



INSTITUT
POLAIRE
FRANÇAIS
PAUL-ÉMILE VICTOR

RAPPORT
D'ACTIVITÉ
CAMPAGNE D'ÉTÉ

2018
2019



Panorama des recherches et des derniers résultats sur **les pathogènes en milieu polaire**

Approches complémentaires des interactions
hôtes-parasites en zones polaires :
de la détection de parasites et agents infectieux à
l'étude fonctionnelle, écologique et évolutive
de leurs interactions avec les hôtes

Thierry **BOULINIER**
thierry.boulinier@cefe.cnrs.fr

Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, UMR 5175 CNRS
Université Montpellier, Montpellier

Stéphane **BETOULLE**
stephane.betoulle@univ-reims.fr

UMR-I 02 Stress environnementaux et biosurveillance
des milieux aquatiques (SEBIO), Université de REIMS Champagne-Ardenne, Reims

France **CAZA**
France.caza@iaf.inrs.ca

Centre Armand-Frappier Santé Biotechnologie, INRS
Institut Armand-Frappier, Québec, Canada

Yves **ST PIERRE**
Yves.St-Pierre@iaf.inrs.ca

Centre Armand-Frappier Santé Biotechnologie, INRS
Institut Armand-Frappier, Québec, Canada

Jérémy **TORNOS**
jeremy.tornos@ceva.com

Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, UMR 5175 CNRS
Université Montpellier, Montpellier

Céline **BOIDIN-WICHLACZ**

CIIL-Center for infection and Immunity of Lille, Université Lille, CNRS INSERM,
CHU Lille, Institut Pasteur de Lille, U1019-UMR9017

Amandine **GAMBLE**
Amandine.gamble@gmail.com

Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of California Los Angeles,
Los Angeles, Californie, États-Unis

Aurélien **TASIEWSKI**
aurelie.tasiemski@univ-lille.fr

CIIL-Center for infection and Immunity of Lille, Université Lille, CNRS INSERM,
CHU Lille, Institut Pasteur de Lille, U1019-UMR9017

INTRODUCTION

Même si les zones polaires semblent à première vue peu susceptibles d'héberger une faune parasitaire riche et abondante, les parasites et les **agents infectieux** ne sont pas absents des hautes latitudes, bien au contraire (Figure 1). Ceci est d'autant plus vrai que dans le contexte du changement global, le réchauffement climatique et l'augmentation de la connexion entre les écosystèmes peuvent entraîner des changements rapides des aires de distributions des parasites et de leurs hôtes. Les parasites et agents infectieux ne sont pas nécessairement responsables de maladies détectables au niveau des individus et des populations. Cependant, certains sont responsables d'effets pathogènes aux conséquences potentiellement importantes, notamment vis-à-vis de l'homme lors de **zoonoses**, ou d'espèces menacées, comme c'est le cas du choléra aviaire chez les albatros de l'île d'Amsterdam. Par ailleurs certains des parasites, représentent des vecteurs efficaces de transport d'agents infectieux, comme la tique qui est vectrice de la bactérie de la maladie de Lyme au sein de la population de manchots royaux de Crozet et des populations de guillemots de l'arctique.

Les parasites représentent des objets de choix pour aborder une série de thématiques scientifiques en zones polaires. Les populations de certaines espèces hôtes sont particulièrement fragmentées et sont agrégées en colonies (agrégations de territoires de reproduction) en certains sites favorables, comme les colonies d'oiseaux ou de mammifères marins, ce qui représente une contrainte écologique et évolutive importante pour les parasites : comment

dispenser entre ces groupes d'hôtes qui représentent des ressources abondantes et persistantes dans les zones réoccupées années après années ? Les populations d'hôtes et l'environnement lui-même peuvent constituer des milieux extrêmes et particulièrement hostiles pour la survie et la reproduction des parasites. Dans ce contexte, il est important de comprendre quels mécanismes de survie et de reproduction ont évolué chez les parasites et les hôtes sachant qu'ils vont avoir des conséquences écologiques et épidémiologiques parfois importantes. L'arrivée d'espèces non-indigènes peut représenter des opportunités de colonisation de nouveaux hôtes et affecter le maintien des populations d'agents infectieux, notamment dans des milieux insulaires comme les îles subantarctiques. Le système immunitaire des populations d'hôtes peut avoir évolué en fonction des pressions parasitaires et des conditions écologiques et peut ainsi être utilisé pour caractériser certains des changements des écosystèmes. Ces thèmes sont abordés par plusieurs des programmes développés par l'Institut polaire français.



agents infectieux

organismes capables d'infecter un être vivant (alors appelé hôte) et de provoquer une maladie lorsqu'ils sont pathogènes



zoonose

maladie pouvant être transmise de l'animal à l'homme ou inversement de l'homme à l'animal



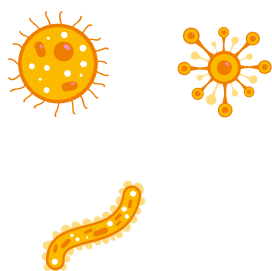
Surveillance et compréhension de la circulation et des effets des parasites et pathogènes chez les oiseaux et mammifères

Une première étape de la plupart des travaux sur les parasites et pathogènes en zones polaires a consisté en une recherche de leur présence et une exploration des caractéristiques de leurs populations. Et lorsque l'on cherche des parasites et pathogènes, on peut en trouver ! (Figure 1 ; Gamble et al. 2020) Des analyses sérologiques (détection d'anticorps) ou de biologie moléculaire (détection d'ADN par PCR) ont par exemple permis de détecter la présence de la bactérie de Lyme *Borrelia burgdoferi sensu lato* dans la plupart des populations d'oiseaux marins et de leur tique *Ixodes uriae* (voir par exemple Schramm et al. 2014 pour la colonie de manchots royaux de la baie du Marin dans l'archipel Crozet). En revanche, la circulation de virus de l'influenza aviaire n'a pas encore été mise en évidence dans les terres australes françaises (Chang et al. 2009, Jaeger et al. 2018). Les caractérisations de populations peuvent ensuite être étudiées sur le plan morphologique ou génétique, comme par exemple pour les tiques associées à différentes espèces hôtes et sur différents sites (Dietrich et al. 2014a, Dupraz et al. 2016).



◆ Figure 1 :

- (a) Autopsie de terrain d'un poussin de manchot papou trouvé mort sur Kerguelen, en Novembre 2018 ; le manchot se révélera infecté par un herpes virus. (Photo Thierry Boulinier/Augustin Clessin/Amandine Gamble/Jérémy Tornos/ Institut polaire français 1151).
- (b) Les parasites et pathogènes sont bien présents en zones polaire si on les cherche. Cas d'hyperinfestation d'un pétrel à menton blanc par des tiques *Ixodes kerguelensis* sur Crozet, Décembre 2017. (Photo Thierry Boulinier / Institut polaire français 1151 ; Gamble et al. 2020).
- (c) Autopsie d'une jeune otarie sur Amsterdam, Août 2019, faisant initialement suspecter une mort par infection tuberculeuse. (Photo Jérémy Dechartre/Augustin Clessin/ Institut polaire français 1151 et 109).

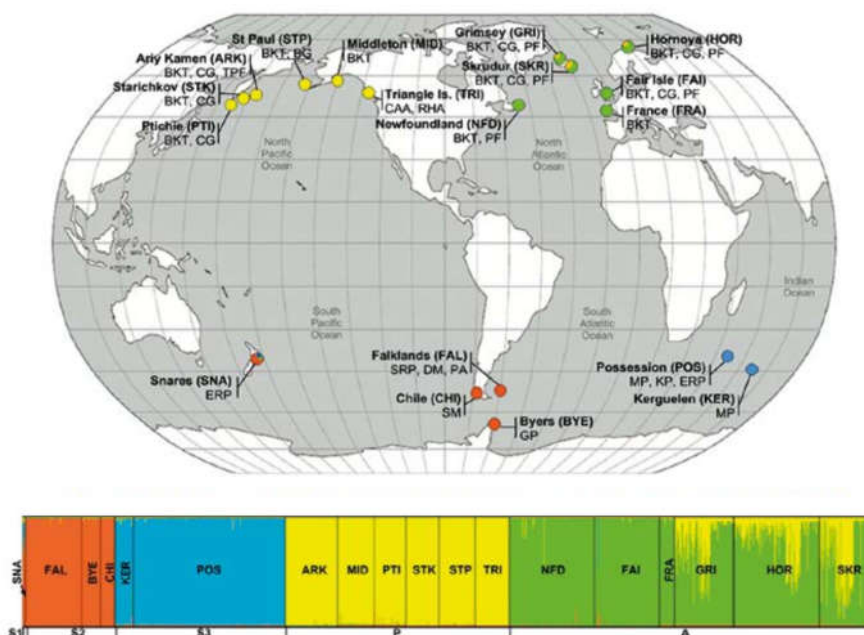


Les travaux menés dans un second temps peuvent nous informer sur les processus écologiques, évolutifs et épidémiologiques en jeu dans les interactions entre populations de parasites et d'hôtes (Figure 2), sachant que ces travaux demandent des plans d'échantillonnage spécifiques, voir des expérimentations sur le terrain afin de déterminer les relations de cause à effet (Dietrich et al. 2014b). En s'appuyant sur une connaissance approfondie de l'écologie des systèmes, les études menées dans les zones polaires dans le cadre de projets de l'Institut polaire ont ainsi permis d'aborder toute une série de questions importantes :



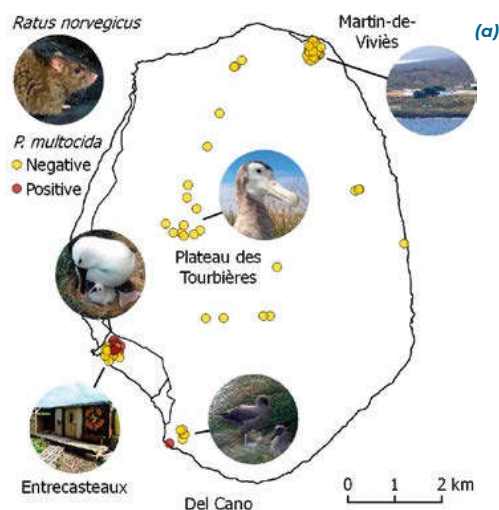
- Est-ce que les populations de tiques d'oiseaux marins sont spécialisées entre espèces d'hôtes et est-ce qu'elles ont évolué d'une façon récurrente vers une telle spécialisation ? (McCoy et al. 2005)
 - Est-ce que les traits écologiques des populations d'hôtes et de parasites vont affecter la dispersion des parasites à différentes échelles spatiales ? (Boulinier et al. 2016, Kada et al. 2017)
 - Quelles sont les conséquences de la spécialisation d'hôte par des tiques vectrices pour la circulation d'agents infectieux ? (McCoy et al. 2013)
 - Est-ce que la persistance des anticorps transmis au jeune via leur mère a évolué pour protéger les jeunes pendant une part de leur longue présence sur les colonies et est-ce que leur persistance peut être utile pour utiliser un vaccin contre une maladie infectieuse qui tue les jeunes ? (Gasparini et al. 2001, Garnier et al. 2012, Gamble et al. 2019a)
 - Est-ce que les endoparasites sont responsables des cycles d'abondance de populations de lemmings ? (Gilg et al. 2019)
- Une originalité de cette question est qu'elle a été abordée en milieu terrestre (au Groenland) par le projet Interactions Institut polaire français 1036, alors que la plupart des projets concernent des espèces inféodées au milieu marin.

◆ Figure 2 : L'étude de la structure génétique des populations de parasites, notamment de parasites vecteurs de bactéries et virus tels que les tiques, a permis d'obtenir des résultats importants sur la spécificité des parasites pour certaines espèces d'hôtes et de déterminer à quelles échelles spatiales les échanges de parasites peuvent avoir lieu (a), entre colonies d'hôtes mais aussi à des échelles géographiques très larges, pour la tique *Ixodes uriae* distribuée aux niveaux des deux pôles (McCoy et al. 2005, Dietrich et al. 2014 ; Projets Parasito-arctique Institut polaire français 333 et Ecophy-Antavia 137).
► Non-seulement les traits d'histoire de vie des espèces hôtes vont affecter la circulation des tiques, mais aussi celles des différentes espèces de tiques (Kada et al. 2017) (Photo Thierry Boulinier/ Institut polaire français 333).



Les vertébrés marins qui viennent se reproduire à terre sur les côtes et les îles sont exposés à une suite de facteurs de stress environnementaux dont le parasitisme fait partie, avec la prédation, les conditions climatiques délétères, la compétition avec des congénères et la distance aux zones d'alimentation. L'exposition aux parasites, tels que les tiques, peut varier fortement dans l'espace au sein des colonies, ce qui peut être utilisé pour explorer les réponses phénotypiques et génétiques des populations d'hôtes à la pression parasitaire (Gasparini et al. 2001, Mangin et al. 2003, Chambert et al. 2012, Cristofari et al. 2018). Les effets sont parfois difficilement détectables sur les paramètres démographiques mais, dans les terres australes, ces études bénéficient des connaissances fines acquises sur l'écophysiologie et le comportement des espèces adaptées à des conditions extrêmes, notamment au plan de leur métabolisme énergétique (Viblanç et al. 2011, Stier et al. 2019). Dans certains cas les effets sont néanmoins très nets, comme dans le cas des mortalités massives et récurrentes de poussins d'albatros sur l'île d'Amsterdam, associées à des infections par l'agent du choléra aviaire (Jaeger et al. 2018, Bourret et al. 2018). Les agents infectieux impliqués sont susceptibles d'avoir été importés et maintenus via des espèces non-indigènes (volailles, rats) et les travaux effectués peuvent alors avoir des implications directes pour la gestion de la biodiversité. Il est notamment étudié dans quelle mesure une stratégie de vaccination des femelles reproductrices d'albatros à bec jaune pourrait être bénéfique via la protection potentiellement assurée par le transfert récurrent d'anticorps maternels (Figure 3, Bourret et al. 2018, Gamble et al. 2019a). Ce type d'approche nécessite de comprendre les facteurs responsables de la fréquence et de la persistance des **épizooties**. Les travaux ont notamment révélé la forte exposition d'une

espèce native, charognarde et prédatrice, le labbe subantarctique, qui représente une excellente sentinelle (Gamble et al. 2019b). Ce type de travaux est en particulier développé dans le cadre de la mise en place d'un observatoire des dynamiques éco-épidémiologiques s'appuyant sur une collaboration entre le projet Ecopath Institut polaire français 1151 (Boulinier et al. 2017), d'autres projets de l'Institut polaire et la Réserve naturelle nationale des terres australes.



épizootie

Augmentation rapide de l'incidence d'une maladie affectant une ou plusieurs espèces

◆ Figure 3 :

► (a) Les résultats obtenus récemment sur les rats surmulots montrent qu'ils sont fortement exposés à *Pasteurella multocida* sur le site d'Entrecasteaux, mais pas sur le reste de l'île d'Amsterdam (Institut polaire français 1151, en préparation).
► Compréhension des dynamiques éco-épidémiologiques et test d'un vaccin contre le choléra aviaire chez l'albatros à bec jaune sur l'île d'Amsterdam menés en partenariat avec le laboratoire Ceva Biovac : les articles publiés dans des revues comme *Oecologia* et *Conservation Letters* (b, c) montrent que les albatros à bec jaune du site d'Entrecasteaux et les labbes subantarctiques sont fortement exposés à la bactérie *Pasteurella multocida*, et qu'une approche vaccinale chez les albatros pourrait ouvrir des perspectives de gestion (Bourret et al. 2018, Gamble et al. 2019a,b).

Comprendre la sensibilité d'organismes modèles et la vulnérabilité de leurs populations face aux variations des facteurs environnementaux

L'**écotoxicologie** est une science de l'environnement qui étudie le devenir et les effets des substances chimiques principalement issues des activités humaines sur les différents niveaux d'organisation biologique des écosystèmes (des organismes aux communautés en passant par les populations). Les milieux aquatiques des îles Kerguelen constituent un laboratoire naturel pour l'étude des effets éco-toxicologiques liés au changement global. La fonction immunitaire constitue l'une des caractéristiques physiologiques centrales des organismes susceptibles d'être affectées par les polluants chimiques. Dans ce contexte, l'objectif du projet Immunotoxker Institut polaire français 409 (Encadré , page suivante) est de mieux comprendre la sensibilité d'organismes modèles (mytilidae/salmonidae) et la vulnérabilité de leurs populations face aux variations des facteurs environnementaux induites par le changement global. En parallèle, le projet Immunotoxker doit poser les bases pour la mise en place d'un observatoire des risques éco-toxicologiques dans les continuums eaux douces - eaux marines des îles Kerguelen en considérant les réponses du système immunitaire des organismes modèles étudiées à l'aide d'approches **multi-omiques**. Les méthodologies utilisées combinent un échantillonnage de terrain peu invasif de moules et de truites communes via la collecte, et le stockage à sec de biopsies liquides (hémolymphe, sang...) (Caza et al. 2015). Cette approche spécifiquement appliquée sur Kerguelen se révèle particulièrement intéressante car elle supprime largement l'usage de la congélation pour la conservation et le transport des échantillons. Cette approche est parfaitement adaptée pour des analyses en laboratoire de signatures moléculaires basées notamment sur les techniques de séquençage à haut débit (Caza et al. 2019). À long terme, un tel observatoire contribuera à développer des biomarqueurs moléculaires pour de multiples espèces sentinelles qui permettront la surveillance en temps réel de changements dans la santé des écosystèmes aquatiques de Kerguelen.

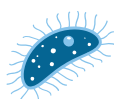


Ecotoxicologie

Science de l'environnement qui étudie le transfert et les effets des substances chimiques principalement issues des activités humaines, sur les différents niveaux d'organisation biologique des écosystèmes (des organismes aux communautés en passant par les populations).

multi-omique

Combinaison d'analyses biologiques permettant de générer de grandes quantités de données sur le génome, l'expression des gènes et leur régulation, les protéines et les métabolites produits.





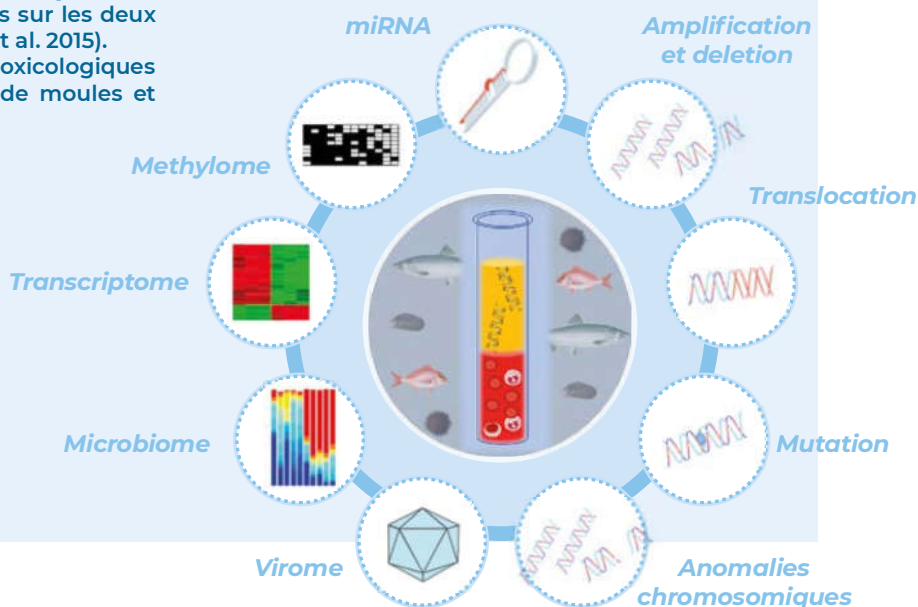
L'immunotoxicologie

L'immunité est au centre de la physiologie de l'organisme et du maintien de son intégrité. Son rôle va donc bien au-delà de la fonction classique de défense anti-pathogène puisqu'elle intervient dans le développement de l'organisme et dans l'homéostasie tissulaire associée aux grandes fonctions physiologiques (métabolisme, reproduction et fonction nerveuse).

Dans les milieux littoraux des Kerguelen, le projet de l'Institut polaire français Immunotoxker s'intéresse à l'étude des interactions entre l'immunité d'organismes aquatiques (moules et salmonidés) et les variables environnementales modulées par le changement global au sein de ces écosystèmes de transition. Aux facteurs écologiques primaires comme la température et la salinité, viennent s'ajouter les contaminants chimiques pour lesquels des effets immunotoxiques sont recherchés. L'approche écosystémique de l'immunité menée sur les organismes aquatiques de Kerguelen est confortée par une interaction forte entre le projet Institut polaire français 1044 et Salmevol Institut polaire français (Figure 4). Parce que ces deux programmes s'intéressent aux dynamiques écologiques dans la zone littorale de Kerguelen (Proteker) en ciblant notamment les populations de salmonidés (Salmevol), ils fournissent des informations (état des populations, traits de vie comportementaux des organismes) qui sont mises en regard des données immunologiques obtenues sur les deux types d'organismes étudiés (Jaffal et al. 2015). Ces observations éco-immunotoxicologiques sont menées sur des populations de moules et

de truites communes échantillonnées dans différents contextes environnementaux propres à l'archipel. Sont ainsi pris en compte les influences de gradients physico-chimiques Nord/Sud et Ouest/Est, ainsi que celles potentiellement imputables à des activités humaines locales.

De façon récente et par la prise en compte de méthodologies et techniques issues du domaine biomédical, les observations menées sur ces taxons représentatifs du littoral de Kerguelen mettent en avant des analyses de biomarqueurs moléculaires chez des espèces sentinelles marines à partir de biopsies liquides (hémolymphe, sang, mucus...) conservées à température ambiante. L'échantillonnage et sa bancarisation s'en trouvent ainsi facilités. Les analyses moléculaires multiomiques (transcriptome, génome, virome, microbiome,...) sont complétées par des recherches de polluants chimiques dans les mêmes fluides physiologiques. Le projet Immunotoxker ouvre ainsi la voie à la mise en place d'un programme d'observation sur le long terme en immunoécologie fonctionnelle de l'environnement littoral de Kerguelen en l'étendant possiblement à d'autres taxons représentatifs de l'écosystème subantarctique (oiseaux et mammifères) dans une stratégie d'observation commune et en continu.



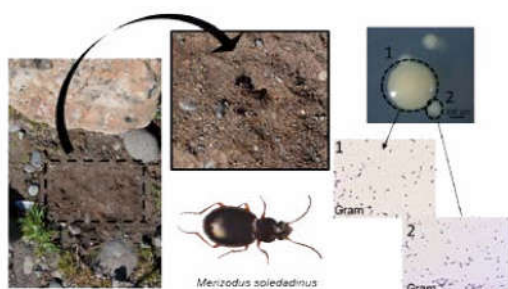
◆ Figure 4 : Organismes aquatiques étudiés par le projet Immunotoxker Institut polaire français 409.

Le programme vise à établir un observatoire des risques écotoxicologiques aux Kerguelen. Les organismes ciblés constituent des espèces modèles largement étudiées à travers le monde, en évaluation des risques écotoxiques. Représentatifs des écosystèmes aquatiques de l'archipel, ils prennent en compte la zone de transition eau douce-eau marine de l'écosystème subantarctique, laquelle est particulièrement exposée aux effets du changement global. Les mollusques bivalves filtreurs sont connus pour intégrer les contaminations chimiques et biologiques des eaux. L'intérêt de la truite commune repose quant à lui sur des caractéristiques bio-écologiques particulières et originales associées à cette espèce qui vit indifféremment dans les eaux douces comme dans les eaux marines littorales de l'archipel. Le poisson intègre alors les particularités physico-chimiques présentes dans ces deux types de milieu et notamment des niveaux et types de contaminations chimiques variés (Jaffal et al., 2011).

(Photos Yves Saint-Pierre/ Institut polaire français 409 et projet Salmevol Institut polaire français 1041)

Les interactions hôte-parasite pour comprendre les processus invasifs et l'adaptation à l'environnement changeant des espèces subantarctiques

Le succès invasif d'un végétal ou d'un animal peut être associé à différents traits de l'espèce, les plus souvent étudiés étant ses capacités de reproduction ou la compétition avec les espèces locales pour la ressource trophique. L'immunologie, qui est une discipline majoritairement explorée dans les domaines médical ou vétérinaire (donc chez les vertébrés), est un trait moins étudié dans le domaine de l'écologie et actuellement peu exploré dans le succès invasif d'une espèce et/ou dans ses capacités à s'adapter à un habitat changeant. L'immunité est à l'interface de la relation hôte-microbes de tout être vivant : c'est elle qui va permettre de choisir, de sélectionner les microbes « bénéfiques » avec qui il est vital de s'associer (symbiose mutualiste) ou qui va éliminer les microbes « pathogènes » qui ont un impact délétère sur le pronostic vital d'une espèce. L'immunité des organismes est très sensible aux variations environnementales et son étude chez certaines espèces permet d'en faire un bio-indicateur des diverses sources de stress environnemental (changement climatique, impact anthropique) tout en révélant la santé des populations (capacité à lutter contre un pathogène) et leurs capacités d'expansion (cas des espèces invasives). Cette approche d'immunologie écologique est abordée depuis peu par des membres du Centre d'Infection et d'Immunité de l'Institut Pasteur de Lille (CIIL) (A. Tasiemski et C. Wichlacz) invitées à rejoindre les projets Subanteco (Institut polaire français 136, D. Renault) et Proteker (Institut polaire français 1044, T. Saucède) pour étudier respectivement: un petit coléoptère terrestre dont l'invasion rapide s'est faite au détriment d'insectes endémiques (Figure 5) et des vers marins qui structurent l'écosystème côtier et sont une ressource trophique non négligeable pour les poissons de fond et les oiseaux locaux (Figure 6)



◆ Figure 5 : Étude de l'immunité chez une espèce invasive *Merizodus*. Isolement et caractérisation des bactéries vivant en interactions avec l'insecte dans le cadre d'un volet du projet Subanteco (Photo Aurélie Tasiemski/ Institut polaire français 136).



◆ Figure 6 : Suivi de la santé immunitaire (capacité de réponse à une infection par un pathogène) dans le cadre du programme Proteker (Institut polaire français 1044). Prélèvement en plongée et étude au laboratoire des vers marins.

Récemment, il a pu être montré en zone non-polaire chez des espèces invertébrées prélevées in natura (et non issues d'élevage de laboratoire, ce qui peut entraîner un biais) que l'immunité peut être un marqueur très sensible aux variations/changements environnementaux (températures, pollution...) et cela à tous les niveaux de l'organisme : de la cellule, aux gènes en passant par les molécules produites (Papot et al. 2017, Cuvillier et al. 2017, Bruno et al. 2019).

Dans le cadre du projet Subanteco, il est étudié depuis peu en quoi le succès invasif de *Merizodus* mais aussi ses limites (ces insectes à l'heure actuelle ne se propagent pas au-delà d'une frontière que l'on appelle le front de migration) relèvent de l'immunité du coléoptère. Le cortège de microbes associés à l'animal (apportés potentiellement lors de son invasion) sont également étudiés afin de déterminer si l'animal ne constituerait pas un réservoir de bactéries pathogènes pour la faune locale.

Les premiers résultats montrent que les *Merizodus* qui sont en front de migration sont les plus vulnérables aux épidémies microbiennes et donc que l'immunité pourrait être un frein au processus invasif. *Merizodus* semble également être un vecteur d'agents bactériens pathogènes des vertébrés. Dans le cadre du projet Proteker, nos très récentes données sur les vers marins montrent clairement une biodiversité ainsi qu'une santé immunitaire différentielle en fonction des habitats et des sites. L'immunité semble être donc un marqueur de choix pour le suivi sur le long terme des populations de vers dont la perturbation de la biomasse peut affecter tout un écosystème.

Perspectives

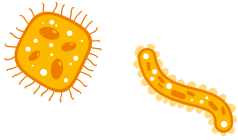
Les connaissances sur l'écologie et l'évolution des maladies infectieuses en zones polaires ont donc fait des avancées significatives ces dernières années. Le bilan des travaux a permis aussi de constater que plusieurs des résultats obtenus ont des implications dépassant les seules zones polaires (voir par exemple, Boulinier & Staszewski 2008, McCoy & Boulanger 2016, Boulinier et al. 2016). Les perspectives de développement dans ce domaine sont importantes dans le contexte du changement global.

Outre la conduite de projets de recherche innovant pour aborder des questions spécifiques sur les interactions hôte-parasite, une approche de surveillance globale des maladies infectieuses dans les écosystèmes polaires peut apporter des informations importantes sur le plan fondamental et appliqué. Un observatoire des dynamiques éco-épidémiologiques chez les populations de vertébrés dans les terres australes est ainsi en train d'être mis en place d'une façon coordonnée entre des projets de l'Institut polaire français, de la Réserve naturelle nationale des terres australes et le programme Sagir de l'Office français de la biodiversité, avec le soutien de l'Observatoire de recherche montpelliérain de l'environnement (OSU OREME) (Figure 7) Le même type d'approche pourrait être envisagé chez les invertébrés marins et terrestres.

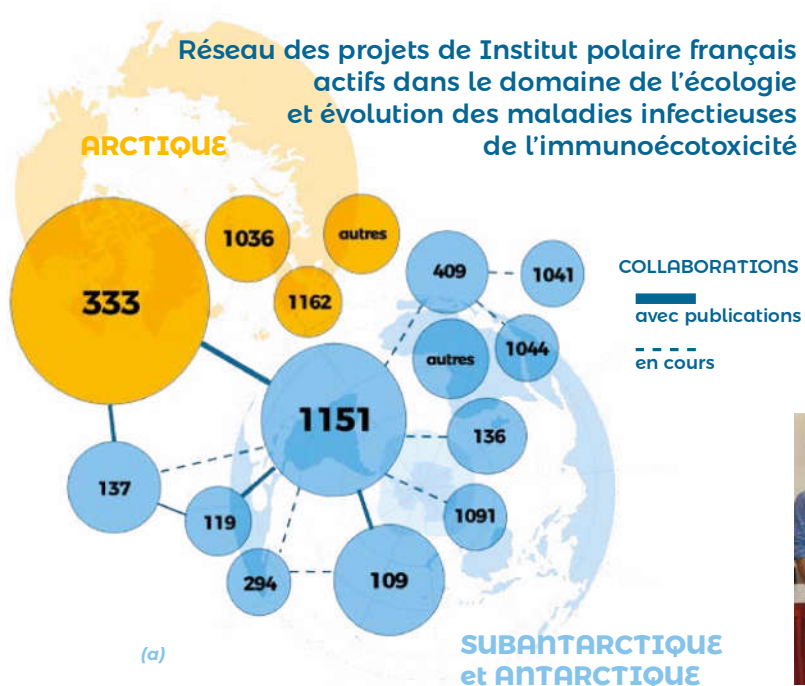
Un observatoire des risques écotoxicologiques dans les continuums eaux douces-eaux marines des îles Kerguelen est mis en place en parallèle. Les approches développées sont résolument interdisciplinaires et bénéficient de la logistique et de l'expérience acquises via l'implémentation des projets de l'Institut polaire français sur le terrain. Elles doivent s'attacher à pouvoir détecter des émergences de maladies chez les animaux sauvages et des détériorations de l'état écotoxicologique des écosystèmes, mais elles doivent aussi permettre d'acquérir des données permettant une compréhension des processus en jeu. La question des zoonoses doit aussi être abordée, certains agents infectieux pouvant être transmis de l'animal à l'homme, mais aussi inversement. Tout comme dans d'autres domaines du monitoring de la biodiversité, l'optimisation des plans d'échantillonnage en relation avec les questions posées et les moyens d'analyses disponibles doit faire l'objet d'une attention particulière (Yoccoz et al. 2001). Des efforts fait en ce sens ont déjà permis de souligner l'intérêt de combiner des approches transversales et longitudinale dans les plans d'échantillonnages (Gamble et al. 2019c).



◆ Figure 7 :
Mise en place par le projet Ecopath 1151, en coordination avec la Réserve nationale naturelle des terres australes et le réseau SAGIR de l'OFB, d'une surveillance éco-épidémiologique :
► (a) Préparation au déploiement de mallettes d'autopsies sur les districts (Photos Thierry Boulinier/ Institut polaire français 1151)
► (b) Formation de VSC et campagnards d'été à l'autopsie d'oiseaux sauvages au Laboratoire vétérinaire départemental de l'Hérault à Montpellier
► (c) Prise de sang sur un gorfou sauteur (Photo Thierry Boulinier/ Institut polaire français 1151)
Cette activité inter-projets de l'Institut polaire français rentre dans l'axe 'Interactions' de la Zone atelier antarctique et sub-antarctique (ZATA).



D'une façon générale, ces initiatives ont vocation à contribuer aux efforts faits sur le plan international sur ces problématiques, qui ont notamment été discutés lors d'un atelier spécifique coordonné entre l'International Arctic Science Committee (IASC) et le Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) qui s'est tenu au congrès polaire 2018 à Davos (Figure 8). Parmi les points évoqués, l'importance de documenter les changements associés aux activités humaines en zones polaires et les risques de dispersion d'agents infectieux entre espèces sont apparus primordiaux.



◆ Figure 8 :

Les approches transverses utilisées amènent des opportunités intéressantes de collaborations, au niveau national et international :

► (a) Représentation du réseau des interactions entre les projets de l'Institut polaire impliqués dans les études sur les parasites et pathogènes (le diamètre des cercles donne une indication du nombre d'articles publiés pendant les 10 dernières années et des travaux en cours sur ces thèmes)

► (b) Side meeting 'Polar wildlife – connecting ecology, health and disease issues in a changing world' à Polar 2018 à Davos, ayant regroupé des intervenants soutenus par l'IASC et le SCAR (Photo Fabien Mavrot).



Remerciements

Outre l'Institut polaire français et les contributions de diverses personnes aux travaux de terrain en zones polaires, nous remercions Jacques Labonne et Philippe Gaudin de l'UMR ECOBIOP (INRA, Saint-Pée sur Nivelle), Thomas Saucède de Biogéosciences (UMR 6282, CNRS – Université de Bourgogne Franche Comté), David Renault d'EcoBio (Univ. Rennes 1, CNRS UMR6553), Karen McCoy de MIVEGEC (UMR 5290, CNRS-IRD-Université de Montpellier), Torkild Tveraa de NINA (Tromsø, Norvège), Christophe Barbraud, Karine Delord et Henri Weimerskirch du CEBC (UMR 7372 CNRS – Université La Rochelle), Vincent Viblanc, Jean-Patrice Robin et Céline Lebohec de l'IPHC (CNRS – Université de Strasbourg), Hubert Gantelet et Eric Thibault de Ceva Biovac (Beaucouzé), Muriel Dietrich, Camille Lebarbenchon et Pablo Tortosa de PIMIT (UMR 9192, La Réunion), Audrey Jaeger de l'UMR ENTROPIE (Université La Réunion), Nicolas Keck du Laboratoire vétérinaire départemental de l'Hérault (Montpellier), Karin Lemberger de Vetdiagnostics (Lyon), Anouk Descors de SAGIR (OFB) pour les interactions que nous avons eu sur ces sujets et/ou leur collaboration aux travaux. Le programme Ecopath a bénéficié d'un soutien de l'ANR (EVEMATA), de la Réserve Nationale Naturelle des Terres Australes, du Labex CEMEB, de l'OSU OREME et de la Zone Atelier Antarctique (ZATA).

REFERENCES

- **Boulinier, T. & Staszewski, V. 2008.** Maternal transfer of antibodies: raising immuno-ecology issues. *Trends in Ecology and Evolution* 23: 282-288.
- **Boulinier, T., Kada, S., Ponchon, A., Dupraz, M., Dietrich, M., Gamble, A., Bourret, V., Duriez, O., Bazire, R., Tornos, J., Tveraa, T., Chambert, T., Garnier, R. & McCoy, K.D. 2016.** Migration, prospecting, dispersal? What host movement matters for infectious agent circulation? *Integrative and Comparative Biology* 56: 330-42.
- **Boulinier, T., Gamble, A., Tornos, J. & Garnier, R. 2017.** Institut polaire français ECOPATH 1151 - Circulation d'agents infectieux dans les populations de vertébrés coloniaux des terres australes : surveillance, compréhension et implications pour la gestion. Institut polaire français 2016 : *Rapport d'activité - Campagne 2016-2017 incluse*; 52-61.
- **Bourret, V., Gamble, A., Tornos, J., Jaeger, A., Delord, K., Barbraud, C., Tortosa, P., Kada, K., Thiebot, J.-B., Thibault, E., Gantelet, H., Weimerskirch, H., Garnier, R. & Boulinier T. 2018.** Vaccination protects endangered albatross chicks against avian cholera. *Conservation Letters* 11: e12443.
- **Bruno, R., Maresca, M., Canaan, S., Cavalier, J.F., Mabrouk, K., Boidin-Wichlacz, C., Olleik, H., Zeppilli, D., Brodin, P., Massol, F., Jollivet, D., Jung, S. & Tasiemski, A. 2019.** Worms' antimicrobial peptides. *Marine Drugs* 17: e512.
- **Caza, F., Betoulle, S., Auffret, M., Brousseau, P., Fournier, M. & St-Pierre Y. 2015.** Comparative analysis of hemocyte properties from *Mytilus edulis desolationis* and *Aulacomya ater* in the Kerguelen Islands. *Marine environmental research* 110:174-82.
- **Caza, F., Granger Joly de Boissel, P., Villemur, R., Betoulle, S. & Yves St-Pierre, Y. 2019.** Liquid biopsies for omics-based analysis in sentinel mussels. *Plos One* 14: e0223525
- **Chambert, T., Staszewski, V., Lobato, E., Choquet, R., McCoy, K.D., Tveraa, T. & Boulinier T. 2012.** Exposure of Black-legged kittiwakes to Lyme disease spirochetes: dynamics of the immune status of adult individuals and effects on their survival. *Journal of Animal Ecology* 81: 986-95.
- **Chang, C.M., Lebarbenchon, C., Gauthier-Clerc, M. & van der Werf, S. 2009.** Molecular surveillance for avian influenza A virus in king penguins (*Aptenodytes patagonicus*). *Polar Biology* 32: 663-665.
- **Cristofari, R., Trucchi, E., Whittington, J.D., Vigetta, S., Gachot-Neveu, H., Stenseth, N.C., Le Maho, Y. & Lebohec, C. 2015.** Heterogeneity as a genetic mixing mechanism in highly philopatric colonial seabirds. *PLoS ONE* 10: e0117981.
- **Cuvillier-Hot, V., Marylène Gaudron, S., Massol, F., Boidin-Wichlacz, C., Pennel, T., Lesven, L., Net, S., Papot, C., Ravaux, J., Vekemans, X., Billon, G. & Tasiemski, A. 2017.** Immune failure reveals vulnerability of populations exposed to pollution in the bioindicator species *Hediste diversicolor*. *Science of The Total Environment* 613-614:1527-1542.
- **Dietrich, M., Kempf, F., Boulinier, T. & McCoy, K.D. 2014a.** Tracing the colonisation and diversification of the worldwide seabird ectoparasite *Ixodes uriae*. *Molecular Ecology* 23: 3292-3305.
- **Dietrich, M., Lobato, E., Boulinier, T. & McCoy, K.D. 2014b.** An experimental test of host specialisation in a ubiquitous polar parasite: a role for adaptation? *Journal of Animal Ecology* 83: 576-587.
- **Dupraz, M., Toty, C., Noël, V., Estrada-Pena, A., Gonzalez-Solis, J., Boulinier, T., Dujardin, J.-P. & McCoy, K.D. 2016.** Linking morphometric and genetic divergence with host use in the tick complex. *Ornithodoros capensis sensu lato*. *Infection, Genetics & Evolution* 46:12-22.
- **Gamble A., Garnier R., Jaeger A., Thibault E., Gantelet H., Tortosa P., Bourret V., Thiebot J.-B., Delord K., Weimerskirch H., Tornos J., Barbraud C. & Boulinier T. 2019a.** Exposure of albatrosses to the avian cholera agent leads to a short-lived immune response: implications for disease surveillance and management. *Oecologia* 189: 939-949.
- **Gamble, A., Bazire, R., Delord, K., Barbraud, C., Jaeger, A., Gantelet, H., Thibault, E., Lebarbenchon, C., Lagadec, E., Tortosa, P., Weimerskirch, H., Thiebot, J.-B., Garnier, R., Tornos, J. & Boulinier, T. 2019b.** Predator and scavenger movements among and within endangered seabird colonies: opportunities for pathogen spread. *Journal of Applied Ecology*, sous presse.
- **Gamble, A., Garnier, R., Chambert, T., Gimenez, O. & Boulinier, T. 2019c.** Next generation serology: integrating cross-sectional and capture-recapture approaches to infer disease dynamics. *Ecology*, sous presse.
- **Gamble A., Weimerskirch H. & Boulinier T. 2020.** Seabirds blinded by ticks. *Frontiers in Ecology and the Environment*, sous presse.
- **Gasparini, J., McCoy, K.D., Haussy, C., Tveraa, T. & Boulinier, T. 2001.** Induced maternal response to the Lyme disease spirochaete *Borrelia burgdorferi sensu lato* in a colonial seabird, the kittiwake *Rissa tridactyla*. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 268: 647-650

- Garnier, R., Ramos, R., Staszewski, V., Militão, T., Lobato, E., González-Solís, J. & Bouludier, T. 2012. Maternal antibody persistence: a neglected life history trait with implications from albatross conservation to comparative immunology. *Proceedings of the Royal Society, London B* 279: 2033-2041.
- Gilg, O., Bollache, L., Afonso, E., Yannic, G., Schmidt, N.M., Hansen, L.H., Hansen, J., Sittler, B., Lang, J., Meyer, N., Sabard, B., Gilg, V., Lang, A., Lebbar, M., Haukialmi, V., Henttonen & Moreau, J. 2019. Are gastrointestinal parasites associated with the cyclic population dynamics of their arctic lemming hosts? *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife* 10: 6-12.
- Jaffal, A., Givaudan, N., Betoulle, S., Terreau, A., Paris-Palacios, S., Biagianti-Risbourg, S., Beall, E., & Roche, H. 2011. Polychlorinated biphenyls in freshwater salmonids from the Kerguelen Islands in the Southern Ocean. *Environmental Pollution* 159: 1381-1389.
- Jaffal, A., Betoulle, S., Biagianti-Risbourg, S., Terreau, A., Sanchez, W. & Paris-Palacios, S. 2015. Heavy metal contamination and hepatic toxicological responses in brown trout (*Salmo trutta*) from the Kerguelen Islands. *Polar Research* 34: 22784.
- Jaeger, A., Lebarbenchon, C., Bourret, V., Bastien, M., Lagadec, E., Thiebot, J.-B., Bouludier, T., Delord, K., Barbraud, C., Marteau, C., Dellagi, K., Tortosa, P. & Weimerskirch, H. 2018. Avian cholera outbreaks threaten seabird species on Amsterdam Island. *PLOS One* 13: e0197291.
- Kada, S., McCoy, K.D. & Bouludier, T. 2017. Impact of life stage-dependent dispersal on the colonization dynamics of host patches by ticks and tick-borne infectious agents. *Parasites and Vectors* 10: 375.
- Lebouvier, M., Laparie, M., Hullé, M., Marais, A., Cozic, Y., Lalouette, Y., Vernon, P., Candresse, T., Frenot, Y. & Renault, D. 2011. The significance of the sub-Antarctic Kerguelen Islands for the assessment of the vulnerability of native communities to climate change, alien insect invasions and plant viruses *Biological Invasions* 13:1195-1208.
- Mangin, S., Gauthier-Clerc, M., Frenot, Y., Gendner, J.-P., Le Maho, Y. 2003. Ticks *Ixodes uriae* and the breeding performance of a colonial seabird, king penguin *Aptenodytes patagonicus*. *Journal of Avian Biology* 34: 30-34.
- McCoy, K.D., Chapuis, E., Tirard, C., Bouludier, T., Michalakakis, Y., Le Bohec, C., Le Maho, Y. & Gauthier-Clerc, M. 2005. Recurrent evolution of host-specialized races in a globally-distributed parasite. *Proceedings of the Royal Society, London B* 272: 2389-2395.
- McCoy KD, Leger E & Dietrich M (2013) Host specialization in ticks and transmission of tick-borne diseases: a review. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* 3: 57
- McCoy, K.D. & Boulanger, N. 2016. *Tiques et maladies à tiques : Biologie, écologie évolutive, épidémiologie*. Ouvrage collectif, IRD Editions.
- Ouisse T., Laparie, M., Lebouvier, M. & Renault, D. 2017. New insights into the eco-biology of *Merizodus soledadinus*, a predatory carabid beetle invading the subantarctic Kerguelen Islands. *Polar Biology* 40: 2201-2209.
- Papot, C., Massol, F., Jollivet, D. & Tasiemski, A. 2017. Antagonistic evolution of an antibiotic and its molecular chaperone: How to maintain a vital ectosymbiosis in a highly fluctuating habitat. *Scientific Reports* 7: 1454.
- Schramm, F., Gauthier-Clerc, M., Fournier, J.C., McCoy, K.D., Barthel, C., Postic, D., Handrich Y, Le Maho, Y. & Jaulhac, B. 2014. First detection of *Borrelia burgdorferi sensu lato* DNA in king penguins (*Aptenodytes patagonicus halli*). *Ticks and Tick-Borne Diseases* 5: 939-942.
- Stier, A., Schull, O., Bize, P., Lefol, E., Haussmann, M., Roussel, D., Robin, J.P. & Viblanc, V. 2019. Oxidative stress and mitochondrial responses to stress exposure suggest that king penguins are naturally equipped to resist stress *Scientific Reports* 9:8545.
- Viblanc, V.A., Mathien, A., Sarau, C., Viera, V.M. & Groscolas, R. 2011. It costs to be clean and fit: energetics of comfort behavior in breeding-fasting penguins. *PLOS ONE* 6: e21110.
- Yoccoz, N.G., Nichols, J.D. & Bouludier, T. 2001. Monitoring biodiversity in space and time: concepts, methods and designs. *Trends in Ecology and Evolution* 16: 446-453.