent les chalutiers dont les rejets de poissons constituent une part importante de leur alimentation (Matthias Grandpierre comm. pers.). Les oiseaux de Méaban et Yeu semblent se nourrir sur des ressources marines, de niveau trophique élevé. Ces deux sites sont des colonies naturelles et marines.

Comme en 2020, les goélands argentés des Sept-Iles présentent peu de variabilité inter-individuelle en termes de contamination au Hg (CV = 45%) et de valeurs isotopiques. Le niveau trophique de leurs proies est plutôt faible ($\delta^{15}\text{N}$ faible en comparaison des autres sites).

Comme en 2019, les goélands du banc de Bilho semblent nourris avec des proies d'origine terrestre ($\delta^{13}\text{C}$ plus négatif).

On remarque une différence de variabilité interindividuelle entre les oiseaux de colonies naturelles et ceux de colonies urbaines. Les oiseaux de Calais et Lorient notamment présentent de fortes variabilités au niveau des concentrations en Hg et des valeurs isotopiques. Ces oiseaux urbains ont probablement accès à des ressources variées, issues des déchets humains. Les oiseaux du banc de Bilho semblent également avoir une alimentation variée, ce qui peut être expliqué par la proximité de plusieurs milieux autour de la colonie (ville de Saint-Nazaire, marais, cultures). A contrario, des oiseaux de colonies naturelles (Yeu, Méaban, Sept-Iles, Arguin) présentent des variabilités faibles (CV = 25 à 45%).

Pour aller plus loin, on peut voir sur la Figure 9 deux tendances parallèles. Ces deux tendances apparaissent plus clairement en Figure 11. Les sites urbains (Calais, Lorient et Boulogne) et urbains-estuariens (banc de Bilho en baie de Loire proche de Saint-Nazaire, et l'îlot du Ratier en baie de Seine proche du Havre) suivent une tendance parallèle aux sites naturels, avec pour des valeurs isotopiques équivalentes des niveaux en Hg supérieurs. Les oiseaux du banc d'Arguin se trouvent également dans la tendance supérieure. Ce graphique nous apporte une information intéressante : à conditions trophiques équivalentes, les oiseaux urbains ont des niveaux de contamination supérieurs à ceux des colonies naturelles (à l'exception des oiseaux d'Arguin).

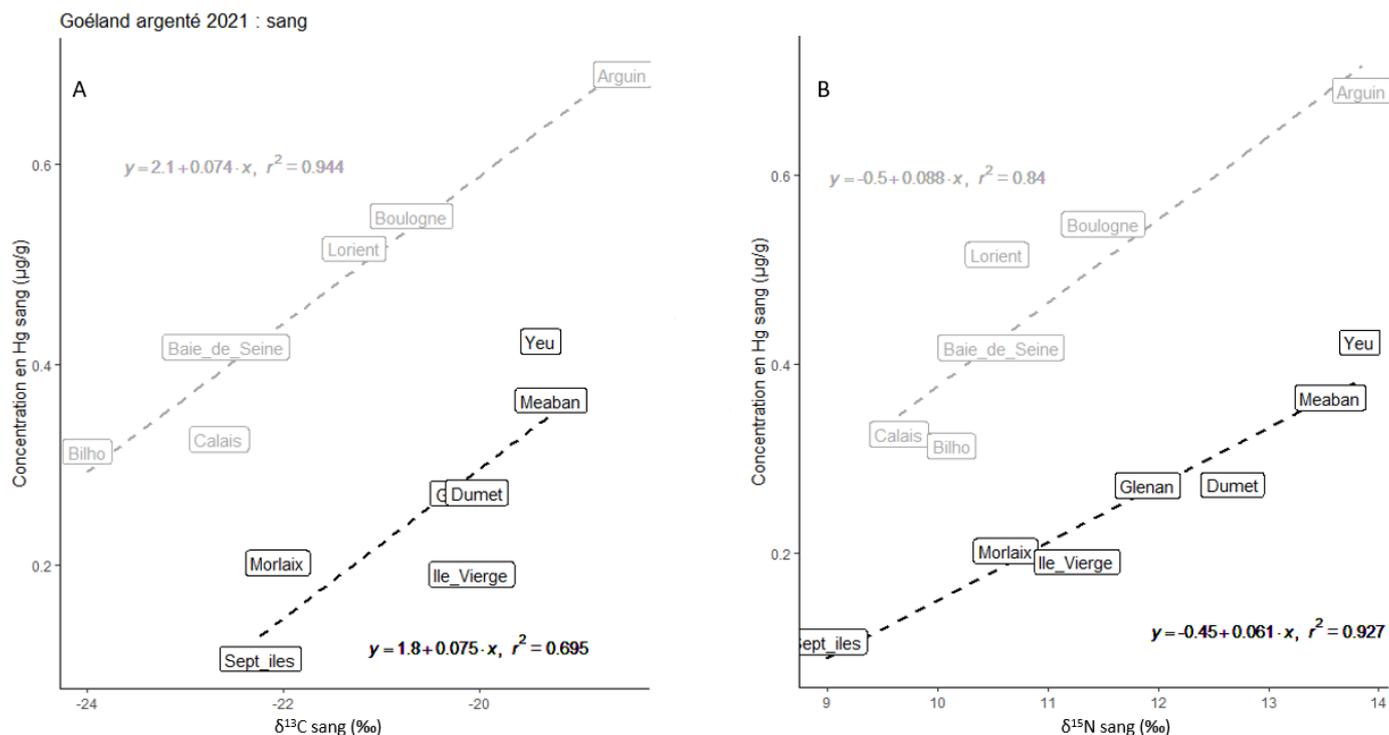


Figure 11 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans le sang de goéland argenté (2021). Mise en évidence de la double régression. Les encadrés représentent les moyennes des concentrations en Hg en fonction des valeurs isotopiques pour chaque site.

Selon les classes données par Dietz et al. (2021), toutes les moyennes des concentrations en Hg chez le goéland argenté sont situées au sein de la classe « pas de risque » (Figure 10). Cela semble étonnant, car des sites se trouvaient au sein de la catégorie « risque faible » en prenant en considération les plumes (comme Lorient en 2020, ou Lilleau des Niges en 2019 et 2020). Cette différence de distance des concentrations par rapports aux seuils peut être expliquée. Le Hg accumulé lors de la croissance, depuis la fin de pousse des duvets, est excrété dans les plumes lors de leur pousse (Blévin et al., 2013; Lewis & Furness, 1991). Ces concentrations reflètent la contamination des proies apportées par les parents durant la période d'élevage du poussin, qui sont généralement des proies de haute valeur énergétique (Barrett et al., 2007). Or le sang reflétant une période plus courte, l'alimentation des poussins peut avoir changé en fin de croissance (proies moins énergétiques, d'un niveau trophique plus bas), et amener à des concentrations en Hg plus éloignées des seuils. Les poussins échantillonnés étant des jeunes peu avant envol, on peut aussi penser que les niveaux de Hg sont bas dans le sang car une partie du Hg a justement été dépuré dans les plumes (Ackerman et al., 2011).

Tableau 3 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland argentés en 2021 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Calais	9 (90 %)	1 (10 %)	0
Boulogne	15 (100 %)	0	0
Baie de Seine	15 (100 %)	0	0
Chausey	15 (88 %)	2 (12 %)	0
Sept-Iles	15 (100 %)	0	0
Morlaix	15 (100 %)	0	0
Ile Vierge	15 (100 %)	0	0
Glénan	15 (100 %)	0	0
Lorient	13 (87 %)	2 (13 %)	0
Méaban	12 (100 %)	0	0
Dumet	14 (100 %)	0	0
Bilho	14 (93 %)	1 (7 %)	0
Yeu	15 (100 %)	0	0
Arguin	14 (93 %)	1 (7 %)	0

La majorité des oiseaux se trouvent au sein de la catégorie « pas de risque », avec quelques individus en « risque faible » (un à Calais, sur le Bilho et sur Arguin, deux à Chausey et Lorient).

3-2. Goéland brun

3-2-1. Plumes 2019

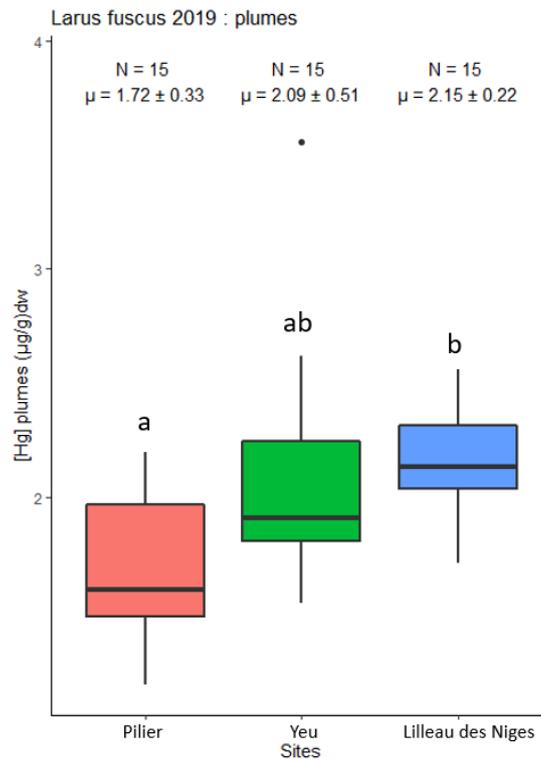


Figure 12 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland brun (2019)

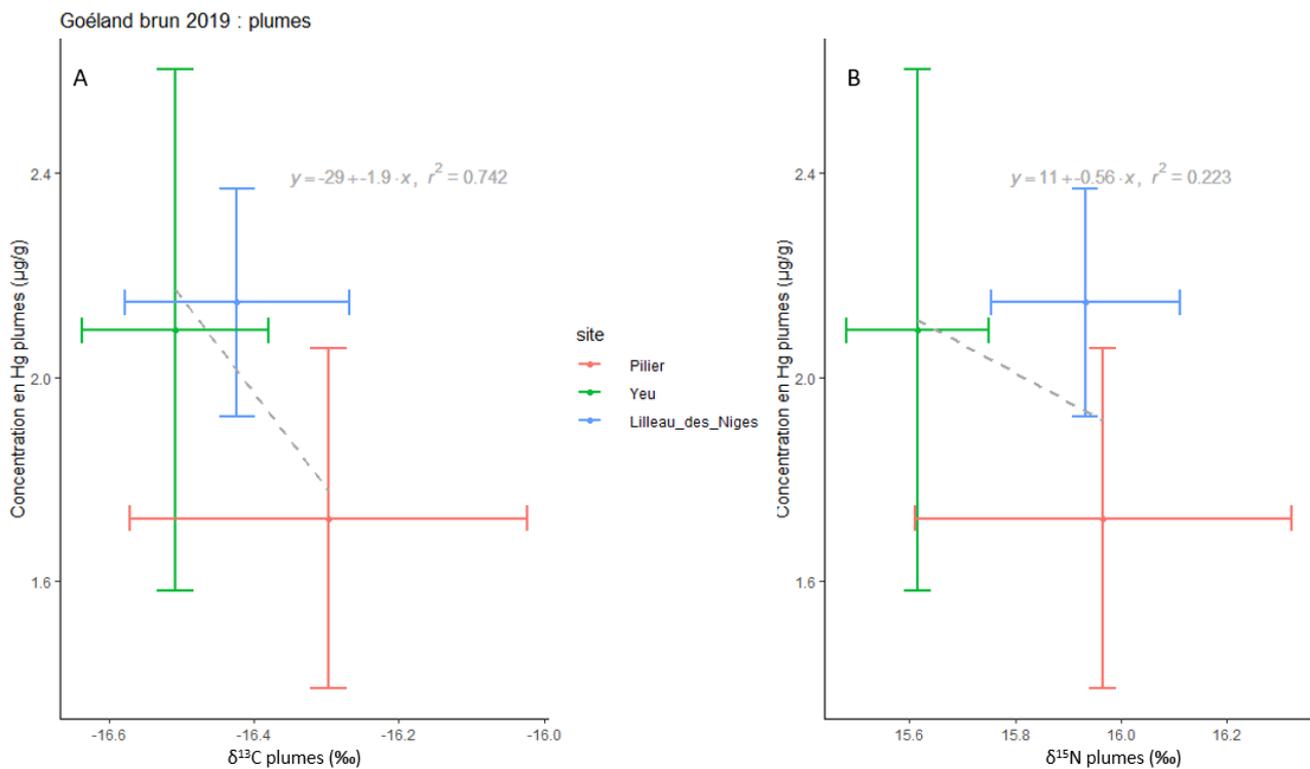


Figure 13 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de goéland brun (2019)

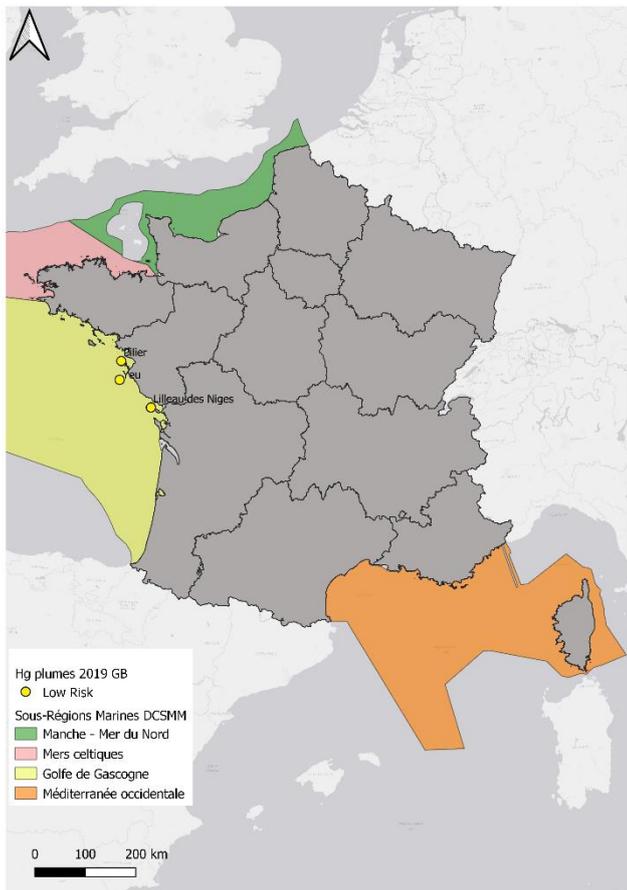


Figure 14 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland brun (2019) classées selon Dietz et al., 2021

Pour l'année 2019, les concentrations en Hg dans les plumes de goéland brun de trois sites ont été dosées (Figure 12). Les concentrations sur l'îlot du Pilier (Noirmoutier) sont significativement différentes et inférieures à celles de Lilleau des Niges (Ré). Celles de l'île d'Yeu ne diffèrent pas de celles des deux autres sites.

Les résultats des analyses isotopiques (Figure 13) montrent des niveaux inverses à ceux attendus ; en effet les $\delta^{13}\text{C}$ (A) les moins négatifs sont ceux des oiseaux du Pilier, ce qui montre une alimentation plus tournée vers les ressources marines que pour les autres sites, et d'un niveau trophique assez élevé ($\delta^{15}\text{N}$ (B) comparables pour le Pilier et Lilleau des Niges, inférieurs pour Yeu). Les différences géographiques de contamination au Hg ne sont pas ici explicables directement par les différences de ressources alimentaires. Un autre facteur est à rechercher (plus haut niveau de contamination de proies de niveaux trophiques comparables, autres sources de Hg).

Le risque est abordé via les classes de risque proposées par Dietz et al., 2021, en premier lieu en regardant les moyennes (Figure 14), puis le nombre d'individus de chaque site au sein de ces catégories (Tableau 4). Les moyennes des concentrations en Hg dans les plumes de goéland brun (Figure 14) sont toutes comprises au sein de la classe « risque faible » (Dietz et al., 2021). Aucun individu ne dépasse la valeur seuil d'apparition des effets (Eisler, 1987).

Tableau 4 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland bruns en 2019 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Pilier	6 (40 %)	9 (60 %)	0
Yeu	1 (7 %)	14 (93 %)	0
Lilleau des Niges	0	15 (100 %)	0

Tous les goélands bruns ayant fait l'objet de prélèvements de plumes en 2019 sont au sein des classes « pas de risque » et « risque faible » (Tableau 4). La majorité des oiseaux de Yeu (93 %) sont en risque faible, ainsi que 100 % de ceux de Lilleau des Niges. Aucun oiseau n'est en risque modéré.

3-2-2. Plumes 2020

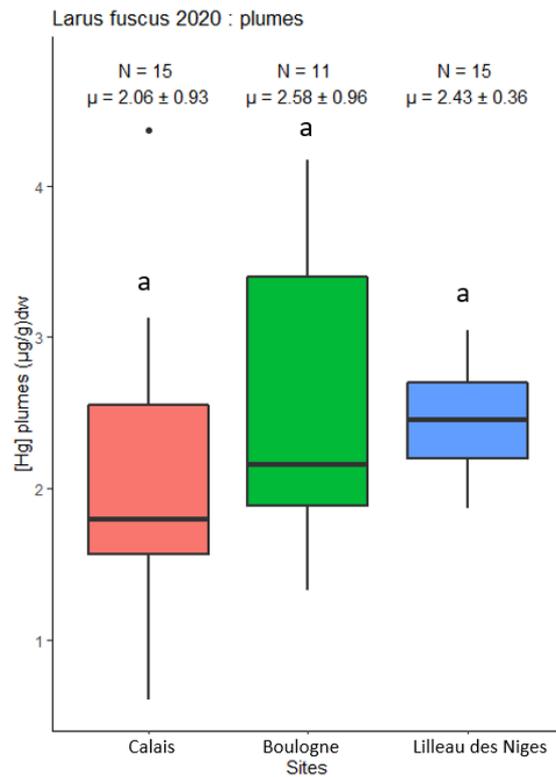


Figure 15 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland brun (2020)

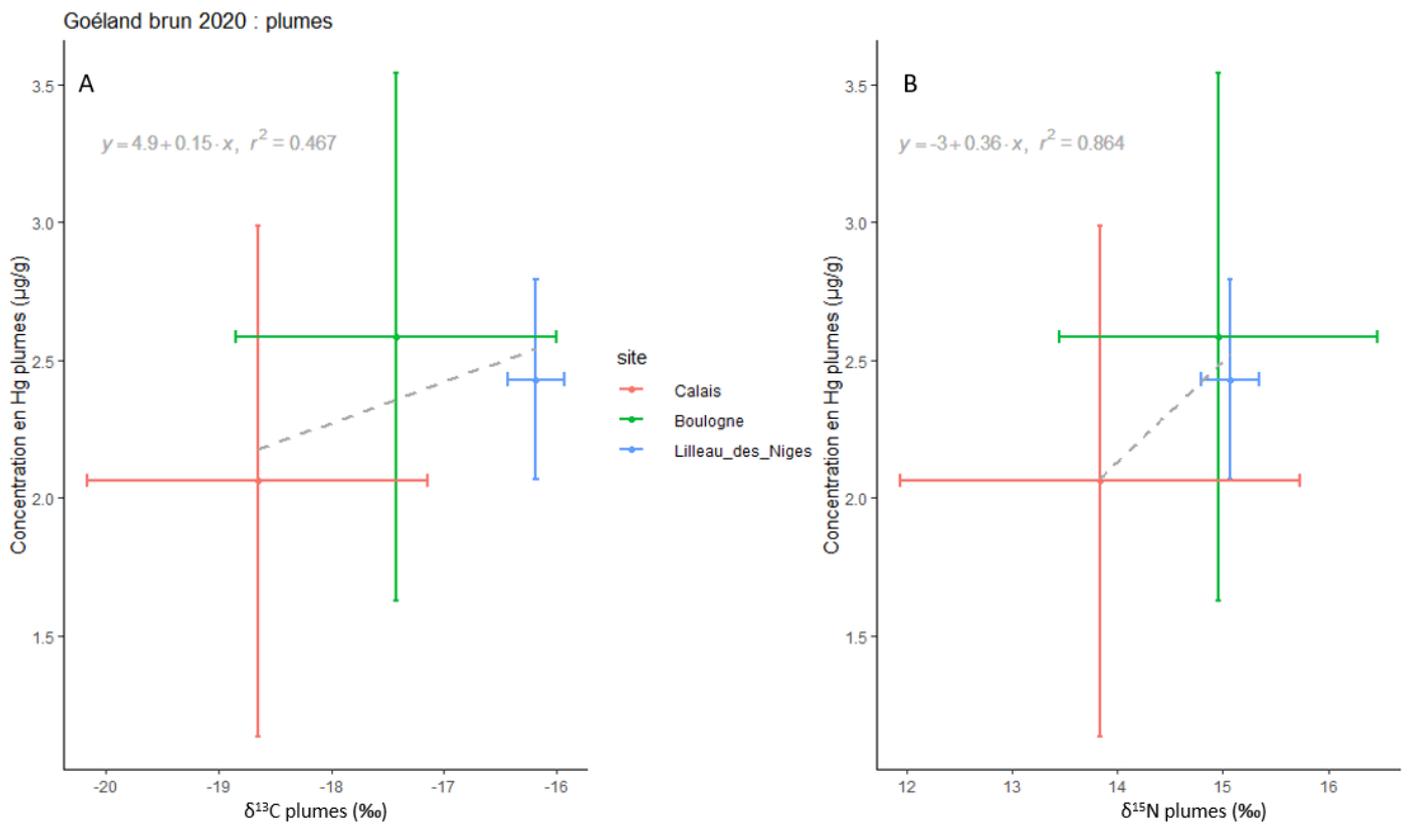


Figure 16 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de goéland brun (2020)

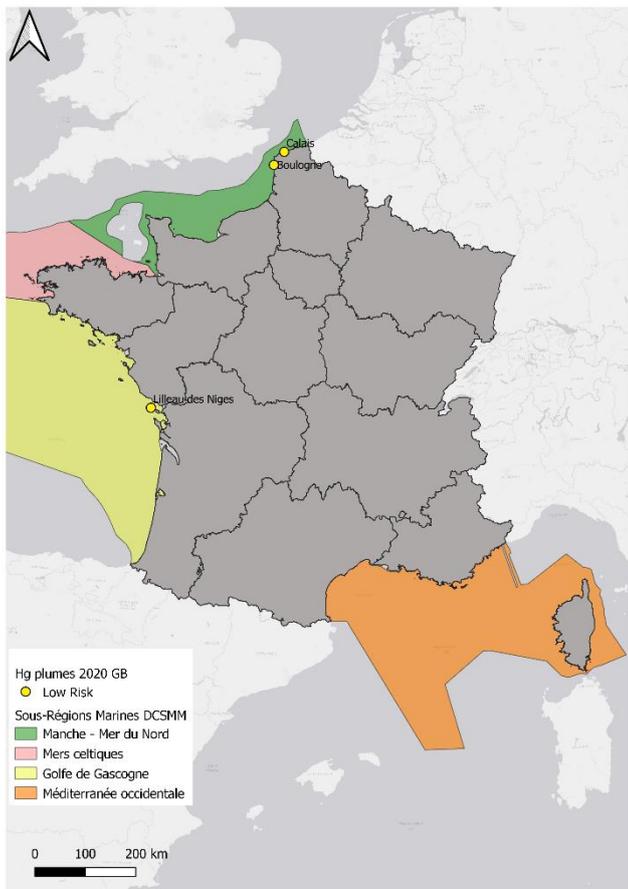


Figure 17 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland brun (2020) classées selon Dietz et al., 2021

Trois sites ont fait l'objet de prélèvements de plumes de goéland brun en 2020. Le Hg a été dosé (Figure 15), mais aucune différence significative entre les sites n'est mise en évidence.

Les analyses des valeurs isotopiques (Figure 16) montrent une différence de variabilité interindividuelle entre la colonie naturelle de Lilleau des Niges sur l'île de Ré (CV = 15%), et les colonies urbaines de Boulogne et Calais (respectivement, CV = 37 et 45%). Les goélands urbains semblent avoir un régime alimentaire plus varié que celui des goélands de Ré. Ces derniers se tournent vers une alimentation plus marine ($\delta^{13}\text{C}$ moins négatif, Figure 16A) que les autres sites, et d'un niveau trophique équivalent à celui de ceux de Boulogne ($\delta^{15}\text{N}$ plus élevé, Figure 16B).

Ces résultats sont similaires à ceux rencontrés chez les goélands argentés, avec des différences interindividuelles en termes de contamination au Hg et de valeurs isotopiques plus fortes chez les goélands urbains que chez les goélands de milieu naturel.

Pour interpréter ces résultats en terme de risque, on se reporte aux catégories de Dietz et al., 2021.

Sur les échantillons 2020 de plumes de goélands bruns (Figure 15), les moyennes se placent au sein de la catégorie « risque faible ». Aucun individu ne dépasse la valeur seuil d'apparition des effets (Eisler, 1987).

Tableau 5 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland bruns en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Calais	4 (27 %)	11 (73 %)	0
Boulogne	2 (18 %)	9 (82 %)	0
Lilleau des Niges	0	15 (100 %)	0

La majorité des individus de goélands bruns sont en « risque faible » (73 à 100 % des individus), avec des individus en « pas de risque » pour Calais et Boulogne (Tableau 5).

3-2-3. Sang 2021

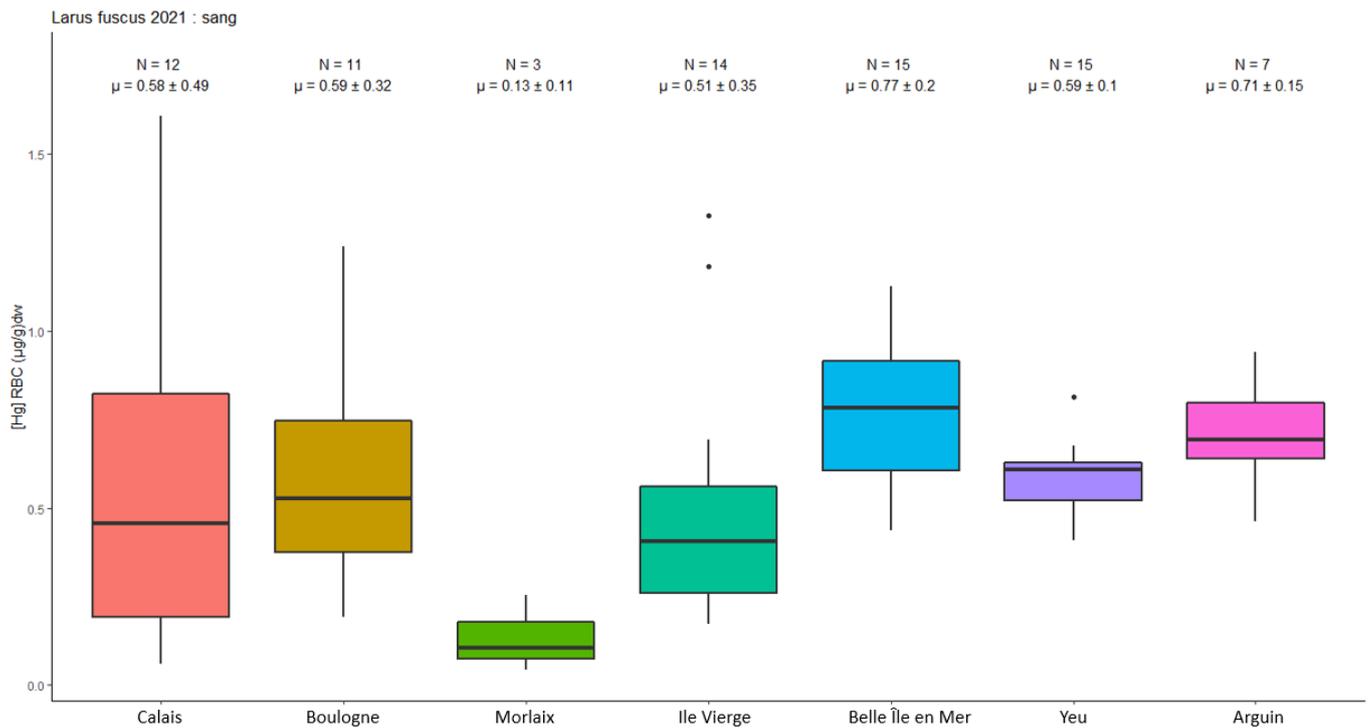


Figure 18 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland brun (2021)

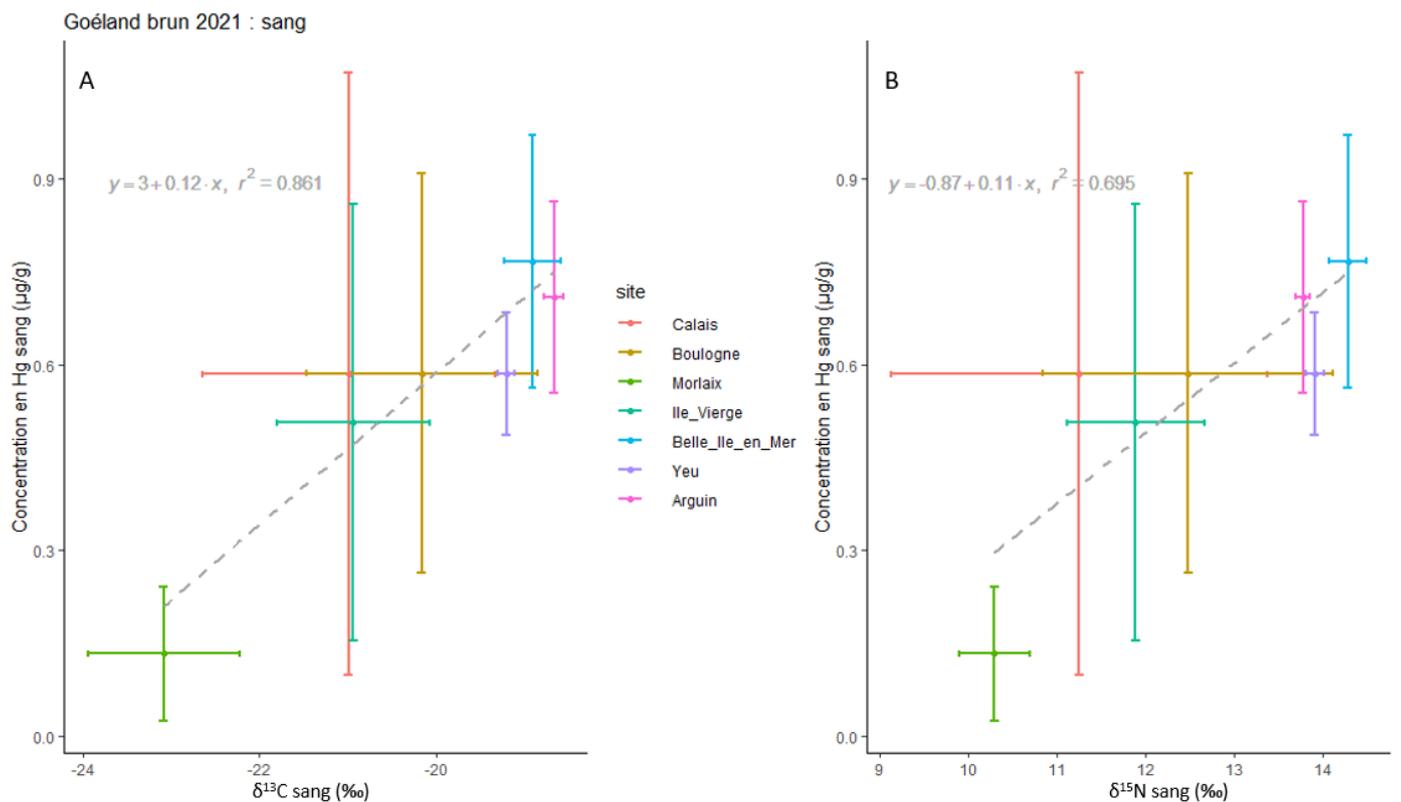


Figure 19 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans le sang de goéland brun (2021)

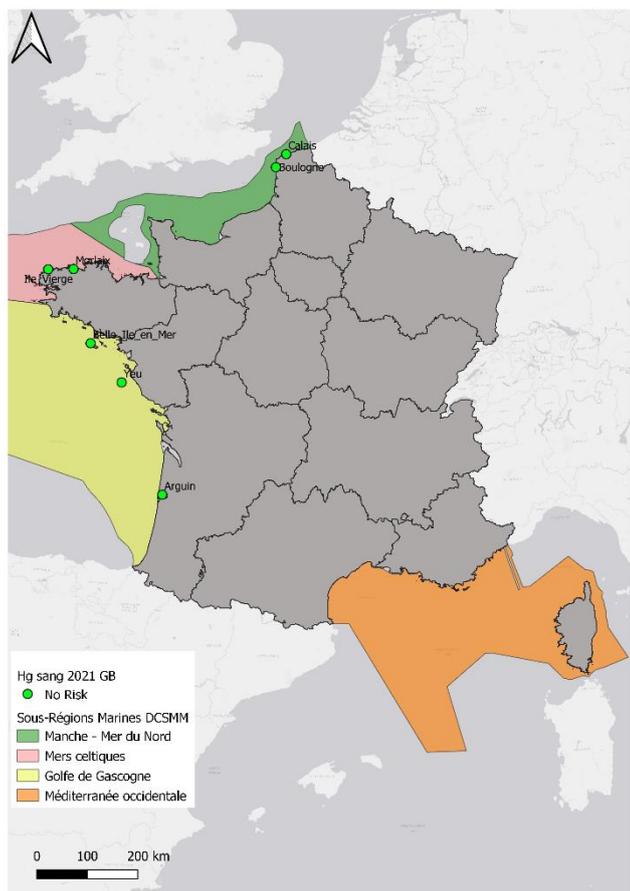


Figure 20 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland brun (2021) classées selon Dietz et al., 2021

Des prises de sang ont été effectuées sur des goélands bruns en 2021, sur sept sites. Le dosage du Hg et les analyses statistiques ne montrent pas de différences significatives entre les sites (Figure 18), bien que la différence de concentration entre la baie de Morlaix (île des Dames) et Belle-Ile-en-Mer s’approche très près de la limite de significativité (valeur-p = 0.051, quand cette valeur doit être inférieure à 0.05 pour montrer une différence significative).

Les analyses des valeurs isotopiques de l’azote et du carbone apportent des informations sur le régime alimentaire de ces oiseaux (Figure 19). On remarque un groupe constitué des oiseaux de Belle-Ile-en-Mer, de Yeu et d’Arguin, avec des $\delta^{13}\text{C}$ moins négatifs (A) et $\delta^{15}\text{N}$ élevés (B), et des variabilités interindividuelles faibles (CV de 17 à 26 %). Ces oiseaux, de colonies naturelles, ont un régime alimentaire basé sur des ressources marines et d’un niveau trophique plus élevé que sur les autres sites.

Les individus de la baie de Morlaix (avec un effectif faible de trois individus) semblent utiliser des ressources alimentaires moins marines, et de faible niveau trophique.

Les oiseaux de Calais et Boulogne montrent de fortes variabilités interindividuelles, au niveau des valeurs isotopiques comme des concentrations en Hg (respectivement CV = 84 et 54 %). Ces deux sites étant des colonies urbaines, on reconnaît ici une tendance observée plus haut, avec une diversification du régime alimentaire plus

élevée en milieu très anthropisé. Les individus de l’île Vierge (dans les Abers) montrent également une forte variabilité (CV = 69 %), bien que ce site soit une colonie naturelle. Ces oiseaux semblent plus tournés vers les terres que les individus des autres colonies naturelles ($\delta^{13}\text{C}$ moins négatifs), et adopter un régime de niveau trophique comparable à celui des colonies urbaines de Calais et Boulogne.

Selon les classes de (Dietz et al., 2021), les moyennes de concentration en Hg de tous les sites (Tableau 6) se trouvent dans la classe « pas de risque ». Cependant, des individus se trouvent au sein de la classe « risque faible » (Tableau 6).

Tableau 6 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland bruns en 2021 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d’individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	NRC	Catégories de risque	
		LRC	MRC
Calais	10 (83 %)	2 (17 %)	0
Boulogne	9 (82 %)	2 (18 %)	0
Morlaix	3 (100 %)	0	0
Ile Vierge	12 (86 %)	2 (14 %)	0
Belle Île en Mer	12 (80 %)	3 (20 %)	0
Yeu	15 (100 %)	0	0
Arguin	7 (100 %)	0	0

La majorité des goélands bruns se trouve dans la classe « pas de risque » (80 à 100% des individus), mais sur quatre sites, entre deux et trois individus se trouvent en « risque faible ».

3-3. Goéland leucophée

3-3-1. Plumes 2019

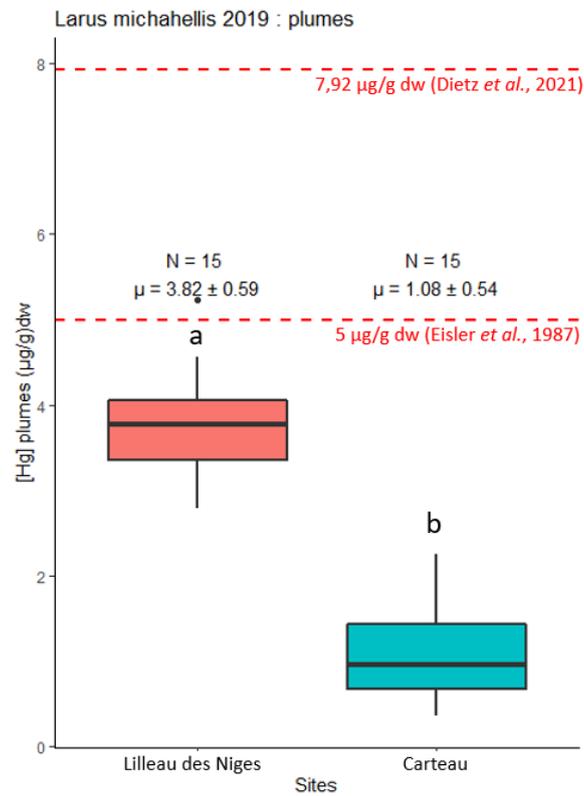


Figure 21 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland leucophée (2019)

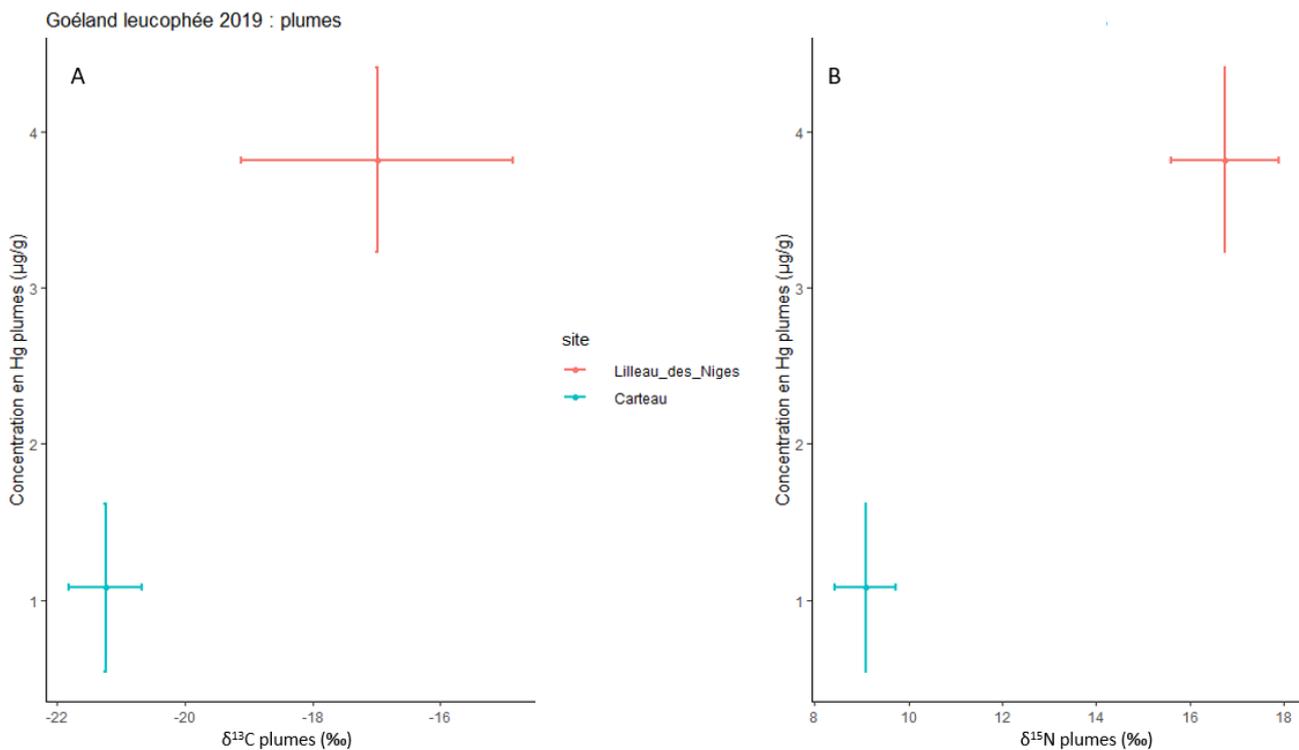


Figure 22 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de goéland leucophée (2019)

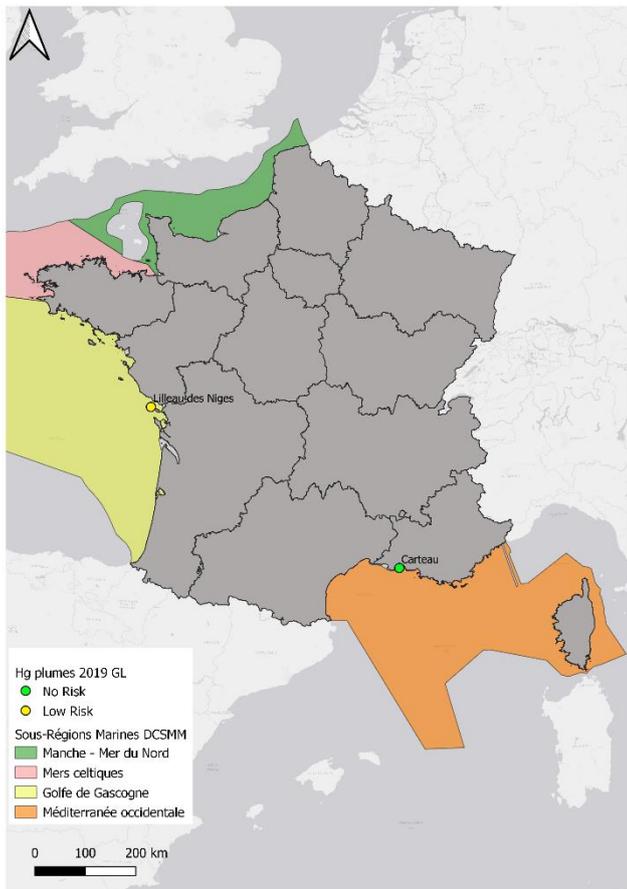


Figure 23 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland leucophée (2019) classées selon Dietz et al., 2021

En 2019, seules deux stations ont fait l’objet de prélèvements de plumes pour le goéland leucophée, une station atlantique (Lilleau des Niges sur l’île de Ré), et une station méditerranéenne (Carteau dans le golfe de Fos). Le Hg a été dosé dans ces plumes (Figure 21), et une différence significative est notée entre les deux sites. La moyenne de concentration en Hg des plumes de goéland leucophée de Lilleau des Niges est trois fois plus élevée que celle de Carteau.

Les différences des valeurs isotopiques (Figure 22) semblent montrer une forte différence dans le choix des proies entre ces deux sites, avec une alimentation plus marine ($\delta^{13}\text{C}$ moins négatif (A)) et d’un plus haut niveau trophique ($\delta^{15}\text{N}$ plus élevé (B)) pour les goélands de Lilleau des Niges. Cependant, les masses d’eau étant très éloignées, il se peut que les niveaux isotopiques de base soient différents (Borgå et al., 2012), avec des $\delta^{13}\text{C}$ plus négatifs et des $\delta^{15}\text{N}$ plus faibles en Méditerranée qu’en Atlantique (Graham et al., 2010; McMahon et al., 2013). Il faudrait pour corriger cela, des données sur les niveaux isotopiques des organismes à la base des écosystèmes de chaque site. Néanmoins, cette forte disparité pourrait expliquer la différence de contamination au Hg des oiseaux des deux sites ; l’alimentation plus marine (biodisponibilité du Hg en milieu marin) et d’un plus haut niveau trophique (bioamplification) pourrait être à l’origine de concentrations en Hg plus élevées à Lilleau des Niges. On sait que les goélands leucophées peuvent se nourrir sur des ressources variées (Ramos et al., 2009; Roscales et al., 2016),

pouvant montrer cibler des ressources marines, terrestres, et de déchets anthropiques, ce qui peut conduire des oiseaux de deux sites différents à avoir un régime alimentaire très différent.

Parmi les oiseaux de Lilleau des Niges, un individu dépasse la valeur seuil d’apparition des effets néfastes du Hg (Eisler, 1987). La Figure 23 montre que les moyennes de Hg dans les plumes de goéland leucophée de Carteau sont au sein de la classe « pas de risque », et celles de Lilleau des Niges dans la classe « risque faible » (Dietz et al., 2021).

Tableau 7 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goélands leucophées en 2019 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d’individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Lilleau des Niges	0	15 (100 %)	0
Carteau	13 (87 %)	2 (13 %)	0

Tous les individus de Lilleau des Niges sont dans la classe « risque faible » (Tableau 7), alors que la majorité des oiseaux de Carteau (87%) sont en « pas de risque ».

3-3-2. Plumes 2020

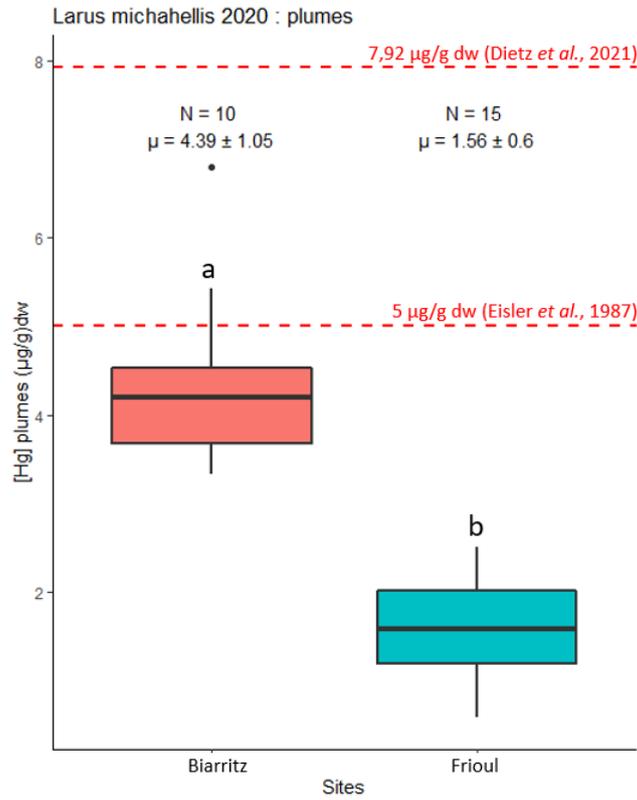


Figure 24 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland leucophée (2020)

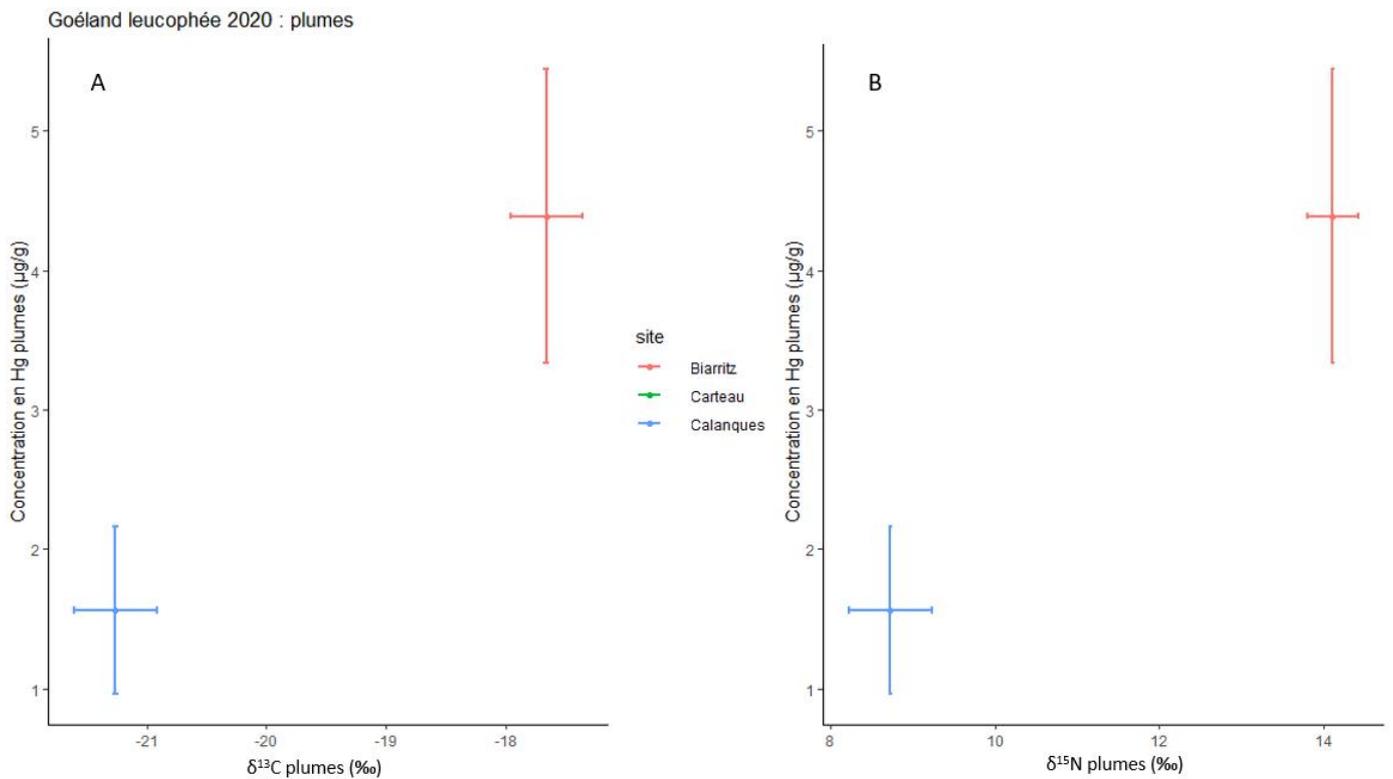


Figure 25 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de goéland leucophée (2020)

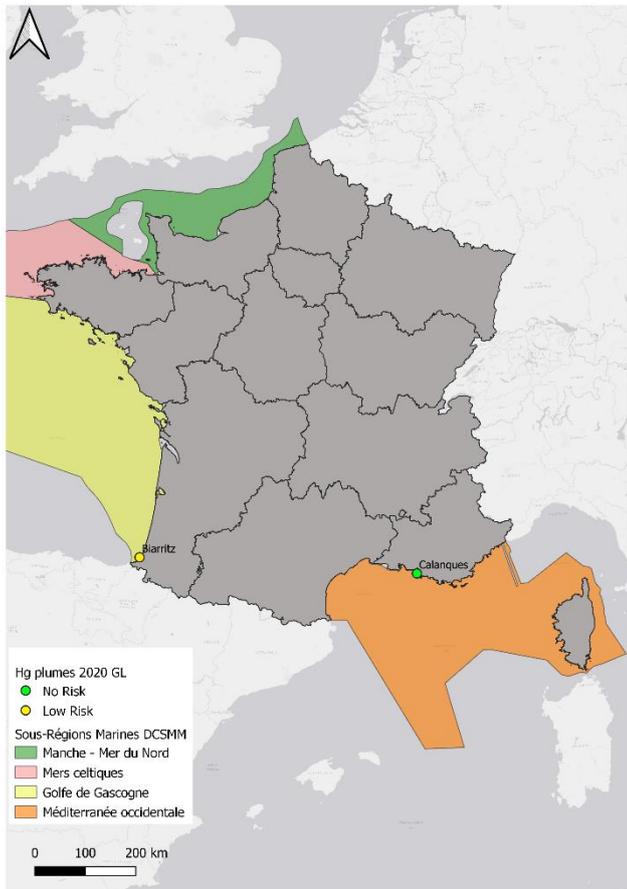


Figure 26 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland leucophée (2020) classées selon Dietz et al., 2021

En 2020, les plumes de goélands leucophées ont été prélevées sur deux sites, un atlantique, Biarritz, et un méditerranéen, le Frioul (Calanques). Les oiseaux de Biarritz sont significativement plus contaminés au Hg que les oiseaux du Frioul (Figure 24).

Les valeurs isotopiques du carbone et de l'azote diffèrent grandement entre les deux sites (Figure 25). Les goélands de Biarritz consomment des proies plus marines ($\delta^{13}\text{C}$ moins négatifs, A) et d'un niveau trophique plus élevé ($\delta^{15}\text{N}$ plus élevés, B) que ceux du Frioul. Bien que comme pour les échantillons de 2019, la grande distance entre les sites pourrait impliquer une différence des niveaux isotopiques de base, la différence de contamination au Hg semble provenir de la ressource alimentaire. Il est intéressant de noter la plus forte contamination au Hg des oiseaux sur la façade Atlantique que sur la façade méditerranéenne, en 2019 comme en 2020.

Deux individus de Biarritz dépassent la valeur seuil d'apparition des effets (Eisler, 1987), ce qui peut laisser penser que le Hg pourrait impacter cette colonie. Cette colonie est d'ailleurs classée « risque faible » selon Dietz et al., 2021 (Figure 26), pour les concentrations moyennes en Hg, alors que les oiseaux du Frioul sont en « pas de risque ». Au niveau individuel, tous les oiseaux de Biarritz sont en « risque faible », et ceux du Frioul sont presque divisés en deux parts égales, avec 53% en « pas de risque » et 47% en « risque

faible » (Tableau 8).

Tableau 8 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goélands leucophées en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Biarritz	0	10 (100 %)	0
Frioul	8 (53 %)	7 (47 %)	0

3-3-3. Sang 2021

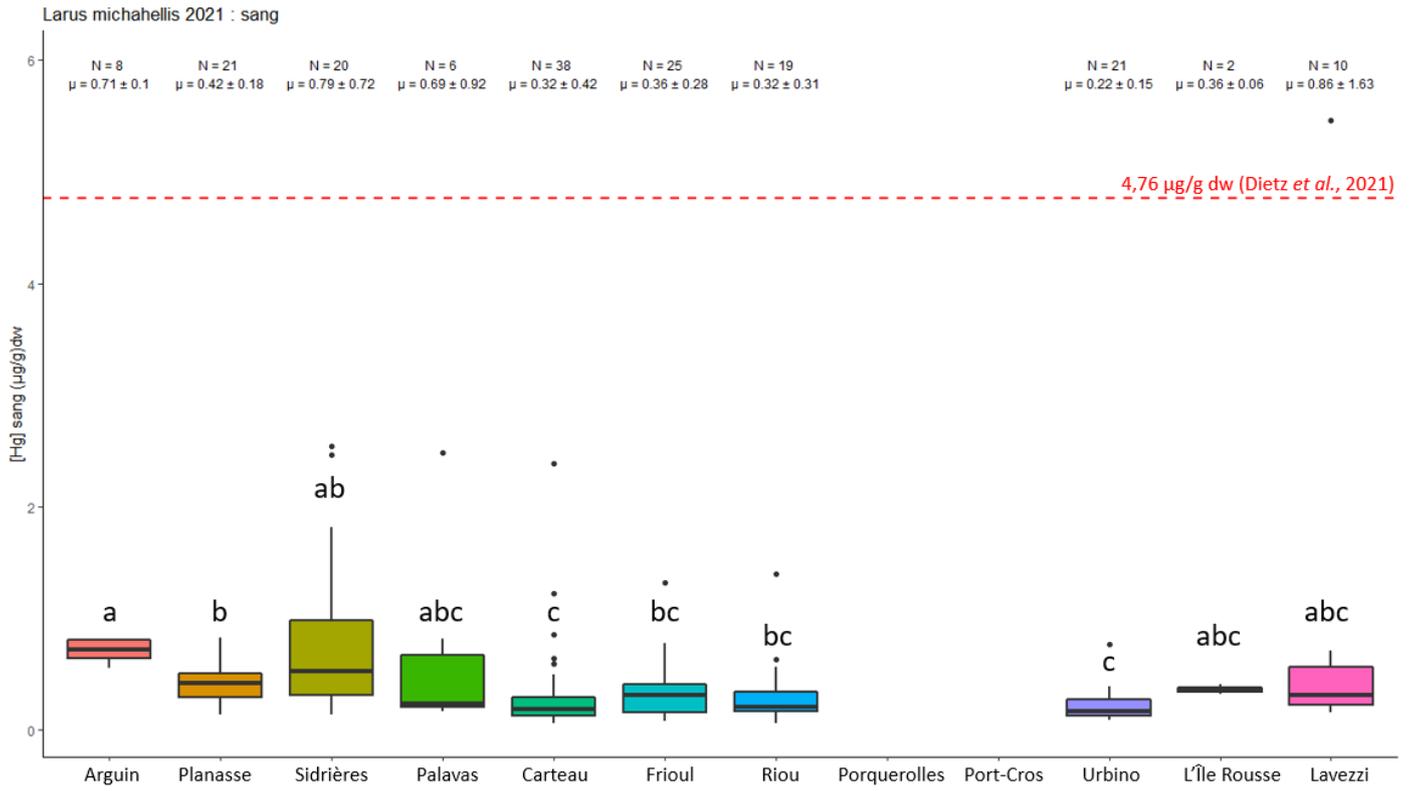


Figure 27 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland leucophée (2021)

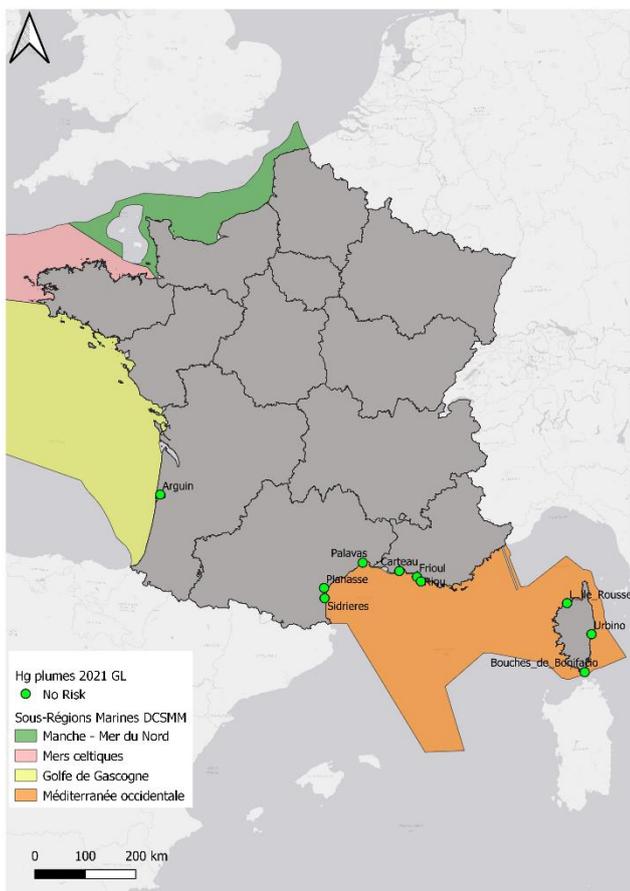


Figure 28 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland leucophée (2021) classées selon Dietz et al., 2021

En 2021, des prises de sang de goéland leucophée ont été réalisées sur 12 sites, dont un sur la façade atlantique, et les autres sur la façade méditerranéenne.

Les niveaux de Hg dans le sang (Figure 27) sont les plus élevés sur le banc d'Arguin (sans différences significatives avec les oiseaux des Sidrières (Leucate), de Palavas, de l'île-Rousse et des Lavezzi (Bouches de Bonifacio)). Les niveaux les plus bas sont notés à Carteau (golfe de Fos) et sur l'étang d'Urbino (sans différences significatives avec Palavas, avec les sites des Calanques Frioul et Riou, ni avec les sites corses de l'île-Rousse et des Lavezzi). Les concentrations en Hg des sites de Palavas, Lavezzi et l'île-Rousse ne diffèrent pas significativement des autres sites (bien que pour ce dernier site, il semble y avoir une erreur due au faible effectif, considérant la faible variabilité).

Les sites du Parc National de Port-Cros (Port-Cros et Porquerolles) ne sont pas encore analysés.

De même, les données des valeurs isotopiques sont à venir.

Un individu de l'archipel des Lavezzi dépasse le seuil de 4,76 µg/g ps, le faisant passer dans la catégorie « risque modéré » (Dietz et al., 2021), mais les moyennes se placent toutes dans la catégorie « pas de risque » (Figure 28). La répartition des individus au sein des classes figure dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goélands leucophées en 2021 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Arguin	8 (100 %)	0	0
Planasse	21 (100 %)	0	0
Sidrières	14 (70 %)	6 (30 %)	0
Palavas	5 (83 %)	1 (17 %)	0
Carteau	36 (95 %)	2 (5 %)	0
Frioul	24 (96 %)	1 (4 %)	0
Riou	18 (95 %)	1 (5 %)	0
Urbino	21 (100 %)	0	0
L'île Rousse	2 (100 %)	0	0
Lavezzi	9 (90 %)	0	1 (10 %)

La majorité des individus de goéland leucophée se trouve dans la classe « pas de risque » (70 à 100% des individus). C'est sur le site des Sidrières qu'on note le plus grand nombre d'individus en « risque faible » (6 oiseaux soit 30%). Des oiseaux de Palavas (1), de Carteau (2), du Frioul (1) et de Riou (1) sont également en « risque faible ». Un oiseau des Lavezzi est en « risque modéré ».

3-4. Goéland marin

3-4-1. Plumes 2019

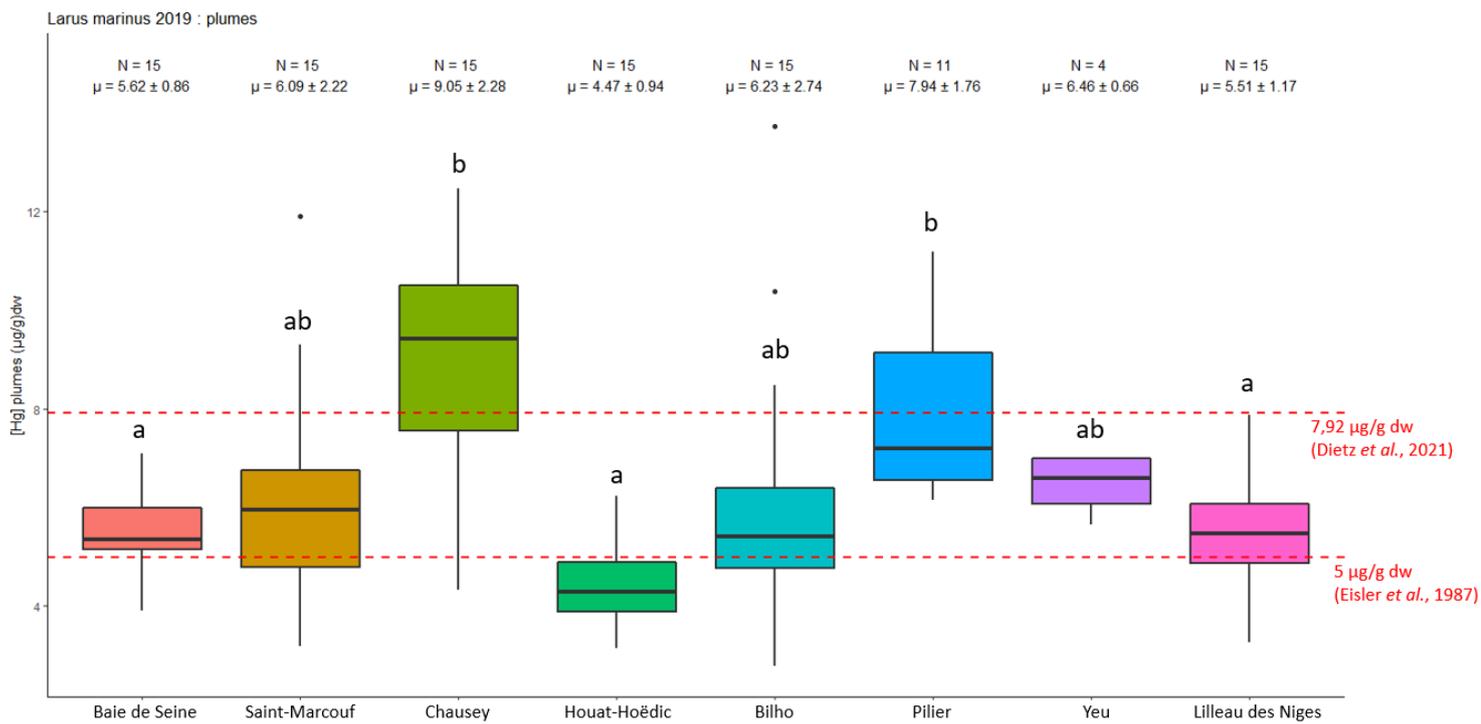


Figure 29 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland marin (2019)

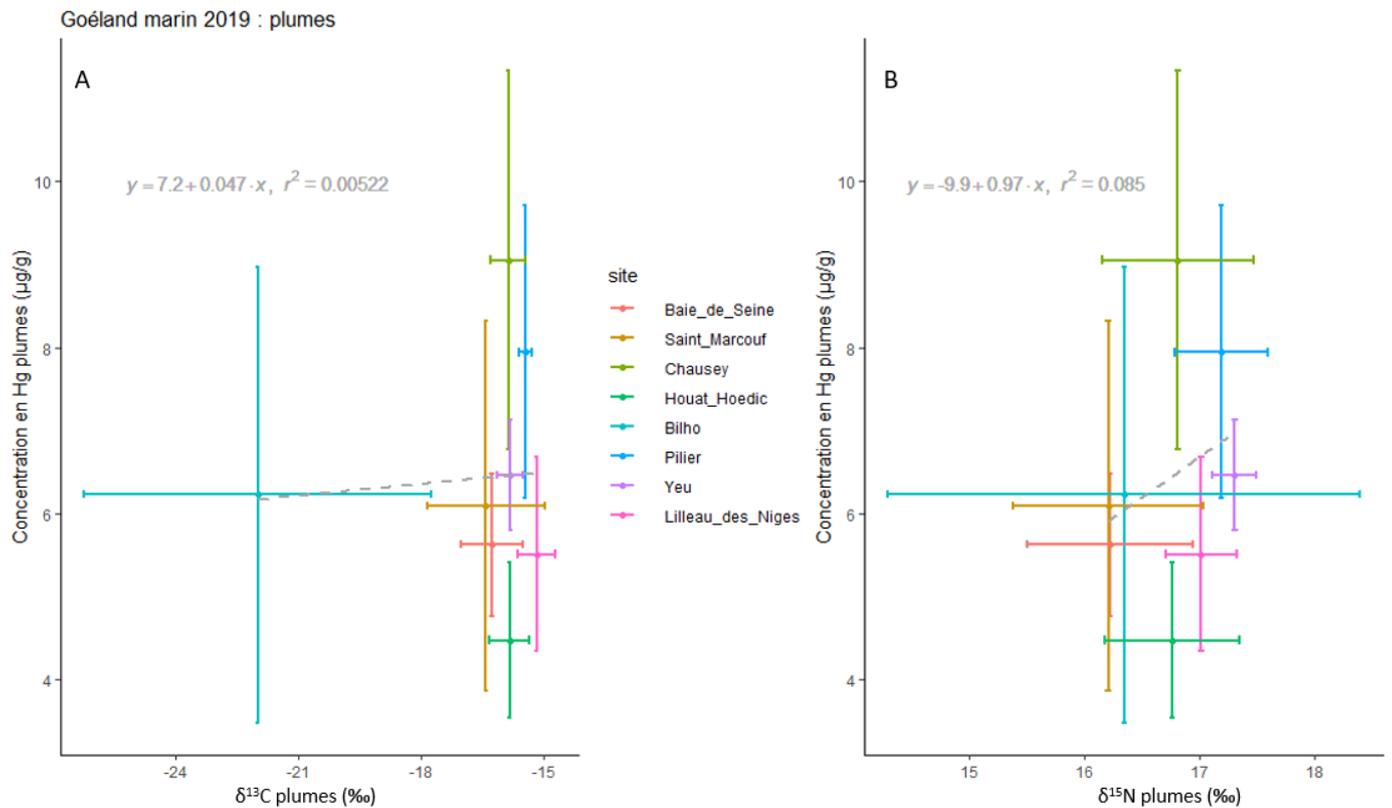


Figure 30 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de goéland marin (2019)

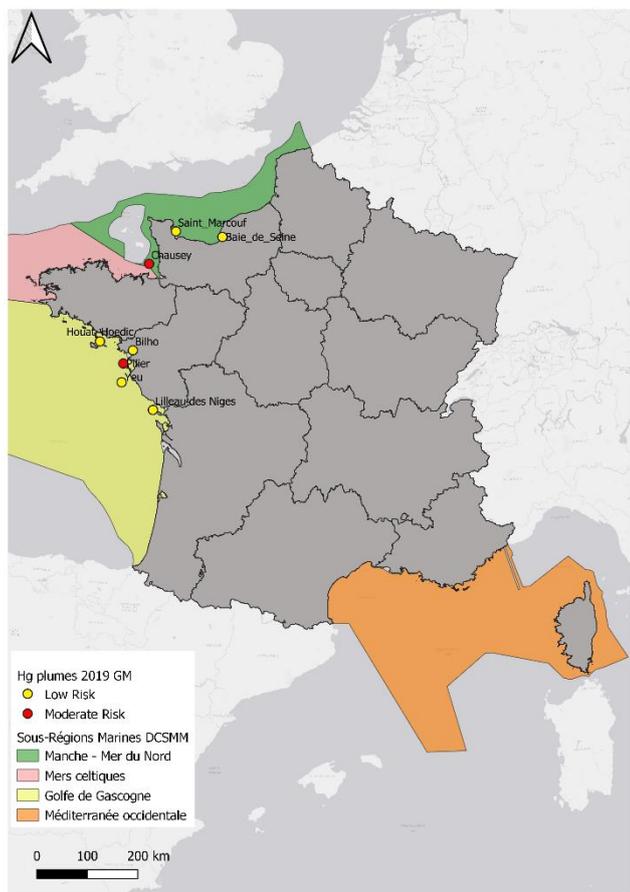


Figure 31 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland marin (2019) classées selon Dietz et al., 2021

Huit sites ont fait l'objet de prélèvements de plumes de goélands marins.

Le dosage du Hg (Figure 29) révèle la présence de deux groupes : a – baie de Seine (îlot du Ratier), Houat-Hoëdic (Valuec), Lilleau des Niges (Fier d'Ars) < b – Chausey, îlot du Pilier (Noirmoutier). Les sites de Saint-Marcouf, du Bilho (baie de Loire) et de l'île d'Yeu ne diffèrent pas significativement des deux groupes.

L'analyse des $\delta^{13}\text{C}$ (Figure 30A) montre que les goélands marins du banc de Bilho ont une alimentation moins marine que celle de tous les autres sites. La variabilité interindividuelle est également très forte pour ce site, pour le $\delta^{13}\text{C}$ comme pour le $\delta^{15}\text{N}$ (Figure 30B), suggérant un régime alimentaire très varié (CV $\delta^{13}\text{C}$ = 19%, CV $\delta^{15}\text{N}$ = 12%). On peut penser que la présence de Saint-Nazaire à proximité de la colonie encourage des individus à utiliser des ressources anthropiques. Ce n'est pas le cas pour les goélands marins de la baie de Seine, qui sont pourtant proches du Havre.

Pour tous les autres sites, les $\delta^{13}\text{C}$ moins négatifs montrent que le goéland marin semble résolument tourné vers des ressources marines. On ne discerne pas de réelle tendance pour les $\delta^{15}\text{N}$, qui se superposent. Les niveaux sont hauts, ce qui implique une alimentation sur des ressources de haut niveau trophique.

Les variabilités interindividuelles au sein des sites, mise à part celle des goélands du Bilho, ne diffèrent pas beaucoup entre sites (CV $\delta^{13}\text{C}$ = 1 à 8%, CV $\delta^{15}\text{N}$ = 2 à 5%).

Les niveaux de contamination des goélands marins sont préoccupants. La majorité des individus dépasse la valeur seuil de $5\mu\text{g/g}$ (Eisler, 1987), et ils sont nombreux à être au-dessus des $7,92\mu\text{g/g}$, les faisant entrer dans la catégorie « risque modéré » (Dietz et al., 2021) comme on peut le voir dans le Tableau 10. Les moyennes des concentrations en Hg dans les plumes des goélands marins de la baie de Seine, de Saint-Marcouf, de Houat-Hoëdic, de Yeu et de Lilleau des Niges sont dans la catégorie « risque faible », quand celles de Chausey et du Pilier sont dans la catégorie « risque modéré » (Figure 31).

Tableau 10 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goélands marins en 2019 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	NRC	Catégories de risque	
		LRC	MRC
Baie de Seine	0	15 (100 %)	0
Saint-Marcouf	0	13 (87 %)	2 (13 %)
Chausey	0	4 (27 %)	11 (73 %)
Houat-Hoëdic	0	15 (100 %)	0
Bilho	0	12 (80 %)	3 (20 %)
Pilier	0	6 (55 %)	5 (45 %)
Yeu	0	4 (100 %)	0
Lilleau des Niges	0	15 (100 %)	0

Aucun goéland marin ne se trouve dans la catégorie « pas de risque ». Sur certains sites, la totalité des oiseaux se trouve dans la catégorie « risque faible » (Baie de Seine, Houat-Hoëdic, Yeu, Lilleau des Niges). À Saint-Marcouf, à Chausey, au Bilho et sur le Pilier des individus (de 2 à 11, soit de 13% à 73%) sont dans la catégorie « risque modéré ».

Ces hauts niveaux de contamination des goélands marins s'expliquent par leur haut niveau trophique (bioamplification du Hg) et leur utilisation des ressources marines (biodisponibilité du Hg en milieu marin). Le goéland marin est connu pour être un prédateur, y compris d'autres oiseaux marins (Götmark, 1984; Rome & Ellis, 2004, observation personnelle), se nourrissant également sur les ordures et les rejets de chalut.

3-4-2. Plumes 2020

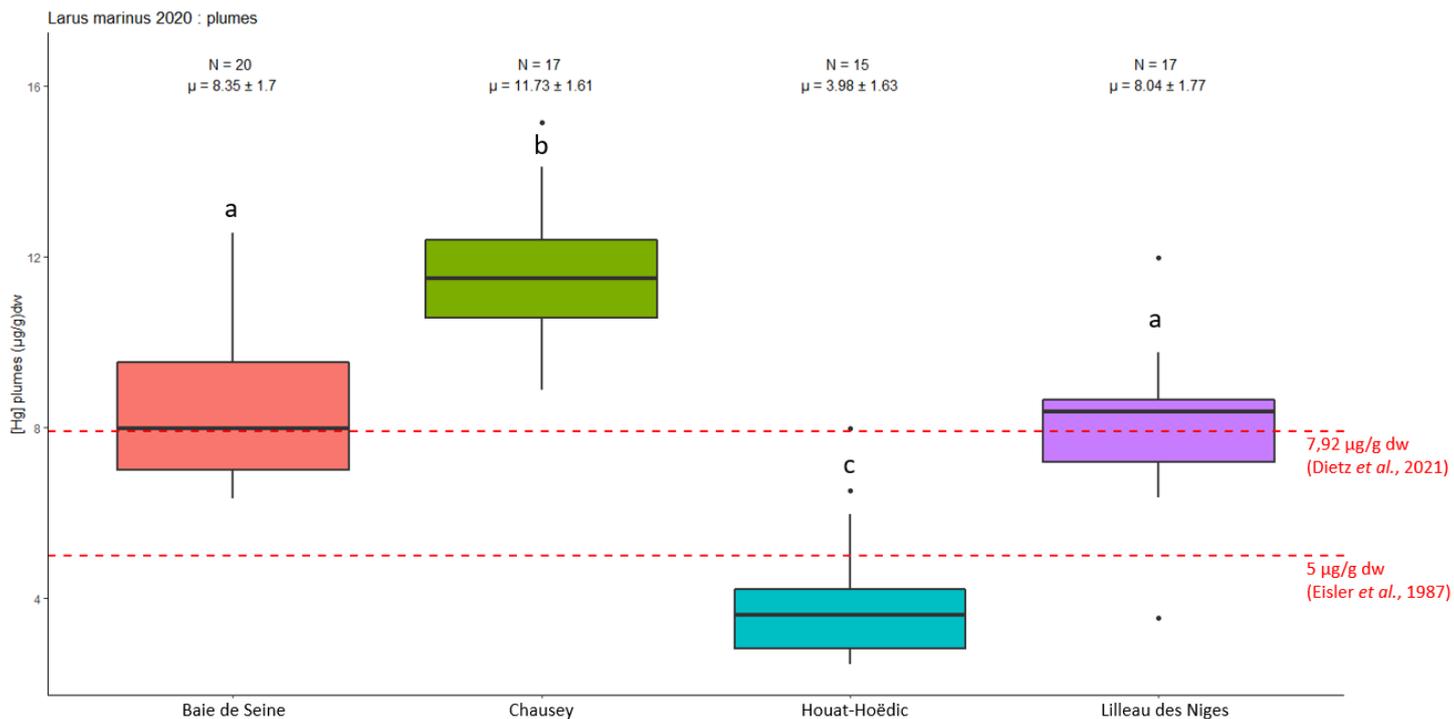


Figure 32 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland marin (2020)

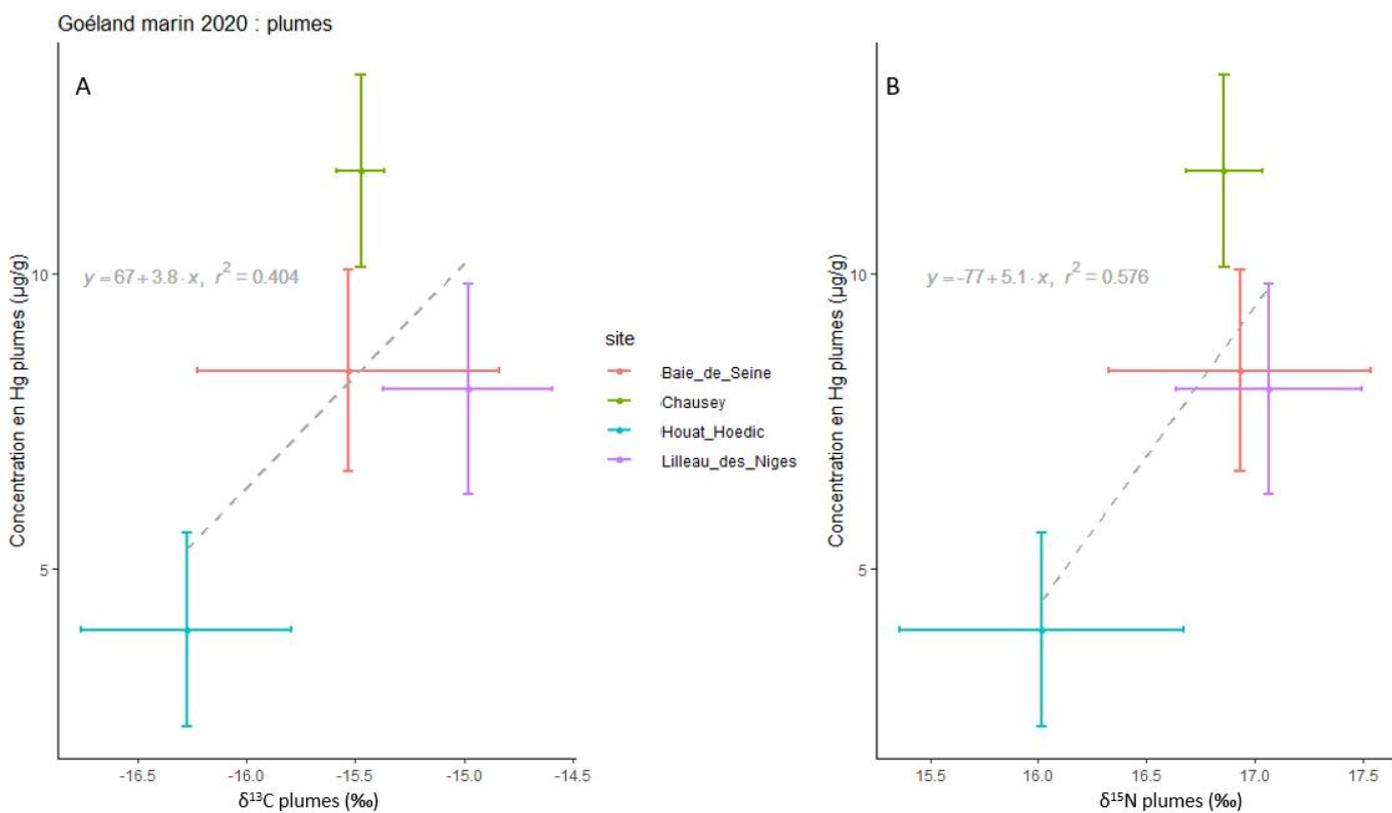


Figure 33 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de goéland marin (2020)

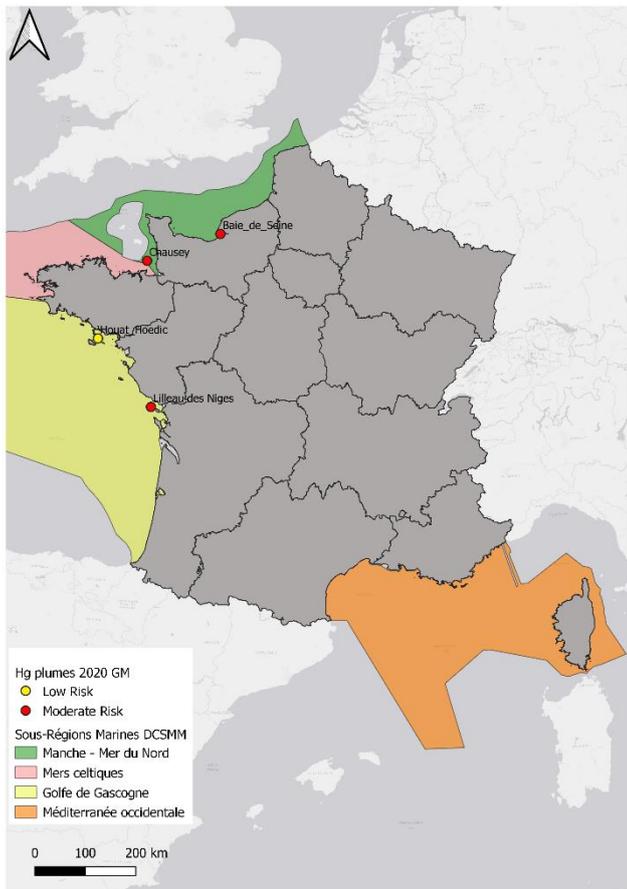


Figure 34 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goéland marin (2020) classées selon Dietz et al., 2021

En 2020, des prélèvements de plumes sur les goélands marins ont été effectués sur quatre sites.

Les analyses du Hg montrent quatre groupes (Figure 32) : c – Houat-Hoëdic (Valuec) < a - Baie de Seine (îlot du Ratier), Lilleau des Niges (Ré) < b - Chausey. Ces différences sont semblables à celles de 2019, avec les goélands de Chausey fortement contaminés au Hg, ceux d’Houat-Hoëdic les moins contaminés, et ceux de la baie de Seine et de Lilleau des Niges présentant des concentrations intermédiaires. Pour ces sites, les concentrations sont plus élevées en 2020 qu’en 2019 (mis à part pour Houat-Hoëdic).

Les $\delta^{13}\text{C}$ (Figure 33A) indiquent une consommation de proies d’origine marine pour tous les sites. On peut y voir des différences entre sites qui n’étaient pas discernables en 2019 du fait de la présence des individus du Bilho, qui par leurs larges variations interindividuelles, éclipsaient les différences fines entre les autres sites. Les goélands marins de Houat-Hoëdic se nourrissent sur des ressources moins marines que les goélands des autres sites. En revanche, ceux de Chausey ne semblent pas cibler des proies plus marines que ceux du Ratier ou de Lilleau des Niges. De la même manière, les $\delta^{15}\text{N}$ (Figure 33B) des goélands de ces trois derniers sites ne diffèrent pas, alors que ceux de Houat-Hoëdic sont plus bas, ce qui implique une utilisation des ressources alimentaires d’un niveau trophique plus bas pour ces derniers. Pour les oiseaux de Houat, les rapports isotopiques apportent des informations sur les raisons de leur plus faible exposition au Hg (proies moins marines, et d’un niveau trophique inférieur).

Les niveaux des concentrations en Hg sont élevés, dépassant les valeurs seuils d’apparition des effets délétères et de risques modérés (Dietz et al., 2021; Eisler, 1987). Les moyennes (Figure 34) se situent dans la classe des « risques faibles » (Houat-Hoëdic) et celle des « risques modérés » (baie de Seine, Chausey et Lilleau des Niges).

Les niveaux des concentrations en Hg sont élevés, dépassant les valeurs seuils d’apparition des effets délétères et de risques modérés (Dietz et al., 2021; Eisler, 1987). Les moyennes (Figure 34) se situent dans la classe des « risques faibles » (Houat-Hoëdic) et celle des « risques modérés » (baie de Seine, Chausey et Lilleau des Niges).

Tableau 11 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de goélands marins en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d’individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Baie de Seine	0	9 (45 %)	11 (55 %)
Chausey	0	0	17 (100 %)
Houat-Hoëdic	0	14 (93 %)	1 (7 %)
Lilleau des Niges	0	7 (41 %)	10 (59 %)

Comme en 2019, aucun oiseau ne se trouve dans la catégorie « risque faible ». Les oiseaux de Chausey, les plus contaminés, sont tous en « risque modéré », tandis que ceux d’Houat-Hoëdic, les moins contaminés, sont en majorité en « risque faible » (93% des individus). Les oiseaux des autres sites se répartissent entre ces deux catégories.

3-4-3. Sang 2021

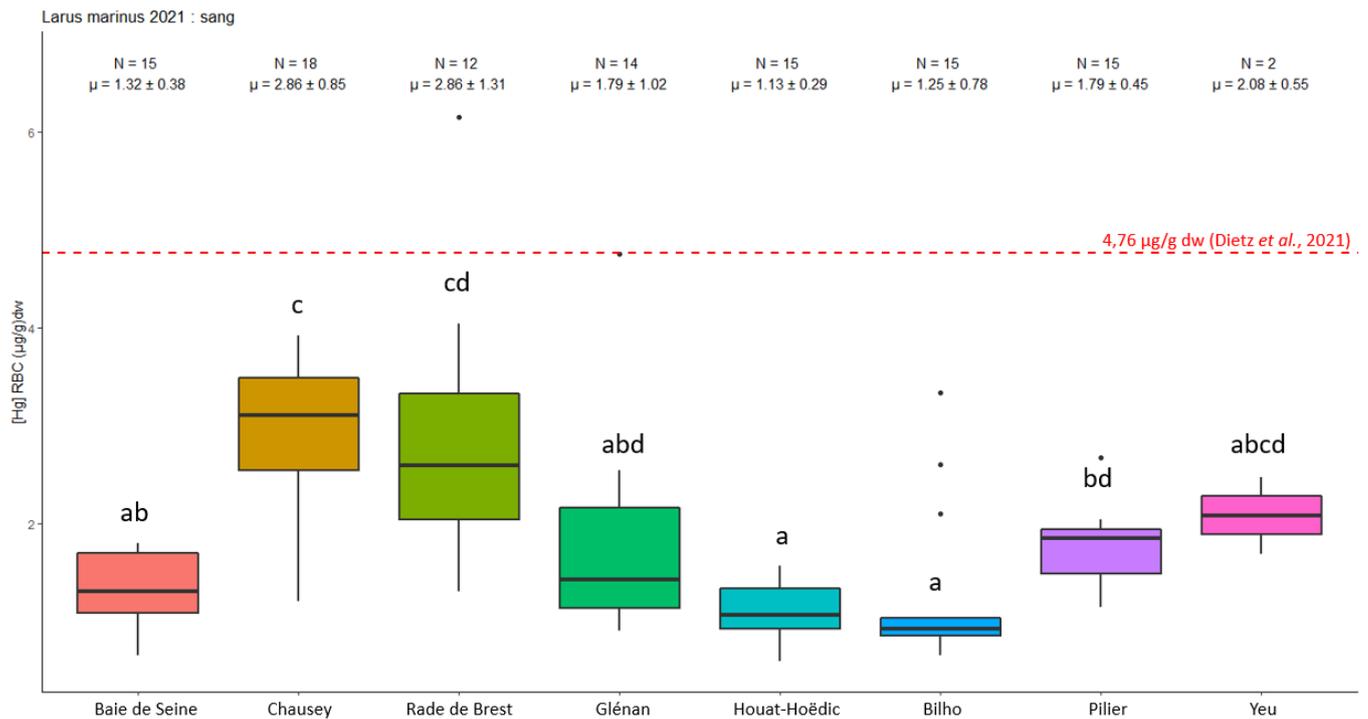


Figure 35 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland marin (2021)

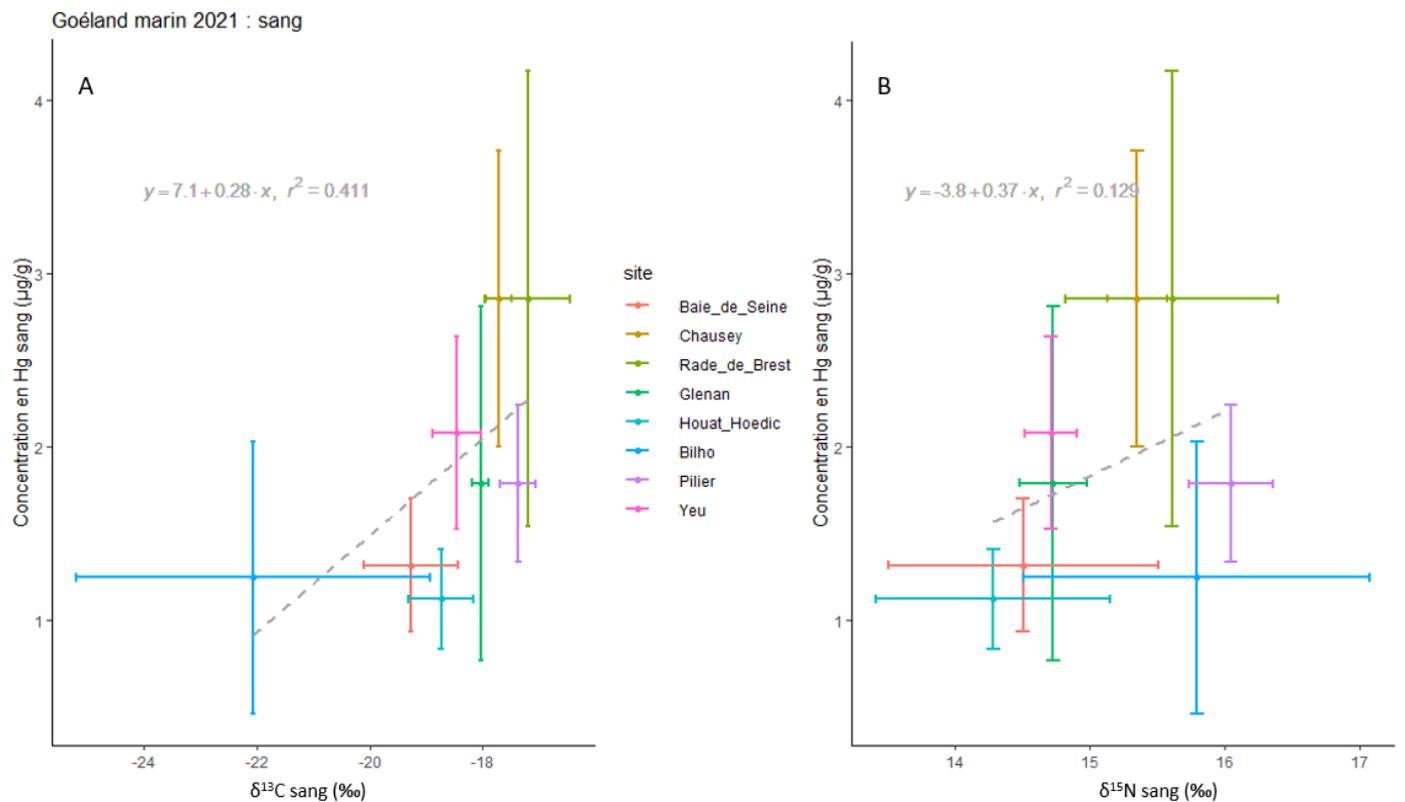


Figure 36 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans le sang de goéland marin (2021)

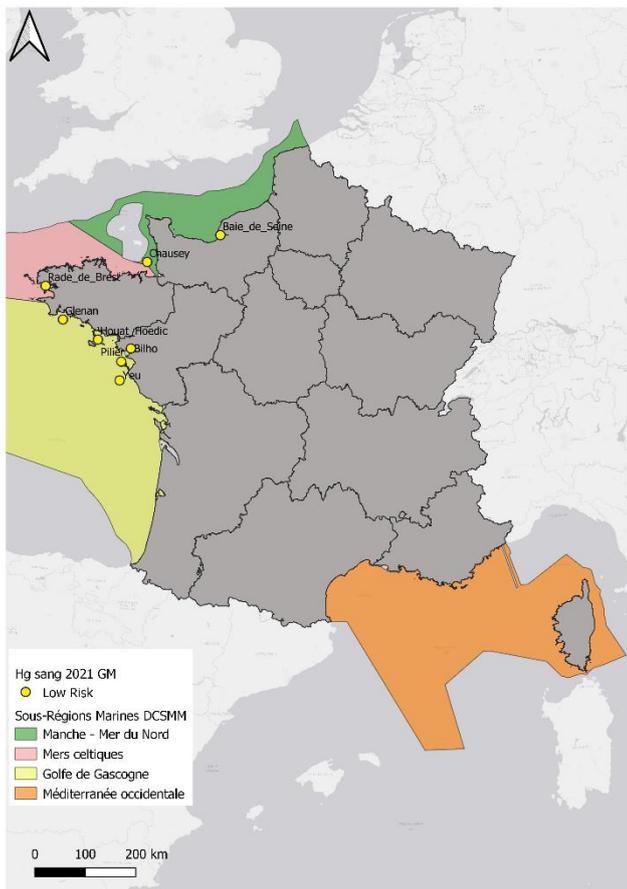


Figure 37 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goéland marin (2021) classées selon Dietz et al., 2021

En 2021, des goélands marins ont été capturés sur huit stations, et du sang prélevé.

Des différences significatives sont visibles au niveau des concentrations en Hg dans les cellules sanguines (Figure 35). Comme pour les années précédentes, les goélands d’Houat-Hoëdic présentent des concentrations basses en regard de celles des autres sites (avec la baie de Seine, les Glénan, le banc du Bilho, et l’île d’Yeu), et Chausey des concentrations supérieures à celles autres sites (avec la rade de Brest (île des Morts) et l’île d’Yeu (vieux château)). Les concentrations des oiseaux de l’île d’Yeu ne diffèrent pas significativement de celles des autres sites, mais la représentation graphique semble le placer plus haut que le groupe a. Ce peut être dû à un effectif très faible, seulement deux individus, qui poserait un problème dans le test statistique.

Comme en 2019, les goélands du Bilho présentent des $\delta^{13}\text{C}$ étendus, associés à un variabilité interindividuelle importante (CV Hg = 62%, CV $\delta^{13}\text{C}$ = 14%), montrant une alimentation sur des ressources moins marines, et d’origines diversifiées (Figure 36A). Les $\delta^{15}\text{N}$ (B) montrent que les proies de ces oiseaux du Bilho ne sont pas d’un niveau trophique plus bas que celle des autres sites.

Les goélands marins des colonies des Glénan, de Chausey et du Pilier ont des variabilités de $\delta^{15}\text{N}$ inférieures à celles des autres sites (CV $\delta^{15}\text{N}$ de l’ordre de 1 à 2%, contre 5 à 8% pour les autres sites).

Les niveaux de contamination des goélands marins sont plus élevés que ceux des autres espèces. Les moyennes de concentrations en Hg dans le sang (Figure 37) sont toutes dans la catégorie « risque faible » (Dietz et al., 2021).

Tableau 12 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de goélands marins en 2021 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d’individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Baie de Seine	4 (27 %)	11 (73 %)	0
Chausey	0	18 (100 %)	0
Rade de Brest	0	11 (92 %)	1 (8 %)
Glénan	3 (21 %)	11 (79 %)	0
Houat-Hoëdic	5 (33%)	10 (67 %)	0
Bilho	8 (53 %)	7 (47 %)	0
Pilier	0	15 (100 %)	0
Yeu	0	2 (100 %)	0

Les goélands marins se situent en majorité dans la classe « risque faible ». Sur plusieurs sites, la totalité des oiseaux est dans cette catégorie (Chausey, Pilier et Yeu). Un individu de la Rade de Brest se place dans la catégorie « risque modéré ».

3-5. Puffin de Scopoli

3-5-1. Sang 2020

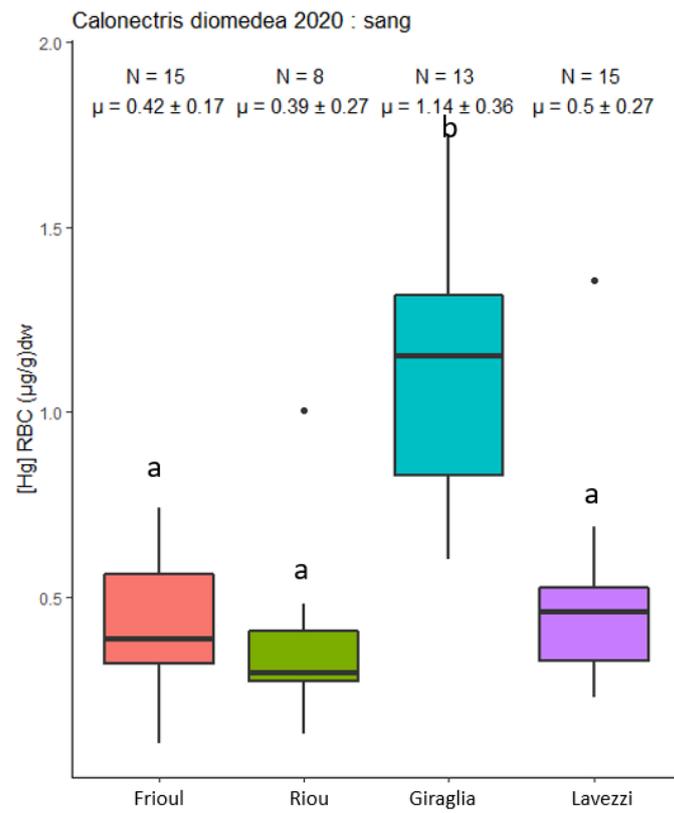


Figure 38 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de puffin de Scopoli (2020)

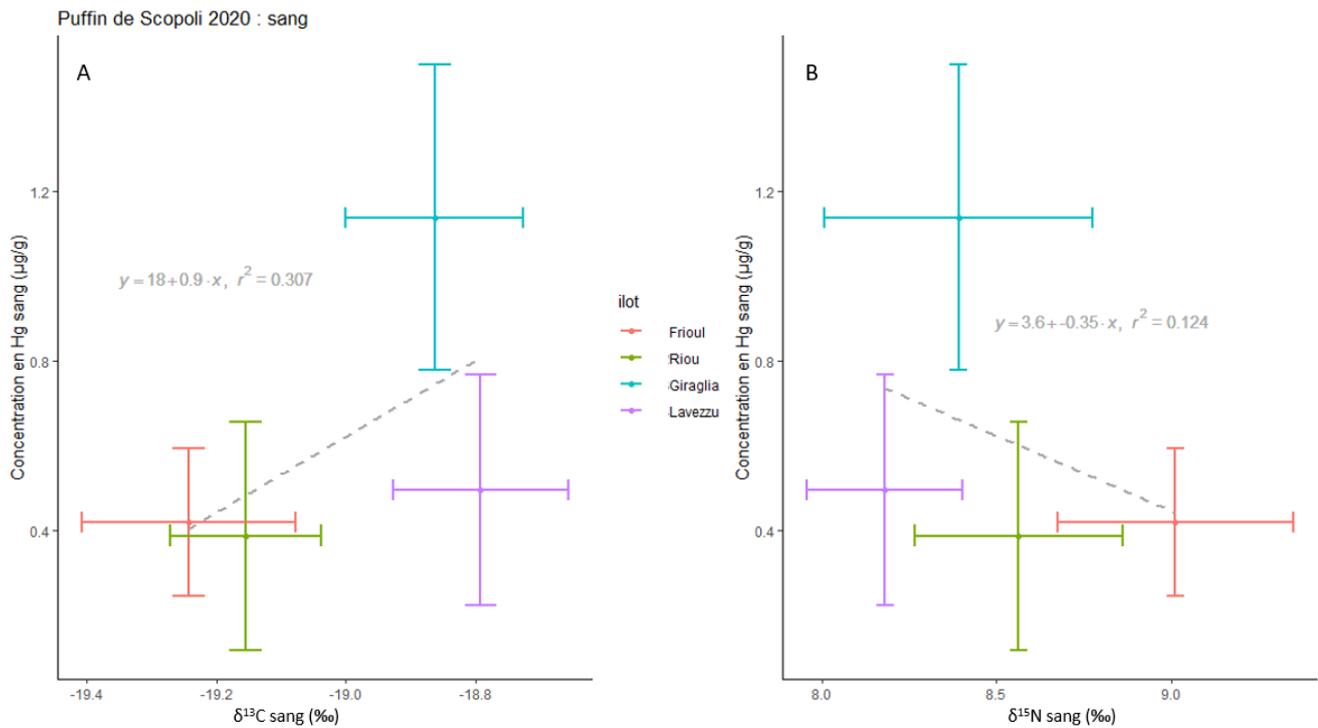


Figure 39 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans le sang de puffin de Scopoli (2020)

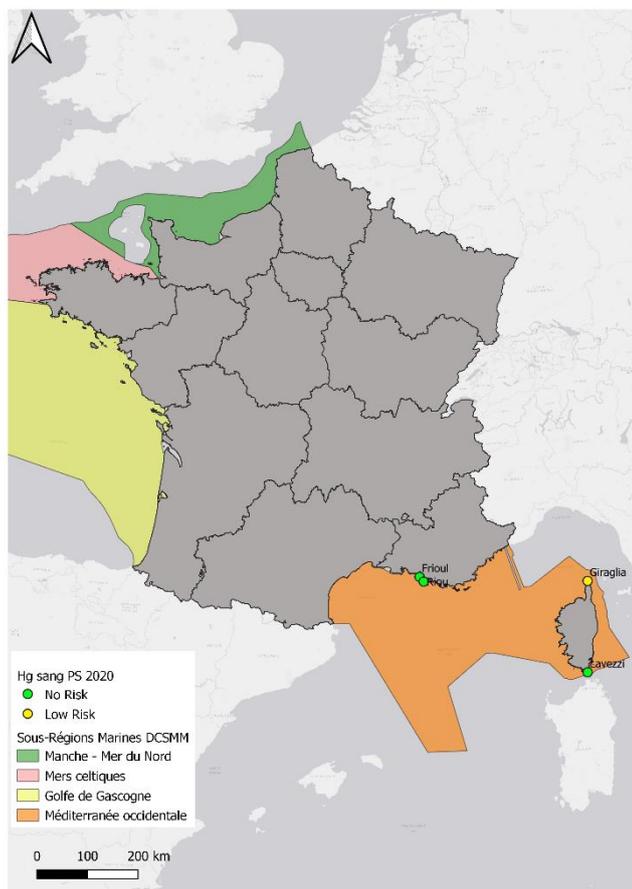


Figure 40 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de puffin de Scopoli (2020) classées selon Dietz et al., 2021

Quatre stations ont fait l'objet de prélèvements de sang et plumes en 2020 pour les puffins de Scopoli. Le sang et les plumes ont été dosés pour ces individus, afin de comparer les concentrations. Il y a moins d'échantillons sanguins que d'échantillons de plumes.

Les puffins de la Giraglia (Cap Corse) présentent des concentrations en Hg dans le sang significativement supérieures à celles des puffins des autres sites (Frioul et Riou dans les Calanques, Lavezzi dans les Bouches de Bonifacio) (Figure 38).

Cette différence ne semble pas expliquée par une différence dans le régime alimentaire, puisque les $\delta^{13}\text{C}$ des puffins de la Giraglia sont équivalents à ceux des puffins des Lavezzi, bien que moins négatifs que ceux des Calanques (Figure 39A). Ce n'est donc pas une préférence tournée vers les ressources marines qui justifie la concentration élevée de Hg de la Giraglia. De plus, les puffins corses (Giraglia et Lavezzi) ont des $\delta^{15}\text{N}$ inférieurs à ceux des Calanques, ce qui dénote un niveau trophique d'alimentation plus bas. La cause des niveaux d'exposition au Hg supérieurs des oiseaux de la Giraglia sont donc à rechercher ailleurs (ressources plus contaminées, sans lien avec le niveau trophique). Les puffins de Scopoli se nourrissent sur des céphalopodes et des poissons (Anselme & Durand, 2012; Navarro et al., 2007), on peut imaginer que ces ressources autour du Cap Corse sont plus contaminées au Hg. D'autant plus que les puffins

chassent autour de la colonie sur ce site : des analyses de données GPS avaient montré que durant la période d'élevage des poussins (Péron & Grémillet, 2014), les adultes des Calanques (Frioul et Riou) chassaient autour des colonies et vers le golfe du Lion et les côtes espagnoles, ceux de la Giraglia restaient autour du Cap Corse et vers les côtes italiennes, et ceux des Lavezzi chassaient entre la Corse et la Sardaigne, avec des individus montant jusqu'au Cap et aux côtes italiennes.

Ces niveaux de contamination sont classés au sein des catégories de risque. La moyenne des niveaux de contamination au Hg des puffins de Scopoli (Figure 40) est dans la catégorie « pas de risque » pour les oiseaux du Frioul, de Riou et des Lavezzi, et dans la catégorie « risque faible » pour ceux de la Giraglia (Dietz et al., 2021).

Tableau 13 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de puffins de Scopoli en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Frioul	15 (100 %)	0	0
Riou	7 (88 %)	1 (13 %)	0
Giraglia	5 (38 %)	8 (62 %)	0
Lavezzi	14 (93 %)	1 (7 %)	0

Au niveau individuel, les oiseaux sont en majorité (Riou et Lavezzi) voire en totalité (Frioul) dans la catégorie « pas de risque ». Les individus de la Giraglia sont majoritairement (à 62%) dans la catégorie « risque faible ». Aucun oiseau n'est dans la catégorie « risque modéré ».

3-5-2. Plumes 2020

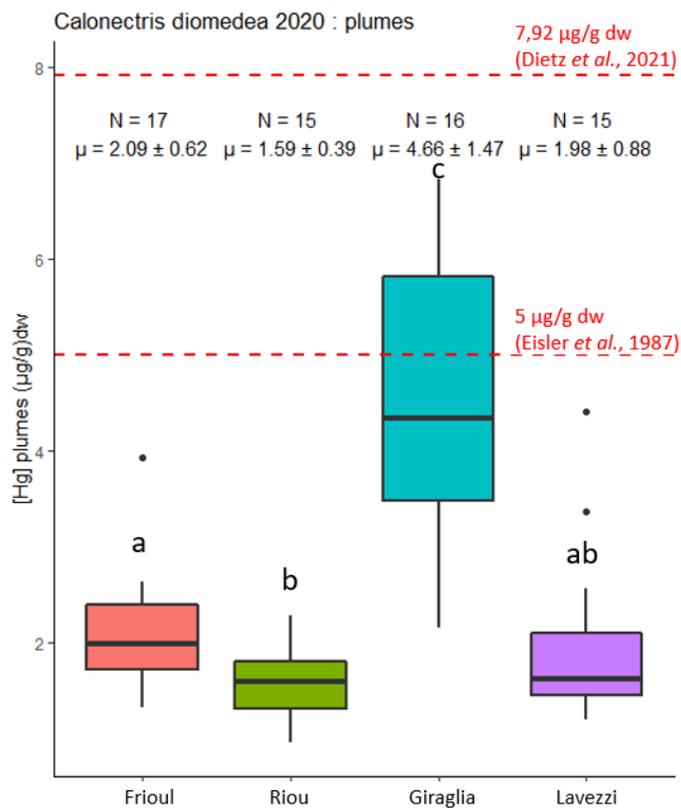


Figure 41 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de puffin de Scopoli (2020)

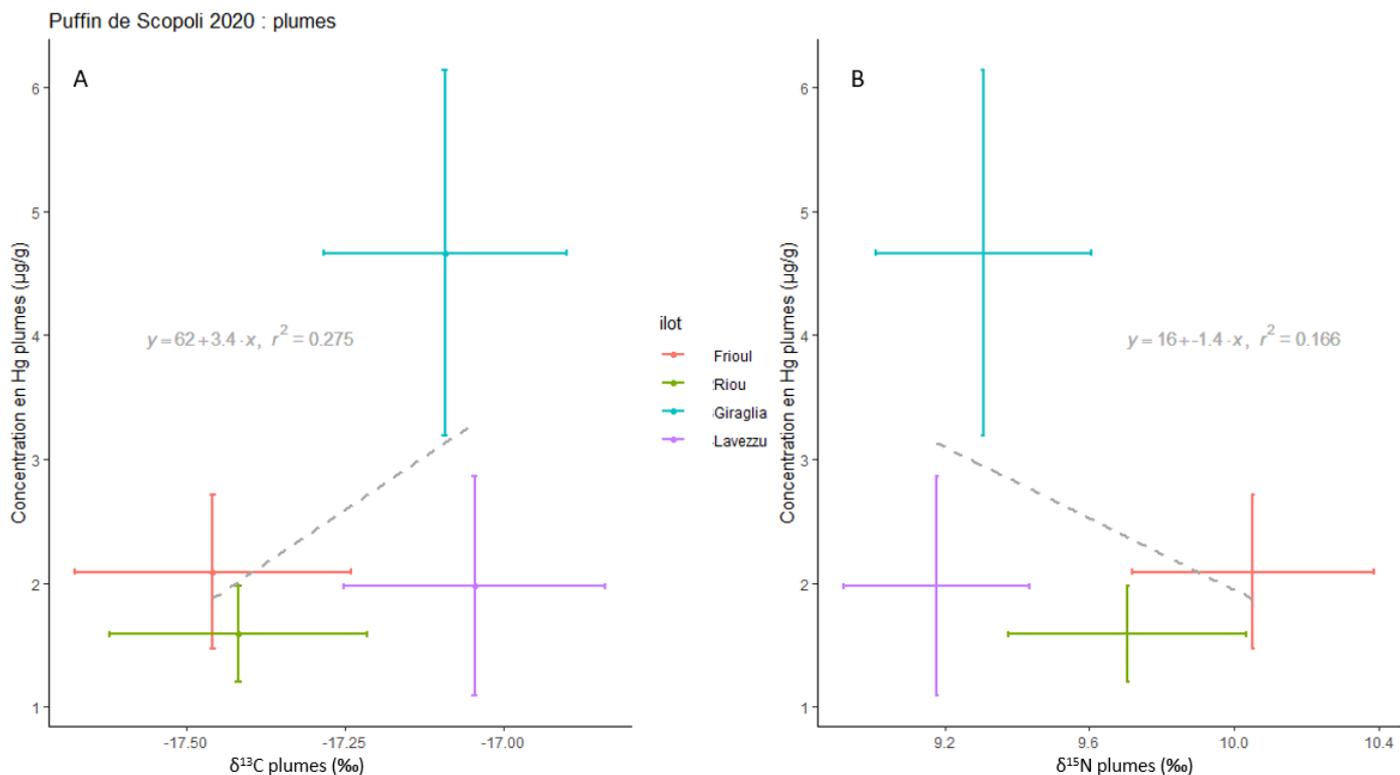


Figure 42 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de puffin de Scopoli (2020)

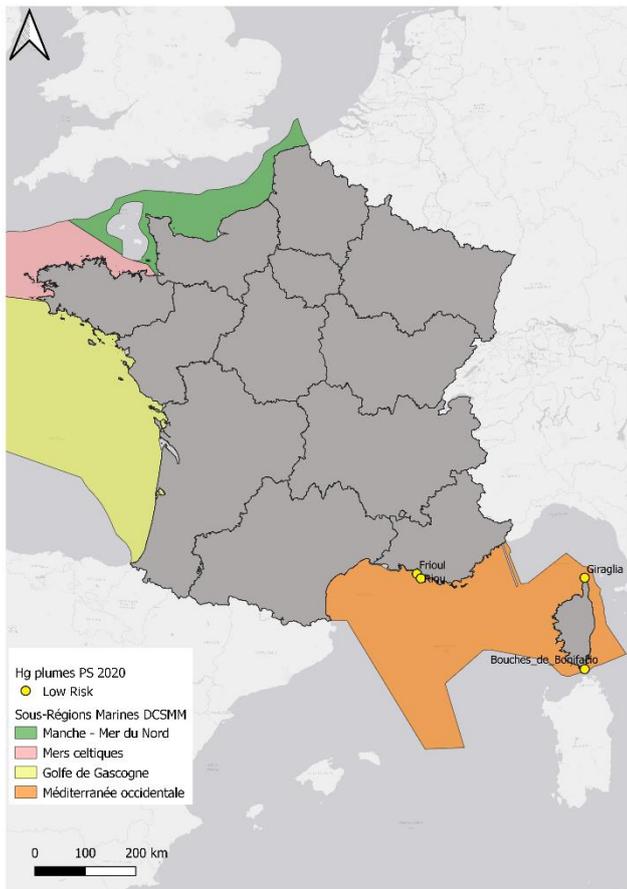


Figure 43 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de puffin de Scopoli (2020) classées selon Dietz et al., 2021

Les concentrations en Hg dans les plumes montrent des résultats semblables aux données du sang (Figure 41). Simplement, une différence significative est détectée entre les sites de Riou et du Frioul, ce qui peut être dû à une différence de matrice, ou d'effectif (effectif supérieur pour les échantillons de plumes). Comme pour le sang, les puffins de la Giraglia montrent des concentrations en Hg supérieures à celles des autres sites.

Les tendances pour les valeurs isotopiques (Figure 42) sont les mêmes que pour les échantillons de sang (avec des niveaux supérieurs, qui s'expliquent par la différence de composition biochimique de ces matrices (Cherel et al., 2014)).

Selon les catégories de Dietz et al., 2021, les concentrations moyennes en Hg des puffins de toutes les stations suivies sont dans la classe « risque faible » (Figure 43).

Au niveau individuel (Tableau 14), sur la Giraglia la totalité des oiseaux sont dans la catégorie « risque faible ». Sur les autres sites, les individus en « risque faible » sont aussi majoritaires (53 à 82%), mais répartis également dans la catégorie « pas de risque ».

Tableau 14 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de puffins de Scopoli en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Frioul	3 (18 %)	14 (82 %)	0
Riou	7 (47 %)	8 (53 %)	0
Giraglia	0	16 (100 %)	0
Lavezzi	6 (40 %)	9 (60 %)	0

On observe une corrélation entre les concentrations en Hg dans les plumes et celles dans le sang (Figure 44), avec un coefficient de détermination r^2 de 0,755, qui traduit une bonne prédictibilité des concentrations en Hg dans le sang à partir des concentrations dans les plumes.

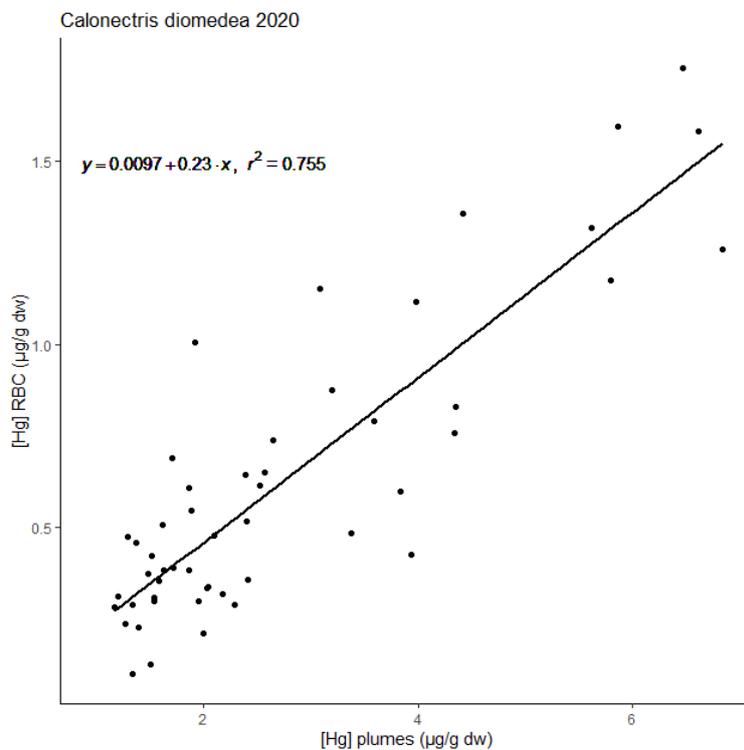


Figure 44 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM
- Relation entre plumes et sang pour la concentration en mercure chez le puffin de Scopoli (2020)

3-6. Cormoran huppé

3-6-1. Plumes 2019

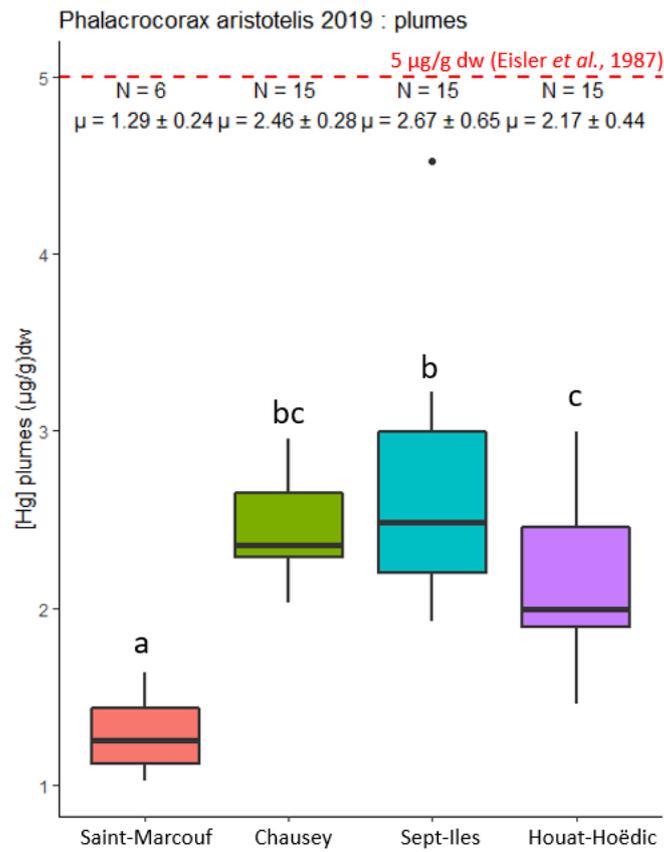


Figure 45 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de cormoran huppé (2019)

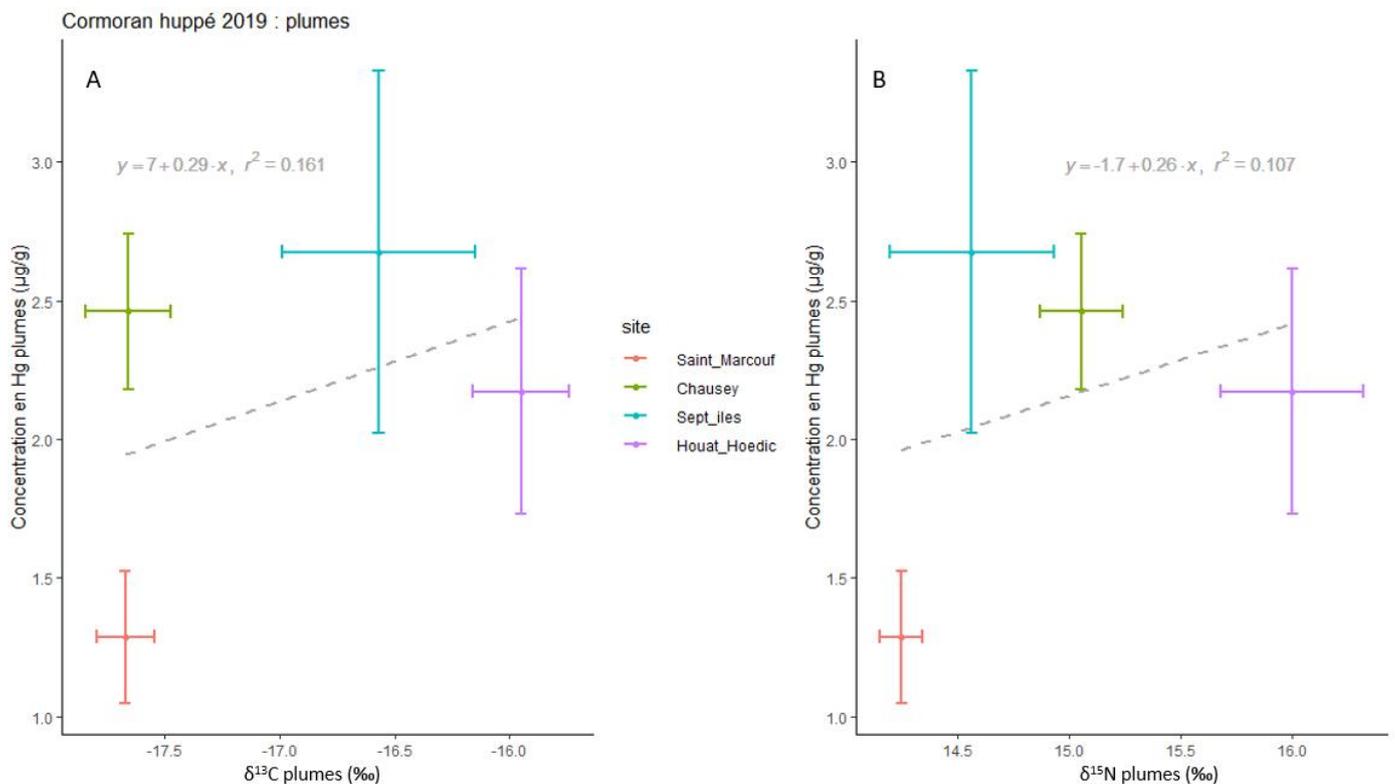


Figure 46 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de cormoran huppé (2019)

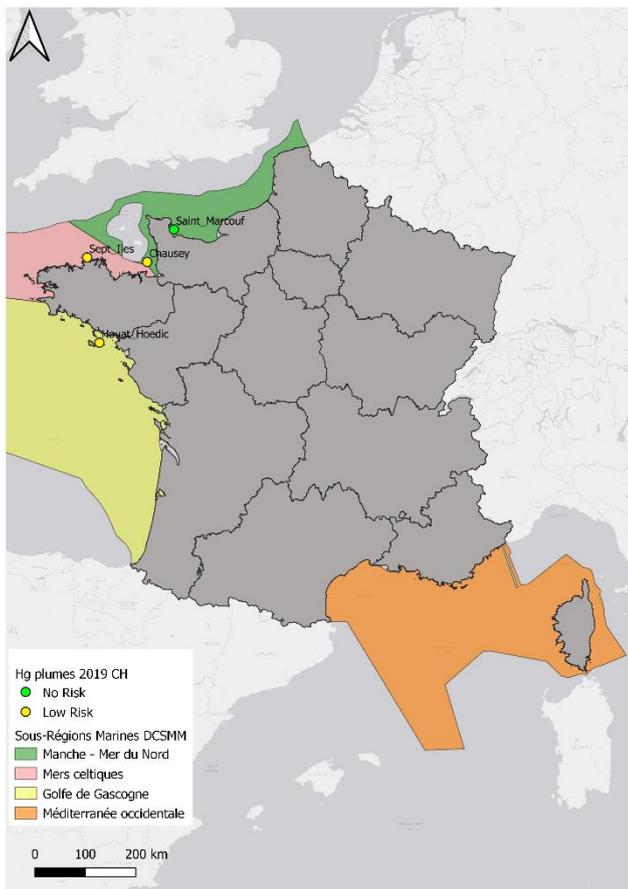


Figure 47 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de cormorans huppés (2019) classées selon Dietz et al., 2021

Les cormorans huppés de quatre sites ont fait l'objet de prélèvements de plumes en 2019.

Les concentrations en Hg (Figure 45) montrent des différences significatives, avec plusieurs groupes : a - Saint-Marcouf < c - Houat-Hoëdic < b - Sept-Iles. Les oiseaux de Chausey ne diffèrent significativement ni de Houat-Hoëdic, ni des Sept-Iles.

Les valeurs isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ montrent un groupe qui contient Saint-Marcouf et Chausey, plus négatif que ceux des autres sites (Figure 46A). Viennent ensuite les cormorans des Sept-Iles, et enfin ceux de Houat-Hoëdic. Les ressources alimentaires utilisées par les oiseaux de Saint-Marcouf et Chausey semblent donc moins marines que celles des deux autres sites.

En revanche, les $\delta^{15}\text{N}$ (Figure 46B) de Saint-Marcouf et de Chausey diffèrent, ces derniers étant supérieurs. La différence de concentration en Hg pourrait donc être en partie expliquée par une différence de niveau trophique. Cependant, les oiseaux des Sept-Iles ne sont pas d'un niveau trophique élevé en comparaison des autres sites, et ne représentent pas la valeur supérieure des $\delta^{13}\text{C}$.

En terme de risques, la Figure 47 montre que les moyennes des concentrations en Hg des cormorans huppés de Saint-Marcouf entrent dans la catégorie « pas de risque », celles des autres sites dans la catégorie « risque faible » (Dietz et al.,

2021).

Tableau 15 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de cormorans huppés en 2019 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	NRC	Catégories de risque	
		LRC	MRC
Saint-Marcouf	5 (83 %)	1 (17 %)	0
Chausey	0	15 (100 %)	0
Sept-Iles	0	15 (100 %)	0
Houat-Hoëdic	1 (7 %)	14 (93 %)	0

Les individus des cormorans se trouvent dans la catégorie « risque faible » pour les oiseaux de Chausey et des Sept-Iles, et majoritairement également pour ceux de Houat-Hoëdic (Tableau 15). La majorité des cormorans de Saint-Marcouf est dans la catégorie « pas de risque ».

3-6-2. Plumes 2020

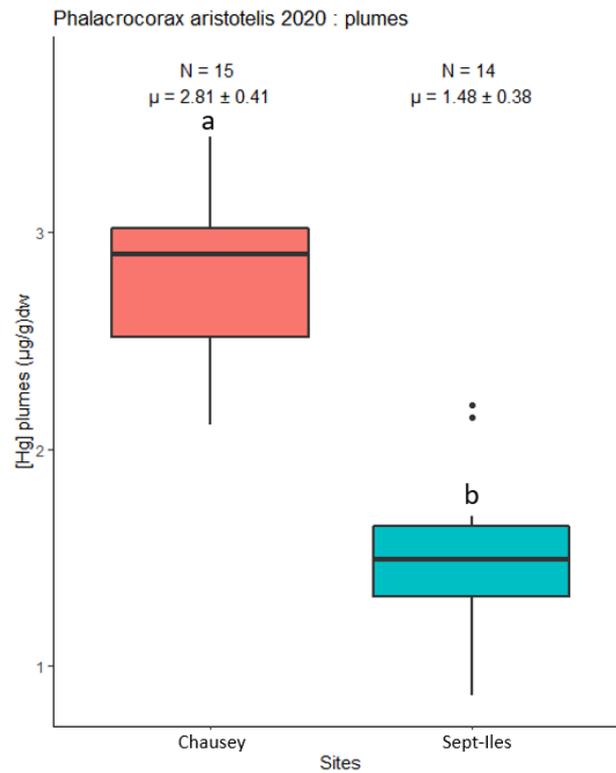


Figure 48 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de cormoran huppé (2020)

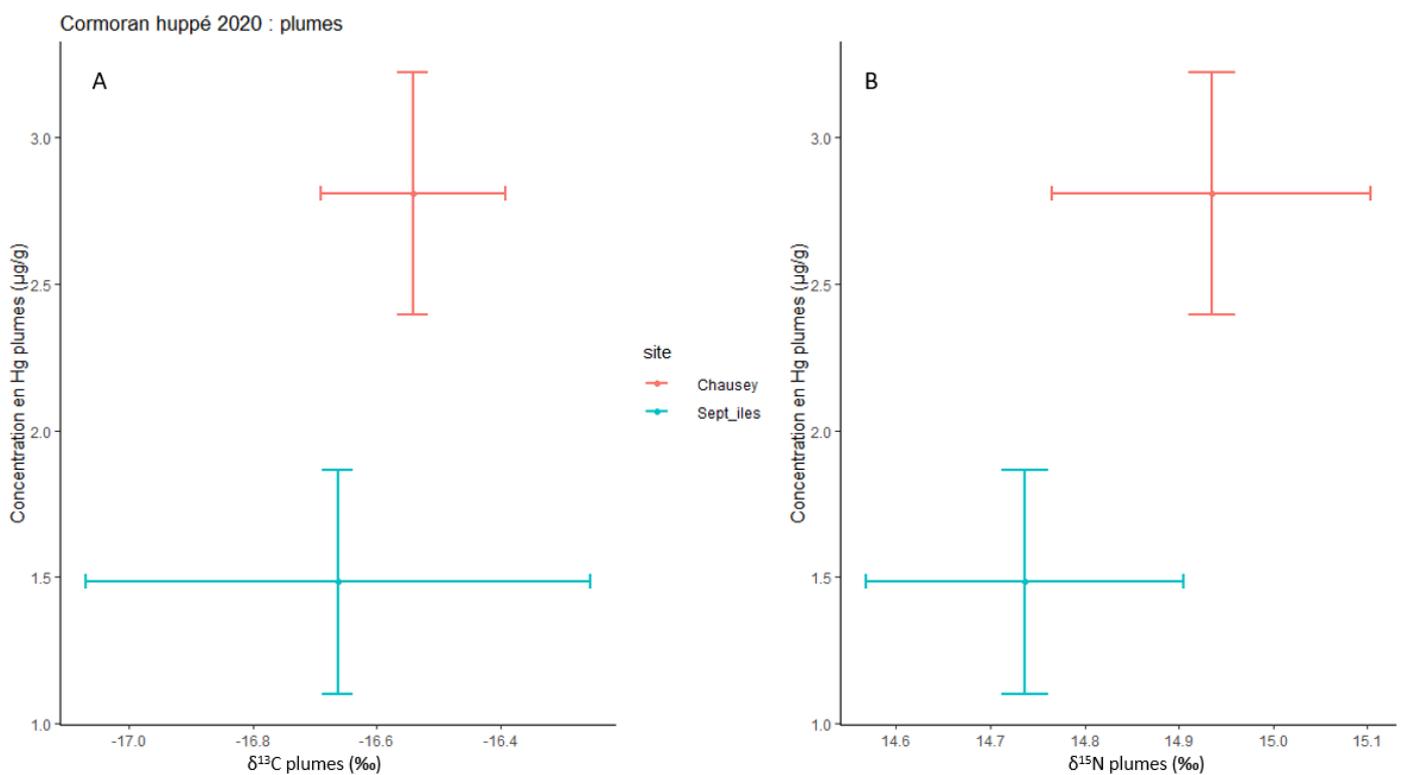


Figure 49 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans les plumes de cormoran huppé (2020)

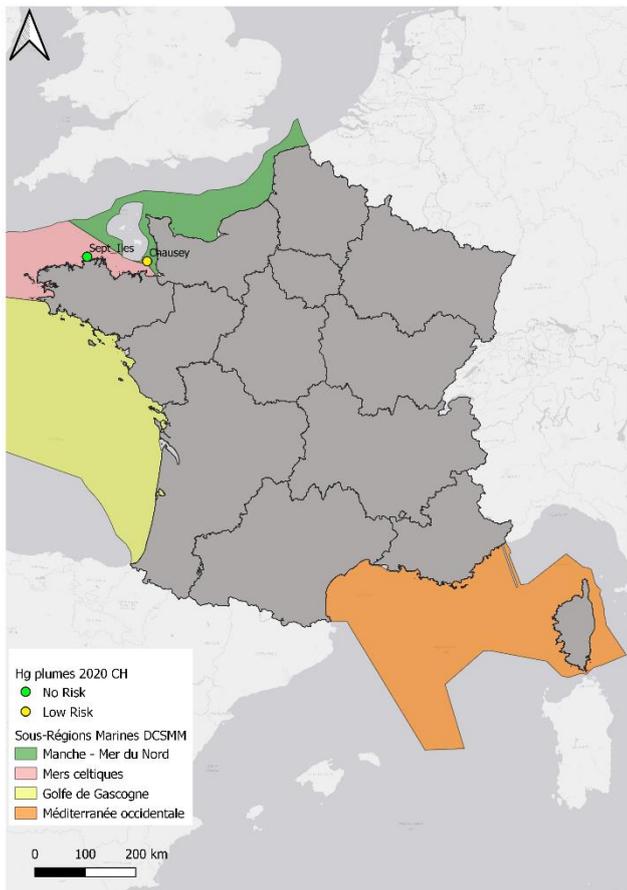


Figure 50 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de cormoran huppé (2020) classées selon Dietz et al., 2021

Seuls deux sites ont fait l'objet de captures de cormorans huppés et de prélèvements de plumes en 2020. Ces deux sites avaient été suivis en 2019, ce qui permet de voir une différence de tendance : alors que les concentrations en Hg des oiseaux de Chausey sont stables entre les deux années, celles des Sept-Iles sont plus basses en 2020 (Figure 48) ; il n'y avait pas de différence significative entre les deux sites en 2019, alors qu'en 2020 les concentrations en Hg des oiseaux de Chausey sont supérieures à celles des Sept-Iles.

Les $\delta^{13}\text{C}$ montrent une plus grande variabilité pour les individus des Sept-Iles ($\text{CV } \delta^{13}\text{C} = 2\%$, contre 1% pour Chausey), montrant une alimentation plus variée que celle des individus de Chausey en termes d'origine géographique (Figure 49A). Leurs proies semblent en revanche d'un niveau trophique moindre par rapport à celles de Chausey, ce qui peut expliquer la différence d'exposition au Hg entre les deux sites, par biomagnification (Figure 49B).

Les moyennes des concentrations en Hg des cormorans huppés des Sept-Iles sont dans la catégorie « pas de risques », et « risque faible » à Chausey (Figure 50). La totalité des individus de Chausey sont dans la catégorie « risque faible » (Tableau 16). Les individus des Sept-Iles se répartissent entre les catégories « pas de risque » et « risque faible ».

Tableau 16 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de cormorans huppés en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Chausey	0	15 (100 %)	0
Sept-Iles	9 (64 %)	5 (36 %)	0

3-6-3. Sang 2021

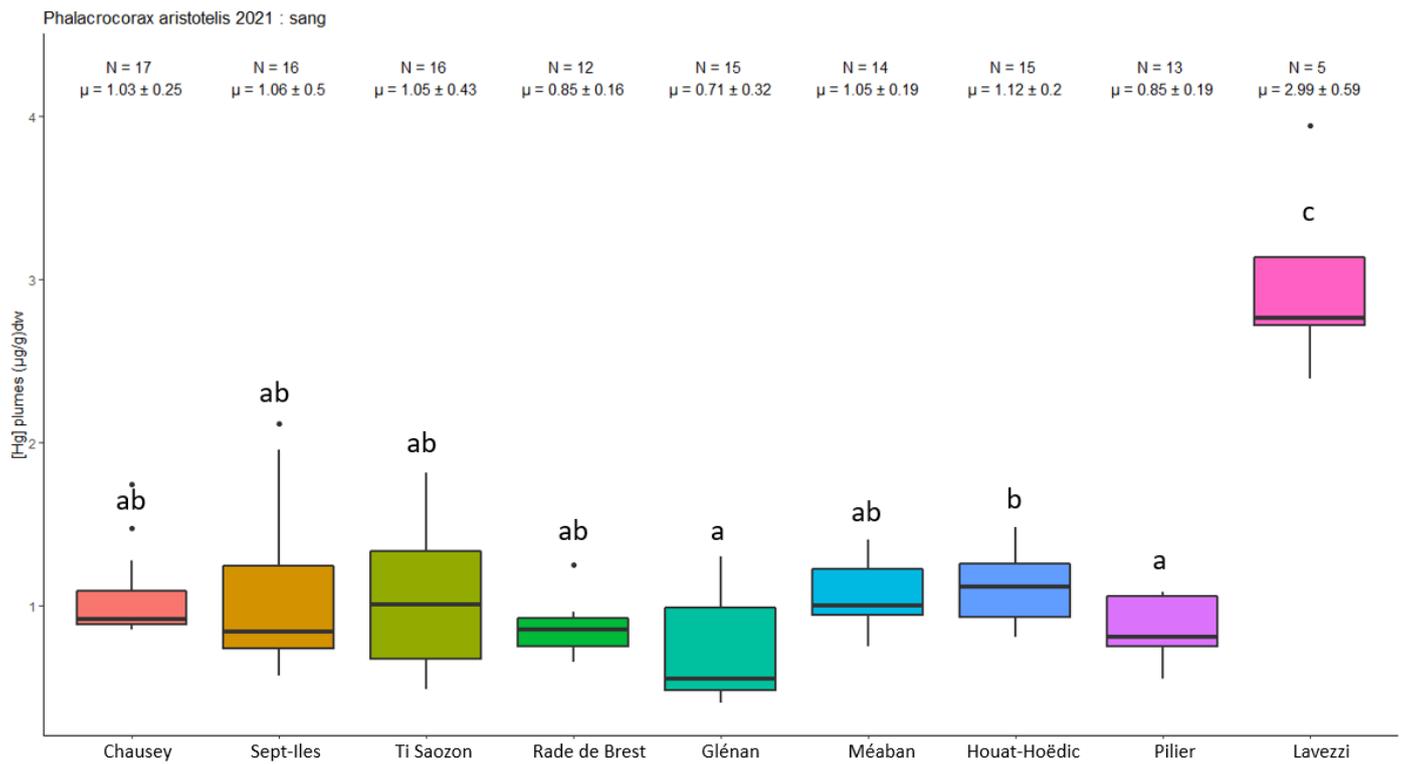


Figure 51 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de cormoran huppé (2021)

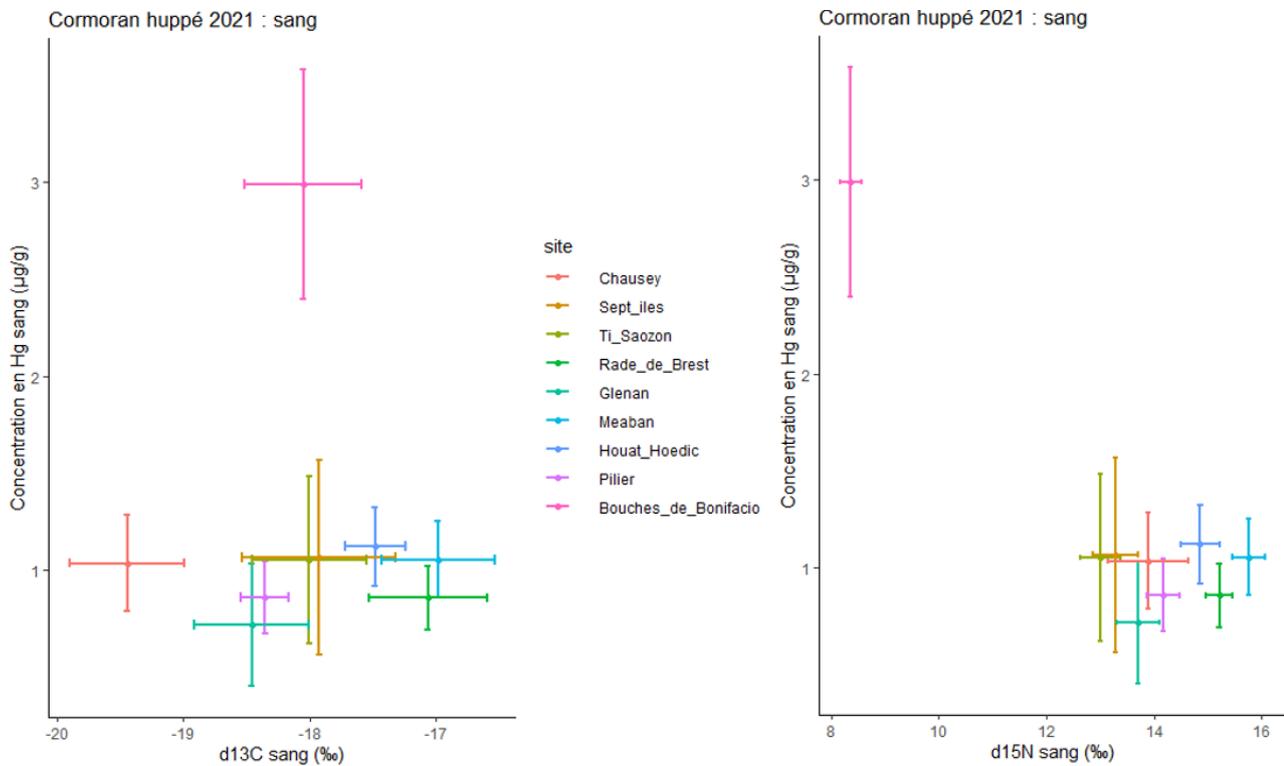


Figure 52 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans le sang de cormoran huppé (2021)

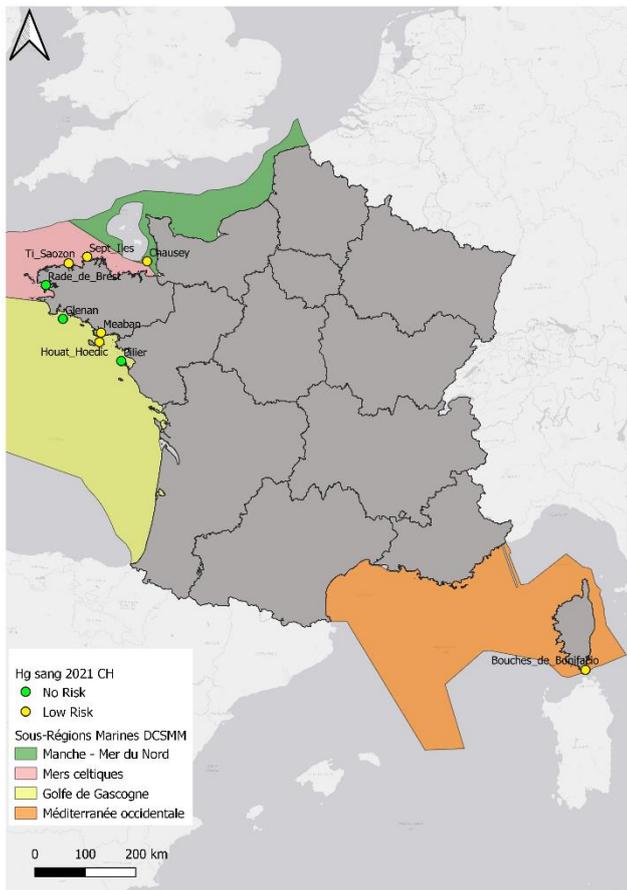


Figure 53 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de cormoran huppé (2021) classées selon Dietz et al., 2021

En 2020, des prises de sang de cormoran huppé ont été réalisées sur neuf sites.

Les concentrations en Hg dans les cellules sanguines constituent trois groupes (Figure 51): a – Glénan, Pilier < b - Houat-Hoëdic < c – Lavezzi (Bouches de Bonifacio). Les concentrations des sites de Chausey, des Sept-Iles, de Ti Saizon, de la Rade de Brest, de Méaban ne diffèrent significativement ni du groupe a ni du groupe b.

Les analyses des valeurs isotopiques (Figure 52) montrent que les cormorans des bouches de Bonifacio, s'ils diffèrent beaucoup des autres sites en termes de concentration en Hg dans le sang, ne ressortent pas sur les $\delta^{13}\text{C}$. L'origine des proies n'est donc pas beaucoup plus marine que celle des autres sites (notamment de ceux de Chausey). En revanche, la différence est très marquée pour les $\delta^{15}\text{N}$, mais dans le sens inverse à celui attendu au vu des concentrations en Hg. Les proies des cormorans des Lavezzi sont d'un niveau trophique inférieur à celui des autres sites. Il faut prendre en compte le fait que les masses d'eau sont très éloignées (Manche-Atlantique, et Méditerranée), ce qui implique potentiellement des niveaux isotopiques de base différents (Borgå et al., 2012). D'autant qu'en tant que piscivore, le cormoran chasse les poissons présents autour de la colonie de reproduction, et que ces communautés ne sont pas les mêmes en fonction des sites. Les espèces prédatées peuvent varier entre les populations de Manche-Atlantique (Gremillet

et al., 1998; Swann et al., 2008) et celles de Méditerranée (Alvarez, 1998; Morat et al., 2014; Xirouchakis et al., 2017). Pour prendre en compte la différence potentielle de niveaux isotopiques de base entre Méditerranée et Atlantique, la Figure 54 reprend les données en excluant le site des Lavezzi.

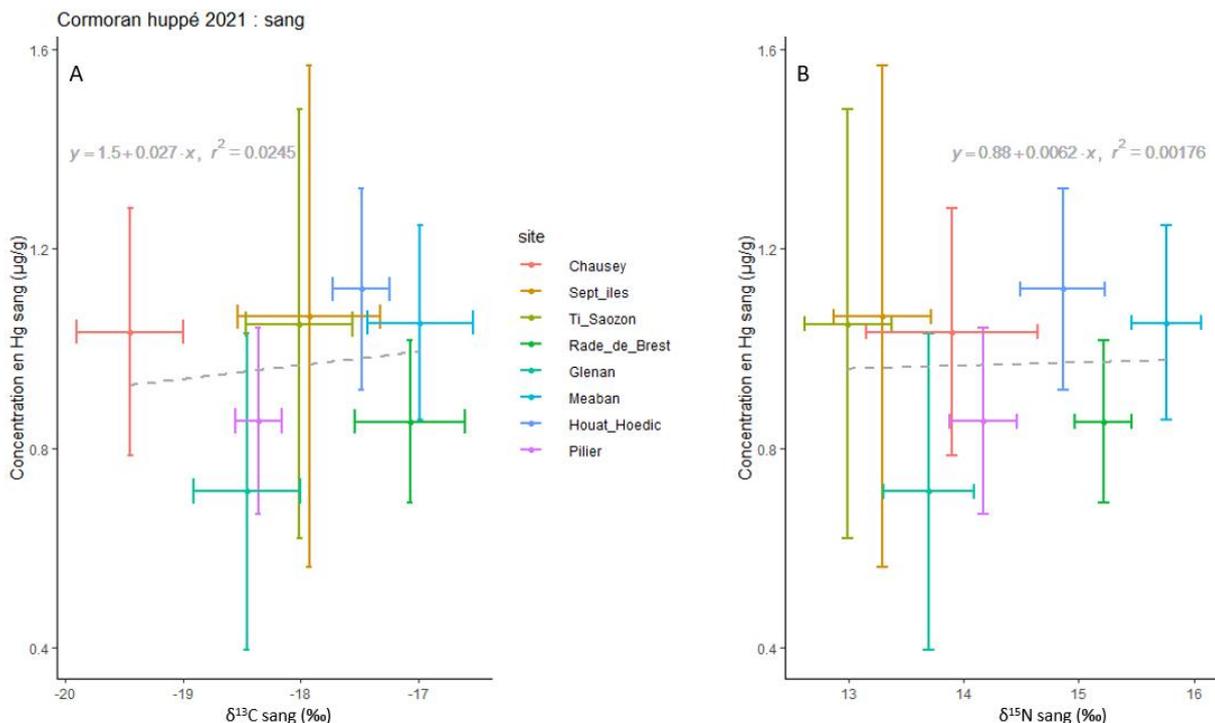


Figure 54 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentration en mercure en fonction des valeurs isotopiques du carbone (A) et de l'azote (B) dans le sang de cormoran huppé (2021) en Manche - Atlantique.

Les oiseaux de Chausey présentent les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ les plus négatives (Figure 54A), ce qui dénote une alimentation plus côtière que celle des cormorans des autres sites. Les oiseaux présentant les valeurs les moins négatives sont ceux de Méaban et de la rade de Brest. Pour le $\delta^{15}\text{N}$, les valeurs les plus élevées sont celles des oiseaux de Méaban (Figure 54B), suivies de celles de la rade de Brest et de Houat-Hoëdic.

Selon les classes de Dietz et al., 2021, les moyennes des concentrations en Hg des oiseaux de la Rade de Brest, des Glénan et du Pilier sont dans la catégorie « pas de risque », et celles de Chausey, de Ti Saozon, de Méaban, de Houat Hoëdic et des Lavezzi sont dans la catégorie « risque faible » (Figure 53). Les individus se répartissent dans les catégories « pas de risque » et « risque faible », sauf pour les oiseaux des Lavezzi qui sont tous dans la catégorie « risque faible » (Tableau 17).

Tableau 17 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang de cormorans huppés en 2021 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Chausey	11 (65 %)	6 (35 %)	0
Sept-Iles	9 (56 %)	7 (44 %)	0
Ti Saozon	8 (50 %)	8 (50 %)	0
Rade de Brest	10 (83 %)	2 (17 %)	0
Glénan	10 (67 %)	5 (33 %)	0
Méaban	5 (36 %)	9 (64 %)	0
Houat-Hoëdic	5 (33 %)	10 (67 %)	0
Pilier	8 (62 %)	5 (38 %)	0
Lavezzi	0	5 (100 %)	0

3-7. Fou de Bassan

3-7-1. Plumes et sang 2020

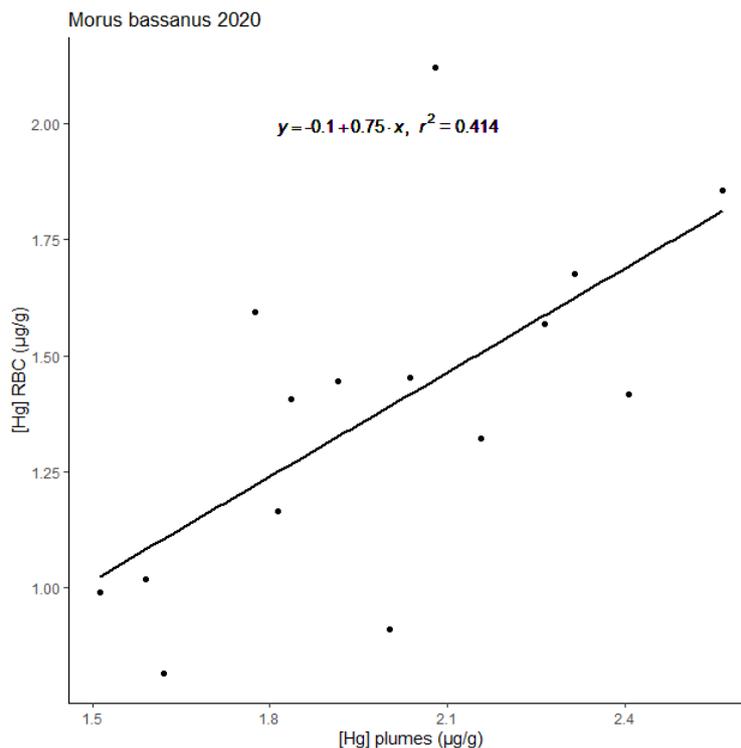


Figure 55 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Relation entre plumes et sang pour la concentration en mercure chez le fou de Bassan (2020)

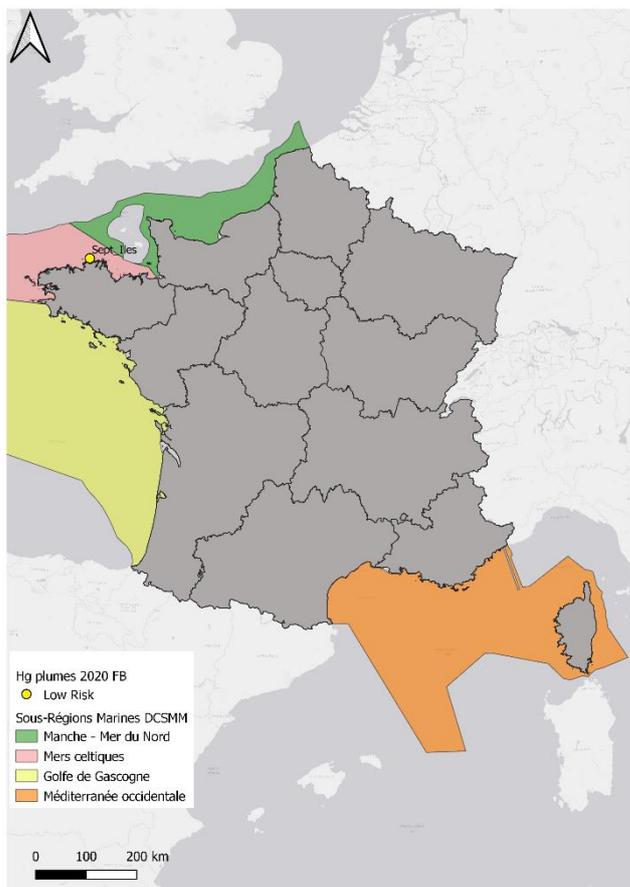


Figure 56 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de fou de Bassan (2020) classées selon Dietz et al., 2021

Il y a eu des prélèvements sur les fous de Bassan uniquement sur l'Archipel des Sept-Iles, en 2020. Nous ne pouvons donc pas faire de comparaisons entre sites.

On observe une corrélation entre les concentrations en Hg dans les plumes et celles dans le sang (Figure 55), avec néanmoins un coefficient de détermination r^2 un peu faible (0,414).

Les moyennes des concentrations en Hg les classent dans la catégorie « risque faible » selon Dietz et al., 2021 pour les plumes (Figure 56), et « pas de risque » en ce qui concerne le sang. Seul un individu se trouve en « pas de risque » (Tableau 18), les autres se trouvant tous en « risque faible ».

Tableau 18 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de fous de Bassan en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Sept-Iles	1 (7%)	14 (93%)	0

3-8. Mouette tridactyle

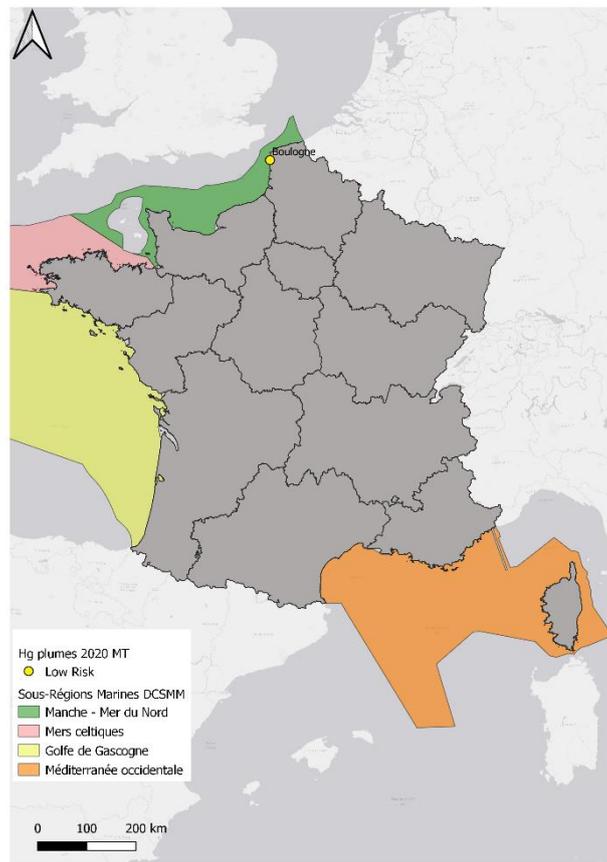


Figure 57 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de mouette tridactyle (2020) classées selon Dietz et al., 2021

Des prélèvements de plumes ont été faits à Boulogne en 2020, et la moyenne des concentrations en Hg des oiseaux de ce site (Figure 57) sont au sein de la classe « risque faible » (Dietz et al., 2021). Tous les individus se trouvent dans cette catégorie (Tableau 19).

Tableau 19 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de mouettes tridactyles en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Boulogne	0	12 (100 %)	0

3-9. Sterne caugek

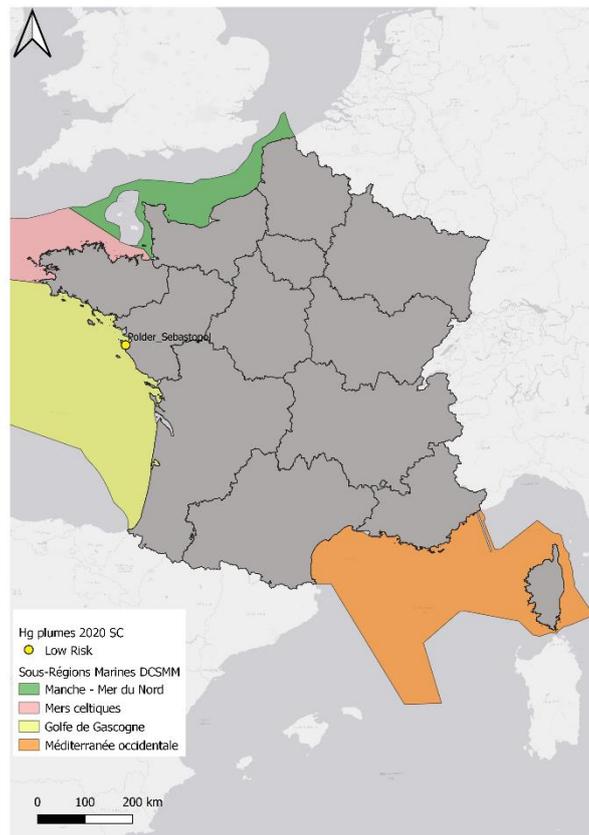


Figure 58 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de sterne caugek (2020) classées selon Dietz et al., 2021

Des prélèvements de plumes ont été faits à Noirmoutier, dans la réserve du Polder de Sébastopol en 2020, et la moyenne des concentrations en Hg des oiseaux de ce site (Figure 58) sont au sein de la classe « risque faible » (Dietz et al., 2021). Trois individus se trouvent en « pas de risque », les autres étant en « risque faible » (Tableau 20).

Tableau 20 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes de sternes caugeks en 2020 classées selon Dietz et al., 2021. NRC équivaut à No Risk Concentration, soit « pas de risque », LRC à Low Risk Concentration pour « risque faible » et MRC à Moderate Risk Concentration pour « risque modéré ». Les chiffres correspondent au nombre d'individus au sein de chaque catégorie et le pourcentage correspondant.

Sites	Catégories de risque		
	NRC	LRC	MRC
Polder de Sébastopol	3 (20 %)	12 (80 %)	0

3 – Synthèse

3-1. Plumes

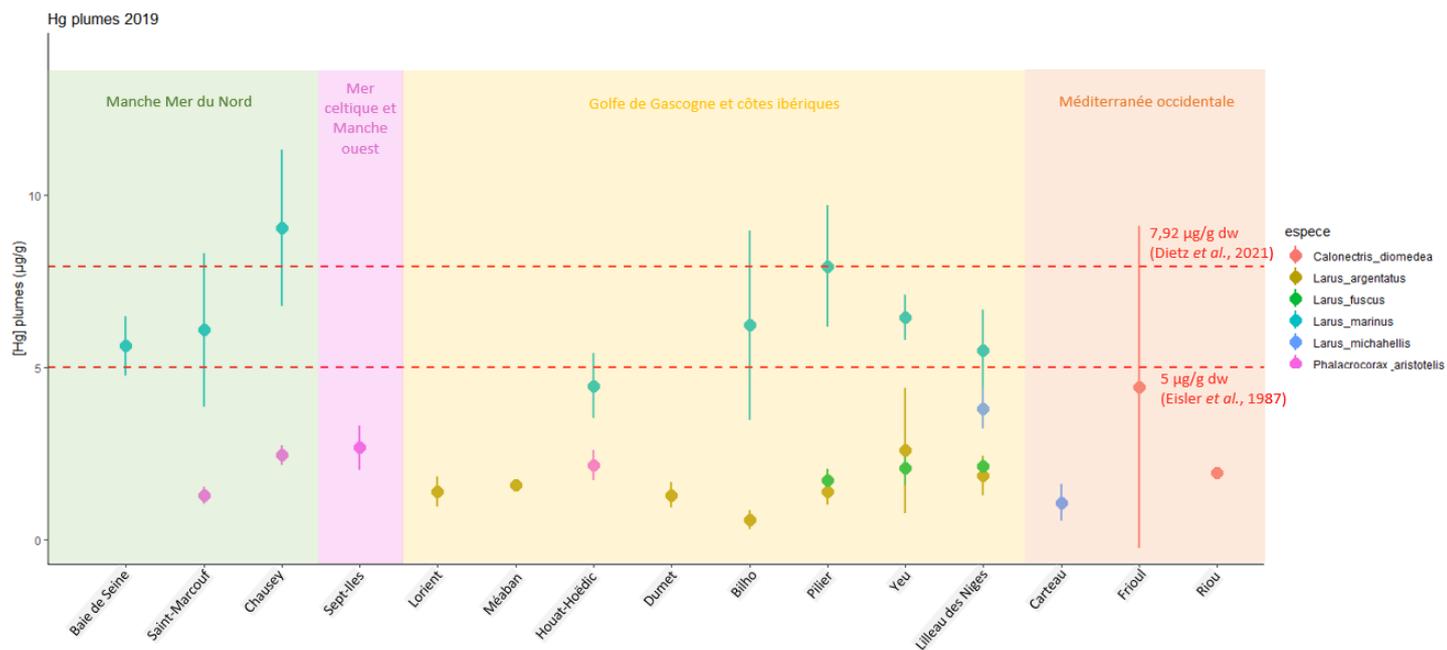


Figure 59 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes (2019)

La Figure 59 montre la totalité des concentrations en Hg mesuré dans les plumes des oiseaux marins en 2019. Des plumes ont été prélevées sur six espèces. On peut y voir que les goélands marins sont les plus exposés au Hg de toutes les espèces. Ce fait peut être expliqué par le niveau trophique élevé de cette espèce, observé par l'analyse des rapports isotopiques de l'azote. Beaucoup de goélands marins dépassent les valeurs seuils d'apparition des effets néfastes du Hg. Les autres espèces présentant des niveaux hauts sont le goéland leucophée (ceux de Ré) et les puffins de Scopoli (ceux du Frioul).

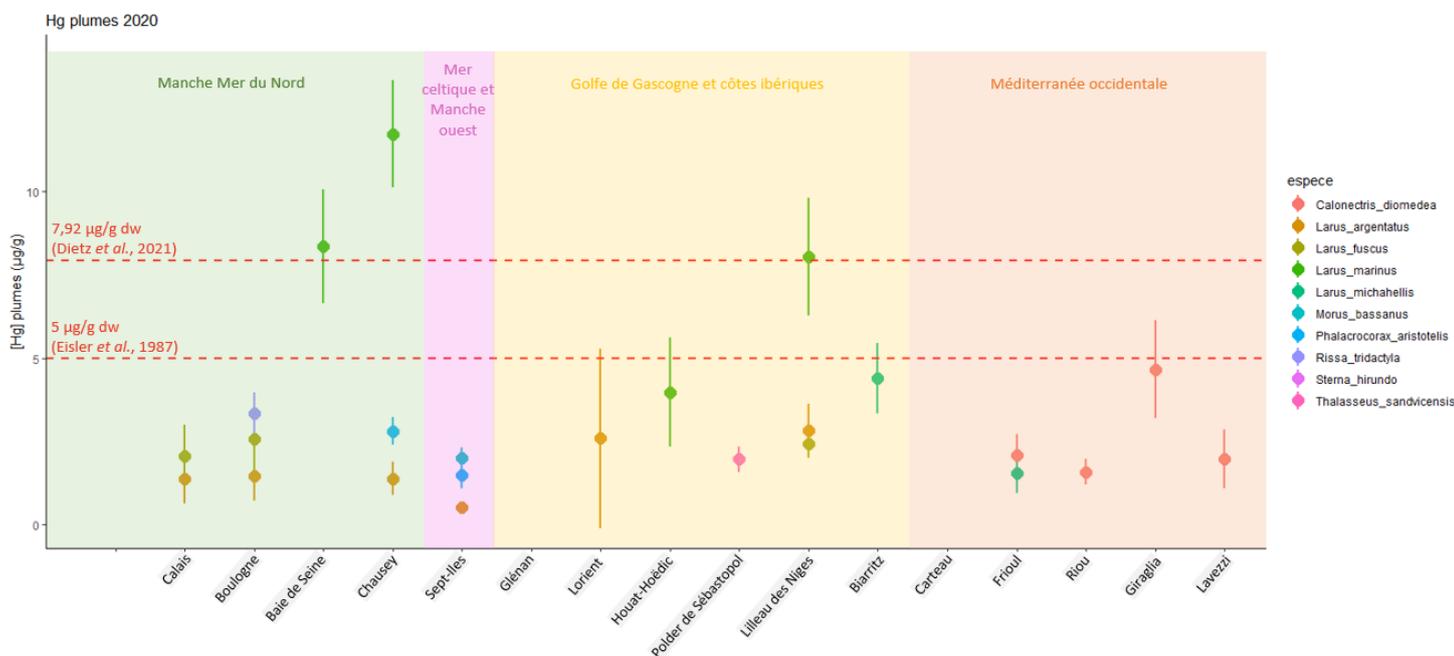


Figure 60 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes (2020)

Neuf espèces ont été suivies en 2020 (Figure 60). Comme en 2019, les goélands marins sont les plus exposés au Hg. On voit aussi de hauts niveaux de Hg chez les goélands leucophées (ceux de Biarritz) et les puffins de Scopoli (ceux du Cap Corse).

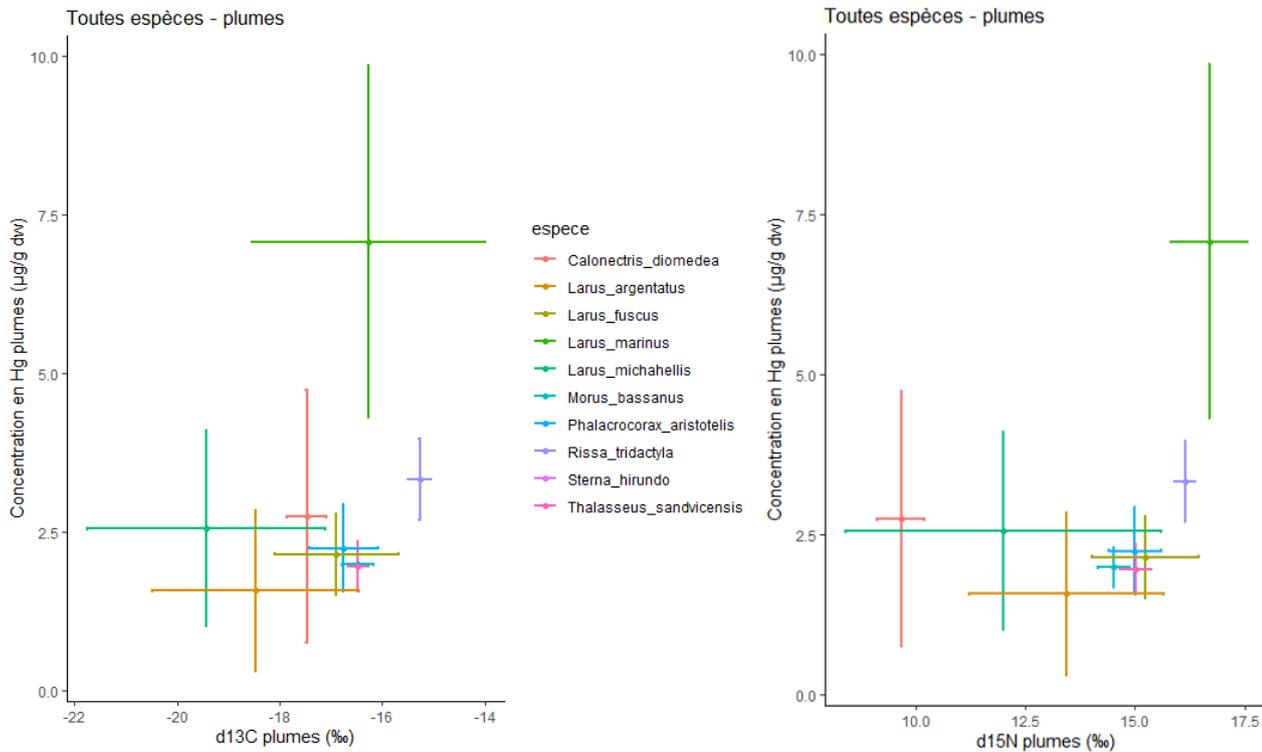


Figure 61 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en Hg et rapports isotopiques du carbone et de l'azote dans les plumes

Les valeurs isotopiques dans les plumes pour toutes les années (Figure 61) permettent de voir que les goélands marins sont nourris par des proies marines ($\delta^{13}\text{C}$ moins négatifs) et de haut niveau trophique ($\delta^{15}\text{N}$ élevés). Cette écologie explique leur forte contamination au Hg. Les mouettes tridactyles, bien que moins contaminés au Hg, ont également une alimentation tournée vers le marin et de haut niveau trophique. Les larges variabilités montrent le caractère opportuniste des quatre espèces de goélands, avec des valeurs inférieures pour les argentés et leucophées. Les goélands bruns semblent quand même avoir des stratégies alimentaires moins diversifiées que les trois autres espèces, et être plus tournés vers des proies marines et de plus haut niveau trophique. Les $\delta^{13}\text{C}$ des puffins de Scopoli sont assez hauts, dénotant une alimentation marine, mais un niveau trophique d'alimentation plus bas que ceux des autres espèces.

3-2. Sang

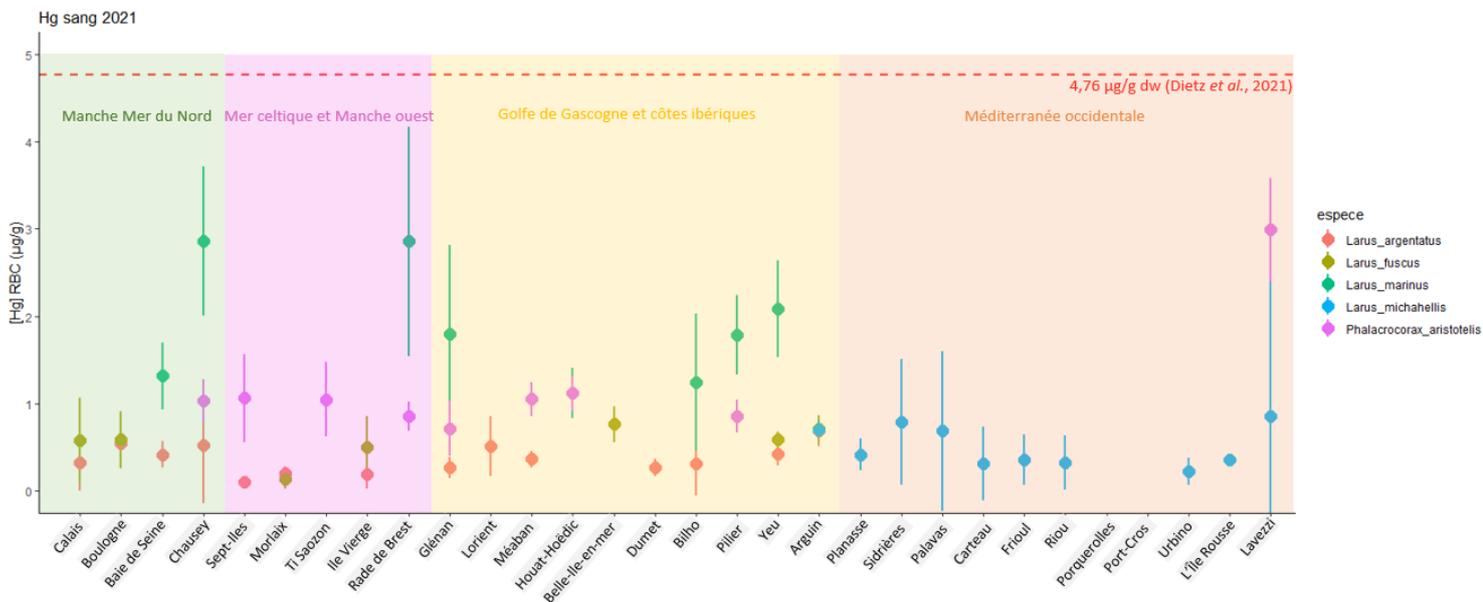


Figure 62 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans le sang (2021)

Sur la Figure 62, on voit les différentes concentrations en Hg en fonction des sites et des espèces. Comme dans les plumes, on voit que les concentrations les plus hautes sont trouvées chez les goélands marins. Viennent ensuite les cormorans huppés, puis les goélands bruns et argentés.

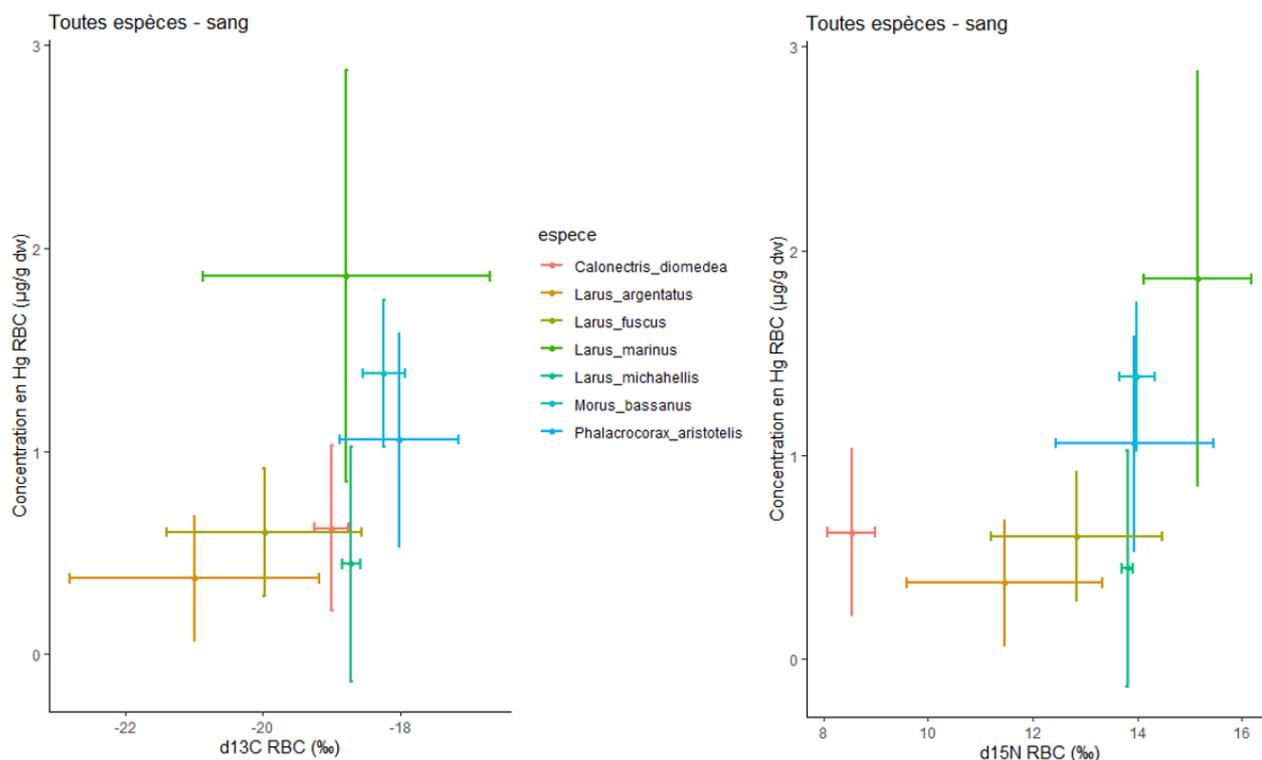


Figure 63 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en Hg et rapports isotopiques du carbone et de l'azote dans le sang

En analysant les valeurs isotopiques de l'azote et du carbone dans le sang (Figure 63), on note que le goéland marin consomme des proies de haut niveau trophique ($\delta^{15}\text{N}$ élevés). Ils semblent également tournés vers des ressources marines ($\delta^{13}\text{C}$ élevés), comme les fous de Bassan et les cormorans huppés. Pour ces deux espèces, les données isotopiques confortent les connaissances quant à leur régime alimentaire, étant toutes deux piscivores. Les puffins de Scopoli, piscivores également, présentent également des $\delta^{13}\text{C}$ élevés, mais d'un niveau trophique inférieur ($\delta^{15}\text{N}$ bas). Sur cette figure, pour les goélands leucophées, seuls ceux du Banc d'Arguin ont été comptabilisés (car les

données isotopiques pour les goélands méditerranéens ne sont encore disponibles). Ces oiseaux étant régulièrement vus derrière les chaluts, ils semblent se nourrir sur des rejets, ce qui pourrait être confirmé par les données isotopiques (valeurs élevées, donc ressources d'origine marine et de niveau trophique élevé).

Comme pour les données dans les plumes, les goélands argentés et bruns ont des écologies alimentaires opportunistes (grande variabilité dans les valeurs isotopiques), avec les bruns un cran au-dessus des argentés au niveau trophique, et plus tournés vers le marin.

3-2. Risques

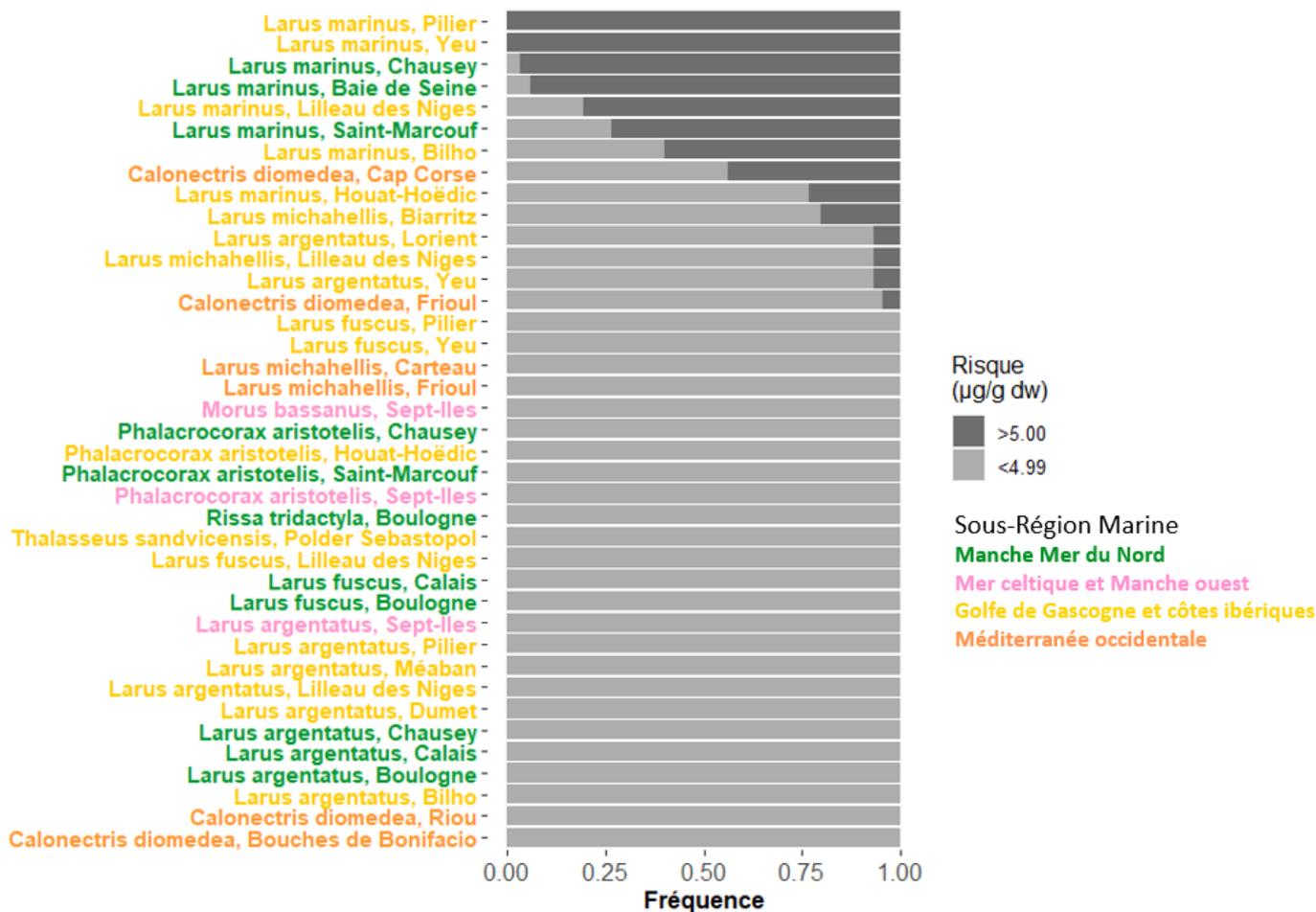


Figure 64 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en mercure dans les plumes d'oiseaux marins et risque en rapport à la valeur seuils d'apparitions des effets (Eisler 1987)

La Figure 64 montre la proportion d'oiseaux dont les concentrations en Hg dépassent la valeur seuil d'apparition des effets. On remarque que les goélands marins sont les plus concernés, avec 100% des individus suivis au-dessus du seuil pour l'îlot du Pilier et l'île d'Yeu. Les puffins de Scopoli du Cap Corse présentent une fréquence élevée d'individus au-dessus de la valeur seuil. Viennent ensuite des goélands argentés et leucophées du Golfe de Gascogne (Biarritz et Ré pour les leucophées, et Lorient et Yeu pour les argentés).

Si la valeur seuil d'apparition des effets permet de donner une idée du risque que courent les oiseaux, il faut quand même prendre en considération le fait que des oiseaux en dessous de cette valeur peuvent tout de même subir des effets délétères du Hg (Whitney & Cristol, 2018).

4 – Conclusion

Le suivi de la contamination des oiseaux marins à l'échelle de la France métropolitaine a permis de révéler que l'exposition de ceux-ci au Hg était importante, avec des niveaux préoccupants. Il permet de démontrer qu'il est nécessaire de suivre ce contaminant avec attention, et ce d'autant plus qu'il y a pour le moment peu d'informations à ce sujet (premières publications sur le mercure chez les goélands en France métropolitaine : Binkowski et al., 2020; Zorroza et al., 2020). De prochains résultats à venir, portant sur d'autres éléments traces et sur les polluants organiques persistants, permettront de détecter d'éventuels autres pressions de contamination exercées sur les oiseaux. De plus, la réalisation de tests génotoxiques pourrait permettre de déterminer d'état de santé des individus et de rechercher des effets de la contamination sur ces derniers.