

## PROPOSITION DE SUJET POUR UN CONTRAT DOCTORAL

<p><b>Laboratoire</b> Centre d'Etudes Biologiques de Chizé (CEBC), UMR-CNRS 7372, La Rochelle Université</p>
<p><b>Titre de la thèse</b> <b>Polluant éternels (PFAS), système immunitaire et conséquences populationnelles</b> <i>- Etude chez des oiseaux marins des littoraux Charentais et Arctique -</i></p>
<p><b>Direction de la thèse</b> <i>directeur-trice-s (grade, HDR) et éventuels co-directeur-trice-s</i> <b>Coraline Bichet</b>, Maître de Conférences, équipe Ecophy, La Rochelle Université CEBC – <b>non HDR (ACT obtenue)</b> <b>Olivier Chastel</b>, Directeur de Recherche CNRS, équipe Ecophy, La Rochelle Université CEBC – <b>HDR</b></p>
<p><b>Adéquation scientifique avec les priorités de l'établissement</b></p> <p>En ayant pour objectif de comprendre les <b>effets de contaminants, les PFASs, de plus en plus préoccupants à l'échelle nationale et internationale sur biodiversité littorale</b>, le projet de thèse porte sur <b>un des axes majeurs du LUDI</b> lié à la biodiversité et à la gestion durable des <b>écosystèmes littoraux et marins</b>. Centrée sur les oiseaux marins du littoral Charentais, il s'agit d'une thèse <b>interdisciplinaire</b> intégrant l'écologie, l'écotoxicologie, l'immuno-écologie et la démographie. En alliant des recherches à l'échelle des <b>individus</b> (physiologie, immunologie, toxicologie) et à l'échelle des <b>populations</b> (démographie), le projet de thèse a pour vocation de comprendre les conséquences encore largement inconnues de la contamination aux PFASs sur les <b>écosystèmes littoraux</b>. Ce projet participera donc à une meilleure compréhension des effets de cette pollution et contribuera ainsi mieux connaître <b>l'état de santé des écosystèmes et des territoires</b> (One Health). Le projet se déroulera majoritairement à l'<b>échelle régionale</b>, sur une <b>population de goélands nichant sur l'île de Ré</b>, en souhaitant recruter un candidat issu du <b>Master GEEL de La Rochelle Université</b>, en collaboration avec un <b>laboratoire de recherche (EPOC, Université Bordeaux) et une association de protection de l'environnement (LPO) de Nouvelle-Aquitaine</b>.</p>
<p><b>Descriptif du sujet</b> <i>(enjeux scientifiques, applicatifs, sociétaux...)</i></p> <p><b>1. Etat de l'art et contexte scientifique</b></p> <p><b>1.1 Les PFASs</b></p> <p>Les activités humaines sont responsables du relargage <b>d'innombrables composés toxiques</b> dans l'environnement, qui s'introduisent au sein des <b>organismes</b> et dans les <b>réseaux trophiques, à échelle mondiale</b><sup>1</sup>. Bien que la production et l'utilisation de certains produit chimique soit régulée (ex. DDT), les développements industriels ont abouti à la production de composés <b>poly- et perfluoroalkylés (PFASs)</b>. Les PFASs sont massivement utilisés dans une multitude de produits manufacturés<sup>2</sup> de la vie courante (poêles anti adhésives, agents imperméabilisants, textiles respirants, produits anti taches, emballages alimentaires, mousses anti-incendie). <b>Or, du fait de leur extrême persistance dans l'environnement</b>, les PFAS sont <b>impossibles à dégrader</b> pour les organismes vivants, et ont été surnommés "<b>polluants éternels</b>". Les PFASs ont un potentiel de <b>bioaccumulation</b> et de <b>bioamplification</b> et s'accumulent principalement dans les tissus riches en protéines, comme le foie et le sang<sup>4</sup>. De plus, les courants océaniques et atmosphériques peuvent transporter les PFASs à grande échelle<sup>5</sup>. Ces derniers sont ainsi été détectés, dans les tissus de la <b>faune sauvage à travers le monde</b><sup>6</sup>, en particulier en milieu marin et ce jusque dans les <b>régions polaires</b><sup>7</sup>.</p> <p>Chez l'humain et les modèles de laboratoire, les PFASs peuvent causer des <b>cancers</b>, affecter les <b>capacités immunitaires</b> et dérégler le <b>système endocrinien</b><sup>8</sup>. Cependant, les conséquences de l'exposition aux PFASs sur la faune sauvage restent <b>très peu étudiées</b>. Les acides perfluorooctanesulfonique (PFOS) et perfluorooctanoïque (PFOA) et acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS) sont aujourd'hui interdits de production et d'usage par la convention de Stockholm (depuis 2009 pour le PFOS, 2019 pour le PFOA, 2022 pour le PFHxS), mais les PFASs regroupent plus 5000</p>

substances, dont les PFAS dits 'émergents' (dits 'à chaîne courte' comme par exemple GenX), qui ne sont soumises à **aucune régulation**.

Porté par le **ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires**, le **plan d'action PFAS 2023-2027** a pour objectif de renforcer la protection des Français et de l'environnement contre les risques liés à ces substances. En particulier, l'axe 3 du plan d'action prévoit "*d'améliorer la connaissance des rejets et de l'imprégnation des milieux, en particulier des milieux aquatiques, pour réduire l'exposition des populations*". Evaluer les effets des PFAS sur la faune sauvage est donc une **priorité environnementale**.

## 1.2 Oiseaux marins et PFASs

Les **oiseaux marins** sont des **modèles de choix** pour évaluer l'effet des contaminants en général, et des PFASs en particulier<sup>9-11</sup>. En tant que **prédateurs supérieurs**, leurs niveaux de contamination reflètent les niveaux **accumulés tout au long de la chaîne trophique**. De par leur **longévité** élevée, ils peuvent **accumuler** les polluants tout au long de leur vie. Leur comportement **philopatric et colonial**, garanti l'accès à un grand nombre d'individus et la possibilité de **recapturer** les mêmes individus à travers les années. Les oiseaux ne possèdent pas de mécanismes de détoxification efficaces pour les polluants organiques comme les PFAS, les rendant potentiellement très vulnérables à ces derniers. Des études récentes suggèrent que les PFAS, en particulier les acides carboxylés à longue chaîne affectent négativement le **succès reproducteur**<sup>12</sup>, augmentent le **taux métabolique**<sup>13</sup> et le **stress oxydatif**<sup>13</sup>, interagissent de façon complexe avec le **système endocrinien**<sup>13</sup>, et seraient liés à la **survie** à travers un effet sur la longueur des **télomères**<sup>14,15</sup>. Ces études suggèrent également que l'effet des PFASs pourrait être dépendant du type de composé impliqué, plus que les concentrations *per se*.

## 1.3 Immunité et contaminants

Le système immunitaire est un **mécanisme physiologique complexe** responsable de la protection et de la défense d'un organisme face aux pathogènes et aux parasites, et est donc **primordial pour la survie**. De plus, le système immunitaire est un mécanisme **couteux**<sup>16,17</sup>, et monter une réponse immunitaire nécessite une grande quantité d'énergie. Si, lors d'une infection, **l'allocation de l'énergie** n'est pas optimale<sup>18-20</sup>, à cause par exemple de perturbations physiologiques causées par une contamination, alors la **survie peut être compromise**. Les coûts liés au système immunitaire proviennent aussi de la production de composés secondaires liés à son fonctionnement<sup>21</sup>. En effet, la **réponse inflammatoire** produit des **molécules oxydantes** pouvant endommager les tissus<sup>21</sup> et placer l'individu en état de **stress oxydatif**<sup>22</sup>, accélérant notamment le **vieillessement**<sup>23-25</sup>. Une modification dans les compromis d'allocation au sein des individus pourrait, ultimement, affecter les capacités de reproduction et la **survie**, et donc compromettre la **persistance des populations sauvages**.

Certains contaminants peuvent **affecter le système immunitaire**<sup>26-30</sup>, mais s'agissant des PFASs, l'état des connaissances reste **extrêmement lacunaire**. Dans un contexte actuel où les oiseaux marins sont les **principales victimes des grandes épidémies** de grippe aviaire, il est **primordial se demander si les contaminants** pourraient, à travers leurs effets sur le système immunitaire, constituer un **facteur aggravant** de ces épidémies.

## 1.4 Les pigments, signaux honnêtes de qualité individuelle ?

La capacité d'un individu à communiquer avec ses congénères peut avoir des conséquences importantes sur sa fitness. L'utilisation d'un **signal visuel honnête** implique l'existence de **coûts** pour ce signal<sup>31</sup>, devenant ainsi un **indicateur de qualité individuel**, pouvant par exemple être impliqué dans la **sélection sexuelle**<sup>32,33</sup>.

Chez les oiseaux marins adultes, les **colorations jaunes, orange et rouges** sont courantes au niveau des pattes, du bec et du contour de l'œil. Ces couleurs sont produites par des pigments **caroténoïdes**<sup>34</sup>. Les caroténoïdes sont aussi des **anti-oxydants** et peuvent **moduler le système immunitaire**<sup>35</sup>. Des études ont donc montré que des colorations liées aux caroténoïdes reflétaient la qualité des individus ou jouaient sur le choix de partenaire<sup>36-39</sup>. D'autres études ont également montré que la **contamination**, dont la contamination aux PFASs, **pouvait affecter ces colorations**<sup>40-42</sup>, perturbant du même coup le signal adaptatif associé.

Les œufs des oiseaux marins présentent **des caractéristiques de couleur et de taches très variables**, aussi bien à l'échelle inter- qu'intraspécifique<sup>43-45</sup>. Plusieurs hypothèses ont été évoquées pour expliquer ces variations, et parmi elles, le fait que ces patrons de coloration pouvaient **refléter la qualité de la femelle** et donc être liés à la **sélection sexuelle**<sup>46-49</sup>. En effet, deux pigments sont principalement impliqués dans la coloration des œufs<sup>50</sup> : la **protoporphyrine** (brun-jaune) et la **biliverdine** (bleu-vert), dont les précurseurs jouent également un rôle dans la **balance oxydative** et le **système immunitaire**<sup>51-54</sup>. Très peu d'études ont cherché à savoir si les contaminants pouvaient aussi affecter les patrons de coloration des œufs<sup>55</sup>. La plupart des études ont plutôt investigués les liens entre volume et l'œuf ou épaisseur de la coquille et niveaux de contamination<sup>56-58</sup>.

Via des **analyses d'images** réalisées sur des oiseaux marins **adultes** et sur leurs **œufs**, le projet de thèse cherchera à savoir si les niveaux de PFASs et/ou les variables immunitaires mesurées peuvent corrélérer avec ces colorations, et dans quelles mesures cela pourrait affecter la fitness des individus. En effet, si les PFASs imposent un coût

supplémentaire au système immunitaire, il se pourrait que les précurseurs des pigments soient plus investis dans l'immunité et donc moins (ou différemment) disponibles pour les colorations de l'individu et/ou de ses œufs.

## 2. Axes de recherche et mise en œuvre

Le projet de thèse s'articule autour de **3 axes principaux**. Dans un premier temps, l'**axe 1** s'attachera, dans les deux populations d'oiseaux marins étudiées, à **mesurer** les niveaux de contamination aux PFASs, les paramètres immunitaires et les indices de coloration, chez les poussins et les adultes capturés, et dans les œufs de ces derniers. Des études **comparatives** seront également réalisées afin de rendre compte des potentielles différences de contamination, d'immunité et de coloration en fonction de l'âge, du sexe ou de l'espèce par exemple. Par la suite, l'**axe 2** cherchera à mettre en évidence les **potentielles corrélations** entre les niveaux de contamination aux PFASs et les variables d'état de santé mesurées (immunité, pigmentation). Pour finir l'**axe 3** portera sur l'étude des **mécanismes ultimes** pouvant potentiellement **impacter la survie** des individus et donc la **persistance des populations**, soit via les **effets directs des mécanismes proximaux** étudiés dans les deux premiers axes, soit **indirectement** via une **modification des compromis d'allocation** ou des patrons de **sénescence**.

### 2.1 Espèces et population étudiées

Le projet de thèse s'appuie sur **deux suivis à long-terme déjà existants**. Tout d'abord, sur le **suivi annuel** (depuis 2010) d'une population composée de **trois espèces de goélands** (marin, brun et argenté) nichant dans la Réserve Naturelle de Lilleau des Niges, sur l'**île de Ré** (46.13°N 1.30°W), gérée par la LPO. Les individus sont **capturés, mesurés et bagués** (avec bagues métal et plastique permettant une identification à distance sans recapture) dans le cadre du suivi porté par la LPO (autorisation CRBPO PP533).

La deuxième population étudiée est une population de **mouettes tridactyles nichant au Svalbard** et suivie depuis 2000 par le directeur de thèse, en partenariat avec des instituts de recherche norvégiens et l'IPEV. Ce suivi a d'ailleurs récemment été labellisé comme '**Suivis à Long-terme du vivant**' lors de l'Appel à Manifestation d'Intérêts (AMI) mis en place par l'INEE en 2023.

Pour les deux suivis, une prise de sang (depuis 2016 à Lilleau des Niges, depuis 2000 au Svalbard) est effectuée sur les individus (re)capturés, adultes et poussins. Un **frottis sanguin** est également réalisé (depuis 2022 à Lilleau des Niges, à mettre en place pour la thèse au Svalbard). Le sang est ensuite centrifugé (10min, 8000g) afin de séparer le **plasma** des **cellules sanguines**. Les échantillons sont ensuite stockés à -20°C jusqu'aux analyses. Plus de **700 échantillons** ont déjà été récoltés pour les goélands et les mouettes, respectivement. Les suivis et les échantillonnages de ces deux populations se poursuivront pendant toute la durée de la thèse, avec la participation du/de la doctorant.e.

### 2.2 Dosages des PFASs

**14 PFASs** (8 carboxylates et 6 sulfonates) seront dosés dans le plasma<sup>59</sup>, par chromatographie en phase liquide, en collaboration avec l'UMR **EPOC de l'Université de Bordeaux**. Des études précédentes **attestent déjà de la présence de PFAS** dans les populations de goélands<sup>60</sup> et de mouettes tridactyles<sup>61,62</sup> étudiées dans le projet. **Plusieurs centaines d'échantillons de goélands et de mouettes sont déjà dosés** pour les PFAS constituant déjà un jeu de données exploitable par le/la doctorant.e dès le début de sa thèse.

### 2.3 Paramètres immunitaires mesurés

Chez les Vertébrés, le système immunitaire se décompose en **deux grandes voies** en interactions complexes<sup>63,64</sup> : la voie de l'immunité **innée** et la voie de l'immunité **acquise**<sup>65</sup>. Chaque voie comporte des mécanismes impliquant des **composés cellulaires et humoraux**. La voie de l'immunité innée est la première ligne de défense en cas d'infection et peut se déclencher de façon non-spécifique<sup>66</sup> ; tandis que la voie de l'immunité acquise agit de manière spécifique sur un antigène et se base sur la mémoire cellulaire<sup>67</sup>. Evaluer correctement les capacités immunitaires d'un vertébré requiert donc de pouvoir **mesurer à la fois des paramètres de l'immunité innée et de l'immunité acquise**. Cette dernière est bien plus difficile à mesurer chez les organismes non-modèles et nécessite bien souvent un prérequis sur le type de pathogènes rencontré par l'individu. Le projet propose donc de **mesurer plusieurs paramètres immunitaires, pour les deux voies, chez les oiseaux échantillonnés**. Pour cela, **plusieurs analyses** seront réalisées et permettront de : mesurer la quantité d'**anticorps naturels** et l'efficacité de la **cascade protéique du complément**<sup>68,69</sup>, de doser l'**haptoglobine**<sup>70</sup>, et d'établir les profils leucocytaires via la lecture **frottis sanguins**. Ces paramètres permettent d'évaluer les **capacités immunitaires basales** des individus. La **réponse immunitaire** sera également évaluée via des **challenges immunitaires** (type PHA ou LPS) chez les mêmes individus. Toutes ces analyses sont réalisées en routine par la directrice de thèse et sur les oiseaux marins<sup>71</sup>. Le/la doctorant.e sera donc formé sur ces techniques par la directrice de thèse et la plateforme ANABIO du CEBC possède tout le matériel nécessaire à la réalisation de ces analyses. Sur les échantillons de goélands déjà récoltés, **240 ont déjà été dosés pour l'haptoglobine**.

## 2.4 Indices de pigmentation et analyses d'images

Sur le terrain, des **photos standardisées des pattes**, du **bec** et du **contour de l'œil** seront réalisées pour les adultes capturés. Des photos des **œufs** de ces adultes seront également effectuées. Chez les mouettes tridactyles adultes, ce type d'étude a déjà été menée par le directeur de thèse<sup>72,73</sup>. Pour les œufs, la directrice de thèse mène actuellement une étude similaire chez une autre espèce d'oiseaux marins. Concernant la population de Lilleau des Niges, une étude de faisabilité a été réalisée par les directeurs de thèse en 2023 et **105 photos d'œufs ont été prises**. Les analyses d'images nécessaires à l'extraction de variables quantitatives de colorimétrie sont maîtrisées par la directrice de thèse qui formera également le/le doctorant.e sur ce sujet.

## 2.5 Captures-marquages-recaptures (CMR), analyses de survie et étude de la sénescence

Si les contaminants sont suspectés d'impacter fortement la fitness des individus, mettre en évidence des effets sur la **survie** et/ou sur le **vieillessement** est **compliqué à étudier**, surtout chez des espèces longévives comme les oiseaux marins<sup>74-76</sup>. Ce type d'études nécessite le **suiti à long-terme** d'une population et des mesurés répétées sur les mêmes individus au cours de leur vie ; combinés à la mise en place de modèles mathématiques complexes. De plus, l'étude des effets de l'âge nécessite de pouvoir corrélérer les variables d'intérêt (ici les niveaux de PFASs, les marqueurs immunitaires et de pigmentation) avec l'âge, au niveau inter- et intra-individuel, afin de pouvoir **découpler la sénescence et les processus de disparition sélective**<sup>77,78</sup>.

Le projet de thèse repose sur deux suivis à long terme, qui permettent aujourd'hui d'établir des **matrices CMR**<sup>79</sup> et des **modèles mixtes d'age-partitionning**. Combinés aux niveaux de PFASs mesurés, ces modèles permettront de savoir si les niveaux de PFASs et/ou les paramètres d'immunité/de pigmentation peuvent **prédire les probabilités de survie** et/ou les **patrons de sénescence** des oiseaux étudiés. Le/la doctorant.e sera formé aux analyses CMR, par Christophe Barbraud (DR CNRS, CEBC), expert de ce type d'analyses, et par la directrice de thèse pour les modèles d'étude de la sénescence.

## 3. Littérature citée

- <sup>1</sup>Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants.  
<sup>2</sup>Buck RC et al. (2011) IEAM 7, 513–541.  
<sup>3</sup>Muir DCG & de Wit CA (2010) Sci. Total Environ. 408, 3044–3051.  
<sup>4</sup>Conder JM et al. (2008) Environ. Sci. Technol. 42, 995–1003.  
<sup>5</sup>Prevedouros K et al. (2006) Environ. Sci. Technol. 40, 32–44.  
<sup>6</sup>Giesy JP & Kannan K (2001) Environ. Sci. Technol. 35, 1339–42.  
<sup>7</sup>Routti H et al. (2015) Environ. Pollut. 197, 62–67.  
<sup>8</sup>DeWitt JC (2015) Humana Press, ISBN: 978-3-319-15517-3.  
<sup>9</sup>Braune BM, Letcher RJ (2013) Environ. Sci. Technol. 47, 616–624  
<sup>10</sup>Verreault J (2007). Environ. Sci. Technol. 41:6671–7.  
<sup>11</sup>Miller A et al. (2015) Environ. Toxicol. Chem. 34, 999–1008  
<sup>12</sup>Tartu S et al. (2014) Environ. Sci. Technol. 48, 13504–13510.  
<sup>13</sup>Blévin P et al. (2017) Environ. Res. 157, 118–126.  
<sup>14</sup>Sebastiano M et al. (2020). Environ. Sci. Technol. 54, 10217–10226.  
<sup>15</sup>Blévin P et al. (2016) Sci. Total Environ. 563, 125–130. 513  
<sup>16</sup>Schmid-Hempel P (2003) Proc. R. Soc. B Biol. Sci. 270, 357–366.  
<sup>17</sup>Lochmiller RL & Deerenberg C (2000) Oikos 88, 87–98.  
<sup>18</sup>Bichet C et al. (2013) Plos One 8, e53866.  
<sup>19</sup>Martini LB et al. (2008) Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci. 363, 321–339.  
<sup>20</sup>van der Most PJ et al. (2011) Funct. Ecol. 25, 74–80.  
<sup>21</sup>Sorci G & Faivre B (2009) Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci. 364, 71–83.  
<sup>22</sup>Costantini D (2008) Ecol. Lett. 11, 1238–1251.  
<sup>23</sup>Finkel T & Holbrook NJ (2000) Nature 408, 239–247.  
<sup>24</sup>Monaghan P et al. (2009) Ecol. Lett. 12, 75–92.  
<sup>25</sup>Selman C et al. (2012) Trends Ecol. Evol. 27, 570–577.  
<sup>26</sup>Hawley DM et al. (2009) Ecotoxicology, 18, 499–503.  
<sup>27</sup>Kenow KP et al. (2007) Environ. Toxicol. Chem. 26, 1460–1469.  
<sup>28</sup>Snoeijs T et al. (2005) Environ. Pollut. 134, 123–132.  
<sup>29</sup>Grasman KA et al. (1995) Arch. Environ. Contam. Toxicol. 28, 161–167.  
<sup>30</sup>Fair JM & Myers OB (2002) Ecotoxicology 11, 199–208.  
<sup>31</sup>Zahavi A (1975) J. Theor. Biol., 53, 205–214.  
<sup>32</sup>Hill GE (2011) Ecol. Lett., 14, 625–634.  
<sup>33</sup>von Schatz T et al. (1999) Proc. Biol. Sci., 266, 1–12.  
<sup>34</sup>McGraw KJ (2006) Harvard University Press, London.  
<sup>35</sup>Blount JD et al. (2003) Science, 300, 125–127.  
<sup>36</sup>Faivre B et al. (2003) Science, 300, 103.  
<sup>37</sup>Baeta R et al. (2008) Proc. R. Soc. B., 275, 427–434.  
<sup>38</sup>Horak P et al. (2001) Oecologia, 126, 166–173.  
<sup>39</sup>Doutrelant C et al. (2008) J. Evol. Biol., 21, 226–233.  
<sup>40</sup>Bortolotti GR et al. (2003) Funct. Ecol., 17, 651–657.  
<sup>41</sup>Maresco V & Constantini D (2016) Front. Ecol. Evol., 4, 65.  
<sup>42</sup>Costantini D et al. (2022) Front. Ecol. Evol., 10, 952765.  
<sup>43</sup>Kilner RM (2006) Biol. Rev., 81, 383–406.  
<sup>44</sup>Cherry MI & Gosler AG (2010) Biol. J. Linn. Soc., 100, 753–762  
<sup>45</sup>Cassey P et al. (2012) Biol. J. Linn. Soc., 106, 657–672.  
<sup>46</sup>Moreno J & Osorno JL (2003) Ecol. Lett., 6, 803–806.  
<sup>47</sup>Lopez-Rull et al. (2008) Behav. Ecol. Sociobiol., 62, 1877–1884  
<sup>48</sup>Reynolds J et al. (2009) An. Behav., 18, 209–215.  
<sup>49</sup>Brulez K et al. (2015) Oxford University Press, 127–141.  
<sup>50</sup>Kennedy GY & Vevers HG (1976) Comp. Bioch. Phys. B., 55, 11  
<sup>51</sup>Morales J et al. (2006) Biol. Lett., 2, 334–336.  
<sup>52</sup>Maurer G et al. (2011) J. Zool., 285, 194–204.  
<sup>53</sup>Holveck MJ et al. (2012) PLoSOne, 7, e50389.  
<sup>54</sup>Duval C et al. (2013) J. Exp. Biol., 216, 700–708.  
<sup>55</sup>Pérez C et al. (2010) Oecologia, 163, 875–884.  
<sup>56</sup>Jagannath A et al. (2008) J. Appl. Biol., 45, 133–140.  
<sup>57</sup>Verboven N et al. (2009) The Auk, 126, 123–133.  
<sup>58</sup>Albert C et al. (2022) Env. Poll., 314, 120322.  
<sup>59</sup>Munoz G et al. (2017) J. Chromatogr. 1513, 107–117.  
<sup>60</sup>Sebastiano et al. (2021) STOTEN, 765, 144611.  
<sup>61</sup>Jouanneau W et al. (2022) Env. Sc. Tech., 56, 6091–6102.  
<sup>62</sup>Jouanneau W et al. (2023) STOTEN, 868, 161413.  
<sup>63</sup>Iwasaki A & Medzhitov R (2010) Science, 327, 291–295.  
<sup>64</sup>Iwasaki A & Medzhitov R (2015) Nature Immunology, 16, 343  
<sup>65</sup>Hoebe K et al. (2004) Nature Immunology, 5, 971–974.  
<sup>66</sup>Akira S et al. (2006) Cell, 124, 783–801.  
<sup>67</sup>Bonilla FA & Oettgen HC (2010) J. Allergy Clin. Immunol., 125,  
<sup>68</sup>Janeway CA et al. (2001) Immunobiology: The immune system disease (5th ed.).  
<sup>69</sup>Matson KD et al. (2005) Dev. Comp. Immunol, 29, 275–286.  
<sup>70</sup>Andersen CBF et al. (2016) Antiox. Redox Sig., 26, 814–831.  
<sup>71</sup>Bichet C et al. (2021) J. Anim. Ecol., 1365–2656, 13642.  
<sup>72</sup>Blévin P et al. (2014) STOTEN, 470–471, 248–254.  
<sup>73</sup>Costantini D et al. (2014) Front. Ecol. Evol., 10, 952765.  
<sup>74</sup>Goutte A et al. (2014) Ecology, 95, 1075–1086.  
<sup>75</sup>Goutte A et al. (2015) Env. Poll., 200, 1–9.  
<sup>76</sup>Goutte A et al. (2018) STOTEN, 631–632, 315–325.  
<sup>77</sup>van de Pol M & Verhulst S (2006), Am. Nat., 167, 766–773.  
<sup>78</sup>van de Pol M & Wright J (2009) Anim. Behav., 77, 753–758.  
<sup>79</sup>Chambrelin J et al. In prep.

**Contexte partenarial** (cotutelle internationale, EU-CONEXUS, partenariat avec un autre laboratoire, une entreprise...)

La thèse impliquera de nombreux partenaires et collaborateurs locaux et internationaux.

Concernant les études de terrain, la thèse bénéficiera d'un partenariat avec la **LPO** qui suit depuis 2010 la population de goéland nichant sur l'île de Ré, au niveau de la **Réserve de Lilleau des Niges**. Ce partenaire (principalement J.-C. Lemesle, J. Gernigon et P. Lagrande) connaît parfaitement cette population et assure le soutien logistique nécessaire au suivi. Tous les ans, l'équipe **Ecophy** participe aux campagnes de baguages et de captures permettant également la récolte d'échantillons sanguins dans lesquels sont mesurés les PFASs. La deuxième population d'oiseaux marins étudiée lors de cette thèse sera une population de mouettes tridactyles située au **Svalbard**, à proximité de la **Base Internationale de Ny-Ålesund** (Arctique norvégien). Cette population est suivie depuis 2000, en collaboration avec l'**IPEV** (programme 330 porté par Olivier Chastel) et l'**Institut Polaire Norvégien**. De plus, l'étude de cette population a récemment été labellisée comme '**Suivis à Long-terme du vivant**' lors de l'Appel à Manifestation d'Intérêts (AMI) mis en place par l'INEE en 2023.

Les dosages des PFASs seront assurés grâce à une collaboration avec un laboratoire de Nouvelle-Aquitaine, l'**UMR EPOC** (Université de Bordeaux), mise en place à travers l'**ANR ToxSeaBird** porté par Olivier Chastel. Les analyses physiologiques seront, quant à elles, toutes réalisées au **CEBC**, via la plateforme **ANABIO** (C. Parenteau, M. Pallud, C. Ribout), qui possèdent déjà tous les équipements nécessaires.

**Impacts** (scientifiques, technologiques, socio-économiques, environnementaux, sociétaux...)

Au **niveau scientifique**, la thèse permettra de mieux **comprendre l'effet de polluants persistants dans l'environnement**, comme les PFASs, sur les **écosystèmes sauvages**, en particulier les **écosystèmes littoraux**. A travers des mesures physiologiques et immunologiques, la thèse cherchera à **fournir des outils de diagnostic de l'état de santé** de populations d'oiseaux marins, pouvant ensuite s'appliquer à d'autres espèces et d'autres milieux. L'idée est non seulement de **rendre compte de la menace** que représente les PFASs **sur les individus sauvages**, mais **aussi sur les populations**, à travers **l'étude d'effets individuels et d'effets à long terme**. La thèse posera la question du **potentiel adaptatif** des populations soumises aux contaminants, un élément clé dans les études de **préservation de la biodiversité**. En cela, ces aspects de **science fondamentale** rejoignent des aspects plus **appliqués**, liés aux études environnementales sur la préservation de la biodiversité et des écosystèmes, en particulier littoraux et à une échelle mondiale. Ces aspects rejoignent également des **priorités actuelles sociétales** (plan d'action ministériel sur les PFASs) en participant à mettre en évidence les effets de la pollution environnementale sur la préservation de la biodiversité et l'intérêt de sa diminution pour le **maintien d'écosystèmes de qualité, aussi bien pour la faune sauvage que pour l'humain**. Nous espérons que les travaux réalisés lors de cette thèse pourront être repris par les **acteurs locaux**, en Nouvelle Aquitaine, mais aussi en Arctique et permettront la mise en place **d'outils législatifs appropriés et efficaces**.

Le projet de thèse utilisera des **techniques analytiques de pointes déjà existantes et disponibles** en Nouvelle-Aquitaine (chromatographie en phase liquide, spectrophotométrie de masse, analyses immunologiques, analyses d'images, ...). Le projet n'a donc pas vocation au développement de nouvelles techniques

**Programme de travail du doctorant** (tâches confiées au doctorant)

Le programme de travail du doctorant est établi avec l'idée de faire acquérir au/à la doctorant.e de **l'expérience et des compétences dans tous les aspects de la recherche scientifique**, à savoir **l'acquisition de données** (capture, manipulation et suivi d'oiseaux sauvages, analyses en laboratoire), **l'analyse de données** (statistique, modélisation CMR), la **rédaction** d'articles scientifiques et la **communication** (communauté scientifique et grand public). Le but de ce programme est de donner toutes les armes au/à la futur.e docteur.e pour continuer sa **carrière dans la recherche**, via des **contrats postdoctoraux**, puis via la réussite de **concours**, comme les concours CNRS ou les concours universitaires. D'ailleurs, afin de pouvoir prétendre à un poste universitaire, le/la doctorant.e sera encouragé à réaliser des **enseignements** (vacations) au sein du Département de Biologie de La Rochelle Université.

**Travail de terrain** : Le/la doctorant.e participera à deux campagnes de terrain différentes, pendant les deux premières années de sa thèse, dans le but de récolter des données nécessaires au bon déroulement de cette dernière. La première campagne de terrain se déroulera dans la Réserve du Lilleau des Niges sur l'île de Ré, sur une population pluri-spécifique de goélands. Cette campagne, de 4 journées entre juin et juillet, se déroule chaque année depuis 2010 et consiste à la capture, au marquage et aux prises de sang de goélands adultes et de poussins (dosages PFASs et marqueurs immunitaires). A cela s'ajoutera la prise de photos des marqueurs de coloration des adultes (bec, pattes, contour de l'œil) et des œufs de ces mêmes goélands. Cette campagne se déroule en partenariat avec la LPO qui assure une grande partie des aspects logistiques. Le/la doctorant.e sera également accompagné.e d'autres membres de l'équipe Ecophy et/ou de l'ANR Toxseabird. Les données récoltées sur cette population depuis 2010 sont déjà disponibles et les mesures de PFASs et d'un marqueur immunitaire ont déjà effectuées sur les échantillons de 2016 à 2018. Le/la doctorant.e commencera les analyses et les dosages sur les échantillons disponibles au début de sa thèse.

La deuxième campagne de terrain se déroulera au Svalbard (Arctique norvégien), sur une population de mouettes tridactyles, de mai à juin pour les adultes, de mi-juillet à mi-août pour les poussins. Cette population est suivie par le CEBC, en collaboration avec la Norvège et l'IPEV depuis 2000. Tous les ans, adultes et poussins sont capturés, marqués et échantillonnés (prise de sang pour le dosage de nombreux contaminants, dont les PFASs et pour des mesures physiologiques, dont l'immunité dans le cadre de la thèse). La reproduction et la survie des individus sont également suivies et certains individus sont équipés de GPS dans le but d'étudier le comportement migratoire de cette population. Là encore, le/la doctorant.e sera toujours accompagné d'un membre de l'équipe Ecophy et/ou de l'ANR ToxSeaBird.

**Analyses de laboratoire :** Les échantillons déjà récoltés ou récoltés pendant la thèse seront traités par le/la doctorant.e, après formation par la directrice de thèse, les membres de la plateforme ANABIO du CEBC, ou les membres du laboratoire EPOC. Ces différents travaux de laboratoire permettront au/à la doctorant.e de maîtriser des techniques d'analyses par spectrophotométrie, par microscopie et par biologie moléculaire.

**Analyses d'images et statistiques :** Le/la doctorant.e sera formé à l'analyse d'images par la directrice de thèse. Les analyses statistiques (modèles linéaires, mixte ou généralisés, analyses multivariés) seront réalisées par le/la doctorant.e, avec le soutien des directeurs de thèse, familiers de ce type d'analyses. La modélisation CMR et les analyses de survie seront aussi réalisées par le/la doctorant.e, avec l'aide de Christophe Barbraud, DR CNRS au CEBC, dans l'équipe Prédateurs Marins, et expert du domaine. De plus, le/la doctorant.e pourra bénéficier de l'aide du service Analyses et Modélisation du CEBC.

**Rédaction :** Le/la doctorant.e publiera les résultats de ces travaux dans des journaux scientifiques à comité de lecture (préférentiellement dans des journaux de rang A), en évitant des revues dites 'prédatrices'. Les deux derniers trimestres seront consacrés à la rédaction de sa thèse de doctorat. Pour ces travaux écrits, le/la doctorant.e pourra compter sur l'aide de ses directeurs de thèses et des co-auteurs.

**Communication :** Le/la doctorante sera encouragé à communiquer sur ses travaux. Il/elle pourra participer à plusieurs congrès nationaux et internationaux pour communiquer ses résultats à la communauté scientifiques sous forme de communication orale ou de poster. Il/elle sera fortement encourager à favoriser les communications en anglais. Le/la doctorante sera également encouragé à communiquer sur ses travaux auprès du grand public (presse, fête de la Science, journées portes ouvertes) et auprès de la communauté universitaire (journées LUDI, colloque des doctorants, enseignements).

**Enseignement et formation :** Si il/elle le souhaite, le/la doctorant.e pourra se former à l'enseignement universitaire en donnant des vacances au Département de Biologie de l'Université de La Rochelle. La directrice de thèse étant Maître de Conférences à LRUniv, elle sera en mesure d'accompagner le/la doctorant.e dans cette démarche et veiller à son bon déroulement. Il sera également proposé au/à la doctorant.e d'encadrer des stagiaires (niveau L3 ou M1 maximum) dans le cadre de ses travaux de terrain ou analytiques.

### Calendrier de réalisation

	Année 1				Année 2				Année 3		
	Trim. 1	Trim. 2	Trim. 3	Trim. 4	Trim. 5	Trim. 6	Trim. 7	Trim. 8	Trim. 9	Trim. 10	Trim. 11
Activités	sep-nov	déc-fév	mar-mai	jun-aoû	sep-nov	déc-fév	mar-mai	jun-aoû	sep-nov	déc-fév	mar-m
Veille bibliographique	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Terrain				x				x			
Analyses de laboratoire (échantillons existants)	x										
Analyses de laboratoire (échantillons récoltés pendant la thèse)					x				x		
Analyses statistiques (données existantes)		x									
Analyses statistiques (données récoltées pendant la thèse)						x				x	
Rédaction d'articles scientifiques			x				x		x	x	x
Communications (colloques, vulgarisation)			x				x		x	x	
Activités d'enseignement* (vacations, encadrement de stagiaires)			(x)	(x)			(x)	(x)			
Rédaction de la thèse et soutenance											x

Trim. : Trimestre

\* facultatif, selon l'intérêt du/de la doctorant.e recruté.e

**Accompagnement du doctorant / Fonctionnement de la thèse** (*accompagnement humain, matériel, financier, en particulier pour la prise en charge du fonctionnement de la thèse et des dépenses associées*)

Le/la doctorant.e sera encadré.e par un **chercheur HDR** et par une **enseignante-chercheuse non-HDR (une DDT avec engagement de soutenance de l'HDR sera demandée si le sujet est retenu)**, tous deux membres de **l'équipe Ecophy du CEBC**. Il /elle sera amené.e et encouragé.e à **collaborer** par d'autres chercheurs de l'équipe ou d'autres équipes du CEBC. Au CEBC, il/elle bénéficiera également de l'appui des **services communs** (analyses biologiques et analyses et modélisation). Au CEBC, le/la doctorant.e bénéficiera d'un **environnement stimulant** avec de nombreux doctorants, chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et postdoctorants, et leurs partenaires nationaux et internationaux. Il/elle s'intégrera également dans les consortiums de **l'ANR TOXSEABIRD** et de **l'IPEV**. Le suivi du/de la doctorant.e sera effectué à l'aide de **réunions et discussions très régulières** (hebdomadaires) avec les directeurs de thèse. Le travail de terrain sera systématiquement accompagné par la présence d'un des directeurs de thèse ou de collaborateurs expérimentés. **Des comités de suivi de thèse annuels** seront organisés avec des chercheurs extérieurs.

Le soutien logistique et financier sera assuré par l'ANR ToxSeaBird, par le programme IPEV 330 et par l'AMI Suivi à long-terme du vivant. Toutes les dépenses liées à la thèse (missions terrain, déplacements, congrès) seront prises en charge par les programmes et les directeurs de thèse. Le/la doctorant.e aura accès à un bureau et un ordinateur, ainsi qu'à une somme de 2000€ pour le fonctionnement annuel courant. Il/elle effectuera la formation Expérimentation Animale pour la Faune Sauvage Non-Hébergée dès sa première année.