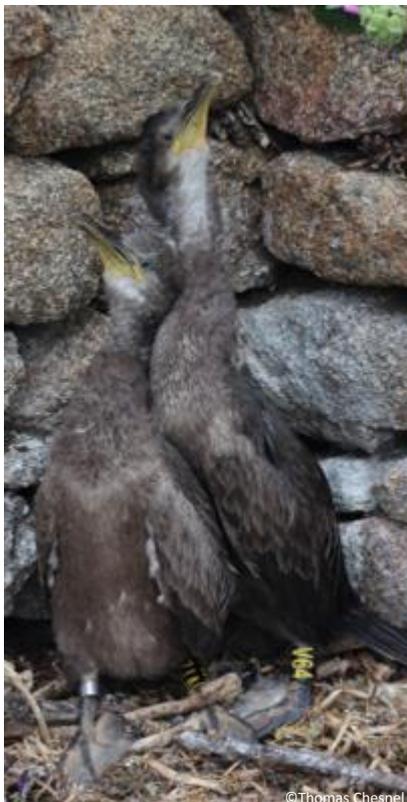


GROUPEMENT D'INTÉRÊT SCIENTIFIQUE OISEAUX MARINS



SUIVI DE LA CONTAMINATION DES OISEAUX MARINS AU TITRE DE LA DCSMM : ETUDE PILOTE 2019



Gauthier Poiriez¹, Aurélie Blanck², Aourel Mauffret³, Nathalie Wessel⁴, Paco Bustamante¹

¹ Littoral Environnement et Sociétés (LIENSs), UMR 7266 CNRS-Université de la Rochelle, La Rochelle, France
gauthierpoiriez@yahoo.fr, paco.bustamante@univ-lr.fr,

² Office Français de la Biodiversité, Brest, France aurelie.blanck@ofb.gouv.fr,

³ Ifremer, Unité de Biogéochimie et Ecotoxicologie, Nantes, France; Aourel.Mauffret@ifremer.fr,

⁴ Ifremer, ODE/Vigies, Nantes, France ; Nathalie.Wessel@ifremer.fr

En premier lieu, merci à l'OFB (anciennement AFB) et à La Rochelle Université de financer ce projet. Merci à Aurélie Blanck et à Sophie Poncet de porter ce programme à l'OFB.

Merci à Nathalie Wessel et Aourel Mauffret de porter ce programme à l'Ifremer, en apportant l'expérience des réseaux de suivi de la contamination en milieu marin.

Un énorme merci à tous ceux qui ont participé cette année aux prélèvements (par ordre alphabétique): Thomas Blanchon, Thierry Boulinier, Olivier Chastel, Fabrice Gallien, Julien Gernigon, William Jouanneau, Gilles Le Guillou, Carole Leray, Marine Leicher, Alain Mante, Karen Mc Coy, Célia Pastorelli, Pascal Provost, Manrico Sebastiano, Marion Vittecoq.

Je remercie Maud Brault-Favrou et Carine Churlaud du Centre Commun d'Analyses pour les conseils dans le dosage des échantillons.

Merci aux membres du comité de pilotage d'avoir apporté des conseils pertinents et d'avoir fait avancer ce projet : Christophe Aulert, Christophe Barbraud, Antoine Chabrolle, Matthieu Enraygues, Camilles Gilliers, Carole Perron.

Merci beaucoup enfin à Paco Bustamante et Jérôme Fort de leur aide et leurs conseils.

1- Contexte et objectifs	4
2- Méthodologie	4
2-1. Espèces	5
2-2. Matrices intégratrices	5
2-3. Contaminants	7
2-4. Sites 2019	7
2-5. Analyses	10
2-5.1. Dosage du mercure	11
2-5.2. Analyses isotopiques de carbone et de l'azote	11
3- Résultats étude pilote	11
3-1. Cormoran huppé	11
3-2. Goéland leucophée	13
3-2.1. Plumes	13
3-2.2. Œufs	15
3-2.3. Comparaison matrices intégratrices	16
3-3. Goéland argenté	17
3-4. Goéland marin	19
3-5. Puffin cendré	21
3-6. Comparaisons interspécifiques	23
3-6.1. Goélands Lilleau des Niges (Île de Ré)	23
3-6.2. Cormoran huppé et goéland marin	24
3-7. Isotopes stables du carbone (C) et de l'azote (N)	24
3-7.1. Goéland marin	25
3-7.2. Goéland argenté	26
3-7.3. Cormoran huppé	26
3-7.4. Goéland leucophée	27
3-7.5. Implications pour le suivi	27
4- Comparaison avec réseau existant (ROCCH Bivalves)	29
5- Synthèse des résultats	30
5- Perspectives	34
4-1. Liste des partenaires	36
Bibliographie	41
Annexes	46



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), mais également le long des réseaux trophiques (Jones et De Voogt 1999). Ainsi, si les polluants les moins persistants sont retrouvés à proximité de leur lieu d'émission, les plus 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 demi-vie longue (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 à l'heure actuelle dans l'environnement (Bustnes et al. 2015), et se retrouvent intégrés aux chaînes alimentaires aquatiques (Clatterbuck et al. 2018). D'autres contaminants, utilisés en remplacement des premiers, ont fait leur apparition. Ces polluants, appelés 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 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. 2012a). 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.

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 (accumulation croissante des contaminants le long des réseaux trophiques). Ils apparaissent donc comme des **bioindicateurs pertinents** de la contamination marine dans le cadre de la DCSMM.

2- Méthodologie

Une réflexion sur les espèces à suivre, sur les matrices à analyser, et sur les contaminants à doser a été menée (Poiriez, 2018). Des valeurs seuils ont été recherchées dans la bibliographie afin de renseigner les indicateurs DCSMM D8C1 (exposition des organismes aux contaminants) et D8C2 (effets des contaminants sur les organismes). La valeur seuil de **5 ppm de mercure dans les plumes de poussins**

(Burger et Gochfeld, 2000, 2004; Ramos et al., 2013) a été avancée, et sera utilisée dans l'étude pilote pour l'interprétation des résultats. D'autres valeurs seuils, qui seront actualisées suite à une veille bibliographique, seront proposées en 2020.

2-1. Espèces

Afin de caractériser au mieux les différences de contamination dans les espèces, trois cortèges alimentaires ont été définis (Poiriez, 2018).

Spécialistes côtiers :

- Cormoran huppé (*Phalacrocorax arsitotelis*)
- Sterne caugek (*Thalasseus sandvicensis*)
- Sterne pierregarin (*Sterna hirundo*)



Généralistes côtiers :

- Goéland marin (*Larus marinus*)
- Goéland brun (*Larus fuscus*)
- Goéland argenté (*Larus argentatus*)
- Goéland leucophée (*Larus michahellis*)



Spécialistes hauturiers :

- Mouette tridactyle (*Rissa tridactyla*)
- Fou de Bassan (*Morus bassanus*)
- Puffin de Scopoli (*Calonectris diomedea*)



L'objectif est d'analyser des échantillons provenant de nombreux points du littoral afin de détecter des **variations géographiques** de la contamination de ces espèces.

Pour un échantillonnage statistiquement robuste et représentatif, il a été prévu d'échantillonner des tissus sur **15 individus par site et par espèce**. Ce chiffre de 15 individus par site permet de prendre en compte une éventuelle variabilité inter-individus.

2-2. Matrices intégratrices

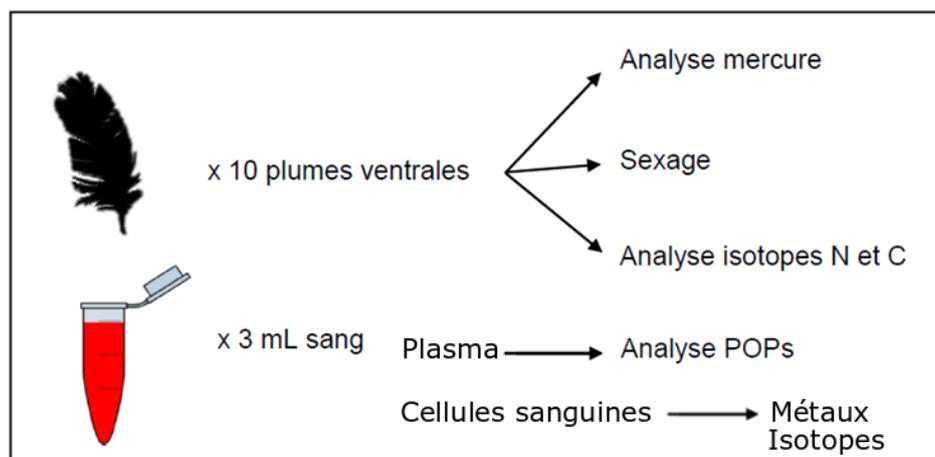
Les **plumes** permettent les analyses des éléments traces métalliques, et notamment le mercure qui a une forte affinité avec les soufres des kératines qui les composent (Thompson et al. 1998). Les plumes permettent aussi les analyses isotopiques du carbone et de l'azote, afin de corrélérer le régime alimentaire (niveau trophique avec l'azote) et la zone de nourrissage (habitat d'alimentation avec le

carbone) aux concentrations en contaminants (Mallory et Braune 2017) en ce qui concerne les plumes de poussins. Si cette corrélation reste controversée en ce qui concerne les adultes (Bond, 2010), elle est tout à fait valable et pertinente pour les plumes de poussins qui reflètent une même période d'intégration pour les isotopes et pour le mercure.

Un des avantages principaux des plumes est le caractère **non destructif** et peu invasif de leur collecte (Thompson et al. 1998). L'idéal, en particulier pour les espèces migratrices, est de récolter les plumes des **poussins** avant leur envol (Borghesi et al. 2016). On met ainsi en évidence de cette manière la **contamination locale**, issue des apports alimentaires des parents au poussin puisque la nourriture apportée au poussin provient nécessairement d'un rayon relativement restreint autour de la colonie (Blévin et al. 2013).

Le **sang** est une matrice qui permet d'analyser efficacement un large spectre de contaminants. Il reflète une contamination **récente**, directement liée au régime alimentaire (Carvalho et al. 2013). L'échantillonnage ne requiert pas le sacrifice de l'oiseau, et son utilisation en tant que tissu pour le suivi des contaminants est pertinente (Kahle et Becker 1999). Les polluants organiques persistants (POPs) sont généralement dosés dans le plasma où ils sont associés aux lipides et lipoprotéines (Wong et al. 2008). Les éléments métalliques sont dosés soit sur le sang total soit dans les cellules sanguines où ils sont généralement associés en majorité (Burger et Gochfeld 1997).

Deux matrices en particulier sont donc ciblées : le sang et les plumes de poussin.



x 15 individus / espèce / site

En concertation avec les acteurs de terrain, en nous basant sur les connaissances de gestionnaires, naturalistes, bagueurs CRBPO, chercheurs, et suite à des réunions avec des membres du Groupement d'Intérêt Scientifique Oiseaux Marins (GISOM), de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), du Muséum d'Histoire Naturelle (MNHN), du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), du Centre d'Etudes Biologiques de Chizé (CEBC), de la Ligue de Protection des Oiseaux (LPO), et de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB), les suivis seront différents en fonction de la **sensibilité des espèces au dérangement**.

Ainsi, il a été décidé pour les sternes que les prélèvements seraient réalisés sur des **cadavres de poussins** ramassés après la saison de reproduction ou en cas d'échec de reproduction (dû à la météo, à un prédateur ou à une autre source de dérangement). Il n'y a donc pas eu d'analyses en 2019 sur les sternes, mais ces espèces seront prises en compte à partir des suivis 2020. Les plumes pourront être prélevées sur ces cadavres. Le stockage des cadavres pourra aussi permettre de comparer les niveaux de contamination avec d'autres matrices, comme le muscle ou les réserves adipeuses. Il existe un biais lié à la récolte de cadavres, puisque la mort a potentiellement été favorisée par un niveau plus haut de contamination (risque de surévaluation du niveau réel). Cependant, la même matrice étant utilisée sur les différents sites, le niveau de contamination pourra être comparé entre sites pour les polluants stables dans le temps comme les métaux ou les PCBs par exemple.

Une mutualisation d'échantillons avec des programmes de recherche existants (voir Figure 2) peut apporter également d'autres matrices, telles que les œufs. Les œufs présentent un intérêt car leur taille relativement importante permet l'analyse de nombreux contaminants métalliques (Burger et Gochfeld, 1991) et organiques (Morales et al. 2012). De plus, les différents compartiments (membrane coquillière, albumen, vitellus) présentent différentes concentrations en contaminants, en fonction des affinités de ces derniers avec les différentes molécules (acides gras, acides aminés). La continuité du programme de Thierry Boulinier du CEFE, et son extension sur les façades Atlantique et Manche-Mer du Nord, va permettre d'obtenir des informations couplées pathogènes/contaminants sur les œufs de goélands argentés et leucophées.

2-3. Contaminants

Les objectifs sont le suivi des contaminants métalliques et organiques :

14 éléments traces métalliques : Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, V et Zn.

Des Polluants Organiques Persistants (POPs) :

- DDTs et ses métabolites
- PCBs (congénères CB-28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)
- PBDEs (congénères BDE-28, 47, 99, 100, 153, 154, 183 et 209)
- PFAS (PFOA, PFHxS, PFNA, PFHpS, PFDA, L-PFOS, Br-PFOS, PFUnA, PFDS, PFTTrDA, PFTeDA, FOSA).

En 2019, dans le cadre de l'étude pilote, seul **le mercure (Hg)** a été suivi, afin de réduire les coûts d'analyse tout en testant la stratégie de suivi.

2-4. Sites 2019

Une **étude pilote** a été menée en 2019, pour tester la faisabilité du déploiement d'un tel programme de surveillance sur l'ensemble des côtes françaises métropolitaines. De façon à obtenir des informations sur les niveaux d'exposition des oiseaux en relation avec la zone d'échantillonnage (contamination locale), les poussins ont été privilégiés pour le programme. Lorsque des programmes de baguage existaient, des plumes ont été prélevées sur les poussins lors des opérations de baguage. Du sang, du duvet et des œufs ont été également prélevés pour analyse lorsque des programmes de recherche autorisaient leur prélèvement.

Les autorisations en 2019 ont été délivrées par le Centre de Recherche sur la Biologie des populations d'Oiseaux (CRBPO), dans le cadre d'opérations de baguage. Les programmes suivants ont fait l'objet de prélèvements :

- 379 : Dynamique de population du Cormoran huppé sur le littoral Atlantique français. Porteuse du programme : Marine Leicher.

- 380 : Etude de la dynamique des colonies de Puffin cendré et de Puffin de Méditerranée sur les îles de Marseille. Porteur du programme : Alain Mante.

Afin de prélever au sein du Parc National des Calanques, une autorisation spéciale a également été demandée auprès du conseil scientifique du Parc. Un dossier a été monté, et l'autorisation a été accordée de récolter du duvet tardif (jugé moins impactant que les plumes).

- 434 : Fonctionnement d'une population de goélands marins (*Larus marinus*). Cas de la ville du Havre (Seine-Maritime). Evolution comparée avec la population littorale de la ZPS du Cap Fagnet. Porteur du programme : Gilles Le Guillou.

- 531 : Étude de la dynamique des colonies normandes de cormoran huppé. Porteur du programme : Fabrice Gallien.

- 603 : Étude du goéland marin en Basse-Normandie. Porteur du programme : Fabrice Gallien.

- 678 : Etude des laridés nicheurs - Goéland marin, *Larus marinus* et Goéland brun, *Larus fuscus* dans le Morbihan, Loire-Atlantique et Vendée. Porteuse du programme : Marine Leicher.

Deux programmes personnels de baguage faisait déjà l'objet de projets de recherche, et des prélèvements étaient déjà autorisés dans ce cadre. Des échantillons supplémentaires y ont donc été récupérés. C'est le cas des programmes :

- 533 : Etude des laridés nicheurs de la Réserve Naturelle de Lilleau des Niges et de l'Île de Ré. Porteur du programme : Julien Gernigon. La demande d'autorisation de prélèvements de plumes et de sang a été réalisée dans le cadre du projet Région Nouvelle Aquitaine MULTISTRESS. Ce projet, porté par Olivier Chastel du Centre d'Etudes Biologiques de Chizé (CEBC), suit les niveaux et effets des polluants (mercure, POPs, PFASs) dans le sang de 4 espèces de goélands (adultes et poussins) de la réserve.

- Suivi de la dynamique des populations et du potentiel de dispersion des goélands leucophées (*Larus michahellis*) sur la colonie de Carteau (Port-Saint-Louis du Rhône) ; conséquences pour leurs parasites et pathogènes. Porteur du programme : Thomas Blanchon. Des autorisations de prélèvements ont été demandées dans le cadre du suivi de l'infestation des goélands par les tiques, dures et molles (ANR ESPEVEC). Des prélèvements de sang, plumes et duvets ont été réalisés, afin de quantifier les pressions multiples exercées sur les oiseaux. C'est Karen Mc Coy de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) qui réalisait les prélèvements sanguins en 2019.

Les sites de baguage où ont été réalisés des prélèvements apparaissent en Figure 1.

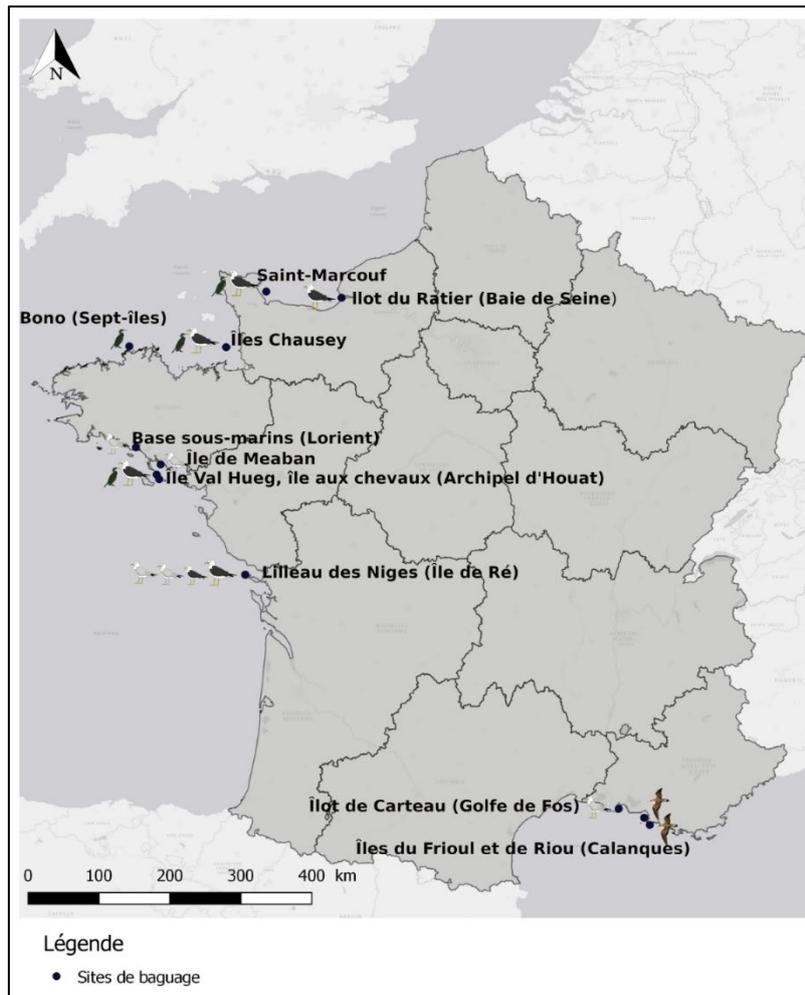


Figure 1 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM pour l'étude pilote 2019 - Sites de baguage sur lesquels des échantillons ont été prélevés

Le programme de recherche d'agents pathogènes dans les œufs frais du goéland leucophée, mené par Thierry Bouliner de Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE), apporte un grand nombre d'échantillons sur le secteur méditerranéen. Une collaboration a été mise en place entre le CEFE et le LIENSs, afin de mutualiser les échantillons d'œufs. Les anticorps de réponse au virus responsable de l'influenza aviaire, à l'agent responsable de la toxoplasmose *Toxoplasma gondii*, et au *Flavivirus meaban* transmis par les tiques sont analysés au CEFE, les contaminants métalliques et le mercure au LIENSs.

Les sites de prélèvements d'œufs apparaissent en Figure 2.

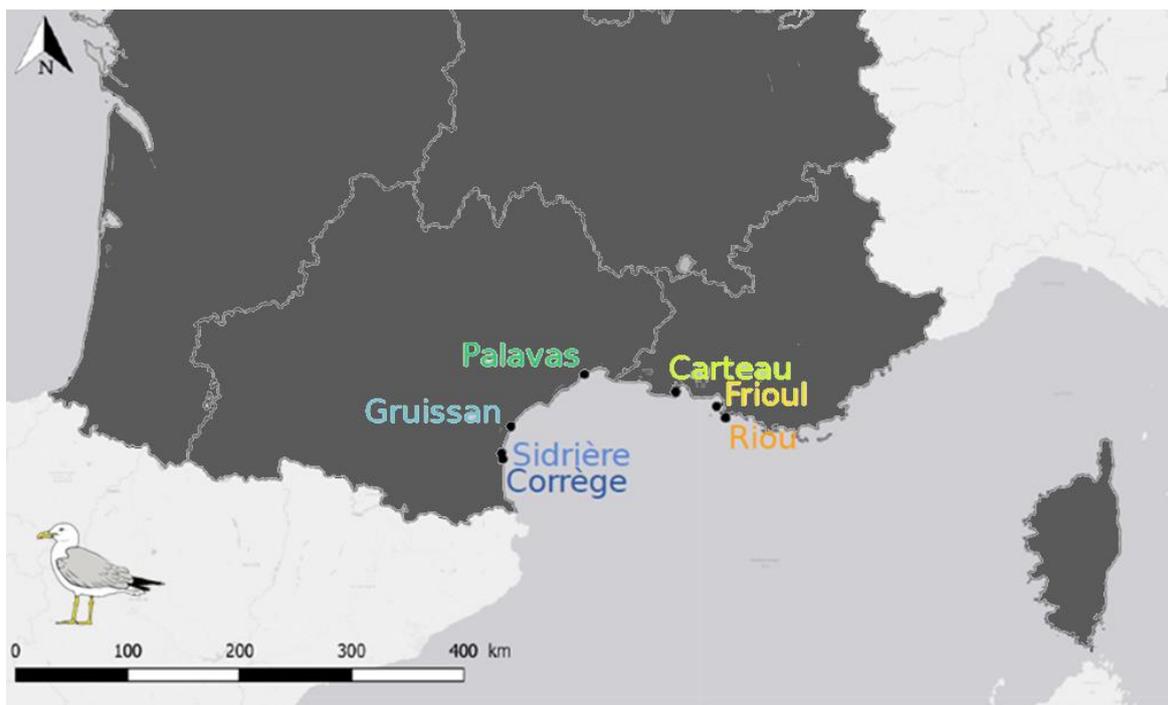


Figure 2 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM pour l'étude pilote 2019 - Sites de prélèvements d'œufs frais de goéland leucophée

Cette année, l'échantillonnage a permis de récolter des **plumes** (cormorans huppés, goélands marins, argentés, leucophées, bruns) sur 10 stations, des **œufs** frais (goélands leucophées) sur 7 stations, du **sang** (goélands marins, argentés, leucophées, bruns) sur 2 stations, et du duvet (goélands leucophées, puffins de Scopoli) sur 3 stations pour un total de **418 échantillons** (Voir tableau en annexe).

2-5. Analyses

Les analyses ont été réalisées à l'Université de La Rochelle, afin de doser le mercure et les isotopes stables de l'azote et du carbone.

Les plumes nécessitent un travail de préparation avant de pouvoir être analysées.

Elles sont d'abord débarrassées manuellement des déchets grossiers ainsi que des duvets éventuels.

Puis, afin d'éliminer la contamination déposée en surface, elles sont passées 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.

Une fois le solvant éliminé (après 48h de séchage à 45°C), les plumes sont réduites en une poudre fine, qui sera la matrice à introduire dans l'appareil.

En ce qui concerne les œufs, l'albumen et le vitellus sont séparés manuellement. Le vitellus a été utilisé en 2019 par le CEFE pour le suivi des pathogènes, et l'albumen pour le dosage du mercure au LIENSs.

Le sang est simplement lyophilisé pour être introduit dans l'appareil.

2-5.1. Dosage du mercure

Le dosage du mercure total est réalisé grâce à un spectrophotomètre d'absorption atomique dédié à l'analyse du mercure, l'AMA 254 de Altec (Advanced Mercury Analyser). Les échantillons pesés pour être injectés dans l'appareil pèsent entre 0,2 et 2 mg de poids sec. Chaque analyse est doublée ou triplée afin d'obtenir un coefficient de variation inférieur à 10%. La valeur retenue est la moyenne des concentrations en mercure. La précision de l'appareil est vérifiée trois fois par jour au moyen de matériaux de référence certifiés : DOLT5, (Dogfish Liver, National Research Council Canada) et TORT3 (Lobster Hepatopancreas, National Research Council Canada).

L'AMA mesure la quantité de mercure dans l'échantillon en ng, et la rapporte à la masse pesée pour afficher en plus la mesure en ng.mg⁻¹. La limite de quantification (LOQ) de l'appareil est de 0,1 ng de mercure. Dans le cas où l'échantillon est proche de la LOQ, la masse pesée d'échantillon est augmentée.

2-5.2. Analyses isotopiques de carbone et de l'azote

Les analyses sont effectuées dans des capsules en étain, pour des 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 δ en relation avec le Vienna PeeDee Belemnite le N₂ atmosphérique pour $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$, respectivement.

3- Résultats étude pilote

3-1. Cormoran huppé

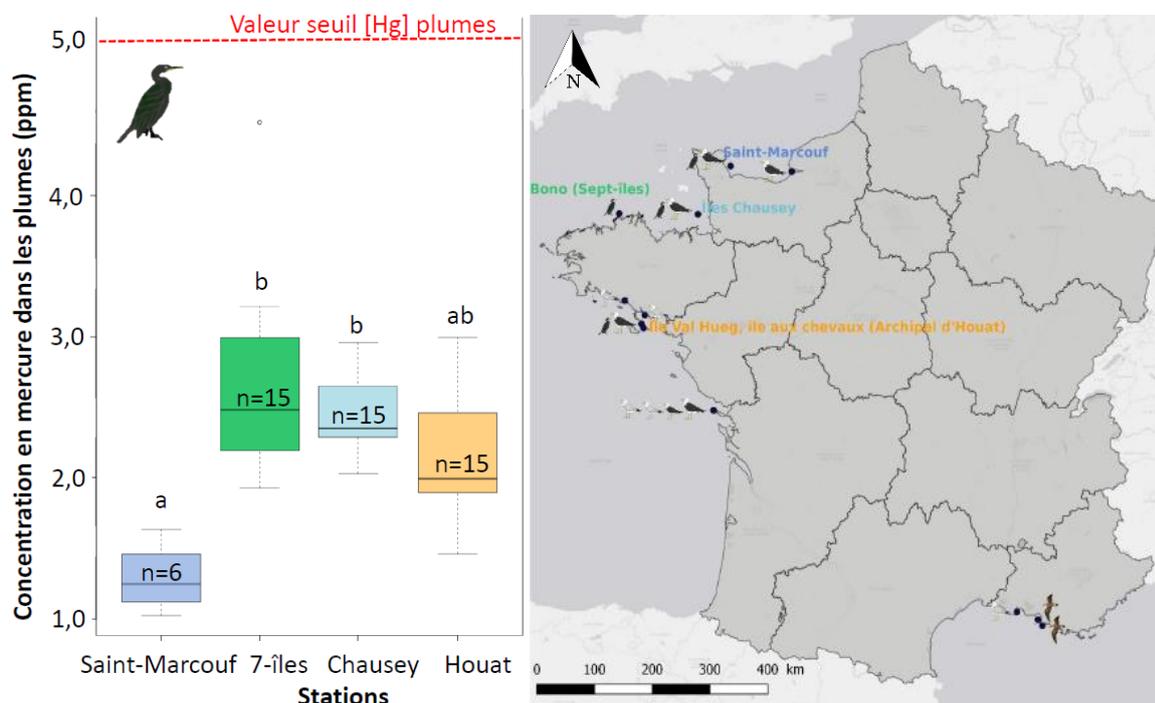


Figure 3 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg dans les plumes de poussin de cormoran huppé (Phalacrocorax aristotelis).

Les concentrations en Hg dans les plumes varient significativement entre les différentes stations échantillonnées (Figure 3). Les cormorans de Saint-Marcouf présentent la plus faible exposition au Hg ce qui suggère que la zone située autour le long de la côte est du Cotentin est faiblement contaminée. Cela pourrait refléter la contamination globalement faible de la masse d'eau qui alimente cette zone, en provenance de la Manche est. Cependant, si on regarde les isotopes stables de carbone et d'azote (Figure 4 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les plumes de poussin de cormoran huppé (*Phalacrocorax aristotelis*).), on peut que voir que les ratios isotopiques sont bas pour les cormorans de Saint-Marcouf.

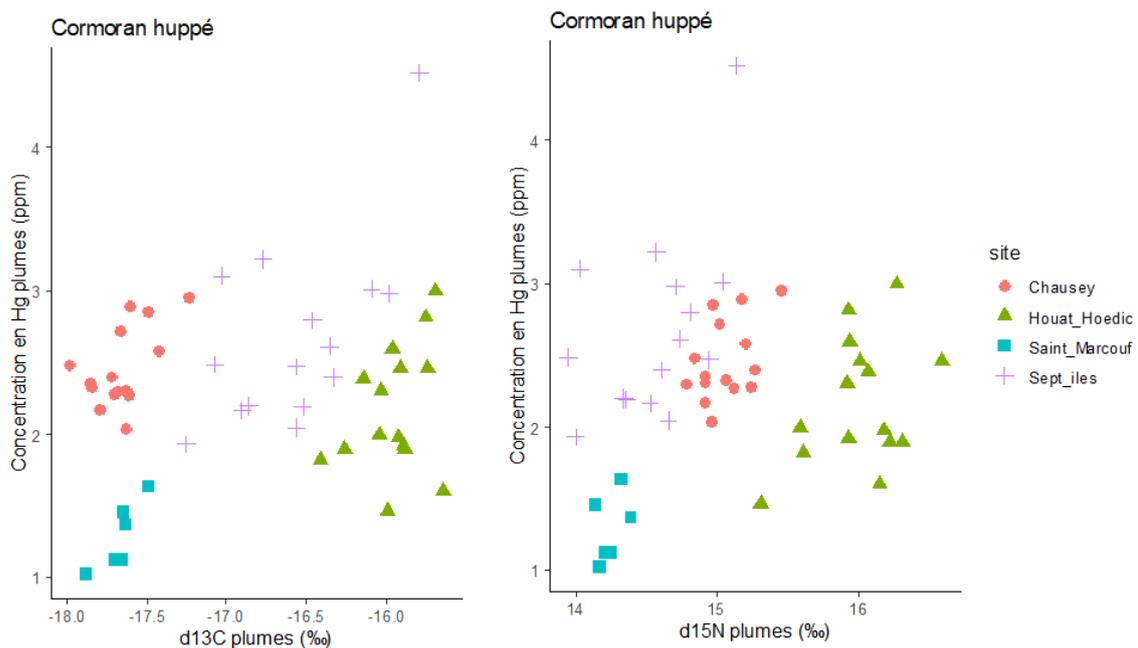


Figure 4 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les plumes de poussin de cormoran huppé (*Phalacrocorax aristotelis*).

Or l'augmentation du ratio C^{13}/C^{12} ($\delta^{13}C$) indique une prépondérance de **l'alimentation sur des ressources marines** (Roscales et al. 2016). Par ailleurs, un ratio N^{15}/N^{14} ($\delta^{15}N$) élevé indique que l'organisme a un **statut trophique élevé** (Thompson et al. 1998). Les cormorans de Saint-Marcouf s'alimentent donc sur des ressources moins marines que les cormorans des autres sites (à l'exception de ceux de Chausey), et d'un niveau trophique moindre (à l'exception de ceux des Sept-îles). Le Hg étant bioamplifiable (Wiener et al. 2002), le niveau de contamination augmente à chaque niveau trophique. Le Hg rentre dans les chaînes trophiques sous la forme méthylmercure meHg (Ochoa-Acuña et al., 2002). Les niveaux de meHg sont particulièrement élevés en milieu marin, qui présente un nombre plus élevé de niveaux trophiques que le milieu terrestre. De plus il y a une forte présence de zones anoxiques dans le milieu marin, qui sont les lieux de méthylation de Hg. La moins forte contamination des cormorans de Saint-Marcouf peut donc s'expliquer par les ressources alimentaires utilisées.

Les cormorans des Sept-Îles et de Chausey ne diffèrent pas significativement en termes de concentrations en Hg. Les cormorans de ces deux stations présentent les plus fortes concentrations en Hg. Or les niveaux trophiques de leurs proies sont plutôt faibles (Figure 4) comparativement à ceux de l'archipel d'Houat. On peut donc imaginer que les masses d'eau autour de ces stations présentent de fortes concentrations en Hg. Les cormorans de l'archipel d'Houat présentent des concentrations en Hg intermédiaires entre celles des cormorans de Saint-Marcouf et celles de Chausey et Houat. Ils semblent pourtant s'alimenter sur les ressources du plus haut niveau trophique, et les plus marines sur les cormorans échantillonnés.

Les variances observées pour les concentrations en Hg dans les plumes de poussin de cormoran huppé sont faibles. Les concentrations, quel que soit le site, sont inférieures au seuil de 5 ppm, ce qui suggère que le Hg ne présente pas un risque toxicologique pour les poussins de cormoran. Cependant il est à noter que ces concentrations peuvent tout même présenter un risque au niveau populationnel. Le Hg étant bioaccumulable, les adultes sont plus contaminés que les poussins, et ils peuvent donc présenter un risque plus élevé.

3-2. Goéland leucophée

3-2.1. Plumes

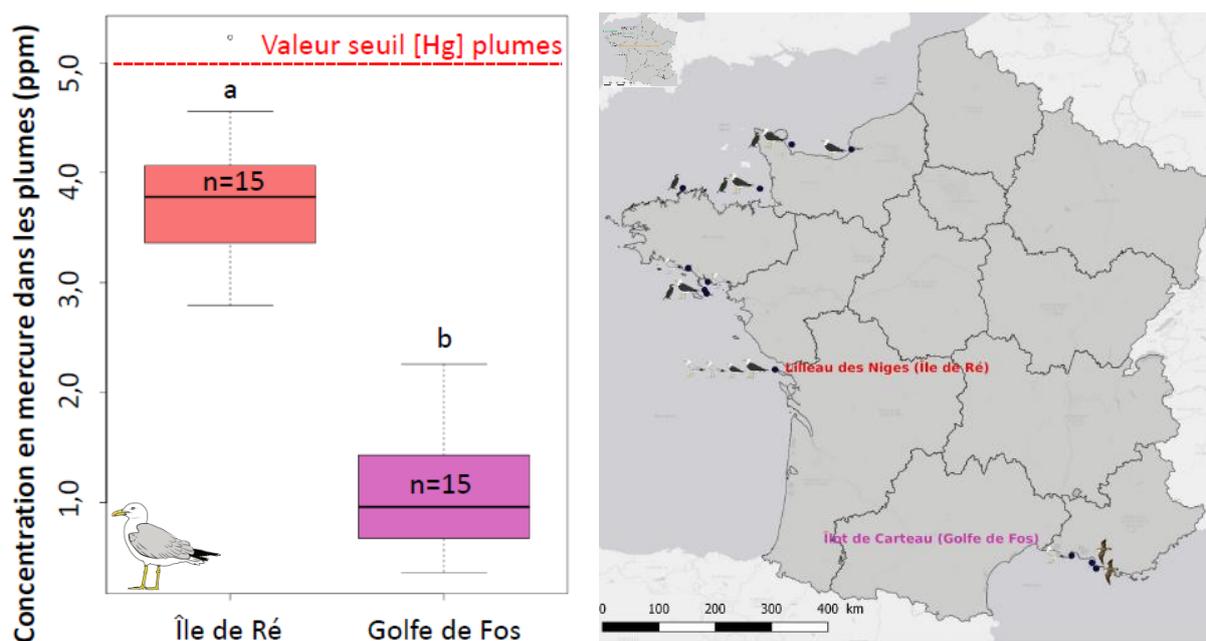


Figure 5 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg dans les plumes de poussin de goéland leucophée (*Larus michahellis*). La ligne rouge correspond à la valeur seuil d'apparition des effets néfastes.

Les concentrations dans les plumes de goéland leucophée diffèrent significativement dans les deux stations échantillonnées (Figure 5). Les goélands leucophées de l'île de Ré présentent une exposition au Hg plus de trois fois supérieure à celle du golfe de Fos.

L'explication est donnée par les analyses isotopiques (Figure 6).

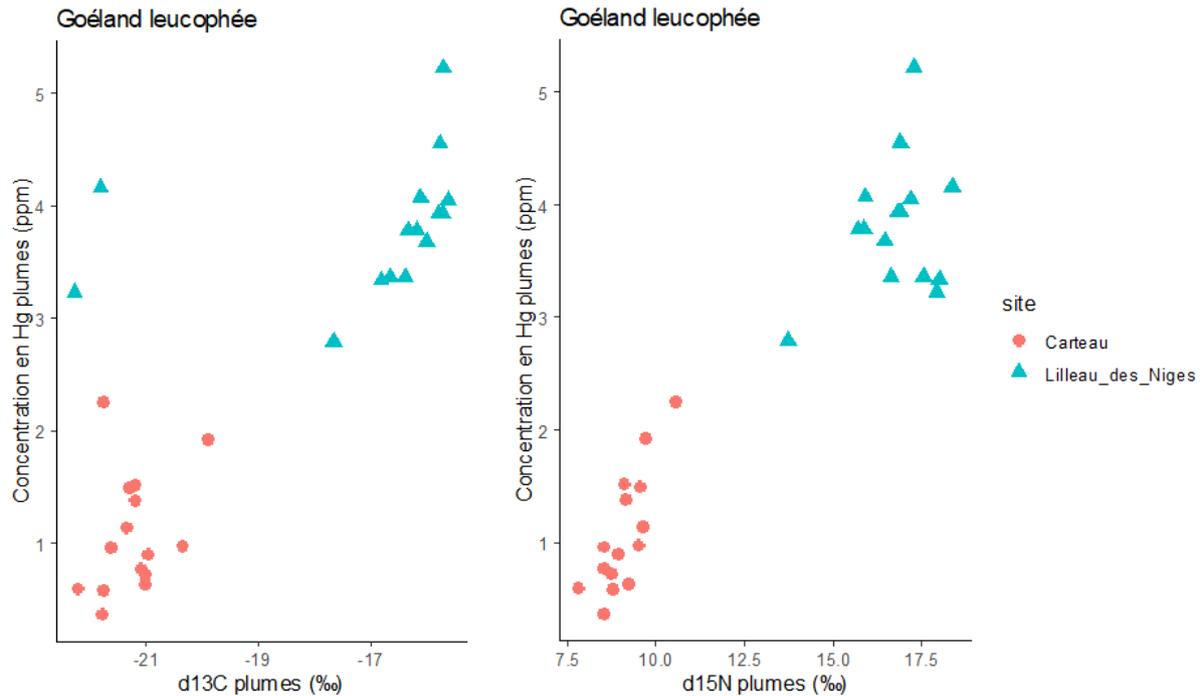


Figure 6 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les plumes de poussin de goéland leucophée (*Larus michahellis*). Les stations sont situées sur l'île de Ré (Lilleau des Niges dans le Fier d'Ars) et dans le Golfe de Fos (îlot de Carteau).

On remarque une alimentation principalement marine des goélands leucophées de l'île de Ré ($\delta^{13}\text{C}$ élevé), alors que ceux de Fos s'alimentent sur des proies plus côtières et même terrestres. Les proies ciblées par les goélands de Ré sont également d'un niveau trophique plus élevé ($\delta^{15}\text{N}$ élevé). Le Hg étant bioamplifiable et plus présent en milieu marin, les isotopes peuvent expliquer la forte différence de concentration en Hg.

La ligne rouge représente la valeur seuil de 5 ppm dans les plumes, connue dans la bibliographie comme une valeur seuil d'apparition des effets néfastes sur l'oiseau.

3-2.2. Œufs

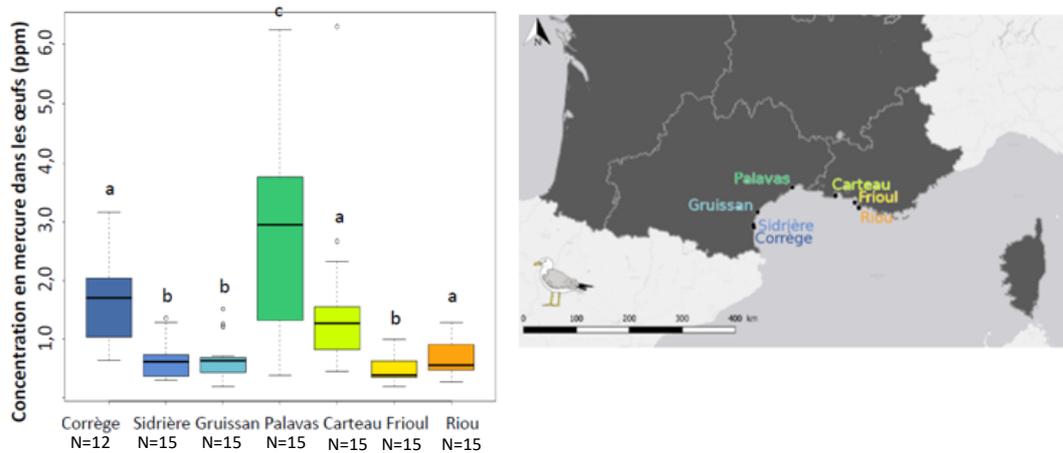


Figure 7 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg dans les œufs frais de goéland leucophée (*Larus michahellis*).

Trois lots se démarquent en ce qui concerne la contamination au Hg des blancs d'œuf de goélands leucophées (Figure 7). Sidrière, Gruissan et Frioul (groupe b) sont les moins contaminés, et ne diffèrent pas significativement. Corrège, Carteau et Riou (groupe a) sont un peu plus contaminés. Palavas est la station où les œufs de goéland leucophée présentent la plus forte concentration en Hg. Il manque encore les valeurs isotopiques pour Palavas, Carteau, Frioul et Riou (en cours d'analyse). Les données de Hg pourront être analysées à la lumière de ces résultats.

Les valeurs seuils d'apparition d'effets délétères du Hg dans les œufs d'oiseaux marins varient selon les auteurs : 0,9 ppm (Eisler 1987), 0,6 à 1,3 ppm (Goodale et al. 2008), 1,5 à 18 ppm (Pereira et al. 2009), 0,6 ppm (Champoux et al. 2015). Ces valeurs sont données pour des œufs entiers, et non pour les blancs. Néanmoins, les concentrations en Hg dans les œufs de goélands leucophées de Corrège, Palavas, Carteau et Riou pourraient présenter des risques (diminution du succès d'éclosion).

3-2.3. Comparaison matrices intégratrices

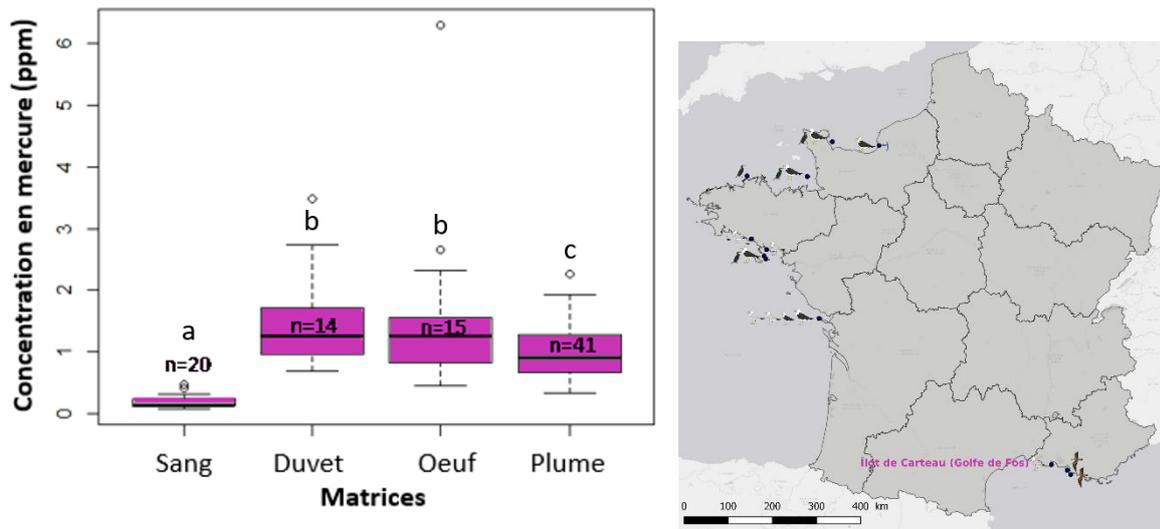


Figure 8 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg dans le sang, le duvet, les œufs frais et les plumes de poussins de goéland leucophée (*Larus michahellis*) sur l'îlot de Carteau dans le Golfe de Fos.

L'îlot de Carteau dans le golfe de Fos fait l'objet de programmes de recherche (portés par Karen Mc Koy de l'IRD, Marion Vittecoq et Thomas Blanchon de la Tour du Valat, et Thierry Boulinier du CEFE). De nombreux échantillons ont été mutualisés dans ce contexte, permettant des analyses inter-matrices.

On observe un gradient de concentration de Hg du type **sang < plume < duvet = œuf** (Figure 8). Le sang est le moins concentré en Hg, suivi par les plumes de poussins, et enfin l'ensemble duvet-œuf (pas de différence significative entre les deux).

Il n'est pas étonnant de voir que le duvet et les œufs ne sont pas significativement différents en termes de concentration en Hg. Le Hg trouvé dans les œufs est transféré par la mère (Ackerman et al. 2016), et la quantité de Hg dans le duvet est fortement corrélée à celle de l'œuf (Ackerman et Eagles-Smith 2009; Heinz et al. 2010) .

Le sang de poussin est en général moins contaminé que celui des parents sur le site de nidification (Evers et al. 2005), car les poussins déchargent le Hg dans les plumes en croissance (Fournier et al. 2002).

Les œufs peuvent refléter une contamination locale du milieu, si les espèces étudiées sont « income breeders » ou strictement sédentaires. Si elles sont « income breeders », l'énergie allouée à la reproduction provient des apports alimentaires récents (Stephens *et al.*, 2009), ce qui la différencie des « capital breeders » qui eux utilisent les réserves accumulées sur l'année entière (Dittmann *et al.*, 2012). Ainsi les « capital breeders » peuvent transmettre à leurs œufs des contaminants provenant des zones d'hivernage si l'espèce est migratrice et de zones d'alimentation éloignées de la colonie de reproduction si la zone vitale de l'espèce est vaste. Les concentrations en Hg de l'œuf et du duvet étant corrélées (Ackerman et Eagles-Smith, 2009), les œufs et les duvets des poussins reflètent potentiellement la contamination des parents, accumulée lors de l'hivernage.

3-3. Goéland argenté

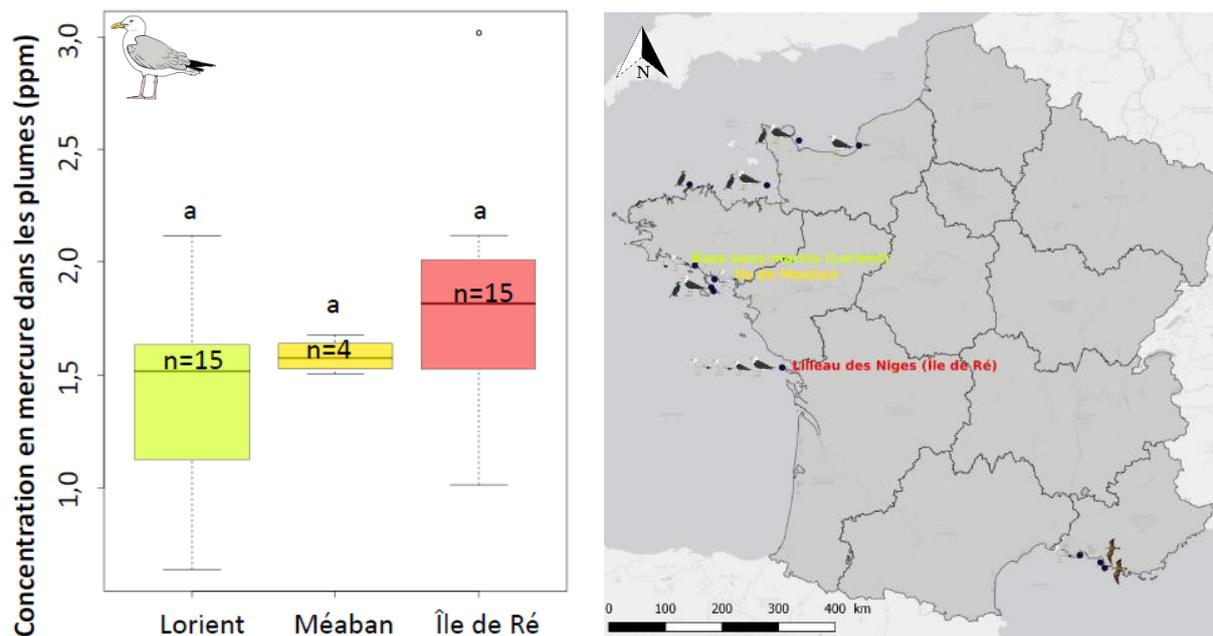


Figure 9 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg dans les plumes de poussin de goéland argenté (*Larus argentatus*).

Aucune différence significative de concentration en Hg dans les plumes n'est détectée entre les différentes stations où des goélands argentés ont été manipulés (Figure 9). Ces stations étaient cependant peu éloignées et une analyse spatiale plus large est nécessaire. Les concentrations sont inférieures à la valeur seuil de 5 ppm. Il est surprenant de ne pas trouver de différence car les isotopes semblent indiquer des stratégies alimentaires différentes (Figure 10).

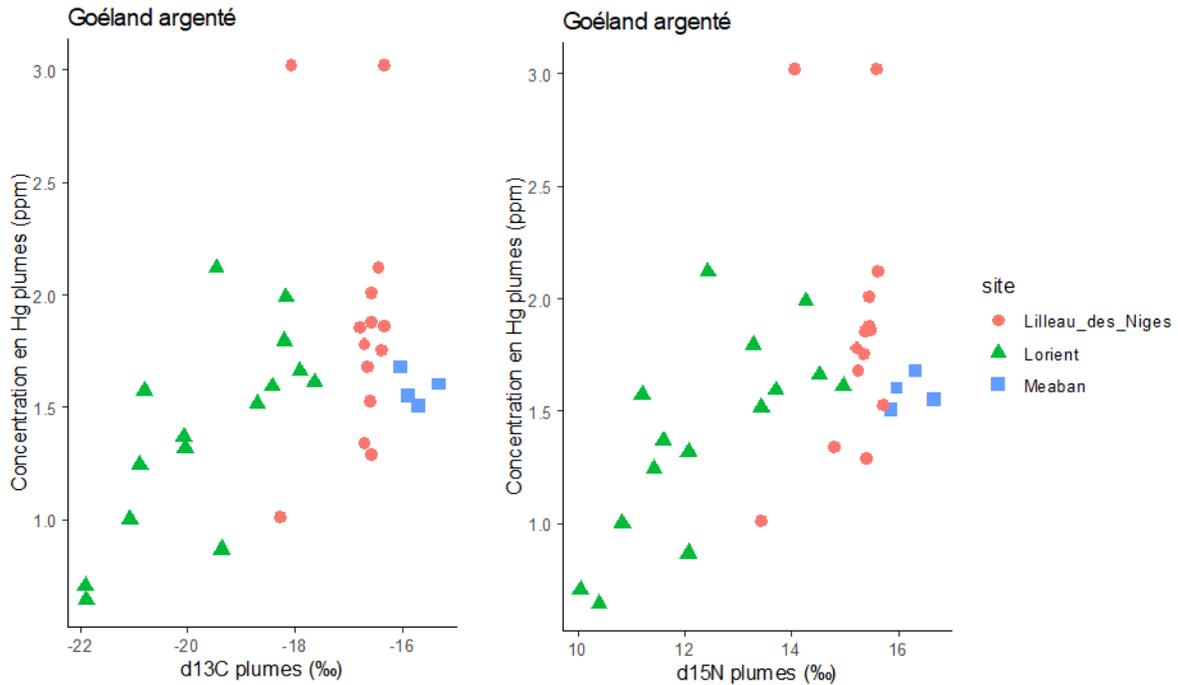


Figure 10 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les plumes de poussin de goéland argenté (*Larus argentatus*).

Les isotopes semblent montrer des stratégies différentes d'alimentation entre stations. Les goélands argentés de Méaban semblent utiliser des ressources plus marines et d'un niveau trophique plus élevé que ceux de l'île de Ré et que ceux de Lorient.

On observe en revanche une grande variance entre échantillons, pour un même site. Le niveau de contamination au Hg étant corrélé au régime alimentaire (Santos et al. 2017), ces variances pourraient être expliquées par des stratégies variées de nourrissage des poussins par les parents. Les adultes de goélands argentés pouvant être spécialistes d'une ressource durant la saison de reproduction (Pierotti et Annett 2012), on peut imaginer des différences interindividuelles.

3-4. Goéland marin

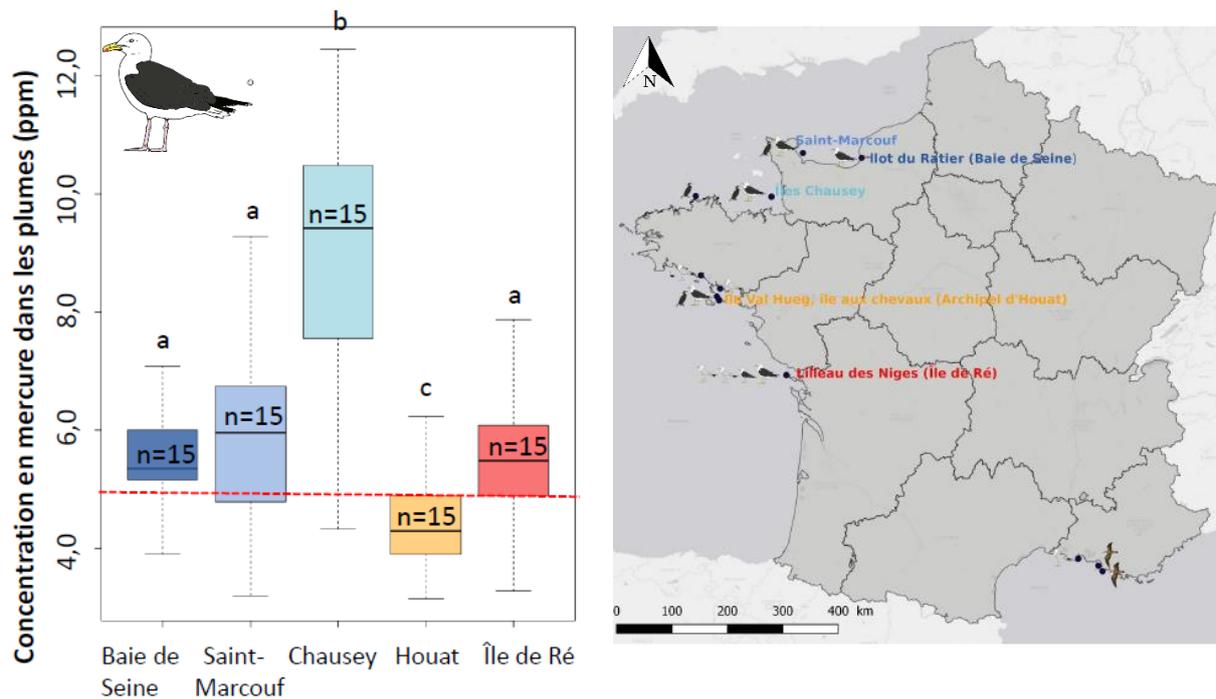


Figure 11 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg dans les plumes de poussin de goéland marin (*Larus marinus*). La ligne rouge correspond à la valeur seuil (5 ppm) d'apparition des effets néfastes

Trois groupes sont discernables en ce qui concerne le goéland marin (Figure 11). Ceux de l'archipel d'Houat sont les moins exposés au Hg. Les goélands de la baie de Seine, de Saint-Marcouf et de l'île de Ré (groupe a) ne présentent pas différence significative de concentrations en Hg entre eux, mais sont plus contaminés que ceux d'Houat et moins que ceux de Chausey. Ceux de Chausey semblent être les plus exposés au Hg. Les valeurs isotopiques du carbone et de l'azote (Figure 12) sont très dispersées, ce qui dénote un régime alimentaire varié chez cette espèce.

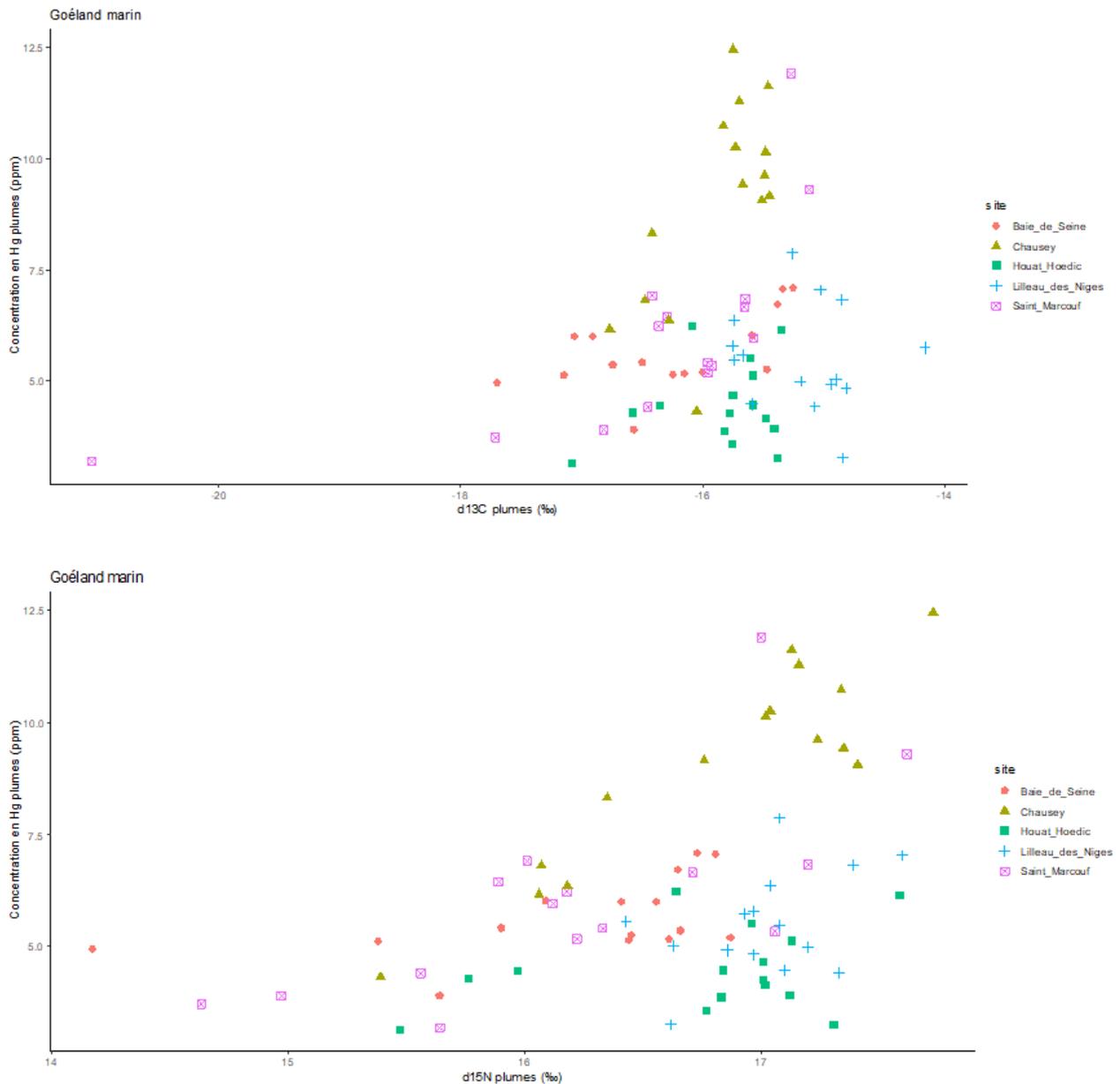


Figure 12 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les plumes de poussin de goéland marin (*Larus marinus*).

La ligne rouge représente la valeur seuil de 5 ppm de Hg dans les plumes. Les individus dépassant cette valeur seuil sont susceptibles d'être impactés négativement par le Hg.

Des résultats similaires ont été observés dans le cadre du projet ECOTONES (Xuereb et al., 2019), où les goélands marins de Chausey étaient plus contaminés au Hg que ceux de baie de Seine.

Les variances de concentration en Hg constatées pour les échantillons de goéland marin sont importantes. Le Hg dans les plumes en croissance est issu des apports alimentaires et des réserves de l'oiseau (Braune et Gaskin, 1987). On peut donc associer ces fortes variances au régime alimentaire diversifié et opportuniste du goéland marin (Götmark, 1984; Steenweg et al., 2011; Rome et Ellis, 2004).

3-5. Puffin cendré

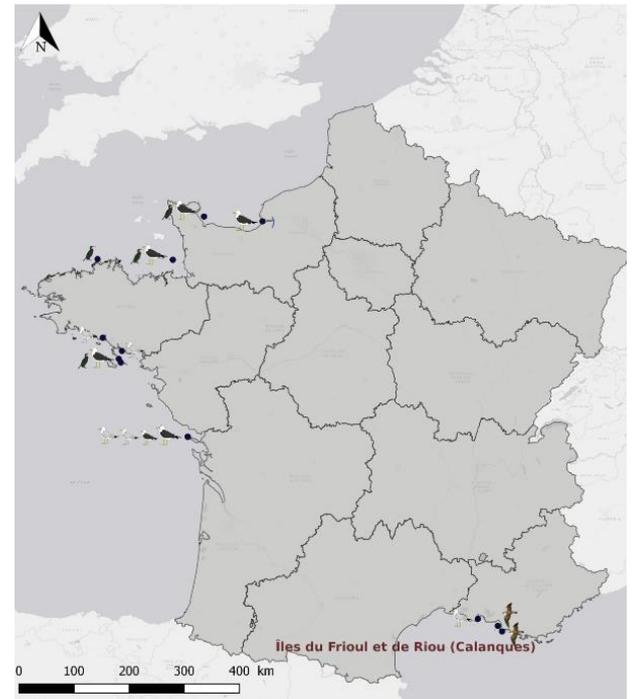
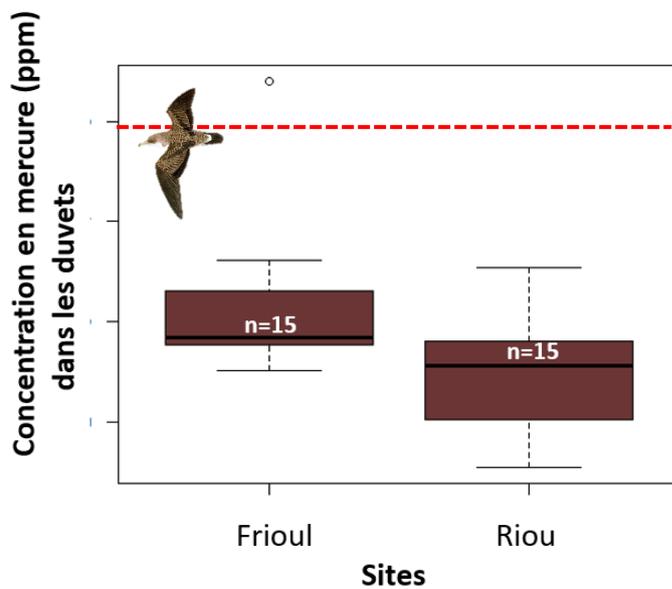


Figure 13 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg dans les duvets de poussin de puffin de Scopoli (*Calonectris diomedea*). La ligne rouge correspond à la valeur seuil (5 ppm) d'apparition des effets néfastes

Les duvets de puffin cendré de Frioul sont plus contaminés que ceux de Riou, la différence est significative (Figure 13). Le méthyl-mercure, forme assimilable du mercure par les organismes (Elizalde, 2017), est très présent dans les milieux marins (Mason et Fitzgerald, 1990). On peut donc imaginer que les puffins du Frioul ont une alimentation plus marine que ceux de Riou. Cependant, les analyses isotopiques (Figure 14) montrent que les proies des puffins des deux îles ne diffèrent pas en terme de géographie (pas de schéma visible dans les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$). Mais les poussins des îles du Frioul semblent avoir été nourris avec des proies de niveau trophique plus élevé que ceux de Riou ($\delta^{15}\text{N}$ plus élevé).

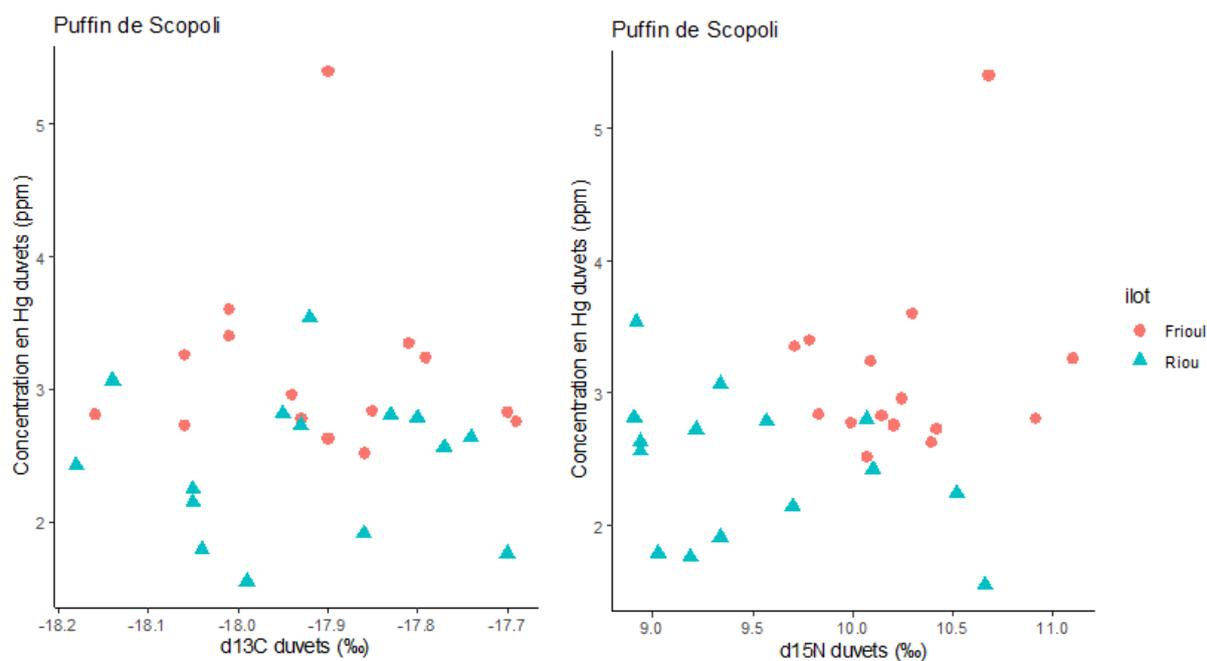


Figure 14 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les duvets de poussin de puffin de Scopoli (*Calonectris diomedea*).

D'après les suivis GPS réalisés (Péron et Grémillet, 2014), on sait que les oiseaux de ces deux îles ont des stratégies d'alimentation différentes en période de reproduction. En 2011 et 2012, si les oiseaux de deux colonies allaient dans le Golfe du Lion, les puffins de Scopoli de Riou utilisaient plus le secteur est du Parc National des Calanques que ceux du Frioul. On peut donc imaginer que les puffins utilisant des secteurs d'alimentation différents ne sélectionnent pas les mêmes proies.

En concertation avec les agents du Parc National, seuls les duvets tardifs ont été prélevés. Partant du fait que les poussins restaient très longtemps au nid, c'est-à-dire 91 jours en moyenne (Courbin et al., 2018), les duvets seraient formés durant la croissance du poussin. Ils reflèteraient donc une contamination locale. Une comparaison avec un échantillon représentatif de plumes pourrait confirmer ou infirmer cette assertion.

3-6. Comparaisons interspécifiques

3-6.1. Goélands Lilleau des Niges (Île de Ré)

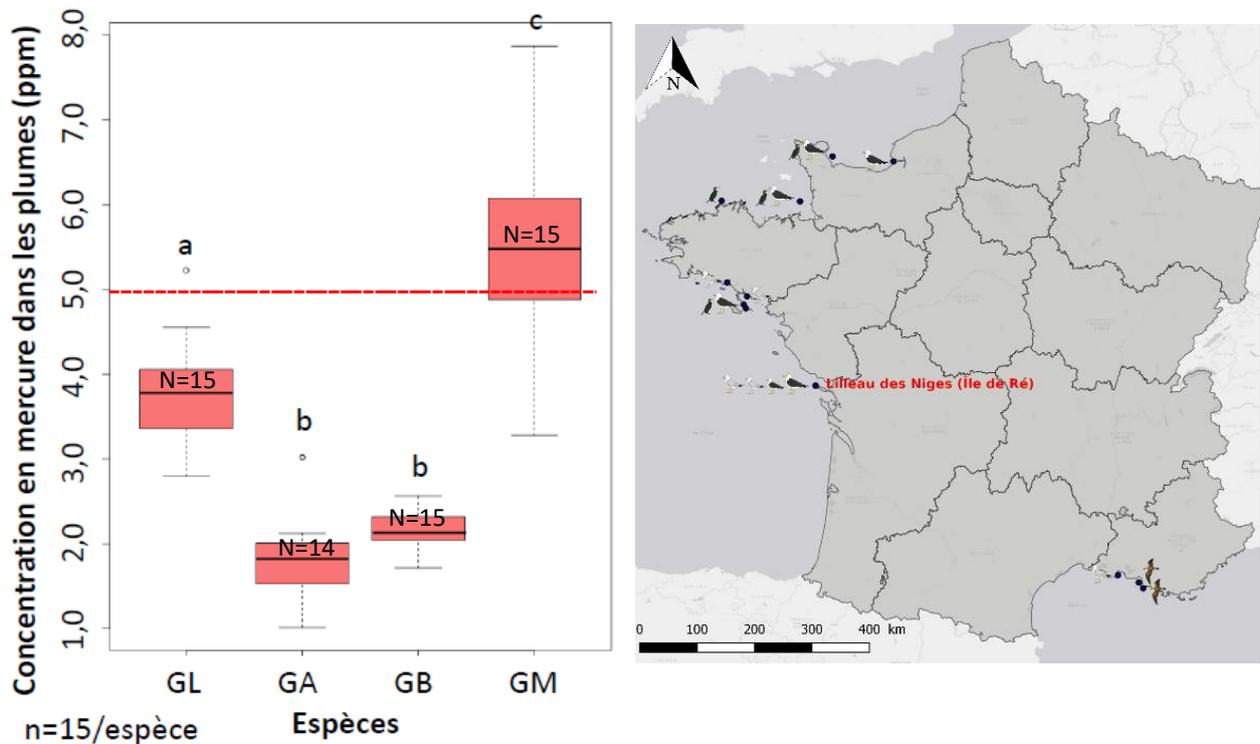


Figure 15 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg dans les plumes de poussin de goéland leucophée (*Larus michahellis*, GL), goéland argenté (*Larus argentatus*, GA), goéland brun (*Larus fuscus*, GB), goéland marin (*Larus marinus*, GM) sur la réserve naturelle nationale de Lilleau des Niges (île de Ré).

Afin d'illustrer les différences d'exposition des espèces, la réserve de Lilleau des Niges sur l'île de Ré est idéale (site de nidification des quatre espèces de goélands suivies).

Le goéland argenté et le goéland brun (groupe b) sont les moins exposés au Hg (Figure 15). Il n'y a pas de différence significative entre ces deux espèces en termes de contamination des plumes au Hg. Le goéland leucophée présente un niveau de contamination intermédiaire entre les goélands argenté et brun, et le goéland marin. Ce dernier est le plus exposé au Hg. Comme en Figure 11, les variances des échantillons de goélands marins sont très importantes, plus que celles des autres espèces de goélands pour un même nombre d'échantillons. Ce résultat suggère que les parents de goélands marins nourrissent leurs poussins avec un régime plus varié que les autres espèces.

La limite de 5 ppm dans les plumes, connue dans la bibliographie comme une valeur seuil d'apparition des effets néfastes sur l'oiseau, est franchie pour neuf goélands marins et pour un individu de goéland leucophée. La moyenne de concentration en Hg est de $5,51 \pm 1,17$ ppm pour les goélands marins sur la réserve de Lilleau des Niges, au-dessus de la limite des 5 ppm.

3-6.2. Cormoran huppé et goéland marin

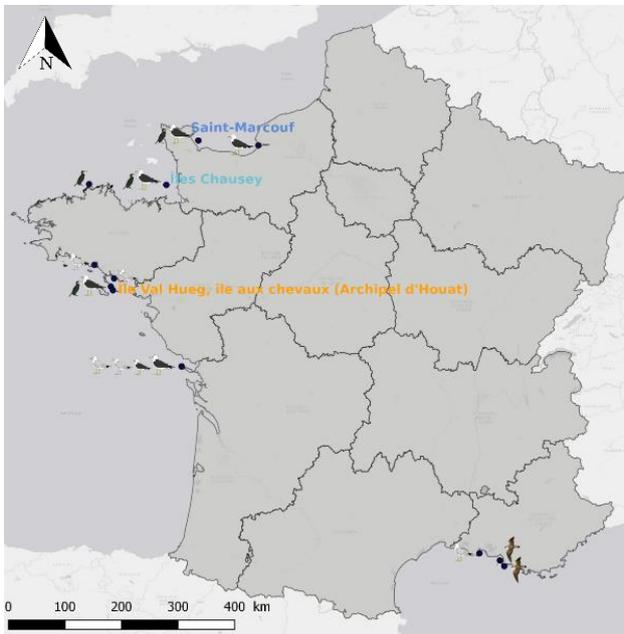
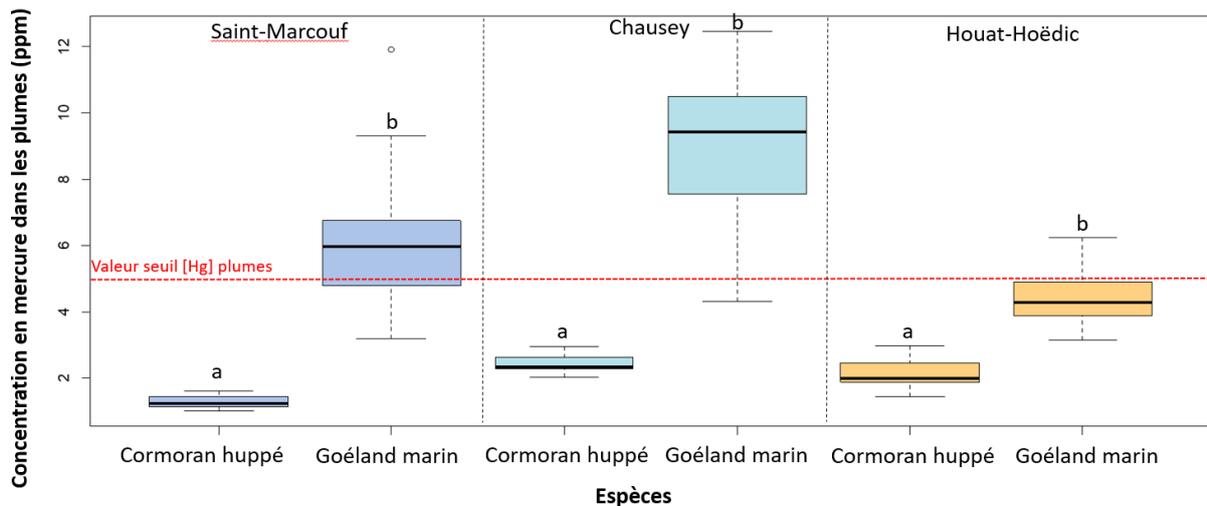


Figure 16 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg dans les plumes de poussin de cormoran huppé (*Phalacrocorax aristotelis*) et de goéland marin (*Larus marinus*).

Sur trois stations du littoral, des cormorans huppés et des goélands marins ont été échantillonnés sur des colonies proches. Le goéland marin est toujours plus exposé au Hg que le cormoran huppé (Figure 16). Cette exposition supérieure est due au niveau trophique élevé du goéland marin, qui figure même parmi les prédateurs du cormoran huppé (obs. pers.). Le niveau trophique du goéland marin, en relation avec les niveaux de Hg, est illustré en Figure 17.

3-7. Isotopes stables du carbone (C) et de l'azote (N)

Afin de corréler les concentrations en Hg dans les plumes au régime alimentaire et au niveau trophique, les isotopes stables du carbone et de l'azote ont respectivement été dosés. L'augmentation du ratio C^{13}/C^{12} ($\delta^{13}C$) indique une prépondérance de **l'alimentation sur des ressources marines** (Roscales et al. 2016). Un ratio N^{15}/N^{14} ($\delta^{15}N$) élevé indique que l'organisme a un **statut trophique élevé** (Thompson et al. 1998).

3-7.1. Goéland marin

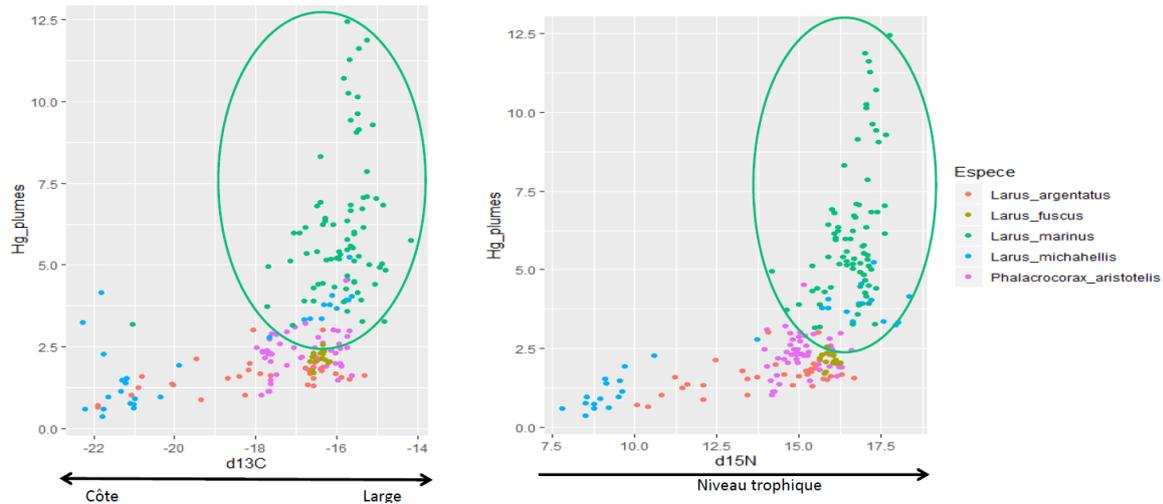


Figure 17 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les plumes de poussin de 5 espèces d'oiseaux marins sur toutes les stations suivies. Focus sur le goéland marin (*Larus marinus*).

Le goéland marin est l'espèce au niveau trophique le plus élevé. Il se nourrit aussi de manière prononcée sur des ressources marines (Figure 17). Le Hg étant bioamplifiable (Wiener et al. 2002), le niveau de contamination augmente à chaque niveau trophique. Le Hg rentre dans les chaînes trophiques sous la forme méthyl-mercure meHg (Ochoa-Acuña et al., 2002). Les niveaux de meHg sont particulièrement élevés en milieu marin, qui présente un nombre plus élevé de niveaux trophiques que le milieu terrestre. La position trophique et la consommation de ressources marines expliquent les niveaux élevés de Hg chez le goéland marin.

Le goéland marin a un régime très diversifié, qui de plus est susceptible de changer au cours du temps (Farmer et Leonard 2011). Les individus peuvent également être spécialistes d'un type de ressource ou d'un milieu en particulier (Maynard et Ronconi 2018). Ils sont très opportunistes, capables de se nourrir sur des ressources marines variées, notamment sur les rejets des pêcheries, mais aussi sur des déchets, ou en prédatant d'autres espèces d'oiseaux marins (Götmark, 1984; Steenweg et al., 2011; Rome et Ellis, 2004).

3-7.2. Goéland argenté

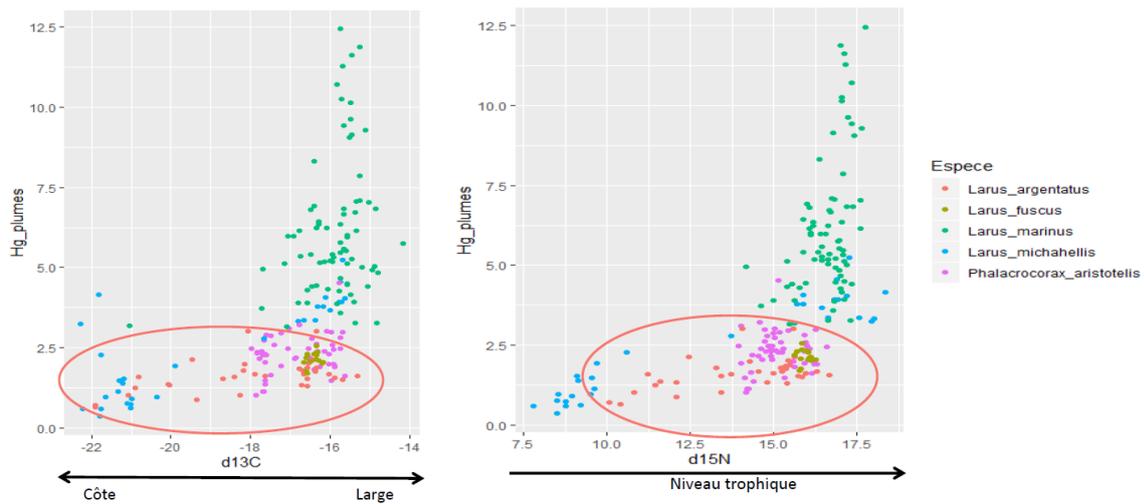


Figure 18 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les plumes de poussin de 5 espèces d'oiseaux marins sur toutes les stations suivies. Focus sur le goéland argenté (*Larus argentatus*).

Les goélands argentés semblent adopter des comportements variés (Figure 18). Ils ne présentent pas de stratégie très définie d'alimentation. En effet, ils peuvent s'alimenter à différents niveaux trophiques et aussi bien en milieu marin que terrestre. Le goéland argenté, comme les autres grands goélands, est une espèce au régime alimentaire opportuniste (Burgess et al. 2013; Steenweg et al., 2011). La dispersion des valeurs isotopiques peut être expliquée par des stratégies alimentaires individuelles différentes et très marquées.

2-7.3. Cormoran huppé

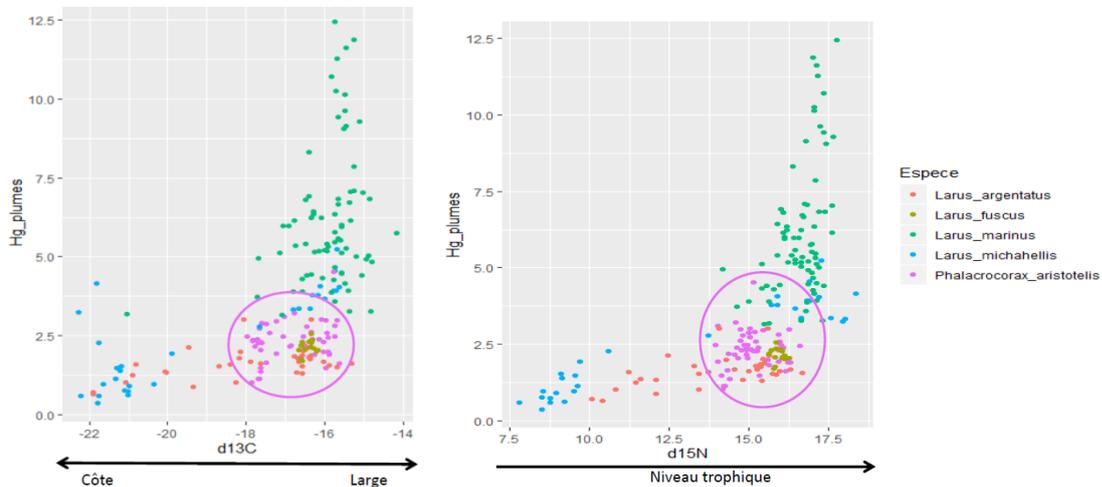


Figure 19 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les plumes de poussin de 5 espèces d'oiseaux marins. Focus sur le cormoran huppé (*Phalacrocorax aristotelis*).

Les cormorans huppés ont en revanche une stratégie alimentaire spécialisée. Les valeurs isotopiques sont peu étalées, montrant un modèle clair. D'un niveau trophique assez élevé, ils consomment des proies benthiques d'origine marine (Figure 19). Le régime alimentaire du cormoran huppé étant strictement piscivore (Gremillet et al. 1998; Harris et Wanless 1993; Morat et al. 2014; Xirouchakis et al. 2017), les valeurs isotopiques peu dispersées sont cohérentes.

La différence d'exposition entre le goéland marin et le cormoran huppé (Figure 16) peut être expliquée par une différence de niveau trophique. Le ratio $\delta^{15}\text{N}$ augmente avec le niveau trophique (Kelly 2000). Le cormoran huppé est donc d'un niveau trophique plus bas que le goéland marin. Le méthylmercure, forme du mercure principalement présente dans les organismes (Wiener et al. 2002), est bioamplifiable, ce qui signifie qu'elle augmente à chaque niveau trophique (Morel et al., 1998).

3-7.4. Goéland leucophée

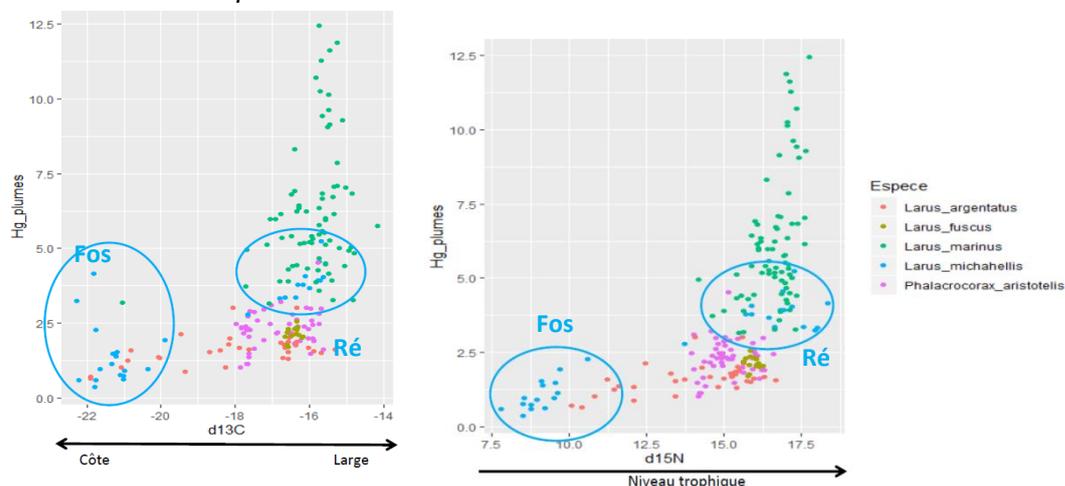


Figure 20 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM , étude pilote 2019- Concentrations en Hg et isotopes stables du carbone et de l'azote dans les plumes de poussin de 5 espèces d'oiseaux marins. Focus sur le goéland leucophée (*Larus michahellis*).

Sur la Figure 20 apparaissent deux groupes différents. Les goélands leucophées de l'île de Ré ont une alimentation d'un plus haut niveau trophique que ceux du golfe de Fos. La source alimentaire est également plus marine. Cette constatation pourrait expliquer la forte différence de contamination au Hg observée dans les plumes (Figure 5).

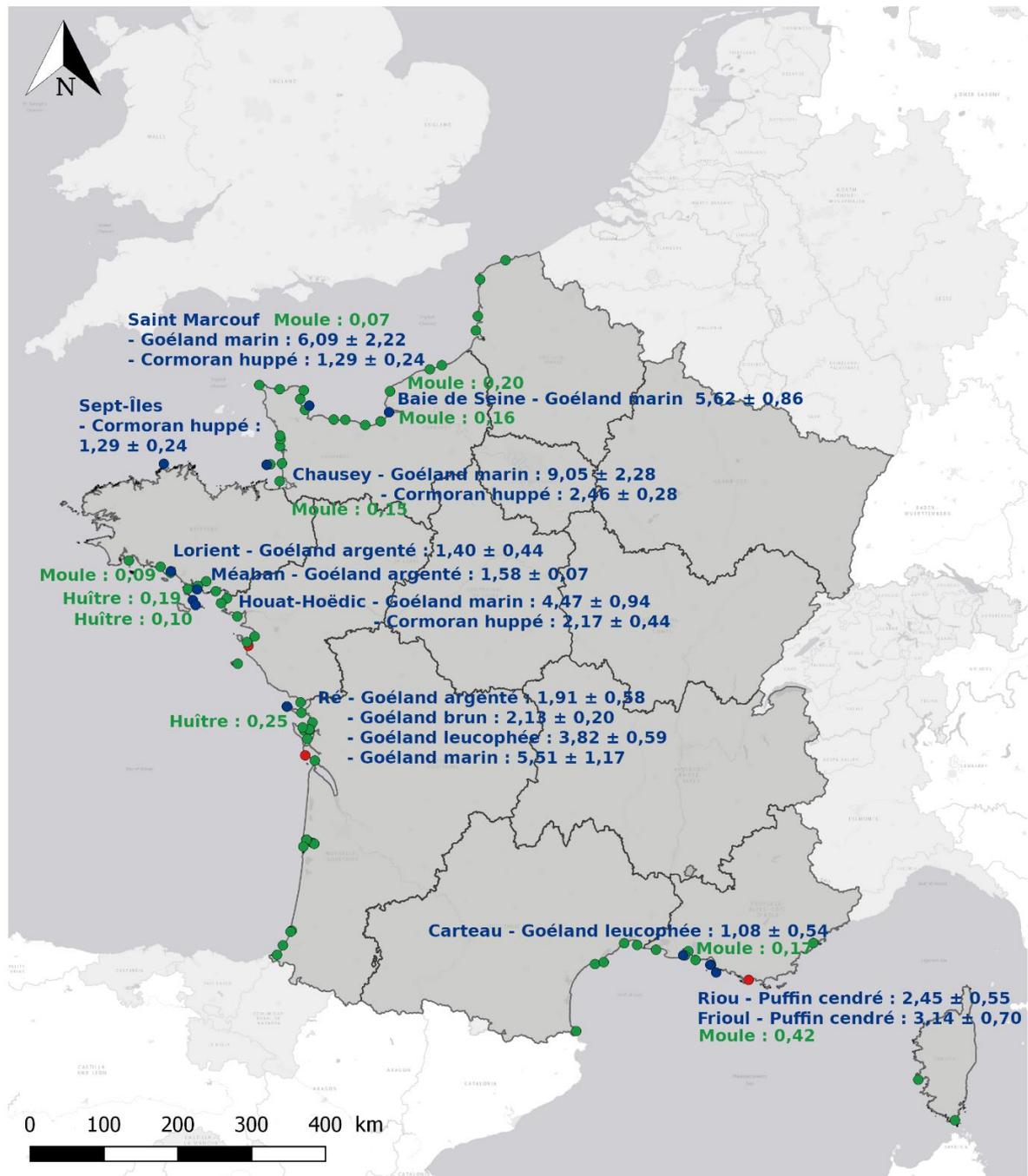
Le régime alimentaire du goéland leucophée est très varié, comprenant des ordures ménagères, des espèces marines et terrestres, et une spécialisation d'individus sur des décharges (Roscales et al. 2016; Ceia et al. 2014; Duhem et al. 2005; Ramos et al. 2009). Les individus de l'île de Ré peuvent être plus spécialisés sur des rejets de pêcheries, alors que ceux du golfe de Fos privilégient peut-être une alimentation plus terrestre.

3-7.5. Implications pour le suivi

Les données de Hg et d'isotopes stables de carbone et d'azote montrent que l'exposition au Hg dépend des ressources alimentaires utilisées par les individus. Afin de mettre en évidence les différences géographiques, il convient de prendre en compte les **guildes trophiques**. En 2019, le cormoran huppé était le représentant des piscivores côtiers, les quatre espèces de goélands constituaient le groupe des généralistes côtiers, et le puffin de Scopoli montrait des résultats pour un piscivore hauturier. Afin de renforcer les analyses, des résultats sur d'autres espèces (sternes caugek et pierregarin pour les piscivores côtiers, mouette tridactyle et fou de Bassan pour les piscivores hauturiers) sont nécessaires. Le suivi d'autres contaminants amènera de plus amples informations sur la contamination des milieux et des oiseaux marins qui y vivent, notamment des contaminants d'origine anthropique issus des bassins-versants. Le suivi des isotopes reste indispensable pour documenter et expliquer en partie les différences observées de contamination. On note cependant qu'on peut observer des décalages entre résultats isotopiques et concentrations en Hg, montrant de réelles variations géographiques des

niveaux de Hg. Une modélisation, prenant en compte le Hg mais aussi d'autres polluants, sur toutes les espèces et sur le maximum de sites possibles (afin d'acquérir la robustesse statistique nécessaire) pourrait être envisagée. Elle pourrait permettre de connaître la part expliquée par le régime alimentaire et celle expliquée par les différences entre sites dans la contamination des oiseaux marins.

4- Comparaison avec réseau existant (ROCCH Bivalves)



Légende

Points de suivi ROCCH bivalves

- < 0.5 ppm
- > 0.5 ppm
- Prélèvements oiseaux marins 2019

Figure 21 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Concentrations en Hg dans les plumes de poussin de 5 espèces d'oiseaux marins et comparaison avec le suivi ROCCH bivalves.

Afin de mettre en relation les différents suivis de la contamination au titre de la DCSMM, les résultats de l'étude pilote ont été comparés à ceux du suivi ROCCH dans les bivalves (Figure 21). Les concentrations en Hg chez les bivalves en 2019 ont été extraites de la base de données Quadrige², aux alentours des stations où des oiseaux ont été échantillonnés.

Aucun point de mesure du ROCCH bivalves ne dépasse les indicateurs DCSMM (0,5 ppm de Hg) aux alentours des stations échantillonnées.

Les fortes différences observées entre les valeurs dans les bivalves et dans les oiseaux marins illustrent le phénomène de bioamplification. Les oiseaux, d'un niveau trophique élevé, présentent une exposition nettement plus forte au Hg. Ils sont plus sensibles pour détecter le Hg et ses variations (Furness et Camphuysen, 1997; Thompson et al., 1998), et fournissent une valeur intégrée de la contamination (Becker 2003).

Pour le Hg, il est difficile de comparer directement les valeurs de contamination chez les bivalves (organismes filtreurs et sessiles) par rapport à celles des oiseaux marins. Les informations apportées par le suivi des oiseaux permettent de comprendre le devenir des contaminants dans les chaînes trophiques. Les suivis sont donc **complémentaires**, et les oiseaux marins sont des **bioindicateurs** pertinents pour renseigner sur l'atteinte de BEE.

5- Synthèse des résultats

L'étude pilote a permis de démontrer la faisabilité du suivi. Les prélèvements ont été réalisés sur de nombreuses stations, beaucoup d'acteurs ont manifesté leur volonté de s'intégrer au suivi, des formations à l'Utilisation d'Animaux à Fins Scientifiques sur Faune Sauvage Non Hébergée ont été suivies. Les retours sur l'étude pilote lors de communications orales ont été positifs, et ont permis de donner de la visibilité au réseau.

En 2019, **418 échantillons** ont été prélevés et analysés le long du littoral français, sur plusieurs matrices:

- 231 échantillons de plumes
- 68 échantillons de sang
- 75 échantillons d'œufs frais
- 44 échantillons de duvets

Ces échantillons ont été prélevés sur **6 espèces** : goélands argenté, marin, brun et leucophée, cormoran huppé, et puffin cendré.

Un total de **18 stations** ont été suivies, le long du littoral français.

8 programmes personnels de baguage et 3 programmes de recherche ont accepté de collaborer et de mutualiser des échantillons.

Des analyses des concentrations en **mercure** et des **ratios isotopiques de l'azote et du carbone** ont été réalisées à l'Université de La Rochelle. Les résultats de ces analyses ont permis de mettre en lumière des différences géographiques en termes de contamination au Hg.

Analyses des plumes :

Les **plumes** représentent la contamination de l'oiseau au moment où les plumes poussent. Afin de refléter une contamination locale, des plumes de poussin avant envol ont été prélevées (représentant les polluants accumulés durant la croissance).

L'espèce la plus contaminée est le goéland marin, avec une forte variance interindividuelle des concentrations pour un même site. Les isotopes expliquent cette forte contamination au Hg, en nous indiquant que le goéland marin est à un niveau trophique élevé, et se nourrit sur des proies d'origine marine. Les goélands marins sont classés ci-dessous par ordre décroissant de valeur moyenne de contamination au Hg :

Îles Chausey ($9,05 \pm 2,28$ ppm) > Saint-Marcouf ($6,09 \pm 2,22$ ppm), Baie de Seine ($5,62 \pm 0,86$ ppm), Île de Ré ($5,51 \pm 1,17$ ppm) > Archipel d'Houat-Hoëdic ($4,47 \pm 0,94$ ppm).

Les goélands marins dépassent pour la majorité le seuil connu de toxicité du Hg dans les plumes (5 ppm). Ils sont potentiellement impactés par le Hg.

Le cormoran huppé, de par son régime alimentaire spécialiste (confirmé par les analyses isotopiques), présente une variance des concentrations en Hg faible. Son niveau trophique élevé et son alimentation marine l'exposent à une contamination importante au mercure. Ci-dessous figurent dans l'ordre décroissant de contamination au Hg les résultats (moyennes) pour le cormoran huppé :

Sept-îles ($2,67 \pm 0,65$ ppm), Îles Chausey ($2,46 \pm 0,28$ ppm) > Saint-Marcouf ($1,29 \pm 0,24$ ppm). Les cormorans de l'Archipel d'Houat-Hoëdic ($2,17 \pm 0,44$ ppm) présentent une valeur intermédiaire entre ces deux ensembles, non significativement différente ni du groupe Sept-îles - Îles Chausey, ni de Saint-Marcouf.

Les valeurs de Hg sont inférieures à la valeur seuil d'apparition des effets néfastes chez les oiseaux marins chez le cormoran huppé.

Le goéland argenté et le goéland leucophée semblent avoir des régimes alimentaires diversifiés au vu des valeurs isotopiques étalées. La différence est très visible entre stations comme pour les leucophées de l'île de Ré qui consomment des ressources plus marines et d'un niveau trophique plus élevé que ceux du Golfe de Fos. Cette différence de régime peut expliquer la différence de contamination entre les deux stations : Île de Ré ($3,82 \pm 0,59$ ppm) > Golfe de Fos ($1,08 \pm 0,54$ ppm). En revanche on ne remarque pas de différence significative de contamination au Hg entre les stations pour le goéland argenté, et les valeurs isotopiques sont dispersées. Les moyennes des concentrations pour les goélands argentés sont les suivantes : Île de Ré ($1,91 \pm 0,58$ ppm), Méaban ($1,59 \pm 0,07$ ppm), Lorient ($1,40 \pm 0,54$ ppm).

Un seul individu de goéland leucophée dépasse la valeur seuil de toxicité de 5 ppm. Aucun goéland argenté ne dépasse cette valeur.

Les valeurs de Hg pour les plumes de goéland brun sont laissées de côté pour le moment, car aucune station n'a été échantillonnée en dehors de l'île de Ré afin de comparer.

Analyse des duvets :

Les duvets de puffin cendrés montrent une différence significative en terme de contamination au Hg entre Riou et Frioul dans les Calanques de Marseille. Cette différence est marquée également pour les isotopes stables de l'azote, les poussins de Frioul étant alimentés avec des proies de niveau trophique plus élevé que ceux de Riou.

Analyses des œufs frais :

Ces résultats concernent uniquement les goélands leucophées du pourtour méditerranéen.

Les œufs représentent une voie d'excrétion du Hg par les femelles. Les concentrations retrouvées dans les œufs frais représentent donc une approche de la contamination des parents. Les goélands étant majoritairement considérés comme « income breeders », l'énergie allouée à la production d'œufs provient des ressources alimentaires utilisées peu avant la ponte. La contamination reflétée par les œufs est donc assez locale.

On observe des différences significatives entre sites, et trois ensembles se dessinent. Du plus au moins exposé, les œufs se classent de cette manière :

Palavas ($2,71 \pm 1,77$ ppm) > Corrège ($1,67 \pm 0,83$ ppm), Carteau ($1,60 \pm 1,44$ ppm), Riou ($0,68 \pm 0,33$ ppm) > Gruissan ($0,68 \pm 0,37$ ppm), Sidrière ($0,63 \pm 0,33$ ppm), Frioul ($0,49 \pm 0,26$ ppm).

Les concentrations en Hg dans les œufs de goélands leucophées de Corrège, Palavas, Carteau et Riou pourraient présenter des risques (diminution du succès d'éclosion).

Comparaison inter-matrices :

Sur l'îlot de Carteau dans le Golfe de Fos, différentes matrices ont été prélevées sur des goélands leucophées. Le gradient de mercure observé est le suivant : sang < plume < duvet, œuf

Un graphique de synthèse des résultats de la contamination par masse d'eau pour les plumes (échantillons les plus largement collectés au niveau national) permet de mettre en relief les différences d'intégration du Hg en fonction des espèces (Figure 22). Les concentrations en Hg dans les duvets de puffin de Scopoli ont été ajoutées pour montrer des données sur un piscivore hauturier, bien que des données sur les plumes seraient préférables afin de pouvoir comparer les niveaux entre espèces.

Il est important de noter que si les valeurs de contamination sont inférieures à la valeur seuil d'apparition des effets néfastes, ces données sont issues d'échantillons de poussins. Or les niveaux de contamination des poussins sont inférieurs à ceux des adultes. Il peut donc exister des **risques** pour les populations **même si certaines concentrations sont inférieures à la valeur seuil**.

Un suivi à long terme permettra de mettre en évidence les tendances des contaminants dans les milieux. Un nombre important de contaminants doit être suivi afin de détecter des hausses, stagnations ou baisses des différents polluants.

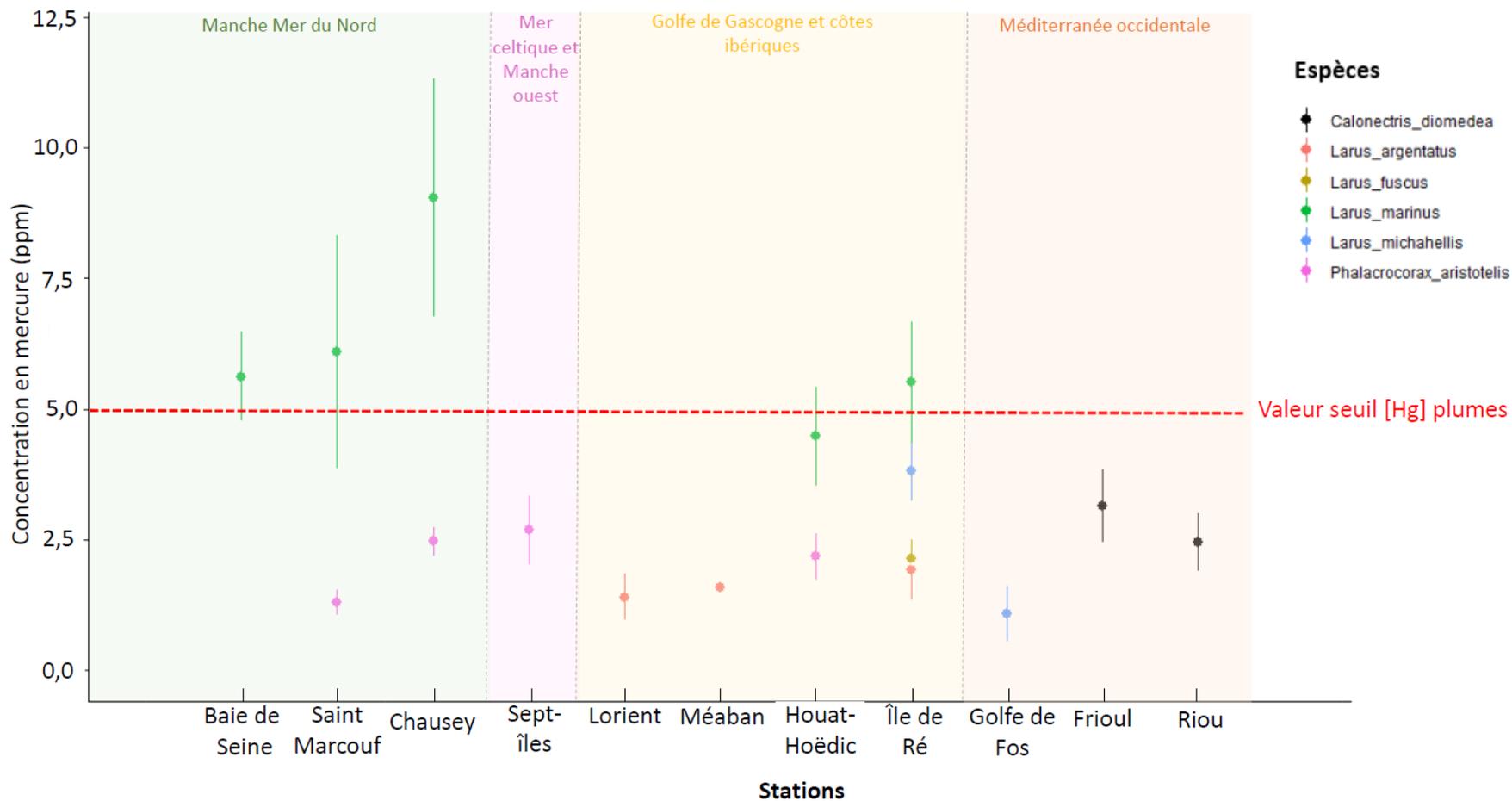


Figure 22 : Suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM, étude pilote 2019 - Synthèse des concentrations en Hg dans les plumes de 5 espèces d'oiseaux marins le long du littoral français. Les stations sont les suivantes : îlot du Ratier en Baie de Seine, Île de Terre à Saint-Marcouf, différents îlots aux îles Chausey, l'île Bono dans l'archipel des Sept-Îles, la base de sous-marins de Lorient, l'île de Méaban à la sortie du Golfe du Morbihan, l'île aux chevaux et l'île de Valuec dans l'archipel d'Houat-Hoëdic, Lilleau des Niges dans le Fier d'Arz sur l'île de Ré, l'îlot de Carteau dans le Golfe de Fos, les îles du Frioul et de Riou dans les Calanques de Marseille.

Le suivi de la contamination des oiseaux marins en 2019 a permis de montrer que quelle que soit l'espèce, les niveaux de mercure étaient très supérieurs à ceux notés dans les bivalves suivis dans le cadre du ROCCH. Le suivi des oiseaux marins au titre de la DCSMM permet donc d'avoir des informations sur la contamination de prédateurs supérieurs, sujets au phénomène de bioamplification. Ce suivi est très complémentaires aux suivis bivalves et poissons, en intégrant le haut de la chaîne trophique.

Les forts niveaux de contaminations posent la question des effets sur les individus et les populations. Le suivi de marqueurs génotoxiques dans le sang des oiseaux marins permettra de détecter des anomalies pouvant être causées par des niveaux élevés de contaminants.

5- Perspectives

Au vu des résultats intéressants obtenus en 2019, la volonté est de mettre en place un suivi à long terme, permettant de renseigner des indicateurs D8 oiseaux marins pour la DCSMM. Un travail sera à réaliser sur la construction de ces indicateurs : un indicateur D8C1 sur les niveaux de contamination, et un indicateur D8C2 sur les effets de la contamination. Le premier permettra d'intégrer les mesures de polluants métalliques et organiques réalisées, et le second se basera sur des analyses de biomarqueurs. Ces indicateurs seront agrégés à l'échelle des SRM.

L'étude pilote 2019 s'est basée sur un nombre restreint de stations, car la volonté était de tester la faisabilité de la mise en œuvre du dispositif en s'appuyant sur des programmes existants. Dans sa nouvelle phase de déploiement opérationnel, il est proposé d'étendre la liste des colonies suivies et le nombre d'espèces. Après prises de contacts, de nombreux gestionnaires, naturalistes et acteurs de terrain ont accepté de participer afin de s'intégrer au réseau de suivi de la contamination. Le **nombre de stations a donc considérablement augmenté** (Figure 23).

Le suivi temporel est capital, la fréquence temporelle d'échantillonnage doit prendre en compte la variabilité interannuelle. Afin de concilier un échantillonnage maximal avec les problématiques budgétaires, il a été décidé de réaliser un suivi tous les trois ans. Cette manière de procéder permet d'avoir deux années de données pour chaque rapportage DCSMM (tous les 6 ans). Afin de permettre un échantillonnage géographique maximal, les stations n'ayant pas pu être échantillonnées la première année pour des raisons techniques pourront l'être l'année suivante. Pour le prochain cycle, l'échantillonnage devra donc être réalisé en 2020 (+2021) et 2023 (+2024).



Légende

- Sites d'échantillonnage prévus pour le suivi 2020

Figure 23 : Réseau de suivi de la contamination des oiseaux marins au titre de la DCSMM - Sites proposés pour le suivi 2020

La liste des contaminants suivis sera également étendue. 14 **éléments traces métalliques** seront suivis : Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, V et Zn.

Des **Polluants Organiques Persistants (POPs)** seront ajoutés :

- DDTs et ses métabolites
- PCBs (congénères CB-28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)
- PBDEs (congénères BDE-28, 47, 99, 100, 153, 154, 183 et 209)
- PFAS (PFOA, PFHxS, PFNA, PFHpS, PFDA, L-PFOS, Br-PFOS, PFUnA, PFDS, PFTTrDA, PFTeDA, FOSA).

Des échantillons de **sang**, de **plumes** (goélands argenté, brun, leucopnée, marin, cormoran huppé, fou de Bassan, puffin de Scopoli, mouette tridactyle), d'**œufs** (goéland leucopnée) et de **cadavres** (sternes caugek et pierregarin, mouette tridactyle) seront prélevés.

4-1. Liste des partenaires

Littoral ENvironnement et Sociétés (LIENSs) - UMR 7266

La Rochelle Université, Bâtiment ILE

2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle



Office Français de la Biodiversité

16 quai de la douane, CS 42932, 29229 Brest cedex 02



Ifremer Centre de Nantes

Rue de l'île d'Yeu, B.P. 21 105, 44 311 Nantes Cedex 03



Groupe ornithologique et naturaliste du Nord - Pas-de-Calais (GON)

5 rue Jules de Vicq - 59000 Lille



Parc naturel marin des estuaires picards et de la mer d'Opale

Chemin de la Warenne, Ecault, 62360 Saint-Etienne-au-Mont



Syndicat Mixte Baie de Somme Grand littoral Picard

1 place de l'Amiral Courbet, CS 50728, 80100 Abbeville



Maison de l'Estuaire

Réserve naturelle de l'estuaire de la Seine

20 rue Jean Currey, 76600 Le Havre



Groupe Ornithologique Normand (GONm)



181 rue d'Auge, 14000 Caen Cedex

Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) Île Grande

Station Ornithologique de l'Île Grande, 22560 Pleumeur Bodou



AGIR pour la
BIODIVERSITÉ



Réserve Naturelle
SEPT-ÎLES

Parc naturel marin d'Iroise

Pointe des Renards, 29 217 Le Conquet



Parc Naturel Régional d'Armorique

Maison du Parc, 15, place aux foires - BP 27, 29 590 Le Faou



Bretagne Vivante

19 rue de Gouesnou - BP 62132, 29221 Brest Cedex 2



Parc Naturel Régional du Golfe du Morbihan

8 boulevard des îles CS 50213, 56006 Vannes Cedex



Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) Vendée

La Brétinière, 85000 - La Roche-sur-Yon



AGIR pour la
BIODIVERSITÉ

Communauté de communes de Noirmoutier

Réserve du Polder de Sébastopol

Rue du polder, 85630 Barbâtre



Réserve Naturelle
POLDER DE SÉBASTOPOL

Centre d'Études Biologiques de Chizé (CEBC) - UMR 7372

405 Route de Prissé la Charrière, 79360 Villiers-en-Bois



Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) Charente Maritime

21 rue Vaugouin, 17000 La Rochelle



AGIR pour la
BIODIVERSITÉ



**Fédération des Sociétés pour l'Étude, la Protection et
l'Aménagement de la Nature dans le Sud-Ouest (SEPANSO)**

1 rue de Tausia, 33800 Bordeaux



Centre de la mer Biarritz

Plateau de l'Atalaye, 64200 Biarritz



Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE) - UMR 5175

1919 route de Mende, 34293 Montpellier



CENTRE D'ÉCOLOGIE
FONCTIONNELLE
& ÉVOLUTIVE



**Observatoire des Sciences de l'Univers Observatoire
de REcherche Méditerranéen de l'Environnement (OSU OREME)**

Université de Sciences et Techniques Montpellier

Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier



Conservatoire d'espaces naturels du Languedoc-Roussillon

Immeuble le Thèbes, 26 Allée de Mycènes, 34000 Montpellier



Sète Agglo pôle Méditerranée

4, avenue d'Aigues, BP 600, 34110 Frontignan



ARCHIPEL DE THAU

Agglomération du Pays de l'Or

Zone Aéroportuaire,

300 Avenue Jacqueline Auriol – CS70040, 34137 Mauguio Cedex



Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

Délégation régionale Occitanie

911, avenue Agropolis, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5



Tour du Valat

Le Sambuc, 13200 Arles



Parc national des Calanques

141 avenue du Prado, Bâtiment A, 13008 Marseille



Toulon Provence Méditerranée

Hôtel de la Métropole

107 Boulevard Henri Fabre - CS 30536, 83041 Toulon Cedex 09



Parc national de Port-Cros

181 Allée du Castel Sainte Claire, BP 70220, 83406, Hyères cedex



Office de l'Environnement de la Corse

Uffiziu di l'Ambiente di a Corsica

14, Avenue Jean Nicoli, 20250 Corte



Centre de Recherche sur la Biologie des

Populations d'Oiseaux (CRBPO)

Museum National D'histoire Naturelle

43 rue Buffon - Bâtiment 135, CP 135, 75005 Paris



Bibliographie

- Ackerman, Joshua T., and Collin A. Eagles-Smith. 2009. "Integrating Toxicity Risk in Bird Eggs and Chicks : Using Chick Down Feathers To Estimate Mercury Concentrations in Eggs." *Environmental Science and Technology* 43 (6) : 2166–72.
- Ackerman, Joshua T., Collin A. Eagles-Smith, Mark P. Herzog, and C. Alex Hartman. 2016. "Maternal Transfer of Contaminants in Birds : Mercury and Selenium Concentrations in Parents and Their Eggs." *Environmental Pollution* 210 : 145–54. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.016>.
- Becker, Peter H. 2003. "Biomonitoring with Birds." In *Bioindicators and Biomonitors*, edited by B.A. Markert, A.M. Breure, and H.G. Zechmeister, Elsevier S, 677–736.
- Blévin, Pierre, Alice Carravieri, Audrey Jaeger, Olivier Chastel, Paco Bustamante, and Yves Cherel. 2013. "Wide Range of Mercury Contamination in Chicks of Southern Ocean Seabirds." *PLoS ONE* 8 (1) : 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054508>.
- Bogdal, C, E Abad, M Abalos, B Van Bavel, J Hagbe, M Sche, and H Fiedler. 2013. "Worldwide Distribution of Persistent Organic Pollutants in Air , Including Results of Air Monitoring by Passive Air Sampling in Five Continents." *Trends in Analytical Chemistry* 46. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.05.011>.
- Bond, Alexander L. 2010. "Relationships between Stable Isotopes and Metal Contaminants in Feathers Are Spurious and Biologically Uninformative." *Environmental Pollution* 158 (5) : 1182–84. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.01.004>.
- Borghesi, Fabrizio, Francesca Migani, Alessandro Andreotti, Nicola Baccetti, Nicola Bianchi, Manfred Birke, and Enrico Dinelli. 2016. "Metals and Trace Elements in Feathers : A Geochemical Approach to Avoid Misinterpretation of Analytical Responses." *Science of the Total Environment, The* 544 : 476–94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.115>.
- Braune, Birgit M, and David E Gaskin. 1987. "Mercury Levels in Bonaparte ' s Gulls (Larus Philadelphia) During Autumn Molt in the Quoddy Region , New Brunswick , Canada" 549 : 539–49.
- Burger, J., and M. Gochfeld. 1997. "Age Differences in Metals in the Blood of Herring (Larus Argentatus) and Franklin's (Larus Pipixcan) Gulls." *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 33 : 436–40. <https://doi.org/10.1007/s002449900274>.
- Burger, Joanna, and Michael Gochfeld. 1991. "Cadmium and Lead in Common Terns (Aves : Sterna Hirundo) : Relationship between Levels in Parents and Eggs." *Environmental Monitoring and Assessment* 16 : 253–58. <https://doi.org/10.1007/BF00397612>.
- Burger, J., and M. Gochfeld 2000. "Metal Levels in Feathers of 12 Species of Seabirds from Midway Atoll in the Northern Pacific Ocean." *The Science of the Total Environment* 257 : 37–52.
- Burger, J., and M. Gochfeld. 2004. "Marine Birds as Sentinels of Environmental Pollution." *EcoHealth* 1 : 263–74. <https://doi.org/10.1007/s10393-004-0096-4>.
- Burgess, Neil M, Alexander L Bond, Craig E Hebert, Ewa Neugebauer, and Louise Champoux. 2013. "Mercury Trends in Herring Gull (Larus Argentatus) Eggs from Atlantic Canada , 1972 e 2008 : Temporal Change or Dietary Shift ?" *Environmental Pollution* 172 : 216–22. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.09.001>.
- Bustnes, Jan O., Sophie Bourgeon, Eliza H.K. Leat, Ellen Magnúsdóttir, Hallvard Strøm, Sveinn A. Hanssen, Aevor Petersen, et al. 2015. "Multiple Stressors in a Top Predator Seabird : Potential

- Ecological Consequences of Environmental Contaminants, Population Health and Breeding Conditions." *PLoS ONE* 10 (7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131769>.
- Carvalho, Paloma Calábria, Leandro Bugoni, Rona A R McGill, and Adalto Bianchini. 2013. "Metal and Selenium Concentrations in Blood and Feathers of Petrels of the Genus *Procellaria*." *Environmental Toxicology and Chemistry* 32 (7) : 1641–48. <https://doi.org/10.1002/etc.2204>.
- Ceia, Filipe R., Vitor H. Paiva, Vera Fidalgo, Lurdes Morais, Alexandra Baeta, Paulo Crisóstomo, Eduardo Mourato, Stefan Garthe, João C. Marques, and Jaime A. Ramos. 2014. "Annual and Seasonal Consistency in the Feeding Ecology of an Opportunistic Species, the Yellow-Legged Gull *Larus Michahellis*." *Marine Ecology Progress Series* 497 : 273–84. <https://doi.org/10.3354/meps10586>.
- Champoux, Louise, Jean François Rail, Raphael A. Lavoie, and Keith A. Hobson. 2015. "Temporal Trends of Mercury, Organochlorines and PCBs in Northern Gannet (*Morus Bassanus*) Eggs from Bonaventure Island, Gulf of St. Lawrence, 1969-2009." *Environmental Pollution* 197 : 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.10.030>.
- Clatterbuck, Corey A., Rebecca L. Lewison, Nathan G. Dodder, Catherine Zeeman, and Kenneth Schiff. 2018. "Seabirds as Regional Biomonitors of Legacy Toxicants on an Urbanized Coastline." *Science of the Total Environment* 619–620 : 460–69. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.057>.
- Courbin, Nicolas, David Grémillet, and Aurélien Besnard. 2018. "Étude de La Dynamique Des Populations de Puffins de Scopoli et Yelkouan Du Parc National Des Calanques et Du Parc National de Port-Cros." <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28635.87845>.
- Dittmann, Tobias, Peter H. Becker, Joop Bakker, Anders Bignert, Elisabeth Nyberg, M. Glória Pereira, Ursula Pijanowska, et al. 2012a. "Large-Scale Spatial Pollution Patterns around the North Sea Indicated by Coastal Bird Eggs within an EcoQO Programme." *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1070-2>.
- . 2012b. "Large-Scale Spatial Pollution Patterns around the North Sea Indicated by Coastal Bird Eggs within an EcoQO Programme." *Environmental Science and Pollution Research* 19 (9) : 4060–72. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1070-2>.
- Duhem, Celine, Eric Vidal, Philip Roche, and Jerome Legrand. 2005. "How Is the Diet of Yellow-Legged Gull Chicks Influenced by Parents' Accessibility to Landfills?" *Waterbirds* 28 (1) : 46–52.
- Eisler, Ronald. 1987. "Mercury Hazards to Fish, Wildlife, and Invertebrates : A Synoptic Review." *Biological Report* 85 (10) : 1–63.
- Elizalde, Marina Renedo. 2017. "Sources and Fate of Methylmercury in the Southern Ocean : Use of Model Seabirds and Mercury Stable Isotopes."
- Evers, David C, Neil M Burgess, Louise Champoux, Bart Hoskins, Andrew Major, Wing M Goodale, Robert J Taylor, Robert Poppenga, and Theresa Daigle. 2005. "Patterns and Interpretation of Mercury Exposure in Freshwater Avian Communities in Northeastern North America." *Ecotoxicology* 14 : 193–221.
- Farmer, R. G., and M. L. Leonard. 2011. "Long-Term Feeding Ecology of Great Black-Backed Gulls (*Larus Marinus*) in the Northwest Atlantic : 110 Years of Feather Isotope Data." *Canadian Journal of Zoology* 89 : 123–33. <https://doi.org/10.1139/Z10-102>.
- Fournier, François, William H. Karasov, Kevin P. Kenow, Michael W. Meyer, and Randy K. Hines. 2002. "The Oral Bioavailability and Toxicokinetics of Methylmercury in Common Loon (*Gavia Immer*) Chicks." *Comparative Biochemistry and Physiology* 133 : 703–14.

- Furness, R W, and Kees Camphuysen Furness. 1997. "Seabirds as Monitors of the Marine Environment." *ICES Journal of Marine Science – ICES Journal of Marine Science* 54 (54) : 726–37.
- Goodale, M. Wing, David C. Evers, Steven E. Mierzykowski, Alexander L. Bond, Neil M. Burgess, Catherine I. Otorowski, Linda J. Welch, et al. 2008. "Marine Foraging Birds as Bioindicators of Mercury in the Gulf of Maine." *EcoHealth* 5 : 409–25. <https://doi.org/10.1007/s10393-009-0211-7>.
- Götmark, Franck. 1984. "Food and Foraging in Five European Larus Gulls in the Breeding Season : A Comparative Review." *Ornis Fennica* 61 : 9–18.
- Gremillet, D, G Argentin, B Schulte, and B M Culik. 1998. "Flexible Foraging Techniques in Breeding Cormorant *Phalacrocorax Carbo* and Shags *Phalacrocorax Aristoleis* : Benthic or Pelagic Feeding?" *Ibis* 140 : 113–19.
- Harris, M. P., and S. W. Wanless. 1993. "The Diet of Shags *Phalacrocorax Aristotelis* during the Chick-Rearing Period Assessed by Three Methods." *Bird Study* 40 (2) : 135–39. <https://doi.org/10.1080/00063659309477138>.
- Heinz, Gary H., David J. Hoffman, Jon D. Klimstra, and Katherine R. Stebbins. 2010. "PREDICTING MERCURY CONCENTRATIONS IN MALLARD EGGS FROM MERCURY IN THE DIET OR BLOOD OF ADULT FEMALES AND FROM DUCKLING DOWN FEATHERS." *Environmental Toxicology and Chemistry* 29 (2) : 389–92. <https://doi.org/10.1002/etc.50>.
- Huber, Sandra, Nicholas A. Warner, Torgeir Nygård, Mikael Remberger, Mikael Harju, Hilde T. Uggerud, Lennart Kaj, and Linda Hanssen. 2015. "A Broad Cocktail of Environmental Pollutants Found in Eggs of Three Seabird Species from Remote Colonies in Norway." *Environmental Toxicology and Chemistry* 34 (6) : 1296–1308. <https://doi.org/10.1002/etc.2956>.
- Jones, K C, and P De Voogt. 1999. "Persistent Organic Pollutants (POPs) : State of the Science." *Environmental Pollution* 100 : 209–21.
- Jörundsdóttir, Hrönn, Karin Löfstrand, Jörundur Svavarsson, Anders Bignert, and Åke Bergman. 2013. "Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) and Hexabromocyclododecane (HBCD) in Seven Different Marine Bird Species from Iceland." *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.061>.
- Kahle, Silke, and Peter H Becker. 1999. "Bird Blood as Bioindicator for Mercury in the Environment." *Chemosphere* 39 (14) : 2451–57.
- Kelly, Jeffrey F. 2000. "Stable Isotopes of Carbon and Nitrogen in the Study of Avian and Mammalian Trophic Ecology" 27 : 1–27.
- Letcher, Robert J., Jan Ove Bustnes, Rune Dietz, Bjørn M. Jenssen, Even H. Jørgensen, Christian Sonne, Jonathan Verreault, Mathilakath M. Vijayan, and Geir W. Gabrielsen. 2010. "Exposure and Effects Assessment of Persistent Organohalogen Contaminants in Arctic Wildlife and Fish." *Science of the Total Environment* 408 : 2995–3043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.038>.
- Mallory, Mark L., and Birgit M. Braune. 2017. "Do Concentrations in Eggs and Liver Tissue Tell the Same Story of Temporal Trends of Mercury in High Arctic Seabirds?" *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.10.017>.
- Mason, R P, and W F Fitzgerald. 1990. "Alkylmercury Species in the Equatorial Pacific." *Nature* 347 : 457–59.

- Maynard, Laurie D., and Robert A. Ronconi. 2018. "Great Black-Backed Gulls Foraging in Atlantic Canada." *Marine Ornithology* 46 : 27–32.
- Morales, Laura, Maria Generosa Martrat, Jorge Olmos, Jordi Parera, Joana Vicente, Albert Bertolero, Manuela Ábalos, Silvia Lacorte, Francisco Javier Santos, and Esteban Abad. 2012. "Persistent Organic Pollutants in Gull Eggs of Two Species (*Larus Michahellis* and *Larus Audouinii*) from the Ebro Delta Natural Park." *Chemosphere* 88 : 1306–16. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.03.106>.
- Morat, Fabien, Alain Mante, Emilie Drunat, Jennifer Dabat, Patrick Bonhomme, Mireille Harmelin-Vivien, and Yves Letourneur. 2014. "Diet of Mediterranean European Shag, *Phalacrocorax Aristotelis Desmarestii*, in a Northwestern Mediterranean Area : A Competitor for Local Fisheries?" *Scientific Reports of Port-Cros National Park* 28 : 113–32.
- Morel, François M.M., Anne M.L. Kraepiel, and Marc Amyot. 1998. "The Chemical Cycle and Bioaccumulation of Mercury." *Annual Review of Ecology and Systematics* 29 (1) : 543–566.
- Ochoa-Acuña, H., M. S. Sepúlveda, and T. S. Gross. 2002. "Mercury in Feathers from Chilean Birds : Influence of Location, Feeding Strategy, and Taxonomic Affiliation." *Marine Pollution Bulletin* 44 : 340–49. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00280-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00280-6).
- Pereira, M. Glória, Lee A. Walker, Jennifer Best, and Richard F. Shore. 2009. "Long-Term Trends in Mercury and PCB Congener Concentrations in Gannet (*Morus Bassanus*) Eggs in Britain." *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.07.019>.
- Péron, Clara, and David Grémillet. 2014. "Habitats Maritimes Des Puffins de France Métropolitaine : Une Approche Par Balises et Analyses Isotopiques. Rapport Final."
- Pierotti, Raymond, and Cynthia A. Annett. 2012. "Diet Choice in the Herring Gull : Constraints Imposed by Reproductive and Ecological Factors Author (s) : Raymond Pierotti and Cynthia A . Annett Reviewed Work (s) : Published by : Ecological Society of America Stable URL : <Http://Www.Jstor.Org/Stable/1>." *Ecology* 72 (1) : 319–28.
- Poiriez, Gauthier. 2018. "Utilisation Des Oiseaux Marins Pour Évaluer Le Bon Etat Ecologique Des Eaux Françaises Sur La Contamination Du Milieu Marin."
- Ramos, Raül, Francisco Ramírez, and Lluís Jover. 2013. "Trophodynamics of Inorganic Pollutants in a Wide-Range Feeder : The Relevance of Dietary Inputs and Biomagnification in the Yellow-Legged Gull (*Larus Michahellis*)." *Environmental Pollution* 172 : 235–42. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.09.014>.
- Ramos, Raül, Francisco Ramírez, Carolina Sanpera, Lluís Jover, and Xavier Ruiz. 2009. "Diet of Yellow-Legged Gull (*Larus Michahellis*) Chicks along the Spanish Western Mediterranean Coast : The Relevance of Refuse Dumps." *Journal of Ornithology* 150 : 265–72. <https://doi.org/10.1007/s10336-008-0346-2>.
- Rice, Kevin M., Ernest M. Walker, Miaozong Wu, Chris Gillette, and Eric R. Blough. 2014. "Environmental Mercury and Its Toxic Effects." *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 74–83.
- Rome, Michelle S, and Julie C Ellis. 2004. "Foraging Ecology and Interactions between Herring Gulls and Great Black-Backed Gulls in New England." *Waterbirds* 27 (2) : 200–210.
- Roscales, Jose L., Alba Vicente, Juan Muñoz-Arnanz, Laura Morales, Esteban Abad, Jose I. Aguirre, and Begoña Jiménez. 2016. "Influence of Trophic Ecology on the Accumulation of Dioxins and Furans

- (PCDD/Fs), Non-Ortho Polychlorinated Biphenyls (PCBs), and Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Mediterranean Gulls (*Larus Michahellis* and *L. Audouinii*) : A Three-Isotope Approach.” *Environmental Pollution* 212 : 307–15. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.078>.
- Santos, Cátia S.A., Léa Blondel, Alejandro Sotillo, Wendt Müller, Eric W.M. Stienen, Pascal Boeckx, Amadeu M.V.M. Soares, et al. 2017. “Offspring Hg Exposure Relates to Parental Feeding Strategies in a Generalist Bird with Strong Individual Foraging Specialization.” *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.286>.
- Sinkkonen, Seija, and Jaakko Paasivirta. 2000. “Degradation Half-Life Times of PCDDs , PCDFs and PCBs for Environmental Fate Modeling.” *Chemosphere* 40 : 943–49.
- Sosnowska, Anita, Maciej Barycki, Karolina Jagiello, Maciej Haranczyk, Agnieszka Gajewicz, Toru Kawai, Noriyuki Suzuki, and Tomasz Puzyn. 2014. “Predicting Enthalpy of Vaporization for Persistent Organic Pollutants with Quantitative Structure e Property Relationship (QSPR) Incorporating the in Fl Uence of Temperature on Volatility.” *Atmospheric Environment* 87 : 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.036>.
- Steenweg, Rolanda J., Robert A. Ronconi, and Marty L. Leonard. 2011. “Seasonal and Age-Dependent Dietary Partitioning between the Great Black-Backed and Herring Gulls.” *The Condor* 113 (4) : 795–805. <https://doi.org/10.1525/cond.2011.110004>.
- Stephens, Philip A, Ian L Boyd, John M Mcnamara, and Alasdair I Houston. 2009. “Capital Breeding and Income Breeding : Their Meaning, Measurement, and Worth.” *Ecology* 90 (8) : 2057–67.
- Thompson, D. R., S. Bearhop, J. R. Speakman, and R. W. Furness. 1998. “Feathers as a Means of Monitoring Mercury in Seabirds : Insights from Stable Isotope Analysis.” *Environmental Pollution* 101 : 193–200. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00078-5).
- Thompson, David R., Robert W. Furness, and Luis R. Monteiro. 1998. “Seabirds as Biomonitors of Mercury Inputs to Epipelagic and Mesopelagic Marine Food Chains.” *Science of the Total Environment*. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00103-X).
- Wiener, James G., David P. Krabbenhoft, Gary H. Heinz, and Anton M. Scheuhammer. 2002. “Ecotoxicology of Mercury.” In *Handbook of Ecotoxicology*, 409–63.
- Wong, Charles S, Matthew S Ross, Robert J Letcher, Jonathan Verreault, and W Gabrielsen. 2008. “Chiral Organochlorine Contaminants in Glaucous Gull (*Larus Hyperboreus*) Blood and Eggs from the Norwegian Arctic.” *Environmental Science and Technology* 42 : 7181–86.
- Xirouchakis, Stavros M., Panagiotis Kasapidis, Aris Christidis, Giorgos Andreou, Ioannis Kontogeorgos, and Petros Lymberakis. 2017. “Status and Diet of the European Shag (Mediterranean Subspecies) *Phalacrocorax Aristotelis Desmarestii* in the Libyan Sea (South Crete) during the Breeding Season.” *Marine Ornithology* 45 (1) : 1–9.
- Xuereb, Benoit, Iris Barjhoux, and Paco Bustamante. 2019. “Projet Seine-Aval 5 ECOTONES « Effets de La Contamination Sur Les Organismes de l ’ Estuaire de La Seine » Annexes Du Rapport de Recherche.”

Annexes

Sous-Région Marine	Sites	Espèce(s)	Matrice(s)	Nombre d'échantillons	Collaborateur.trice.s
Manche mer du Nord	Îlot du Ratier (Baie de Seine)	Goéland marin	Plumes	15	Gilles Le Guillou (Maison de l'Estuaire) Damien Ono-Dit-Biot (Maison de l'Estuaire)
	Saint-Marcouf	Goéland marin	Plumes	15	Fabrice Gallien (Groupe Ornithologique Normand)
		Cormoran huppé	Plumes	6	Fabrice Gallien (Groupe Ornithologique Normand)
	Îles Chausey	Goéland marin	Plumes	15	Fabrice Gallien (Groupe Ornithologique Normand)
		Cormoran huppé	Plumes	15	Fabrice Gallien (Groupe Ornithologique Normand)
Mer celtique et Manche ouest	Île de Bono (Sept îles)	Cormoran huppé	Plumes	15	Pascal Provost (Ligue pour la Protection des Oiseaux)
Golfe de Gascogne et côtes ibériques	Base de sous-marins (Lorient)	Goéland argenté	Plumes	15	Marine Leicher (Bretagne Vivante)
	Île de Méaban (sortie Golfe du Morbihan)	Goéland argenté	Plumes	4	Marine Leicher (Bretagne Vivante)
	Île Valuec (Archipel d'Houat)	Goéland marin	Plumes	15	Marine Leicher (Bretagne Vivante)
	Île aux chevaux (Archipel d'Houat)	Cormoran huppé	Plumes	15	Marine Leicher (Bretagne Vivante)
	Lilleau des Niges (Île de Ré)	Goéland argenté	Plumes		15
Sang				12	Manrico Sebastiano (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé)

		Goéland brun	Plumes	15	Julien Gernigon (Ligue pour la Protection des Oiseaux) Olivier Chastel (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé) Frédéric Robin (Ligue pour la Protection des Oiseaux) William Jouanneau (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé) Manrico Sebastiano (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé)
			Sang	12	
		Goéland leucophée	Plumes	15	Julien Gernigon (Ligue pour la Protection des Oiseaux) Olivier Chastel (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé) Frédéric Robin (Ligue pour la Protection des Oiseaux) William Jouanneau (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé) Manrico Sebastiano (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé)
			Sang	12	
		Goéland marin	Plumes	15	Julien Gernigon (Ligue pour la Protection des Oiseaux) Olivier Chastel (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé) Frédéric Robin (Ligue pour la Protection des Oiseaux)

			Sang	12	William Jouanneau (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé) Manrico Sebastiano (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé)
Méditerranée occidentale	Pointe de Corrège (Leucate)	Goéland leucophée	Œufs frais	15	Thierry Boulinier (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Jeremy Tornos (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Manon Amiguet (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive)
	Sidrière (Leucate)	Goéland leucophée	Œufs frais	15	Thierry Boulinier (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Jeremy Tornos (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Manon Amiguet (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive)
	Gruissan	Goéland leucophée	Œufs frais	15	Thierry Boulinier (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Jeremy Tornos (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Manon Amiguet (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive)
	Palavas-les-flots	Goéland leucophée	Œufs frais	15	Thierry Boulinier (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Jeremy Tornos (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Manon Amiguet (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive)

	Îlot de Carteau (Golfe de Fos)	Goéland leucophée	Plumes	41	Thomas Blanchon (Tour du Valat) Marion Vittecoq (Tour du Valat) Karen Mc Coy (Institut pour la Recherche et le Développement) Thierry Boulinier (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Jeremy Tornos (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) Manon Amiguet (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive)
			Sang	20	
			Duvets	14	
			Œufs frais	15	
	Île du Frioul (Calanques)	Puffin cendré	Duvets	15	Alain Mante (Parc National des Calanques) Célia Pastorelli (Parc National des Calanques)
	Île de Riou (Calanques)	Puffin cendré	Duvets	15	Alain Mante (Parc National des Calanques) Célia Pastorelli (Parc National des Calanques)