

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PRÉPARER À PROTÉGER : LA BIOSURVEILLANCE DU MANCHOT EMPEREUR (*A. FORSTERI*)
COMME MODÈLE DE PRÉVENTION DES MILIEUX POLAIRES FACE AUX POTENTIELLES
MENACES ANTHROPIQUES ET CLIMATIQUES

ESSAI
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCE DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
JEAN-MICHEL LALIBERTÉ

FÉVRIER 2026

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce document diplômant se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév. 12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Cet essai regroupe les huit dernières années de mon parcours académique au sein de la sphère des sciences de la vie. Après des hauts ainsi qu'une multitude de bas, j'en viens au sprint final qu'est le dépôt de cet essai. La rédaction fut un processus mélancolique par un envahissement de nombreux joyeux souvenirs en lien avec mon parcours tout en me rappelant que chaque page écrite me rapproche de la fin de cette belle étape. Je n'aurais jamais cru être où j'en suis présentement et c'est majoritairement grâce aux merveilleuses personnes qui ont su me motiver, me consoler et m'écouter lors de ces longues années d'études ardues.

Je débute mes remerciements par ma copine et fiancée, Flavie Audet, qui est à mes côtés depuis mon initiation au monde de la biologie. À travers les rédactions de rapport de laboratoire, les nuits interminables à réviser et les centaines de faits amusants sur les manchots, elle a su me tenir sur un plateau d'argent vers un meilleur futur académique, professionnel et personnel. Je ne serais pas la personne ni le biologiste que je suis aujourd'hui sans son encouragement éternel. Je t'aime, Flavie.

Par la suite, je tiens à remercier mon tuteur de maîtrise ainsi que mon enseignant favoris à ce jour, Daniel Kneeshaw. Sa pédagogie, ses réflexions et son grand cœur m'ont permis de devenir non seulement un biologiste amoureux de l'écologie animale, mais un détenteur d'une maîtrise dans le domaine de mes rêves. Grâce à ce merveilleux professeur, j'ai su m'améliorer et m'amuser à pratiquer le rôle d'étudiant, de chargé de projet ainsi que de faire partie des fonctionnaires pendant un court laps de temps. Dan, merci beaucoup.

Finalement, je termine avec des remerciements envers ma famille, mes camarades de classes (principalement Vincent M-D., Pierre B. et Élisabeth A.) ainsi que les divers.es tuteurs.es qui ont fait partie de mon cheminement académique et personnel. Chacun.e d'entre vous m'ont permis de persévérer dans un domaine compétitif tout en me permettant de rêver grand pour finalement réaliser ces rêves palpitants.

Cet essai est rédigé pour vous, par vous.

Merci à tous.tes.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	II
TABLE DES MATIÈRES.....	III
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES ABRÉVIATIONS	VI
RÉSUMÉ.....	VII
INTRODUCTION.....	1
REVUE DE LITTÉRATURE	4
CHAPITRE 1 LES MENACES ANTHROPIQUES ET NATURELLES DES MILIEUX POLAIRES	4
1.1 Les types de menaces.....	4
1.2 Les rôles de la biodiversité	7
CHAPITRE 2 LA BIOSURVEILLANCE	9
2.1 La biosurveillance faunique.....	10
2.2 La gouvernance de la biosurveillance faunique en milieux internationaux	11
CHAPITRE 3 ÉTUDE DE CAS : LE MANCHOT EMPEREUR ET SON RÔLE ÉCOLOGIQUE.....	14
3.1 Description de l'espèce.....	14
3.2 Rôle écologique.....	14
QUESTION DE RECHERCHE ET OBJECTIFS	16
STRATÉGIE DE RECHERCHE	17
RÉSULTATS ET DISCUSSION	19
VOLET 1 ANALYSE DES MÉTHODOLOGIES ACTUELLES DE BIOSURVEILLANCE DU MANCHOT EMPEREUR.....	20
Collecte de données à distance.....	20
Collecte de données sur place	22
VOLET 2 L'APPLICATION DE L'ÉTUDE DE CAS DU MANCHOT EMPEREUR ET LA GOUVERNANCE DE L'ANTARCTIQUE ENVERS LA FAUNE ARCTIQUE	28
Gouvernance de l'Arctique	29
Le manchot empereur & la biosurveillance d'espèces bioindicatrices de l'Arctique.....	31
Transposition de méthodologies non-invasives du sud au nord.....	31
La réalité économique de l'Arctique.....	33
La géopolitique et le partage des données environnementales	34
BIAIS ET LIMITATION DE L'ESSAI	40
CONCLUSION.....	41
ANNEXE A MOTS-CLÉS PREMIÈRE PARTIE DE LA RECHERCHE	a
ANNEXE B ARTICLES PREMIÈRE PARTIE DE LA RECHERCHE.....	b
BIBLIOGRAPHIE	c

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Processus physique des points d'ancrage des plaquettes de glace provoquant la compaction de la calotte glaciaire.....	5
Figure 2. Synthèse de la méthodologie de recherche envers la biosurveillance du manchot empereur	18
Figure 3. Synthèse de la méthodologie de recherche de l'application de l'étude de cas du manchot empereur et la gouvernance de l'Antarctique envers l'Arctique	19
Figure 4. Concentration des plaquettes de glace autour du continent de l'Antarctique démontrant une importante baisse en hiver austral de 2023	21
Figure 5. Infrastructures de recherche du réseau INTERACT de l'Arctique.....	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Synthèse d'études scientifiques et de leurs méthodologies concernant la surveillance et l'obtention de données de biosurveillance chez le manchot empereur	26
Tableau 2. Comparaison de l'Arctique avec l'Antarctique par rapport à des facteurs biologiques, géographiques et sociaux.....	28
Tableau 3. Concentration des plaquettes de glace autour du continent de l'Antarctique démontrant une importante baisse en hiver austral de 2023	38
Tableau 4. Synthèse de la méthodologie de recherche de l'application de l'étude de cas du manchot empereur et la gouvernance de l'Antarctique envers l'Arctique	39

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

H5N1 : Hémagglutinine de type 5 et neuraminidase de type 1

HPAIV : Highly Pathogenic Avian Influenza Virus

DSM : Deep-sea mining

RÉSUMÉ

L'accentuation des menaces anthropiques et climatiques provoquent des conséquences importantes au sein d'un écosystème. Parmi les exemples concrets, on peut citer la modification du climat ainsi que la dispersion de maladies zoonotiques stimulant le déclin de la diversité animale et végétale. Afin de contrer cette tendance déclinante, un outil analytique des écosystèmes s'est vu prendre essor au début des années 2000. La biosurveillance s'impose en tant qu'outil de suivi pour la conservation des espèces via les pressions anthropiques ainsi que les changements climatiques. Cet outil consiste en l'analyse des données biologiques dont la génétique, les biomarqueurs ou bien des concentrations de contaminants chez les espèces pour quantifier l'état immédiat d'une population envers les menaces environnementales. Cet essai cherche à déterminer comment les données biologiques du manchot empereur (*A. forsteri*), peuvent être adaptées et appliquées à la conservation d'autres espèces fauniques via un protocole global et transférable de biosurveillance. Considérant le rôle d'espèce indicatrice ainsi que son rôle écologique particulier que portent le manchot empereur, le choix était relativement simple d'utiliser cette espèce à des fins de modèle pour d'autres espèces polaires. Pour ce faire, une première partie se concentrera sur une synthèse de revues, soit un total de 31 articles portant sur les diverses méthodologies de biosurveillance employées envers le manchot empereur depuis les dernières années. Cette section permet de regrouper l'information disponible sur les avancées technologiques de surveillance de l'espèce via l'emploi de véhicules aériens (drones) ainsi que des collectes de biomarqueurs sur place. La seconde partie explore puis compare les pôles, soit l'Arctique et l'Antarctique, au sein de la biosurveillance de la faune en employant le manchot empereur comme étude de cas pour l'Antarctique et des espèces similaires pour l'Arctique. L'ours polaire (*Ursus maritimus*), le morse (*Odobenus rosmarus*) et le phoque annelé (*Pusa hispida*) ont été sélectionnés comme espèces analysées au sein du territoire de l'Arctique démontrant une fragilité aux conditions climatiques en changement de l'océan Arctique. Une section porte sur la gouvernance hors du commun des deux milieux internationaux incorporant des facteurs cruciaux par rapport aux décisions de la conservation faunique et de l'emploi du territoire.

Mots-clés : Antarctique, Arctique, Biosurveillance, Bioindicateur, Biomarqueurs, Biodiversité, Changement climatiques, Conservation, CCAMLR, H5N1, Imagerie satellite, Manchot empereur, Menaces anthropiques, Océan Austral, Polaire, Surveillance aérienne,

INTRODUCTION

La biosurveillance représente un outil crucial dans la lutte pour la conservation des espèces menacées par les menaces anthropiques et naturelles à la hausse (Tan *et al.*, 2023). En analysant les biomarqueurs, les données génétiques, et les concentrations de polluants dans les tissus et les fluides des animaux, les scientifiques peuvent évaluer l'état de santé des populations et l'impact direct des menaces environnementales (Tan *et al.*, 2023). Cette approche permet de détecter précocement les effets du réchauffement, de l'acidification des océans, et/ou de la perte d'habitat, bien avant qu'ils ne deviennent apparents (Trathan *et al.*, 2015). Par exemple, la surveillance des plumes d'oiseaux peut révéler des niveaux de mercure et d'autres toxines qui témoignent de la contamination de leur chaîne alimentaire, affectée par le déclin des plaquettes glaciaires (Trathan *et al.*, 2015; Wells, 1999). En fournissant des données précises et quantitatives, la biosurveillance aide à orienter les politiques de conservation, à prioriser les zones de protection, et à suivre l'efficacité des mesures de gestion, offrant ainsi une perspective scientifique solide pour la survie des espèces les plus vulnérables.

Les milieux polaires tels que l'Antarctique sont des territoires ardues à protéger par leur climat extrême, leur isolement ainsi qu'au fait que ces endroits n'appartiennent pas qu'à un seul unique pays. En effet, l'Antarctique est gouverné depuis 1959 via le Traité de l'Antarctique, regroupant à ce jour 58 pays y compris le Royaume-Uni, la Russie, la Chine, et l'Argentine (Haward et Jackson, 2023). Également, le traité sert de cadre géographique promouvant la recherche scientifique sur le continent tout en excluant toutes sortes d'activités militaires et d'extraction de ressources naturelles (*The Antarctic Treaty*). Cela dit, la biosurveillance de cet endroit rencontre un enjeu de responsabilité provenant de la garde partagée du territoire par chacun des signataires du traité (Chown et Brooks, 2019). Cet essai explore les manières de faire au sein de ces milieux en se basant sur une étude de cas, soit le manchot empereur de l'Antarctique alors que les régions polaires subissent les plus grandes conséquences des changements climatiques par rapport au reste du monde (Nevitt et Percival, 2018).

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) sont à l'origine d'altérations profondes des systèmes naturels de la planète, et l'Antarctique n'échappe pas à ces perturbations (Tombeng et Masjud, 2024). Le réchauffement climatique modifie la chimie des océans, élève leur niveau et accentue les variations de température, contribuant ainsi à la fonte accélérée des plates-formes glaciaires flottantes (ou *ice shelves*) (Jenouvrier *et al.*, 2021). Ces formations de glace, essentielles au cycle de vie de plusieurs espèces clés, servent également de site de reproduction (Trathan *et al.*, 2020). Leur disparition progressive entraîne une fragmentation des habitats et perturbe les interactions écologiques clés, notamment les chaînes alimentaires. Un des effets indirects majeurs est la diminution des populations de krill antarctique (*Euphausia superba*), ressource alimentaire fondamentale pour de nombreuses espèces marines. Cette baisse provient majoritairement de l'altération de l'océan Austral via son réchauffement puis l'acidification de celui-ci ce mène à des conditions défavorables pour des espèces dépendantes de la glace, comme le krill qui subit une importante baisse d'abondance (Flores *et al.*, 2012; Krüger *et al.*, 2021). La raréfaction de cette base trophique entraîne des conséquences en cascade sur les écosystèmes de l'océan Austral. Depuis quelques années maintenant, la péninsule Ouest de l'Antarctique (WAP) est également imprégnée de cas de la grippe aviaire (H5N1 – HPAIV H5 Clade 2.3.4.4b), un virus contribuant au déclin de multiples espèces (Banyard *et al.*, 2024; Muñoz *et al.*, 2024). La H5N1 aurait été recensé pour la première fois en 1996 dans la province de Guandong en Chine chez des oies qui à leur tour auraient transmis le virus à des fermes alimentaires qui aurait mené à des infections fatales chez des humains en 1997 (Lycett *et al.*, 2019). Responsable de la mort de plus de 280 millions d'oiseaux dans le monde depuis 2021, ce clade du virus a eu un impact particulièrement sévère sur les espèces appartenant à l'ordre des Procellariiformes (Banyard *et al.*, 2024). L'arrivée du virus en Antarctique semble être parvenu par la transmission de celui-ci entre diverses espèces d'oiseaux partant de l'Amérique du Sud jusqu'aux îles subantarctiques pour finalement atteindre la péninsule lors de leur migration annuelle (Banyard *et al.*, 2024).

Le manchot empereur (*Aptenodytes forsteri*) est une espèce emblématique et bioindicatrice des vastes étendues glacées du continent polaire. Reconnaissable par son plumage noir et blanc orné de taches jaune-

orangées sur la nuque, cet oiseau aquatique est parfaitement adapté aux conditions extrêmes de son habitat. Les tempêtes glaciales, les vents polaires et les températures extrêmes font partie de son quotidien. Toutefois, malgré ces adaptations remarquables, les populations de manchots empereurs montrent des signes inquiétants de déclin, une tendance directement liée au changement climatique et non aux rigueurs naturelles de leur environnement (Tombeng et Masjud, 2024). La vulnérabilité croissante du manchot empereur face aux changements climatiques souligne l'urgence d'actions concrètes pour préserver, non seulement cette espèce emblématique, mais aussi les fonctions écosystémiques critiques de l'Antarctique.

REVUE DE LITTÉRATURE

CHAPITRE 1

LES MENACES ANTHROPIQUES ET NATURELLES DE L'ANTARCTIQUE

Bien qu'isolé des autres continents, l'Antarctique et son océan environnant ressentent largement les impacts des changements climatiques tout autant que des actions anthropiques nuisant à l'état du septième continent. Ces pressions sont majoritairement causées par les résultats indirects du réchauffement climatique, qui à son tour provoque une cascade d'effets venant altérer tout écosystème (Josey *et al.*, 2024). De plus, les milieux polaires n'accueillent pas une aussi grande diversité d'espèces qu'ailleurs sur la planète à cause de leurs conditions climatiques extrêmes (Josey *et al.*, 2024). On y retrouve une principalement des espèces fauniques aquatiques et marines passant de baleines à bosse (*Megaptera novaeangliae*) à de microorganismes tels que le krill antarctique (*Euphausia superba*) (Barbraud et Weimerskirch, 2001). La faune antarctique requiert une adaptation hautement spécialisée afin de côtoyer ce milieu, au détriment d'une plasticité d'adaptation envers des menaces inconnues (Barbraud et Weimerskirch, 2001). Les principales menaces envers l'Antarctique regroupent les conséquences des changements climatiques, soit le réchauffement de l'Océan Austral, la fonte des glaces, la hausse des niveaux des océans puis l'acidification de celles-ci (Brooks *et al.*, 2018). D'autres menaces anthropiques telles que la surpêche puis le tourisme s'intègrent également aux enjeux de conservation du continent de glace (Brooks *et al.*, 2018). Alors que le déclin de biodiversité est prévu s'intensifier dans les deux prochaines décennies, les espèces de l'Antarctique se trouvent dans une situation particulièrement précaire. Ce chapitre fera un survol des nombreuses menaces à la hausse pour ces espèces.

1.1 Les menaces reliées aux changements climatiques

1.1.1 Réchauffement climatique et la fonte de glace

Le réchauffement de la température de l'océan Austral provoquerait d'importantes répercussions sur l'écosystème. En effet, la surface blanche de la glace des milieux polaires renvoie le rayonnement solaire

hors de l'atmosphère et ainsi contribue à conserver le climat froid, soit par processus d'albedo (Swathi *et al.*, 2025). Une surface foncée, telle que la mer, absorbe les rayons solaires puis conserve cette chaleur au lieu de la refléter, contribuant ainsi au réchauffement d'un milieu (Swathi *et al.*, 2025). On observe ainsi une boucle de rétroaction positive entre le réchauffement climatique ainsi que la fonte de glace des milieux polaires. Cette boucle de rétroaction se voit être un cercle vicieux. L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) accélère le réchauffement planétaire, ce qui entraîne la fonte de la glace et de la neige (Swathi *et al.*, 2025). Cette fonte réduit l'albédo de la Terre ce qui fait que les océans et le sol, plus sombres, absorbent davantage de chaleur, augmentant encore plus la température.

1.1.2 Hausse des niveaux des océans

La fonte des plateformes de glace, qui s'étendent depuis la marge du continent Antarctique, ne contribue pas directement à l'élévation du niveau marin, car ces structures flottent déjà sur l'océan (LaRue *et al.*, 2024). Leur disparition, cependant, entraîne des conséquences indirectes majeures sur l'équilibre des masses de glace. Les plateformes

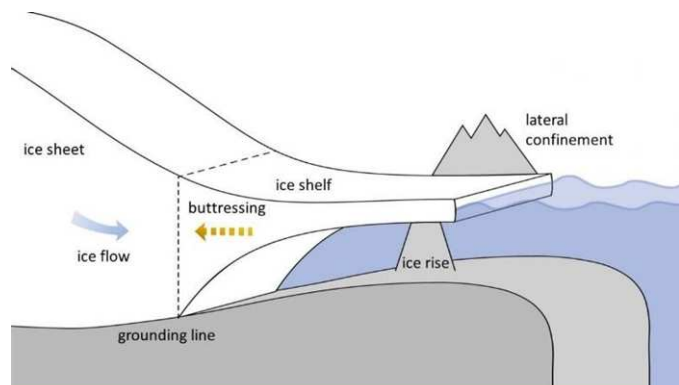


Figure 1 : Processus physique des points d'ancrage des plaquettes de glace provoquant la compaction de la calotte glaciaire.

de glace agissent comme des contreforts et des points d'ancrage pour la calotte glaciaire continentale (Barbraud et Weimerskirch, 2001). Cet ancrage est assuré par l'adhésion des plateformes à des points d'appui tels que des îles ou des hauts-fonds. Cette configuration crée une pression en retour sur la calotte glaciaire, qui restreint son écoulement vers l'océan. La désintégration de ces plateformes, causée notamment par le réchauffement de l'océan, libère cette contrainte mécanique. Le relâchement de cette force de retenue accélère alors l'écoulement des glaciers, augmentant ainsi leur contribution directe à l'élévation du niveau des océans (Barbraud et Weimerskirch, 2001). Cette augmentation contribue à la déstabilisation de

l'écosystème marin en agissant comme amplificateur de risques en rendant le milieu plus vulnérable à d'autres menaces présentes et à venir, comme l'acidification des océans (Thomas *et al.*, 2004).

1.1.3 L'acidification des océans et surpêche

La compréhension de la relation entre le krill et l'Antarctique est essentielle pour saisir l'impact de l'acidification des océans sur l'oiseau. Le krill (*Euphausia superba*) joue un rôle crucial dans le cycle du carbone. En se nourrissant de phytoplancton, il absorbe le carbone atmosphérique. Ses déjections, plus denses que l'eau, descendent au fond de l'océan et y séquestrent le carbone. Le krill est aussi la principale source de nourriture pour de nombreuses espèces marines, y compris le manchot empereur (Ainley et Wilson, 2024). L'augmentation du CO₂ atmosphérique provoque une acidification de l'océan, qui absorbe une quantité plus importante de ce gaz. Cela entraîne une dégradation des coquilles et des squelettes calcaires des organismes s'expliquant par la réduction importante d'ions carbonate (CO²⁻) (Bednaršek et al., 2012). Des études ont démontré que le développement du krill peut être perturbé jusqu'à environ 90 % dans des conditions plus acides (Kawaguchi et al., 2013). Les prévisions de l'IPCC IS92a estiment que l'acidité, en pression partielle, pourrait atteindre 1400 µatm pCO₂ dans les habitats du krill d'ici 2100 (Kawaguchi et al., 2013). Sachant que le point de basculement de l'acidité pour certains écosystèmes est de 450 µatm pCO₂ et que les conditions actuelles sont d'environ 380 µatm pCO₂, le risque est imminent (Heinze et al., 2021). Les conditions de l'acidification de l'océan et la surpêche sont deux facteurs clés dans la réduction de la biomasse du krill. La dégradation du krill, qui est à la base de l'alimentation du manchot empereur et un élément clé de la séquestration du carbone, a un impact direct sur le déclin de cette espèce (Ainley et Wilson, 2024). La surpêche commerciale date des années 1970 dans les écosystèmes marins de l'Antarctique où le krill est vu comme de l'or en pleine mer (*Antarctic and Southern Ocean Coalition*, 2024). Étant à la base de la chaîne trophique de son milieu, la surpêche du krill présente d'importantes conséquences pour tout le continent. Pour les humains, le krill représente une source importante de nourriture pour les aquacultures ainsi que pour la consommation gastronomique anthropique (Brooks *et al.*, 2018). Autrefois, plus de 500,000 tonnes de krill furent pêchées par année dans les débuts

des années 1980 alors que l'on observe un taux d'environ 100,000 tonnes/année à ce jour (Brooks *et al.*, 2018). Une importante baisse fut observée dans les premières années des années 1990 suivant le retrait des activités soviétiques dans cet écosystème (*Overfishing*, s. d.). Cela dit, depuis maintenant plus de 10 ans, les activités de surpêche illégales sont en plein essor par des groupes importants où les quotas de pêche ne sont pas respectés tout autant que les zones de conservation où la pêche y sont interdite (Sumaila *et al.*, 2020). Bien que le krill soit très prisé par ces groupes, d'autres espèces comme la légine australe (*Dissostichus eleginoides*) furent surexploitées dès que la demande anthropique était présente (Sumaila *et al.*, 2020). Au travers de la pêche, des milliers d'oiseaux de mer tels que des albatros et des pétrels ont succombés via noyades et blessures provenant des filets de pêche industrielle (Sumaila *et al.*, 2020). Cela dit, du 20 au 31 octobre avait lieu la 44^e rencontre du CCAMLR portant sur la conservation de l'océan Austral où celle-ci ne fut en mesure de rehausser les aires de conservation puis de limiter la pêche à la hausse du krill antarctique (CCAMLR-44 | *Meetings*, 2025). Ce résultat est identique à la rencontre précédente où la Russie et la Chine n'ont pas voté en faveur de l'application de ces nouvelles restrictions, soit démontrant une des lacunes de la gouvernance de l'Antarctique en guise de conservation du continent (CCAMLR-44 | *Meetings*, 2025).

1.2 Autres types de menaces

1.2.1 Zoonoses

Considérant l'éloignement de l'Antarctique aux autres continents ainsi que son climat, il n'y a pas de zoonoses originaires du continent glacial. On observe un processus inverse, soit la zooanthroponose, où les humains servent d'intermédiaires par la transmission de maladies vers une population faunique (Cerdà-Cuéllar *et al.*, 2019; Tan *et al.*, 2023). Des oiseaux marins, traversant l'océan Austral pour atteindre le continent de l'Antarctique peuvent avoir été infectés de ces maladies puis les transmettre à leur tour à d'autres espèces fauniques auxquelles ces oiseaux côtoient. Entre 2008 et 2011, 666 oiseaux de mer regroupant 24 espèces ont été analysés où trois cas présentaient des maladies transmises par l'humain (*Salmonella serovar*, *C. jejuni*) (Cerdà-Cuéllar *et al.*, 2019). Depuis quelques années, le virus de la grippe

aviaire (HPAI H5N1 clade 2.3.4.4b) décime les populations fauniques aviaires à travers le monde. Jusqu'en 2023, l'Antarctique et l'Océanie étaient toujours intouchés par cette lignée de ce virus, puisque quelques cas de clades divers de H5N1 furent identifiés dans le passé, en Antarctique (León *et al.*, 2025). C'est le 23 octobre 2023 que le premier cas en Antarctique a été recensé via l'analyse PCR sur Bird Island dans le sub-Antarctique (SCAR.org). Depuis, on retrouve plusieurs colonies d'oiseaux testant positifs pour le virus tout en observant un énorme taux de mortalité chez diverses espèces du continent (León *et al.*, 2025). D'une autre étude, 115 individus ont été analysés puis 9 d'entre eux étaient porteurs, dont 8 manchots adélie (*Pygoscelis adeliae*) et 1 cormoran antarctique (*Leucocarbo bransfieldensis*) (León *et al.*, 2025). Selon les données les plus récentes, le virus est contenu dans la péninsule de l'Antarctique et n'a pas été en mesure d'atteindre la mer de Ross ainsi que les autres colonies d'oiseaux de mer à l'ouest du continent (León *et al.*, 2025). Cela dit, le virus consiste en l'une des plus grandes menaces présentes sur le continent.

CHAPITRE 2

LA BIOSURVEILLANCE FAUNIQUE

Un outil multifactoriel comportant sur la prévention opposant des menaces potentielles et présentes dans un milieu afin de protéger la population humaine (Salines, 2012). En effet, ce dernier se définit tel que le processus de collecte, d'intégration, d'interprétation et de communication de données sur toutes sortes de menaces portant sur le bien-être humain tout autant que celui des espèces animales et végétales (Tan *et al.*, 2023). Les diverses données à analyser portent sur une multitude de facteurs environnementaux incluant des menaces infectieuses ou bien toxiques, le suivi de populations via les taux de natalité et de mortalité, l'immigration et émigration de population, l'état d'un milieu prenant en compte l'état de l'eau, de la nourriture, la production agricole ainsi que la qualité de l'air, par exemple (Tan *et al.*, 2023). La biosurveillance cherche entre autres à veiller sur l'environnement, question de gérer efficacement et rapidement une menace importante avant même que celle-ci puisse nuire à un milieu et à l'équilibre écosystémique de celui-ci (Wagner *et al.*, 2006). De plus, cet outil est également employé pour suivre les plus petites populations d'espèces menacées au sein d'un territoire (Wagner *et al.*, 2006). Des données précises sur la taille et l'évolution des populations sont essentielles à la conservation. En effet, elles permettent de quantifier les espèces et d'analyser les dynamiques interspécifiques afin de prédire les tendances futures de ces populations. Ceci permet ainsi d'agir selon les besoins environnementaux de cette espèce (Tan *et al.*, 2023). Aujourd'hui, la biosurveillance est un outil international que l'on retrouve aux quatre coins de la planète en guise de conservation de la biodiversité puis de la protection de la population humaine (NatureServe, 2025).

La prochaine section portera sur deux aspects distincts de la biosurveillance faunique. Une brève introduction du sujet sera suivie du premier aspect portant sur la gouvernance et la responsabilité d'un pays envers la biosurveillance de ses multiples populations humaines, animales et végétales. Le second aspect porte sur l'importance de personnaliser la méthodologie appliquée envers le sujet à surveiller, soit un défi

d'envergure du côté d'espèces éloignées, moins populaires et moins importantes aux yeux de la majorité de la population.

2.1 La biosurveillance faunique

La biosurveillance faunique représente l'analyse de données environnementales d'espèces animales et de leurs variabilités afin de détecter précocement des anomalies d'envergure au sein d'une espèce ou d'un milieu (Salines, 2012; Tan *et al.*, 2023). Elle a pour mission d'informer les chercheurs.es de manière continue permettant d'élaborer des plans de conservation d'une espèce menacée tout en favorisant la prise de décisions adaptée à la situation présente chez la démographie impliquée (Tan *et al.*, 2023). Cet outil procure une vaste étendue de données collectées sur un long laps de temps permettant d'analyser de fond en comble les variabilités des facteurs observés et ainsi la conception de mesures d'atténuations et de conservation avant d'atteindre un point de non-retour (Tan *et al.*, 2023). Normalement, les variables observées comportent les déplacements, la dispersion, la répartition des individus ainsi que les hausses et les baisses de population, soit des tendances similaires au fil des années par rapport à des changements environnementaux (NatureServe, 2025).

2.1.1 La biosurveillance faunique personnalisée

Un des grands défis de la biosurveillance porte sur l'application d'une méthodologie personnalisée à ce qui est recherchée au sein de cette même surveillance. En d'autres mots, les biomarqueurs observés au sein d'une population d'ours polaires en Arctique ne conviendront pas à la surveillance d'une population d'ours noirs retrouvée en forêt boréale du Québec, par exemple. Selon NatureServe, une ONG de conservation animale et aussi l'une des pionnières de la biosurveillance faunique, les facteurs à considérer lors de la biosurveillance de l'ours polaire sont principalement reliés à la fonte des banquises, aux conditions météorologiques, aux taux de naissance et de mortalité (NatureServe, 2025). Tandis que l'ours brun ne se trouve pas dans un milieu polaire et n'a donc aucune nécessité à surveiller les mêmes facteurs environnementaux, mais bonifie d'une surveillance de son taux de naissance et de mortalité, tout comme

l'ours polaire (NatureServe, 2025). La grande variabilité de facteurs à prendre en considération contribue à la lourde tâche qu'est une biosurveillance adéquate.

2.1.2 La gouvernance de la biosurveillance faunique

En ce qui concerne la gouvernance au sein des pays par rapport à la biosurveillance, celle-ci est entreprise habituellement par les ministères de l'environnement ou bien par l'entremise d'instituts de recherches spécialisées (Tan *et al.*, 2023). Au Canada, la biosurveillance faunique est accomplie par Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) en collaboration avec d'autres organisations répertoriées sur son territoire telles que le Réseau Canadien de Biosurveillance Aquatique (RCBA) (Canada, 2015). On retrouve aussi un regroupement de données de biosurveillance chez NatureServe, portant sur les espèces végétales et animales en Amérique du Nord principalement (NatureServe). Un autre exemple de gouvernance de biosurveillance est celui de la France où depuis 2009, où l'on a confié aux ministères de l'environnement la mission de mener un programme pluriannuel de biosurveillance (PNBS) (Santé Publique France, 2021). D'autres groupes se joignent aux ministères tels que Réseau SAGIR et la Plateforme ESA (Santé Publique France, 2021). Chaque pays a pour rôle de surveiller et de récolter les données pour sa propre faune et sa flore afin de protéger sa biodiversité tout autant que sa population humaine des menaces possibles.

2.2 La gouvernance de la biosurveillance faunique en milieux internationaux

2.2.1 Les océans

Les milieux internationaux tels que les océans, l'Arctique et l'Antarctique sont des endroits requérant une conservation plus complexe par le fait même qu'ils n'appartiennent pas à une seule autorité (Chown et Brooks, 2019). Les océans sont parsemés de lois et de directives scientifiques afin de conserver la biodiversité marine provenant d'organisations réputées comme Les Nations Unies (UN), NOAA et Océans Canada. Cela dit, les océans sont surveillés selon les besoins et les espèces par divers centres de recherche

Ainsi que des entités gouvernementales, similairement à ce qui est mentionné plus haut (Brooks *et al.*, 2024).

2.2.2 Les régions polaires, l'Arctique et l'Antarctique

Cependant, l'Arctique et l'Antarctique se trouvent entre les deux catégories antérieures, n'appartenant pas à un seul pays (ASOC, 2024). Toutefois, l'Arctique se dote de huit pays contrôlant diverses régions économiques exclusives du territoire, voir des zones (ZÉE) s'étendant jusqu'à une distance maximum de 200 miles (370,4km) des côtes des pays respectifs (WWF, 2024). Ces zones, créées par la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer en 1982, offrent le droit d'exploiter et explorer le milieu tout en s'assurant de respecter les lois de préservation provenant d'une multitude de programmes scientifiques et politiques internationaux tels que le Code Polaire et l'Arctic and Northern Policy Framework du Canada. (RCAANC, 2022). En ce qui concerne l'Antarctique, près de 60 pays ont signé le Traité de l'Antarctique, créé en 1959 afin de conserver le continent comme étant « une réserve naturelle dédiée à la paix et la science » (ASOC, 2024). Le traité assure une protection accrue des zones marines ainsi qu'une interdiction envers les activités d'exploitation ainsi que toutes activités militaires (ASOC, 2024). La gouvernance prend en compte 29 pays sur les 58 lors de la prise de décision, soit un statut discerné aux pays ayant grandement contribué aux avancées scientifiques de l'Antarctique, dont leur statut de parties consultatifs. Le SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) est une des grandes organisations de la recherche scientifique de ce continent, explorant divers sujets biologiques, géologiques et multidisciplinaires (SCAR, 2025). Le Canada et les États-Unis mènent également des programmes de recherche en Antarctique promouvant les valeurs du Traité de l'Antarctique. En effet, on constate un partage international de ressources scientifique, d'outils de surveillance à distance et de données entre les centres de recherche, les universités et les organisations. On compte près de 70 stations de recherche sur le territoire permettant d'entreprendre des projets de recherche d'envergure par plusieurs équipes de divers pays (Johansson et Callaghan, 2025). Cette coopération est de mise envers les valeurs du traité signé il y a plusieurs décennies, cependant le manque de gouvernance propre ainsi que les tensions géopolitiques à la

hausse dont on peut observer dans la course à l'Arctique, sont des enjeux pouvant mettre la biodiversité dans une situation critique principalement par rapport à des activités minières comme le deep-sea mining ainsi que la hausse de navires de transports dans les eaux de l'Arctique (Willaert et Soete, 2025). De plus, les enjeux économiques et géopolitiques découragent les nations de l'Arctique à coopérer sur les enjeux environnementaux par le fait même que les pays ne veulent pas divulguer cette information par crainte de répercussions néfastes sur leur image économique (Willaert et Soete, 2025).

CHAPITRE 3

LE MANCHOT EMPEREUR ET SON RÔLE ÉCOLOGIQUE

3.1 Description de l'espèce

Le manchot empereur (*Aptenodytes forsteri*) est la plus grande et la plus volumineuse des 18 espèces de manchots identifiées à ce jour (Le Maho, 1977). L'oiseau d'environ 115cm de haut a délaissé l'habileté du vol afin de se vêtir d'un manteau de plumes lui permettant de survivre au froid glacial de son milieu (Le Maho, 1977). De plus, son plumage s'est spécialisé pour un tel mode de vie où ces plumes portent également des capacités d'imperméabilité lui donnant la capacité de nager élégamment tout en conservant sa chaleur (Le Maho, 1977). On observe aucun signe de dimorphisme sexuel chez le manchot empereur, soit une absence de différences physiques entre les mâles et les femelles (WWF, 2022). Aussi, les réserves de graisses sont nombreuses et cruciales pour la conservation de chaleur. Finalement, les nombreux individus d'une colonie de manchots se collent également les uns contre les autres pour se garder au chaud (Le Maho, 1977).

3.2 Rôle écologique

Le manchot empereur se distingue d'autres espèces comme le manchot papou (*Pygoscelis papua*) par son habitat, car il vit sur les plateformes de glace de l'Antarctique et non sur la terre ferme. Les plus grandes colonies se trouvent près de la mer de Ross, au sud du continent, et de la mer de Weddell que l'on retrouve au nord-ouest (Jenouvrier et al., 2012).

Le cycle de reproduction du manchot empereur est unique car il se déroule pendant l'hiver austral, soit de mars à octobre. Durant cette période, les manchots quittent l'océan Austral où ils se sont nourris pour rejoindre leurs sites de reproduction. Bien que la reproduction soit monogame, la fidélité entre partenaires n'est que d'environ 15 % par année (Jenouvrier et al., 2012). Une fois que la femelle a pondu un seul œuf,

elle retourne en mer pour se nourrir, soit un périple de plusieurs jours voire quelques semaines. Le mâle, quant à lui, incube l'œuf (Trathan *et al.*, 2015). À son retour, la femelle prend la relève pour nourrir le jeune, tandis que le mâle retourne en mer pour s'alimenter. Ce cycle de nourrissage se répète environ six fois avant que le jeune manchot ne soit assez mature pour se débrouiller seul pendant l'été austral (Trathan *et al.*, 2015). Les manchots adultes reproduisent ce cycle chaque année, mais seule la reproduction des individus de 5 ans et plus a lieu (Jenouvrier *et al.*, 2012).

Le manchot empereur représente l'un des grands prédateurs de l'échelle trophique du continent de l'Antarctique, se concentrant principalement par la chasse envers des petites proies aquatiques (poissons, calmars et krill). Considérant le rôle clé que joue le krill antarctique (*E. superba*) au sein de son milieu, la chaîne trophique dépend extensivement de sa présence puis de sa biomasse. En effet, le phytoplancton détient une des biomasses les plus volumineuses au monde, concrétisant son importance au sein de l'Antarctique. De plus, non seulement le manchot empereur est un prédateur crucial afin de contrôler les populations d'autres espèces, il joue également le rôle de proie pour d'autres prédateurs polaires tels que les orques et les loups de mer (Le Maho, 1977). Étant une espèce emblématique, la surveillance et l'analyse du manchot empereur permet d'évaluer l'état de l'Antarctique par les variations des populations, le taux de naissance, les mortalités ainsi que le déplacement des diverses colonies sur son territoire (Fretwell *et al.*, 2012). Ces facteurs sont directement liés à l'état de la glace ainsi que ses plaquettes tout autant que d'autres facteurs variés.

QUESTION DE RECHERCHE ET OBJECTIFS

Les menaces accélérant le déclin de la biodiversité sont nombreuses et il s'avère donc crucial d'être équipé d'une méthodologie de biosurveillance adaptée à l'espèce observée ainsi qu'à son milieu. L'essai aura pour but de tenter de répondre à la question suivante :

Comment l'étude de cas du manchot empereur et la gouvernance de l'Antarctique permettraient d'élaborer une méthodologie de biosurveillance afin de conserver davantage les espèces fauniques de l'Arctique ?

Ce questionnement encadre également divers objectifs scientifiques :

- Décrire et évaluer les différentes méthodologies de biosurveillance employées par de nombreuses études portant sur le manchot empereur afin d'appliquer ces notions vers un milieu polaire retiré ainsi que ses espèces adaptées dans un but de conservation.
- Renseigner davantage la population par rapport à l'importance de la conservation du manchot empereur.
- Déterminer les limites des implications anthropiques via biosurveillance lorsque l'espèce n'est pas en mesure d'être conservée réalistiquement.

STRATÉGIE DE RECHERCHE

PARTIES I ET II

La méthodologie se base sur le cadre méthodologique d'Arksey et O'Malley en prenant forme d'une revue de littérature à titre de « scoping review » (Arksey et O'Malley, 2005). La revue se concentre sur l'élaboration des mots-clés les plus retrouvés au travers de divers articles portant sur un sujet spécifique afin d'énumérer les notions importantes de celui-ci. Ces mots-clés prendront la forme de variables au sein d'une équation de recherche qui sera employée à des fins de faire ressortir les articles scientifiques portant sur ces notions variées. Ces articles donnent naissance à une compilation de connaissances académiques sur un sujet niche de façon efficace puis rapide. Par la suite, ces multiples articles seront analysés afin d'énumérer les limites et lacunes que chacune des méthodologies présentent en guise de réponses à la question de recherche.

Un moteur de recherche a été utilisé afin de collecter l'information par rapport aux mots-clés et l'équation. Le moteur de recherche sélectionné est **Google Scholar** par rapport à sa simple utilité ainsi qu'une grande base d'articles scientifiques. De plus, le logiciel Zotero fut utilisé afin de faire ressortir les mots-clés via la première recherche d'articles n'utilisant pas une méthodologie planifiée. Par ce logiciel, une dizaine d'articles ont été mis de l'avant portant sur les différentes méthodologies employées par une multitude de chercheurs.es afin de surveiller le manchot empereur. De plus, l'équation de recherche contient également des mots-clés de tri afin de mener à une recherche approfondie excluant certaines notions divergeant du sujet au sein du moteur de recherche. Des opérateurs booléens (OR, AND, NOT) ont également été employé en guise de connectivité entre les mots-clés. Une fois l'équation de recherche élaborée, cette dernière fut acheminée dans Google Scholar. Un filtrage des articles initiaux a eu lieu afin d'obtenir un nombre total d'articles spécifiques au sujet de recherche. Le même processus a eu lieu pour la deuxième partie de la section suivante. Dans ce cas-ci, le sujet portait davantage sur l'application des notions sur le manchot

empereur envers d'autres espèces possédant potentiellement un mode de vie au sein d'un milieu similaire au manchot.

Volet 1 : Analyse des méthodologies actuelles de biosurveillance du manchot empereur

L'équation de recherche créée à partir des mots-clés en lien avec le sujet de recherche a donné une multitude de résultats selon le moteur de recherche (figure X). Les mots-clés sont présentés en annexe 1 à la fin du texte. Seulement les articles concordant avec le sujet défini étaient conservés menant à une réduction accrue du nombre initial. Un filtre de recherche additionnel par rapport à l'année de publication priorise des articles à jour. Ce filtre limitait la recherche d'articles entre 2015 et 2025 afin d'avoir des données relativement récentes puis à jour. Finalement, seulement les articles de revue révisés par des pairs étaient considérés pour cet essai afin d'avoir une synthèse des diverses méthodologies employées envers la biosurveillance du manchot empereur dans les dernières années. Lors de la rédaction, d'autres articles de recherche ont été cités afin d'élargir sur les connaissances et les méthodologies utilisées.

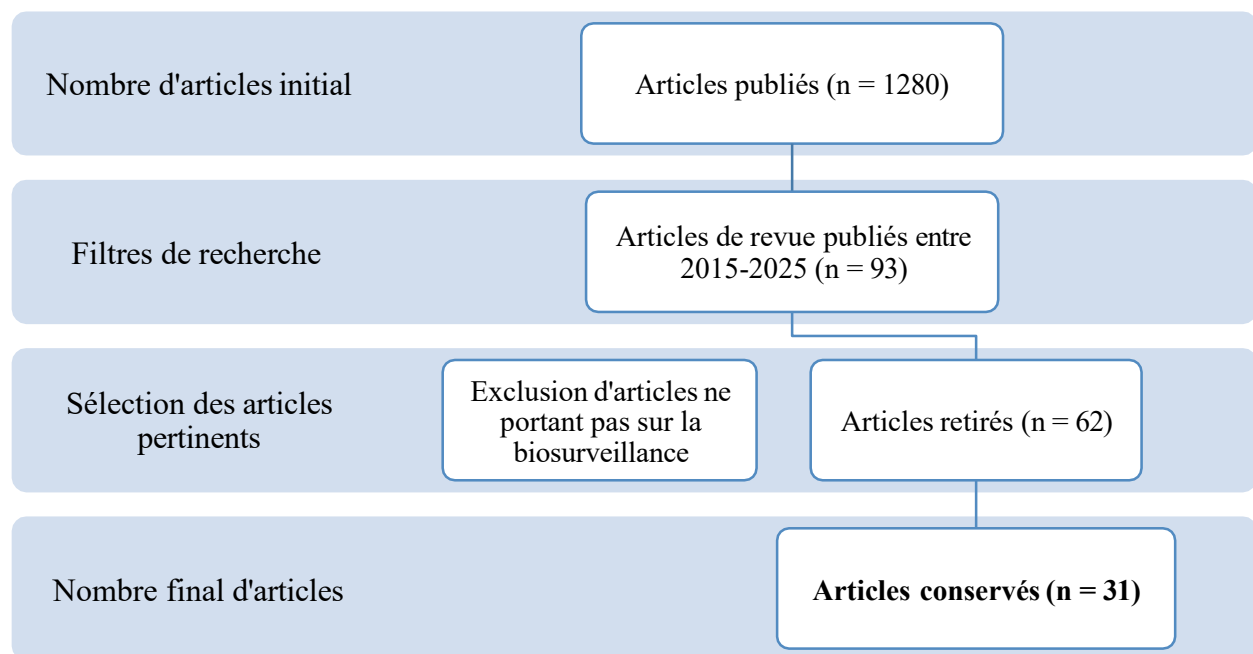


Figure 2 : Synthèse de la méthodologie de recherche envers la biosurveillance du manchot empereur

Volet 2 : Application du modèle du manchot empereur et de la gouvernance de l'Antarctique envers l'Arctique

Une fois de plus, l'échantillonnage initial, obtenu via une équation de recherche à partir de mots-clés (voir annexe 2), a généré une quantité importante de résultats (Figure 3). Ces derniers ont été rigoureusement filtré pour assurer la qualité et la pertinence par rapport au sujet de l'essai. Premièrement, seuls les articles directement liés au sujet ont été conservés. Deuxièmement, un filtre temporel a été appliqué, limitant la recherche aux publications parues entre 2015 et 2025. Enfin, seuls les articles ayant subi une évaluation par les pairs ont été retenus, garantissant ainsi la validité et la robustesse des données exploitées pour cet essai.

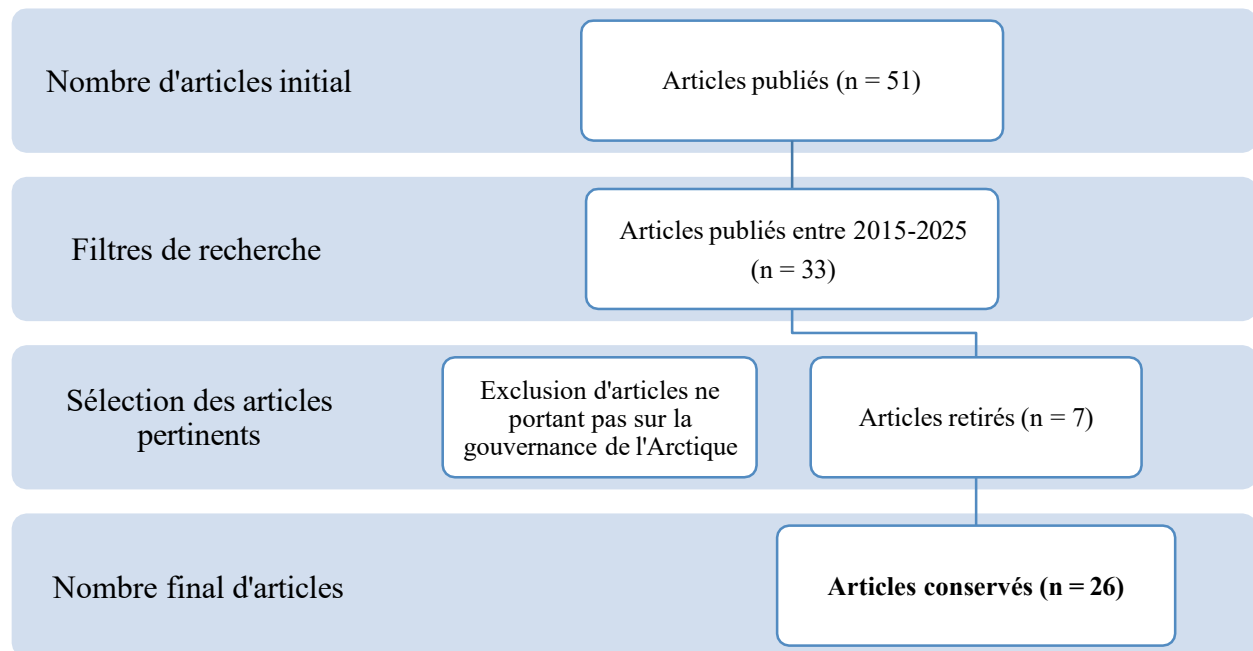


Figure 3 : Synthèse de la méthodologie de recherche de l'application de l'étude de cas du manchot empereur et la gouvernance de l'Antarctique envers l'Arctique

RÉSULTATS ET DISCUSSION

VOLET 1

ANALYSE DES MÉTHODOLOGIES ACTUELLES DE BIOSURVEILLANCE DU MANCHOT EMPEREUR

L'Antarctique et la biosurveillance

Collecte de données à distance

Imagerie satellite

À ce jour, la technologie d'imagerie satellite est de loin la méthodologie de biosurveillance priorisée au sein de la communauté scientifique afin de surveiller l'Antarctique et sa faune. Concrètement, ce procédé consiste en l'utilisation d'images spatiales à très hautes résolutions (VHR) soit d'une résolution de 0.6m² ainsi que des données recueillies par les satellites afin d'observer, à distance, divers facteurs écologiques et environnementaux (LaRue *et al.*, 2011). En d'autres mots, l'imagerie satellite permet de recueillir de l'information environnementale afin d'analyser l'état d'un milieu ou bien celui d'une espèce en particulier. Comme il a été mentionné plus tôt, l'Antarctique n'est pas un milieu facilement accessible ni destiné à la présence de l'être humain. Cela dit, la biosurveillance via satellite permet de collecter une grande quantité d'information sans à avoir recours à des déplacements importants et dangereux (LaRue *et al.*, 2024). Par exemple, lors de l'hiver austral alors que les manchots empereurs sont en période de reproduction, les conditions climatiques glaciaires deviennent extrêmement difficiles à tolérer pour les chercheurs (LaRue *et al.*, 2024). Cette technique permet d'obtenir des résultats sans avoir à se déplacer sur le continent et ainsi limiter une multitude de facteurs pouvant nuire aux espèces fauniques puis au milieu simultanément (Barber-Meyer *et al.*, 2007; Jenouvrier *et al.*, 2017). Trois facteurs visuels sont cruciaux afin de pouvoir utiliser l'imagerie satellite, selon des revues méthodologiques sur cette technique (LaRue *et al.*, 2017). Ces trois facteurs sont 1) un milieu ouvert, 2) un contraste de couleur entre l'espèce observée et son milieu, 3) observation d'une espèce assez volumineuse afin d'être détectée par les satellites (LaRue *et al.*, 2017). L'obtention d'images satellites facilitent la récolte de données et ainsi le processus de biosurveillance des

colonies de manchots amplifié par le contraste évident des plumes noires sur la glace blanchâtre favorisant leur suivi, selon la qualité des images (Fretwell *et al.*, 2012). La présence de guano, soit d'excréments d'oiseaux de couleur brunâtre, facilite également le repérage des multiples colonies sur le continent, mais peut également nuire au recensement d'individus au sein d'une colonie (Barber-Meyer *et al.*, 2007; Fretwell *et al.*, 2012; LaRue *et al.*, 2024).

Cela dit, la biosurveillance ne se concentre pas seulement sur un seul aspect d'une espèce, mais bien précisément sur tout facteur environnemental relié à l'espèce (Barber-Meyer *et al.*, 2007). Dans ce cas-ci, le suivi des plaquettes de glaces et l'étendue annuelle de cette glace est un facteur clé dans le cas précis du manchot empereur (Jenouvrier *et al.*, 2017). De plus, la surveillance de l'activité de pêche industrielle en lien avec la biomasse de krill antarctique est de mise afin de conserver adéquatement la plus grande espèce de manchots (Brooks *et al.*, 2018). Aussi, l'imagerie satellite permet d'obtenir de l'information sur une échelle continentale, régionale et locale selon l'étendue de l'imagerie utilisée (LaRue *et al.*, 2024). Ceci procure des données spécifiques à certains comportements de dispersion au sein d'une même colonie (locale) tout autant que les réponses de l'espèce sur le plan régional face à une grande diminution de glace dans cette section du continent, par exemple (Fretwell *et al.*, 2012). Il est grâce à ces images de très grande résolution (VHR) qu'il a été possible de quantifier l'énorme baisse du volume des plaquettes glaciaires lors de l'hiver austral de 2023, où 2.33 millions de km² de glace furent manquant en août 2023 (figure 4) (Josey *et al.*, 2024).

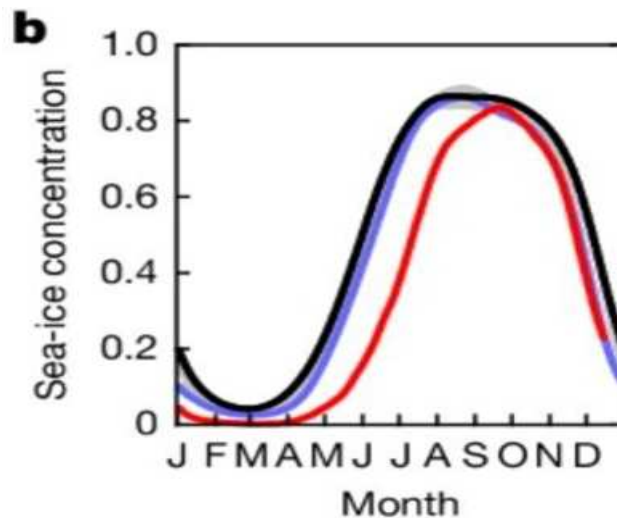


Figure 4 : Concentration des plaquettes de glace autour du continent de l'Antarctique démontrant une importante baisse en hiver austral de 2023 (rouge) comparativement à la moyenne (noir) et 2022 (bleu).

Alors que l'imagerie satellite procure une panoplie d'information environnemental, cette méthodologie n'est pas omise de limites. En effet, plusieurs lacunes sont présentes au sein de cette méthodologie ce qui pourrait nuire à l'exactitude des résultats et ainsi aux décisions appliquées se basant sur la biosurveillance (LaRue *et al.*, 2022). L'une des limites retrouvées via cette méthodologie est la qualité des images satellites où il est parfois une tâche monumentale de discerner le nombre d'individu au sein d'une colonie de manchots empereur (Fretwell *et al.*, 2012). Selon cette étude, le nombre total d'environ 595,000 individus n'est qu'une approximation puisque l'énorme présence de guano brunâtre ainsi que les ombres de ces individus venaient nuire à la distinction individuelle de ces manchots (Fretwell *et al.*, 2012). En effet, l'imagerie satellite procurerait principalement des résultats comportant la présence et la dispersion d'espèces ainsi démontrant des lacunes au point de vue du dénombrement individuel au sein d'une même colonie (Ratcliffe *et al.*, 2015). De plus, le processus de biosurveillance requiert de l'information sur divers marqueurs biologiques (biomarqueurs) dont des bactéries ou des virus que l'on peut retrouver dans un milieu (Banyard *et al.*, 2024). Cela dit, il est hors de la portée de l'imagerie satellite d'élucider sur ces données, limitant ainsi une biosurveillance complète sans l'apport de méthodologie de collecte de données bactériennes (Banyard *et al.*, 2024) Similairement, des données comme des relevés sanguins ou des observations comportementales sont également hors de la portée de l'imagerie satellite.

Collecte de données sur place

Survol aérien

En guise de compléter l'utilisation d'imagerie satellite, plusieurs projets de recherche ainsi que de biosurveillance font recours à l'utilisation de véhicules aériens afin d'observer le milieu de plus près. Cette méthode de surveillance se fait via des appareils volants tels que des avions « Twin Otters » et « Dash 7 » ainsi que des drones du genre « UAV » comportant des caméras afin de collecter de l'information selon une vue à vol d'oiseau (Dickens *et al.*, 2021). L'acronyme UAV définit des appareils volants ne comportant pas de pilotes humains (Unmanned aerial vehicles) (Dickens *et al.*, 2021).

Ces divers appareils (avions et drones) portent chacun des avantages et des inconvénients par rapport à leur utilisation. L'utilisation de drones est à la hausse pour une multitude de projets de surveillance, permettant d'obtenir des images ainsi que des données largement plus rapidement qu'en avion (Shah *et al.*, 2020). Les drones de type UAV permettent d'épargner du côté économique puisqu'il n'y a pas autant de dépenses par rapport à leur entretien ni envers le carburant, comme il en est le cas pour les Dash 7 (Shah *et al.*, 2020). De plus, ils permettent d'obtenir des données sans mettre en danger la vie d'un.e pilote, soit un facteur crucial à considérer lors des expéditions de recherche. Il a été démontré qu'avec l'utilisation de modèles géographiques au sein de l'ordinateur des UAV, ces véhicules aériens étaient en mesure de patrouiller un territoire défini largement plus rapidement que par d'autres méthodes (Shah *et al.*, 2020). Les drones peuvent être initiés à partir d'à peu près partout comme sur un bateau ou bien sur la terre ferme (Shah *et al.*, 2020). Il a également été démontré que la collecte de données via des drones pilotés automatiquement étaient grandement plus rapide que des drones pilotés manuellement (Shah *et al.*, 2020). En effet, des multiples drones automatiques ont recensés environ 300,000 nids de manchots Adélie sur une aire de 2km² en 3 heures (Shah *et al.*, 2020). Ces 300,000 nids comportent une énorme quantité de données par rapport à la colonie en lien avec le développement de cette population qui pourra être suivi sur plusieurs années (Shah *et al.*, 2020). Précédemment, le recensement complet de cette zone pouvait s'étaler sur 2 jours lorsque des drones étaient pilotés par un humain (Shah *et al.*, 2022).

L'automatisation de divers drones sur le terrain simultanément permettrait d'obtenir des recensements de population faunique rapidement par l'utilisation de modèles cartographiques optimaux (Shah *et al.*, 2020). En gros, les drones explorent la zone délimitée à multiples reprises afin de trouver les routes les plus efficaces tout autant que complètes selon les données recherchées pour ensuite garder en son ordinateur ces dites routes puis les UAV se divisent le territoire puis récoltent les données simultanément (Shah *et al.*, 2020). De plus, les véhicules aériens de ce genre permettent de récolter des données sans empreinte anthropique nuisible comme des odeurs, des déchets, du bruit etc... promouvant des comportements naturels au sein des colonies observées (Dickens *et al.*, 2021).

Cela dit, les drones ont tout de même leurs contraintes à ce jour, conservant ainsi l'utilité cruciale d'autres véhicules aériens tels que les avions et les hélicoptères (Dickens *et al.*, 2021). En effet, les drones ne sont pas en mesure de capturer des images (photos et vidéos) d'aussi bonne qualité qu'avec une caméra maniée par un humain (Dickens *et al.*, 2021). De plus, certains types de drones automatiques ne sont pas en mesure de changer de trajectoire selon les besoins de recherche soit un avantage que les avions polaires détiennent (*Aircraft capability*, BAS). Les vents de l'Antarctique ainsi que les températures hivernales glaciales sont des facteurs importants à considérer lorsque l'on fait recours aux drones (Ratcliffe *et al.*, 2015). Un des modèles utilisés est le DeltaQuad Pro Vertical Take-OFF and Landing (VTOL), soit un drone avec des ailes fixes pouvant opérer dans des températures allant de 45 degrés Celsius jusqu'à -20 degrés Celsius (Ricaud *et al.*, 2023). Cependant, le grand froid hivernal allant jusqu'à -40 degrés Celsius empêche l'utilisation de ces véhicules lors de ces périodes glaciales. Plusieurs types de drones existent soit quelques-uns à ailes fixes permettant des déplacements plus rapides et éloignés alors que des drones multi rotors sont plus stables en plein vol favorisant une photographie supérieure au détriment d'une vitesse inférieure (Zmarz *et al.*, 2018). La distance maximale à surveiller contribue également à la sélection du type de drones où des grandes étendues sont priorisés par des drones plus volumineux pouvant atteindre plus de 150km de son point de départ chez certains modèles (PW- ZOOM) alors que la plupart des drones multi rotors ont des capacités fonctionnelles jusqu'à quelques centaines de mètres voire quelques kilomètres (Zmarz *et al.*, 2018). De plus, considérant que les manchots empereur sont rapatriés en colonies

lors de l'hiver austral, les températures glaciales et les grands vents nuisent largement à l'utilisation de drones, peu importe le modèle employé (Ratcliffe *et al.*, 2015; Ricaud *et al.*, 2023). En effet, il a été démontré que les conditions climatiques difficiles ont largement nuit à un projet de recherche alors que seulement 4 jours sur trois semaines permettaient l'utilisation des drones (Ratcliffe *et al.*, 2015). Il serait plus envisageable d'utiliser ou bien développer des drones pouvant subir des températures plus froides lors des mois hivernaux afin de compléter le travail que les images satellites ne puissent faire. Le tableau 1 à la fin de cette section synthétise les méthodologies de survols aériens au sein de plusieurs études scientifiques des dernières années.

Cela dit, les nombreuses publications scientifiques employant diverses méthodologies de surveillance aérienne démontrent des résultats pertinents pour des suivis d'espèces, de colonies et du milieu de façon plus sécuritaire puis économique dans la plupart des cas (Ratcliffe *et al.*, 2015). Ces résultats stipulent que l'utilisation de cette méthodologie est efficace et davantage prometteuse pour les années à suivre tout dépendamment des tensions géopolitiques entre les pays ayant comme objectifs de rehausser l'économie via les ressources de l'Arctique puis de l'océan Austral (Haward et Jackson, 2023).

Collecte de biomarqueurs

Bien que les images satellites ainsi que les drones présentent des solutions afin de collecter des données envers une biosurveillance adéquate, ces méthodologies ne sont pas complètes sans l'obtention de certains biomarqueurs (Salines, 2012). Ces derniers permettent de surveiller la propagation de maladies (zoonoses) au sein d'une colonie ou bien d'analyser l'état de santé d'une espèce par rapport à divers facteurs écologiques, anthropiques ou environnementaux comme les changements climatiques (León *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2024) Présentement, l'un des plus gros enjeux en lien avec des biomarqueurs en Antarctique est la propagation de la grippe aviaire H5N1 présente sur le continent et ses îles voisines depuis 2023 (Clessin *et al.*, 2025) Les biomarqueurs analysés sont habituellement récoltés au sein de la cloaque et du guano des espèces aviaires ou bien par les carcasses d'animaux (Clessin *et al.*, 2025). Sans la récolte de ces données, la biosurveillance de la propagation de cette zoonose serait basée que par des images ne possédant

pas de données explicitement en mesures de répondre aux hausses de mortalité. Alors qu'aucun projet de recherche a démontré la présence de cette zoonose chez le manchot empereur, les colonies massives de ces oiseaux lors des périodes de reproduction favoriseraient une propagation excessivement efficace entre les individus (León *et al.*, 2025). Afin de conserver *A. forsteri* hors de danger ou bien limiter la propagation de la H5N1 avant qu'il ne soit trop tard, la biosurveillance est un outil crucial dans cette lutte. À ce jour, diverses espèces de manchots ont été atteintes par ce virus, menant à de centaines voire des milliers de cas de mortalité au sein de plusieurs colonies (Muñoz *et al.*, 2024). Plus de 37 évènements importants de mortalité chez les manchots de Humboldt (*Spheniscus humboldti*) situés au Chili en 2023, dépassant les centaines d'individus décédés par le virus (Muñoz *et al.*, 2024). Pour ce faire, un modèle de suivi chez diverses espèces de l'Antarctique devrait être mis en place, soit des espèces qui pourraient entrer en contact avec le manchot empereur. De celles-ci on devrait observer principalement des espèces migratrices volantes et prédatrices du manchot empereur comme le skua antarctique (*Stercorarius maccormicki*) ainsi que le pétrel géant (*Macronectes giganteus*) (Wagner *et al.*, 2024). Ces espèces charognardes et prédatrices sont extrêmement à risque de contracter la maladie via les carcasses animales infectées dont elles se nourrissent puis d'ensuite propager davantage cette même maladie à d'autres espèces (Wagner *et al.*, 2024).

Tableau 1 : Synthèse d'études scientifiques et de leurs méthodologies concernant la surveillance et l'obtention de données de biosurveillance chez le manchot empereur

Article	Objectifs	Approche	Données récoltées	Résultats
Barber-Meyer <i>et al.</i>, 2007	Estimer l'abondance relative des colonies inaccessibles dans la mer de Ross	Images satellites	Modélisation d'images chromatiques satellites	Différence d'abondance entre les colonies (5,000 et 3,000 individus) Analyse impactée par grande quantité de guano et d'ombres Méthodologie moins couteuse et dangereuse, mais limitée et moins précise
Brooks <i>et al.</i>, 2024	Construire un modèle de biosurveillance des aires protégées marines (APM) à partir de la mer de Ross	Politique et législatif	N/A	Gestion des données scientifiques entre les pays Utilisation de véhicules automatisés pour une biosurveillance constante Engagement de politiques priorisant la recherche et la conservation
Dickens <i>et al.</i>, 2021	Recenser diverses espèces au sein des îles subantarctiques aux fins de biosurveillance via des drones	Drones (UAV) DJI Mavic 2 Pro	Imagerie aérienne des colonies	L'utilisation du drone favorise une sécurité anthropique tout en réduisant les impacts envers la faune Limiter par la météo, le vent et les crevasses où certaines espèces se cachent
Fretwell <i>et al.</i>, 2012	Élaborer le premier recensement global de l'espèce par imagerie satellite	Images satellites	Recensement continental de l'espèce via imagerie satellite	595,000 oiseaux adultes (environ 238,000 parents) 4 nouvelles colonies identifiées Estimation de la population complète utilisable pour des modèles de population pour d'autres projets
LaRue <i>et al.</i>, 2017	Déterminer les prérequis pour adéquatement surveiller une espèce via VHR	Images satellites	Revue de 14 articles scientifiques utilisant VHR	1. Milieu ouvert, 2. Contraste entre milieu et espèce, 3. Taille adéquate pour un recensement Manchot empereur détient les trois critères selon les auteurs.res

LaRue <i>et al.</i>, 2018	Déterminer les différences d'abondance du manchot empereur sur une période de 10 ans (2009-2018)	Recensement aérien, imagerie satellite, modélisation	Comparaison du nombre d'individus par colonies selon les données satellites de 2009 et des photographies de 2018	Modèles démontrent une baisse d'individus avec un taux de confiance de 81% (2009-2018) Déclin de 1.3% de la population totale à chaque année Régions près des plaquettes de glaces sont plus impactées
LaRue <i>et al.</i>, 2022	Utiliser l'imagerie satellite à des fins de biosurveillance pour promouvoir le suivi des aires protégées marines	Imagerie satellite	N/A	Interactions inter-intrasécifiques déterminent la dispersion des manchots VHR a permis de contrer la philopatrie des manchots empereur, dispersion au sein des colonies Possibilité de biosurveillance constante via VHR
Ratcliffe <i>et al.</i>, 2015	Élaboration d'un protocole pour le recensement aérien de colonies de manchots via des drones	Drones (UAV) DJI Naza F550 hexacoptère	Photographie aérienne de colonies	Limitations des drones dans des conditions météorologiques difficiles (vents, froid) Méthode à faible risque pour des bons résultats Vents de moins de 10m/s permettent le vol
Shah <i>et al.</i>, 2020	Élaborer des routes de recensement aérien plus rapide tout en gardant le plus de données possibles	Drones (UAV) VOTL 4 DJI Matrice 100	Photographie aérienne de colonies	Modélisation des meilleures routes à prendre permet de sauver du temps avec les courtes durées de vie des batteries 16min de vol dans le froid, contrairement à 22min Diminution du temps de recensement de 2 jours à 3h via plusieurs drones 300,000 nids observés

VOLET 2

L'APPLICATION DE L'ÉTUDE DE CAS DU MANCHOT EMPEREUR ET LA GOUVERNANCE DE L'ANTARCTIQUE ENVERS L'ARCTIQUE

Les pôles Nord et Sud sont composés d'éléments environnementaux similaires, mais possèdent une faune et une flore diverses de l'une à l'autre. Cela dit, les aspects de gouvernance sont largement différents d'un milieu à l'autre démontrant une hausse de conflits géopolitiques au sein d'une panoplie de ressources naturelles (Chown et Brooks, 2019). De plus, l'absence d'un continent comme l'Antarctique fragilise davantage l'Arctique par rapport aux changements climatiques par la possibilité de disparition de la banquise (Davidson *et al.*, 2020). En effet, la surface sombre de l'océan accélère la fonte des glaces par l'amplification d'absorption d'énergie solaire tout en créant une boucle de rétroaction positive (albedo) en perdant la surface claire de la glace (Shokr et Ye, 2023). De plus, l'Arctique est également habité par 4 millions d'individus comportant également de multiples nations autochtones puis joue un grand rôle dans l'économie et le climat de l'hémisphère Nord où une multitude de grands joueurs économique se trouvent (Shokr et Ye, 2023). Le tableau suivant synthétise globalement les deux milieux polaires.

Tableau 2 : Comparaison de l'Arctique avec l'Antarctique par rapport à des facteurs biologiques, géographiques et sociaux

	Arctique	Antarctique
Taille	5.5 millions m ²	5.4 millions m ²
Géographie	Milieu maritime entouré de masses terrestres	Continent entouré d'océans
États autoritaire	8 pays (Traité de l'Arctique)	53 pays (Traité de l'Antarctique)
Ressources naturelles	Pétrole et gaz	Ressources minérales
Population permanente	4 millions	N/A
Activités militaires	Oui	Non

Afin de comprendre comment extrapoler les notions de biosurveillance de l'Antarctique vers l'Arctique, il est crucial de comprendre la méthodologie législative et de gouvernance au sein de ce milieu international.

Gouvernance de l'Arctique

La région Arctique est distribuée sous huit états soit la Norvège, la Suède, la Finlande, le Danemark (Groenland), l'Islande, le Canada, la Russie et les États-Unis d'Amérique. Comme il a été mentionné plus haut, les nations autochtones présentes en Arctique n'adhèrent pas aux frontières, conservant ainsi leurs traditions majoritairement intactes dans un monde moderne (RGS,). Le comité de l'Arctique (Arctic Council) a vu le jour en 1996, mettant en vigueur l'arrivée des huit états de l'Arctique (*Arctic Governance and the Arctic Council* | RGS). Ce comité se rencontre annuellement afin de discuter, débattre et voter sur diverses politiques envers le milieu polaire alors que d'autres organisations gouvernementales puis autochtones ne possèdent pas le droit de vote, mais peuvent apporter des points lors des délibérations (Nevitt et Percival, 2018). Les défis de la conservation de l'Arctique et de sa faune et flore proviennent de la fonte des glaces et du pergélisol qui a su révéler une énorme quantité de gaz, de pétrole ainsi que la possibilité d'ouvrir de nouvelles routes commerciales navigables (Shokr et Ye, 2023). De plus, l'enjeu de géopolitiques à la hausse augmente les conflits envers les ressources de l'Arctique comme il a été le cas avec la guerre entre l'Ukraine et la Russie où cette dernière fut sanctionnée envers ses accès aux ressources de la région polaire dès 2022 (explorer, transporter, vendre des ressources) (*The Race for the Melting Arctic*). Cependant, depuis ces sanctions, la Russie s'est largement rapprochée de la Chine à des fins de militarisation, question de rivaliser puis intimider ses rivaux géopolitiques notamment les États-Unis d'Amérique (*The Race for the Melting Arctic*). Ces tensions politiques et la pauvre résilience de l'Arctique jouent un rôle crucial au sein de la biosurveillance de la région sans oublier que les changements climatiques apportent davantage de conditions météorologiques extrêmes et difficiles pour la faune (Shokr et Ye, 2023). Contrairement à un havre de recherche scientifique, l'Arctique doit subir sur tous les aspects qui l'encadrent démontrant des objectifs majoritairement axés sur l'économie et l'armement géopolitiques du Nord Atlantique.

Cela dit, la prochaine section se penchera sur la transférabilité du modèle de biosurveillance du manchot empereur au contexte arctique. En raison de leur dépendance commune à la stabilité des glaces, des espèces telles que l'ours polaire (*Ursus maritimus*), le morse (*Odobenus rosmarus*) et le phoque annelé (*Pusa hispida*) présentent des vulnérabilités similaires face aux changements climatiques (Gilg *et al.*, 2012). Toutefois, cette comparaison biologique servira de toile de fond pour une analyse plus profonde des cadres de gestion. En effet, il s'agira de comparer la gouvernance collaborative du Traité sur l'Antarctique à la réalité arctique, où la biosurveillance doit composer avec les impératifs économiques et la souveraineté des huit nations.

Le manchot empereur & la biosurveillance d'espèces bioindicatrices de l'Arctique

Les changements climatiques majoritairement causés par les émissions de gaz à effet de serre (GES) provoquent d'énormes répercussions pour la faune polaire via des températures plus chaudes menant à la fonte des glaces et la fonte de la neige accélérée au printemps (Davidson *et al.*, 2020). Ces effets affectent les conditions dans lesquelles se trouvent la faune Arctique soit une réduction de sources de nourriture, une hausse de compétition interspécifique puis de prédation (Gilg *et al.*, 2012). Alors que les deux milieux semblent avoir des missions différentes envers leur gouvernance et la géopolitique, la réalité biologique reste la même. En effet, la conservation de ces milieux polaires est cruciale pour le climat de la Terre et la biosurveillance est un outil qui permettrait de suivre de plus près ces régions fragiles de la planète (Gilg *et al.*, 2012). Le modèle du manchot empereur dans un environnement gouverné par la science se compare directement à celui de l'Arctique et de la vision politiquement économique. Tout comme le manchot est une espèce bioindicatrice pour son milieu, l'ours polaire (*Ursus maritimus*), le morse (*Odobenus rosmarus*) et le phoque annelé (*Pusa hispida*) le sont également pour l'Arctique principalement par rapport à l'état de la cryosphère des milieux polaires (Eccles *et al.*, 2024; Gilg *et al.*, 2012).

Transposition de méthodologies non-invasives du Sud au Nord

L'une des méthodologies de recensement de population d'espèce favorisée au sein de l'Antarctique est le recours à la technologie d'imagerie satellite. En effet, le recensement à distance via des ressources non-intrusives envers la faune démontre des résultats concluants chez les colonies de manchots par rapport à leur abondance et leur dispersion, soit des facteurs permettant d'élucider sur l'état de la glace du milieu (LaRue et al. 2022). L'imagerie satellite pourrait être instauré lors de la surveillance d'espèces comme le morse, une espèce volumineuse limitée davantage par la fonte de la banquise à devoir s'entasser les uns sur les autres (LaRue *et al.*, 2011; Udevitz *et al.*, 2017). En effet, il a été démontré que la réduction annuelle de la glace en Arctique provoque une dispersion plus importante des morses afin d'atteindre la terre ferme pour se reposer, soit une tâche habituellement complétée en se tirant hors de l'eau pour atteindre la banquise (Udevitz *et al.*, 2017). Normalement, les morses se nourrissent d'espèces benthiques telles que des bivalves et de nombreux invertébrés dans les haut-fond des eaux, soit moins de 100m de profondeur (Udevitz *et al.*, 2017). La perte de glace limite ainsi les milieux de repos pour les morses ainsi que la nourriture puisqu'on retrouve une trop grande quantité d'individus au sein d'un même milieu (Udevitz *et al.*, 2017). La méthodologie d'imagerie satellite employée pour suivre les colonies de manchots est donc une avenue de suivi importante à considérer au sein de la population de morses dans l'océan Arctique. De plus, l'utilisation d'une méthodologie non-invasive envers la faune tout autant qu'à distance pourrait également permettre d'accéder à des résultats sans avoir à passer par des limites géographiques partagées par les huit pays (Johansson et Callaghan, 2025). En effet, il serait donc envisageable de surveiller des espèces dotées d'une dispersion allant d'une région de l'Arctique à une autre sans impacter les tensions géopolitiques entre les pays. Évidemment, cette méthodologie ne résulterait pas nécessairement similairement avec chacune des espèces, comme l'ours polaire par exemple, par l'absence de contraste de l'animal blanc lorsque celui-ci se trouve sur la banquise de même couleur (LaRue *et al.*, 2017). Cela dit, les espèces de ce genre ainsi que ceux ne pratiquant pas le comportement d'attroupement en colonies sembleraient profiter de méthodes alternatives dont l'ajout d'un traceur GPS afin de suivre ces animaux à distance via satellite (WWF, 2025).

Cependant, cette méthode nécessite des déplacements de longue durée ainsi que des coûts astronomiques afin d'envoyer l'équipe installer l'outil GPS sur l'animal (WWF, 2025). Non seulement ceci nécessite d'endormir l'animal afin d'assurer la sécurité des individus lors de l'installation, mais afin d'obtenir des résultats significatifs, cette méthode doit être employée sur une grande quantité d'ours polaires (WWF, 2025). De plus, il semblerait que les traceurs GPS interféraient au niveau des habiletés de chasse puis seraient à la cause de certaines blessures chez *U. maritimus* (WWF, 2025). Donc, non seulement les coûts sont hautement élevés, mais les traceurs GPS ne démontreraient pas assez d'information pour tirer des conclusions convaincantes permettant de généraliser les données comme étant une biosurveillance de l'espèce en totalité (WWF, 2025). Cela dit, le manchot empereur peut encore servir de modèle pour le suivi de certaines espèces de l'Arctique (Sparaventi *et al.*, 2021). En effet, le guano est fréquemment utilisé afin de surveiller les colonies de manchots, cependant cette substance excrétée détient également une panoplie d'information sur l'individu dont la concentration de métaux au sein de l'animal (Sparaventi *et al.*, 2021).

Considérant que l'océan Arctique et Austral sont des puits à polluants transportés par les courants océaniques et les dépôts atmosphériques, la contamination au sein des espèces fauniques est un fléau environnemental crucial à intégrer à la biosurveillance de ces milieux (Eccles *et al.*, 2024). Il a d'ailleurs été démontré qu'une méthodologie similaire pouvait être appliquée à l'ours polaire, contrairement aux méthodes habituelles invasives et parfois terminales pour l'animal (Eccles *et al.*, 2024). Les conditions climatiques glaciales permettent aux matières fécales d'être préservées plus longtemps, soit un avantage pour la recherche non-invasive (Eccles *et al.*, 2024). Effectivement, les résultats obtenus par les selles et tissus de 49 ours distincts ont permis d'élaborer un modèle pour les communautés Inuits, considérant qu'elles consomment certains de ces animaux ainsi que pour les divers ministères environnementaux (Eccles *et al.*, 2024). Étant donné que l'ours polaire et le manchot empereur partagent des similarités au sein de la chaîne trophique, il est habituel pour ces prédateurs de diverses proies d'être également contaminés davantage par l'ingestion de d'autres proies antérieurement contaminées (bioaccumulation & bioamplification) (Eccles *et al.*, 2024). Ceci explique ainsi les résultats de l'étude où les 32 métaux observés ont tous été retrouvés, séparément, chez les individus analysés démontrant une contamination

importante chez une espèce bioindicatrice de l'Arctique (Eccles *et al.*, 2024). Finalement, cette contamination peut être extrapolée vers le phoque annelé considérant que cette espèce est l'une des proies prisées de l'ours polaire (Eccles *et al.*, 2024).

La réalité économique de l'Arctique

Comme mentionné antérieurement, la fonte de l'Arctique amplifie la ruée vers ses ressources naturelles auparavant inaccessibles. Ces notions ne sont pas une réalité pour le continent polaire de l'Antarctique par l'Article 7 du Protocole de Madrid qui stipule l'interdiction de toutes exploitations de ressources sur son territoire depuis 1991 (Barr, 2018). Cela dit, l'application d'un modèle de biosurveillance basé sur le manchot empereur en Arctique nécessite une adaptation de son opposé géographique par rapport aux conflits économiques. Alors que l'Antarctique détient une vision de réserve naturelle scientifique prospérant sur la recherche et la paix, l'Arctique devrait plutôt élaborer un cadre environnemental restrictif envers les intérêts économiques de ses ressources tout en incorporant davantage de prise de données de biosurveillance. En d'autres mots, la biosurveillance permettrait d'assurer, en plus de collecter des données comme à son habitude, que les restrictions environnementales mises en place sont respectées par les nations de l'Arctique lors de l'extraction des ressources naturelles ainsi que lors du transport de marchandise par navires de charge. Il est évident que l'Arctique ne pourra être protégée de part égale que l'Antarctique étant donné que les ressources naturelles qui y résident sont largement trop prisées par des géants de l'industrie pétrolière et minière (Du *et al.*, 2025). Il est crucial d'énumérer certains cadres législatifs établies par les nations de l'Arctique qui visent à procurer une protection du milieu contre des activités économiques du genre « deep-sea mining (DSM) ». De ceux-ci, le cadre de l'United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS), signé en 1982, regroupe diverses activités marines dont le transport et la pêche (Canada, 2015). Principalement, UNCLOS détermine les droits d'exploration et d'exploitation de ressources naturelles jusqu'à 200 milles marins (370,4km) des côtes de chacun des pays et délimite également les frontières océaniques (Canada, 2015). Ces zones économiques exclusives (ZEE) doivent se conformer aux multiples articles de la convention visés à préserver l'environnement dont les articles 207 visant à limiter

la pollution des activités terrestres et 208 portant la création de lois contrôlant la pollution de DSM selon la juridiction des pays (Canada, 2015). Cela dit, chacun des pays est libre d'exploiter ses côtes à leur guise, selon des restrictions environnementales cependant le manque de législations internationales n'empêchent l'exploitation des zones en haute mer, soit les eaux internationales (Canada, 2015). L'arrivée de l'entente BBNJ (Agreement on Marine Biological Diversity of Areas beyond National Jurisdiction) en janvier 2026 propose davantage de cadres législatifs hors des ZÉE, dont l'implémentation d'études impacts environnementales ainsi que la création d'aires marines protégées d'ici 2030 afin de conserver davantage la biodiversité (Willaert et Soete, 2025). Cela dit, le contexte légal serait possiblement altérable selon l'interprétation du document permettant ainsi d'ouvrir la porte à un plus grand marché de DSM en haute mer (Willaert et Soete, 2025). En d'autres mots, l'efficacité de ce cadre environnemental va principalement dépendre de l'interprétation des nations de l'Arctique selon leur réalité économique pouvant parfois compromettre les enjeux environnementaux, comme il en a été pour la Norvège en 2024 (Willaert et Soete, 2025). Malgré la présence de lois et de conventions législatives, les pays sont relativement libres de faire à leurs têtes selon les besoins économiques où ces derniers peuvent parfois avoir le dernier mot (Canada, 2015). L'application du modèle du manchot empereur à la réalité économique de l'Arctique permettrait d'accroître considérablement la rigueur législative environnementale de la région. Un suivi plus sévère au sein des évaluations environnementales procurerait une standardisation indispensable garantissant un suivi biologique pérenne, particulièrement dans un contexte marqué par l'exacerbation des tensions géopolitiques observée au cours des trois dernières années.

La géopolitique du partage des données environnementales

La gouvernance de l'Antarctique diffère une fois de plus de l'Arctique par une coopération scientifique obligatoire entre les signataires du Traité de l'Antarctique, soit la mission de l'Article III du document signé en 1959 (*The Antarctic Treaty, 1959*). Cela implique une coopération mandatée au sein des projets de recherche ainsi qu'un partage des données de biosurveillance disponible pour chacune des entités du Traité de l'Antarctique (*The Antarctic Treaty, 1959*). Comparativement, la mission de l'Arctique est

principalement basée par rapport aux tensions géopolitiques depuis 2022 où la transmission d'information scientifique, géographique, biologique et géographique n'est pas obligatoire entre les pays et ainsi rarement vu par peur de dévoiler des connaissances aux ennemis politiques (Johansson et Callaghan, 2025). Cela dit, l'application du modèle de l'Antarctique en lien avec le partage de données de biosurveillance permettrait possiblement d'atteindre une collaboration internationale entre les pays favorisant l'innovation, la conservation et la protection de l'Arctique (Rüffin et Rüland, 2022; Vidal et Saas, 2025). Cela pourrait mener à une réduction des tensions géopolitiques tout autant qu'à un réseau multinational promouvant une biosurveillance internationale d'espèces fauniques, d'impacts environnementaux puis de l'évolution des changements climatiques sur l'Arctique (Rüffin & Rüland, 2022).

L'Arctique a établi un cadre scientifique diplomatique, le Comité International de la Science Arctique (IASC) en 1990 via des représentants de chacun des nations de l'Arctique afin de promouvoir des projets multidisciplinaires au sein de la région polaire (Johansson et Callaghan, 2025). Cette diplomatie « top-down » favorise la dispersion d'information scientifique, tout comme l'entente signée en 2017 du nom Agreement on Enhancing International Arctic Scientific Cooperation (Rüffin & Rüland, 2022). Cependant, la signature de cette entente a été résumée par plusieurs par une facilité de partage de données promouvant les priorités nationales des pays principalement du côté économique contrairement à des intentions de collaboration scientifique (Rüffin & Rüland, 2022). C'est alors que INTERACT (International Terrestrial Network for Research and Monitoring in the Arctic) redéfinit la collaboration scientifique du milieu de l'Arctique (Johansson et Callaghan, 2025). Ce projet regroupait en 2020 un réseau de 90 stations de recherche dispersées au travers des nations de l'Arctique en guise de collaboration scientifique tout en prenant en considération les communautés autochtones sur le territoire (voir figure 5) (Johansson et Callaghan, 2025). Les données sont également partagées via plus de 150 organisations internationales afin d'assurer des données environnementales précises pour la prise de décision lors de sommets climatologiques (Loescher et al., 2022). INTERACT démontre une vision largement similaire à celle de l'Antarctique au sein d'une coopération internationale pour une surveillance accrue de la biodiversité, mais les enjeux du Nord ont mis des bâtons dans les roues du réseau international (Johansson et Callaghan,

2025). En effet, depuis l'invasion de la Russie en Ukraine, INTERACT est passé d'un projet multinational recouvrant l'Arctique d'est en ouest à un réseau analysant que seulement 50% de son territoire qu'en quelques mois suivant l'invasion de 2022 (Johansson et Callaghan, 2025).

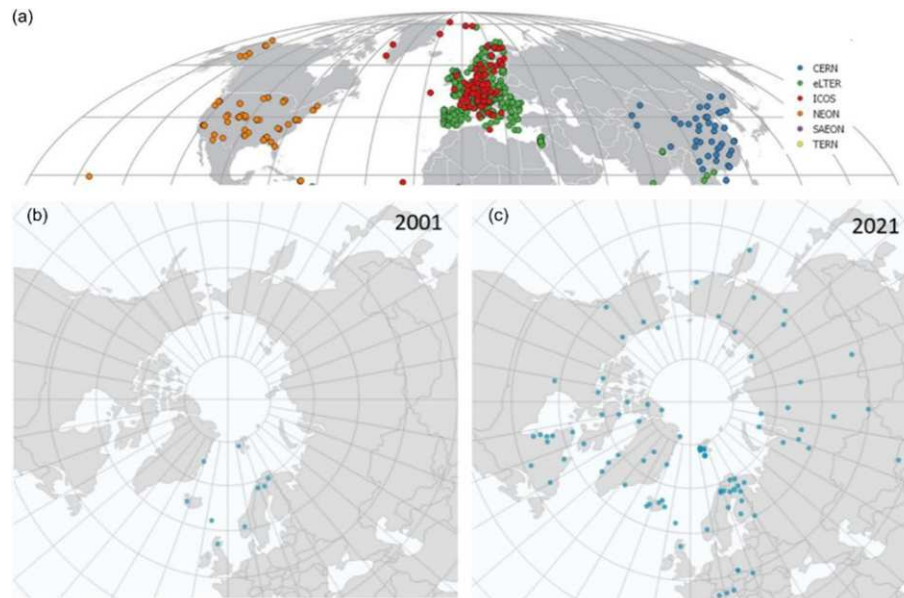


Figure 5 : Infrastructures de recherche du réseau INTERACT de l'Arctique. a) Distribution des sites de Global Ecosystem Research Infrastructure de l'Hémisphère Nord. b) Distribution du réseau INTERACT en 2001. c) Distribution du réseau INTERACT en 2021

L'Arctique possède plus de 50 stations de recherche à son effectif, dont 23 d'entre elles sont russes et ne partagent désormais plus d'information avec le reste des autres nations, réduisant le nombre total de stations accessibles à 29/52 (Johansson et Callaghan, 2025). Considérant que la côte arctique russe représente 53% de la totalité de la côte arctique, le hiatus de la part de la Russie impact directement plus de la moitié des efforts de surveillance de la région polaire (Johansson et Callaghan, 2025). Ce résultat quoi que désolant ne cesse de démontrer les défis que doivent entreprendre les nations de l'Arctique dans les prochaines années. Il est important également de mentionner que la Russie est l'un des grandes nations installées en Antarctique. Malgré qu'il n'y a pas eu d'activités interdites de la part de ce pays jusqu'à présent, le renouvellement du Protocole de Madrid en 2048 semble effrayé certains par rapport aux intentions économiques de la Russie (*Competition Among Russia, China, and United States Heats Up in Antarctic*, 2022). Cela dit, le manque de coopération sur le partage de données environnementales amplifie le retard que le Nord prend via une vision majoritairement économique au détriment de la

protection de sa faune et des enjeux climatiques par rapport à son voisin du sud (Johansson et Callaghan, 2025; Rüffin & Rüland, 2022). Alors qu'une adoption d'une gouvernance identique à celle de l'Antarctique se rend difficile par rapport aux enjeux économiques internationaux, la vulnérabilité de l'Arctique se décrit par un état fragile destiné à s'amplifier dans les prochaines années (Smieszek *et al.*, 2021).

Tableau 3 : Synthèse des notions de biosurveillance et de méthodologie employée selon les espèces fauniques

Profil de biosurveillance	Manchot empereur (Antarctique)	Ours polaire (Arctique)	Morse (Arctique)	Phoque annelé (Arctique)
Rôle dans l'écosystème	Consommateur secondaire	Prédateur apex	Consommateur tertiaire	Consommateur tertiaire
Indicateur du changement climatique	Échec de la reproduction dû à la perte de glace de reproduction stable.	Échec de la chasse dû à la perte de la glace de mer servant de plateforme de chasse.	Forcé sur des lieux de repos terrestres dû à la perte de la glace de mer de repos.	Échec de la reproduction dû à la perte de glace/neige de reproduction stable.
Survol aérien	Dénombrement par drones des populations (comptage des colonies/du guano).	Suivi par satellite (colliers de repérage des individus).	Dénombrement par satellite des populations (comptage des lieux de repos terrestres).	Inventaires aériens (comptage des tanières/trous de respiration).
Collecte de biomarqueurs	Échantillonnage biologique (polluants, régime alimentaire).	Échantillonnage biologique (polluants, métaux)	Échantillonnage biologique (polluants, régime alimentaire).	Échantillonnage biologique (polluants, santé).
Imagerie satellite	Suivi par satellite (trajets d'alimentation individuels).	S/O (Sans Objet)	Suivi par satellite (trajets d'alimentation individuels).	Suivi par satellite (déplacements individuels).

Tableau 4 : Synthèse des facteurs politiques et de gouvernance influençant la biosurveillance d'espèces fauniques

Caractéristique	Antarctique (manchots empereurs)	Arctique (morses, ours polaires)
Gouvernance principale	Traité de l'Antarctique (International via les signataires)	Huit nations souveraines (National)
Principe directeur	Continent réservé à la paix et à la science	Combinaison de souveraineté nationale et de coopération internationale véhiculée par l'économie.
Partage des données	Mandaté et Ouvert : Les données sont considérées comme un "bien mondial"	Négocié et Variable : Les données sont considérées comme un "actif national", partagé via des accords
Effet sur la biosurveillance	Très efficace. Les données sont partagées rapidement, ce qui est idéal pour le suivi des menaces à l'échelle du continent (comme les pathogènes)	Efficace, mais vulnérable. Le suivi des espèces migratrices ou des maladies à travers les frontières politiques est difficile et peut être entravé par la géopolitique

BIAIS ET LIMITATION DE L'ESSAI

Cet essai comporte divers biais et limitation notamment par rapport à la méthodologie de recherche employée. En effet, l'utilisation d'une scoping review via un seul moteur de recherche, Google Scholar, pourrait avoir limité l'étendue des résultats obtenues. Il aurait été pertinent d'aller explorer via d'autres moteurs de recherche similaires tels que Greenfile, Scopus ainsi que Pudmed afin d'avoir une banque d'articles scientifiques plus diversifiées. De plus, Google Scholar, étant une compagnie américaine ne semblait pas démontrer des résultats d'articles russes lors des recherches. Il aurait pu être pertinent d'observer la perspective russe par rapport aux conflits géopolitiques, considérant que quelques chercheurs.es russes ont quittés le pays pour continuer leurs recherches.

La comparaison des espèces bioindicatrices de l'Antarctique (manchot empereur) et celles de l'Arctique (ours polaire, morse, phoque annelé) est également sujet à limitations. En effet, celles-ci comportent un statut clé pour leur milieu respectif par rapport à des enjeux liés à la cryosphère, cependant la comparaison synthèse possiblement trop les similarités entre les espèces. Alors que chacune des espèces dépendent de la glace, elles ne partagent pas un mode de vie ni un rôle écologique similaires. Par exemple, le morse utilise la glace pour se reposer et se nourrir dans les haut-fond, alors que le manchot empereur emploie la glace pour se reproduire, loin de la mer et doit traverser plusieurs jours à pied pour atteindre sa source de nourriture. Cela dit, les deux espèces vivent également en colonies, démontrant ainsi une forte similarité au sein de leur rôle écologique et cycle de vie.

CONCLUSION

L'analyse de la biosurveillance du manchot empereur démontre l'efficacité des protocoles scientifiques standardisés lorsqu'ils sont soutenus par un cadre de gouvernance unique, dénué de conflit territorial. Cependant, la proposition d'utiliser ce modèle comme référence pour l'Arctique met en lumière une dichotomie fondamentale : celle de la nature physique même des deux pôles.

L'Antarctique, sous la forme d'une plateforme continentale parsemée de glace, symbolise la résilience structurelle. Le traité qui le définit par sa complicité, en dépit de ses faiblesses, repose sur un socle physique inébranlable qui garantit la primauté de la science. La coopération et la standardisation des données y sont la règle, permettant un suivi rapide et coordonné des espèces sentinelles. Ce modèle de biosurveillance est un produit direct de cette base stable.

À l'inverse, l'Arctique est un océan pris au sein d'une enveloppe de continents soit un espace en transition démunie de son identité même, et dont l'intégrité dépend entièrement de la glace de mer flottante. Cette structure intrinsèquement fragile et vulnérable se reflète dans sa gouvernance fragmentée. La compétition pour les ressources ainsi que la hausse des tensions géopolitiques limitant le partage des données sont considérées comme des actifs nationaux plutôt que des biens mondiaux sont les manifestations directes de cette instabilité physique. De plus, l'Arctique est séparée par les zones nationales alors que l'Antarctique s'unifie comme une seule entité partagée géographiquement par les signataires du traité de l'Antarctique.

Par conséquent, si le manchot empereur offre une méthodologie scientifique d'une rigueur indispensable pour le suivi des espèces arctiques menacées, l'adoption complète de ce modèle exige un effort politique et diplomatique majeur. Il ne s'agit pas seulement de retranscrire des protocoles de comptage de population, mais bien de créer une structure de coopération qui surmonte la fragilité géopolitique de l'Arctique. L'avenir des espèces bioindicateurs de ce milieu, telles que l'ours polaire et le morse, dépendra ultimement de la capacité des nations souveraines à imiter la neutralité et la transparence du septième continent.

ANNEXE A

MOTS-CLÉS VOLET 1 DE LA RECHERCHE

"emperor penguin" surveillance OR biomonitoring AND surveys OR Sensing OR

H5N1 OR zoonoses OR biomarkers -optimization -optimizer

ANNEXE B

MOTS-CLÉS VOLET 2 DE LA RECHERCHE

Arctic AND Antarctica AND biomonitoring AND climate change AND emperor
penguin AND polar bear OR polar governance OR remote sensing OR Russia OR
treaty OR walrus

BIBLIOGRAPHIE

Airborne science and technology. (s. d.). *British Antarctic Survey*. <https://www.bas.ac.uk/polar-operations/sites-and-facilities/facility/airborne-science-and-technology/>

Aircraft capability. (s. d.). *British Antarctic Survey*. <https://www.bas.ac.uk/polar-operations/polar-science-facilities/aircraft/>

Arctic Governance and the Arctic Council | RGS. (s. d.). Récupéré le 14 novembre 2025 de <https://www.rgs.org/schools/resources-for-schools/arctic-governance-and-the-arctic-council>

Banyard, A. C., Bennison, A., Byrne, A. M. P., Reid, S. M., Lynton-Jenkins, J. G., Mollett, B., De Silva, D., Peers-Dent, J., Finlayson, K., Hall, R., Blockley, F., Blyth, M., Falchieri, M., Fowler, Z., Fitzcharles, E. M., Brown, I. H. et James, J. (2024). Detection and spread of high pathogenicity avian influenza virus H5N1 in the Antarctic Region. *Nature Communications*, 15(1), 7433. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51490-8>

Barber-Meyer, S. M., Kooyman, G. L. et Ponganis, P. J. (2007). Estimating the relative abundance of emperor penguins at inaccessible colonies using satellite imagery. *Polar Biology*, 30(12), 1565-1570. <https://doi.org/10.1007/s00300-007-0317-8>

Barbraud, C. et Weimerskirch, H. (2001). Emperor penguins and climate change. *Nature*, 411(6834), 183-186. <https://doi.org/10.1038/35075554>

Bargagli, R. et Rota, E. (2024). Environmental contamination and climate change in Antarctic ecosystems: an updated overview. *Environmental Science: Advances*, 3(4), 543-560. <https://doi.org/10.1039/D3VA00113J>

Barr, S. (2018). Twenty years of protection of historic values in Antarctica under the Madrid Protocol. *The Polar Journal*, 8(2), 241-264. <https://doi.org/10.1080/2154896X.2018.1541547>

BBNJ Agreement | Agreement on Marine Biological Diversity of Areas beyond National Jurisdiction. (s. d.). Récupéré le 21 novembre 2025 de <https://www.un.org/bbnjagreement/en>

Brooks, C. M., Ainley, D. G., Abrams, P. A., Dayton, P. K., Hofman, R. J., Jacquet, J. et Siniff, D. B. (2018). Antarctic fisheries: factor climate change into their management. *Nature*, 558(7709), 177-180. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05372-x>

Brooks, C., Stammerjohn, S., Ballard, G., DuVivier, A. K., Hofmann, E., LaRue, M., Nissen, C., Orona, A. J., Pan, B. J., Schmidt, A. E., Walker, N., Watters, G. M. et Weller, J. (2024). Building a coordinated framework for research and monitoring in large-scale international marine protected areas: The Ross Sea region as a model system. *Conservation Letters*, 17(6), e13053. <https://doi.org/10.1111/conl.13053>

Canada, E. and C. C. (2015, 20 février). *Law of the Sea: United Nations convention* [transparency - other]. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/corporate/international-affairs/partnerships-organizations/law-sea-united-nations-convention.html>

CCAMLR-44 | Meetings. (s. d.). Récupéré le 6 novembre 2025 de <https://meetings.ccamlr.org/en/ccamlr-44>

Cerdà-Cuéllar, M., Moré, E., Ayats, T., Aguilera, M., Muñoz-González, S., Antilles, N., Ryan, P. G. et González-Solís, J. (2019). Do humans spread zoonotic enteric bacteria in Antarctica? *Science of The Total Environment*, 654, 190-196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.272>

Chaousis, S., Leusch, F. D. L. et van de Merwe, J. P. (2018). Charting a path towards non-destructive biomarkers in threatened wildlife: A systematic quantitative literature review. *Environmental Pollution*, 234, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.044>

Chown, S. L. et Brooks, C. M. (2019). The State and Future of Antarctic Environments in a Global Context. *Annual Review of Environment and Resources*, 44(Volume 44, 2019), 1-30. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033236>

Clessin, A., Briand, F.-X., Tornos, J., Lejeune, M., De Pasquale, C., Fischer, R., Souchaud, F., Hirchaud, E., Hong, S. L., Bralet, T., Guinet, C., McMahon, C. R., Grasland, B., Baele, G. et Boulinier, T. (2025). Circumpolar spread of avian influenza H5N1 to southern Indian Ocean islands. *Nature Communications*, 16(1), 8463. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64297-y>

Davidson, S. C., Bohrer, G., Gurarie, E., LaPoint, S., Mahoney, P. J., Boelman, N. T., Eitel, J. U. H., Prugh, L. R., Vierling, L. A., Jennewein, J., Grier, E., Couriot, O., Kelly, A. P., Meddens, A. J. H., Oliver, R. Y., Kays, R., Wikelski, M., Aarvak, T., Ackerman, J. T., ... Hebblewhite, M. (2020). Ecological insights from three decades of animal movement tracking across a changing Arctic. *Science*, 370(6517), 712-715. <https://doi.org/10.1126/science.abb7080>

Deadly avian flu strain is spreading rapidly in Antarctica. (s. d.). Récupéré le 24 septembre 2025 de <https://www.science.org/content/article/deadly-avian-flu-strain-spreading-rapidly-antarctica>

Dickens, J., Hollyman, P. R., Hart, T., Clucas, G. V., Murphy, E. J., Poncet, S., Trathan, P. N. et Collins, M. A. (2021). Developing UAV Monitoring of South Georgia and the South Sandwich Islands' Iconic Land-Based Marine Predators. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.654215>

Du, Z., Liu, C., Xie, Z., Luo, H.-Y., Zhang, W. et He, X. (2025). Address Arctic shipping crisis at COP30. *Science*, 388(6752), 1143-1144. <https://doi.org/10.1126/science.adx4305>

Eccles, K. M., Boutet, V., Branigan, M., Dyck, M., Groot, P. van C. de, Loughheed, S. C., Rutter, A. et Langlois, V. S. (2024). Non-invasive biomonitoring of polar bear feces can be used to estimate concentrations of metals of concern in traditional food. *PLOS ONE*, 19(6), e0305398. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305398>

Female and young walruses depend on disappearing Arctic sea ice for food sources. (s. d.). ScienceDaily. Récupéré le 18 novembre 2025 de <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/08/210820111104.htm>

Fretwell, P. T., LaRue, M. A., Morin, P., Kooyman, G. L., Wienecke, B., Ratcliffe, N., Fox, A. J., Fleming, A. H., Porter, C. et Trathan, P. N. (2012). An Emperor Penguin Population Estimate: The First Global, Synoptic Survey of a Species from Space. *PLOS ONE*, 7(4), e33751. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033751>

Gilg, O., Kovacs, K. M., Aars, J., Fort, J., Gauthier, G., Grémillet, D., Ims, R. A., Møltøfte, H., Moreau, J., Post, E., Schmidt, N. M., Yannic, G. et Bollache, L. (2012a). Climate change and the ecology and evolution of Arctic vertebrates. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1249(1), 166-190. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06412.x>

Gilg, O., Kovacs, K. M., Aars, J., Fort, J., Gauthier, G., Grémillet, D., Ims, R. A., Møltøfte, H., Moreau, J., Post, E., Schmidt, N. M., Yannic, G. et Bollache, L. (2012b). Climate change and the ecology and evolution of Arctic vertebrates. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1249(1), 166-190. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06412.x>

Goebel, M. E., Perryman, W. L., Hinke, J. T., Krause, D. J., Hann, N. A., Gardner, S. et LeRoi, D. J. (2015). A small unmanned aerial system for estimating abundance and size of Antarctic predators. *Polar Biology*, 38(5), 619-630. <https://doi.org/10.1007/s00300-014-1625-4>

Haward, M. et Jackson, A. (2023). Antarctica: geopolitical challenges and institutional resilience. *The Polar Journal*, 13(1), 31-48. <https://doi.org/10.1080/2154896X.2023.2205237>

Hays, G. C., Bailey, H., Bograd, S. J., Bowen, W. D., Campagna, C., Carmichael, R. H., Casale, P., Chiaradia, A., Costa, D. P., Cuevas, E., Bruyn, P. J. N. de, Dias, M. P., Duarte, C. M., Dunn, D. C., Dutton, P. H., Esteban, N., Friedlaender, A., Goetz, K. T., Godley, B. J., ... Sequeira, A. M. M. (2019). Translating Marine Animal Tracking Data into Conservation Policy and Management. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(5), 459-473. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.01.009>

Hellmann, K. (s. d.). *Deep Sea Mining in the Arctic: Navigating Jurisdictional Shifts and Environmental Norms in International Law*.

ICI.Radio-Canada.ca, Z. É.-. (2024, 14 décembre). *Augmentation du trafic maritime dans l'Arctique canadien en 2024 | Bilans de l'année 2024 et perspectives pour 2025*. Radio-Canada.ca. Radio-Canada.ca. <https://ici.radio-canada.cahttps://ici.radio-canada.ca/nouvelle/2126880/arctique-bateau-passage-mines>

Jenouvrier, S., Caswell, H., Barbraud, C., Holland, M., Strøve, J. et Weimerskirch, H. (2009). Demographic models and IPCC climate projections predict the decline of an emperor penguin population. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1844-1847, world. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806638106>

Jenouvrier, S., Garnier, J., Patout, F. et Desvillettes, L. (2017). Influence of dispersal processes on the global dynamics of Emperor penguin, a species threatened by climate change. *Biological Conservation*, 212, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.05.017>

Johansson, M. et Callaghan, T. V. (2025). The rise and fall of science diplomacy in the Arctic: The “INTERACT” experience. *Polar Record*, 61, e8. <https://doi.org/10.1017/S0032247425000014>

Kawaguchi, S., Ishida, A., King, R. *et al.* Risk maps for Antarctic krill under projected Southern Ocean acidification. *Nature Clim Change* 3, 843–847 (2013). <https://doi.org/10.1038/nclimate1937>

Krüger, L., Huerta, M. F., Santa Cruz, F. et Cárdenas, C. A. (2021). Antarctic krill fishery effects over penguin populations under adverse climate conditions: Implications for the management of fishing practices. *Ambio*, 50(3), 560-571. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01386-w>

LaRue, M. A., Rotella, J. J., Garrott, R. A., Siniff, D. B., Ainley, D. G., Stauffer, G. E., Porter, C. C. et Morin, P. J. (2011). Satellite imagery can be used to detect variation in abundance of Weddell seals (*Leptonychotes weddellii*) in Erebus Bay, Antarctica. *Polar Biology*, 34(11), 1727-1737. <https://doi.org/10.1007/s00300-011-1023-0>

LaRue, M. A., Stapleton, S. et Anderson, M. (2017). Feasibility of using high-resolution satellite imagery to assess vertebrate wildlife populations. *Conservation Biology*, 31(1), 213-220. <https://doi.org/10.1111/cobi.12809>

LaRue, M., Brooks, C., Wege, M., Salas, L. et Gardiner, N. (2022). High-resolution satellite imagery meets the challenge of monitoring remote marine protected areas in the Antarctic and beyond. *Conservation Letters*, 15(4), e12884. <https://doi.org/10.1111/conl.12884>

LaRue, M., Iles, D., Labrousse, S., Fretwell, P., Ortega, D., Devane, E., Horstmann, I., Viollat, L., Foster-Dyer, R., Le Bohec, C., Zitterbart, D., Houstin, A., Richter, S., Winterl, A., Wienecke, B., Salas, L., Nixon, M., Barbraud, C., Kooyman, G., ... Jenouvrier, S. (2024). Advances in remote sensing of emperor penguins: first multi-year time series documenting trends in the global population. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 291(2018), 20232067. <https://doi.org/10.1098/rspb.2023.2067>

León, F., Le Bohec, C., Pizarro, E. J., Baille, L., Cristofari, R., Houstin, A., Zitterbart, D. P., Ulloa-Contreras, C., Barriga, G., Poulin, E. et Vianna, J. A. (2025). Tracking HPAIV H5 through a geographic survey of Antarctic seabird populations. *Scientific Reports*, 15(1), 29499. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14651-3>

Lycett, S. J., Duchatel, F. et Digard, P. (2019). A brief history of bird flu. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1775), 20180257. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0257>

Muñoz, G., Ulloa, M., Alegría, R., Quezada, B., Bennett, B., Enciso, N., Atavales, J., Johow, M., Aguayo, C., Araya, H. et Neira, V. (2024). Stranding and mass mortality in humboldt penguins (*Spheniscus humboldti*), associated to HPAIV H5N1 outbreak in Chile. *Preventive Veterinary Medicine*, 227, 106206. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2024.106206>

Nevitt, M. et Percival, R. (2018). Polar Opposites: Assessing the State of Environmental Law in the World's Polar Regions. *Boston College Law Review*. https://scholarship.law.upenn.edu/faculty_scholarship/1913

Norway undermines the High Seas Treaty by rushing deep sea mining authorization. (s. d.). *WWF Arctic*. <https://www.arcticwwf.org/newsroom/features/norway-undermines-the-high-seas-treaty-by-rushing-deep-sea-mining-authorization/>

(PDF) Satellite imagery can be used to detect variation in abundance of Weddell seals (*Leptonychotes weddellii*) in Erebus Bay, Antarctica. (2025). *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1007/s00300-011-1023-0>

Ratcliffe, N., Guihen, D., Robst, J., Crofts, S., Stanworth, A. et Enderlein, P. (2015). A protocol for the aerial survey of penguin colonies using UAVs. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(3), 95-101. <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0006>

Ricaud, P., Medina, P., Durand, P., Attié, J.-L., Bazile, E., Grigioni, P., Guasta, M. D. et Pauly, B. (2023). In Situ VTOL Drone-Borne Observations of Temperature and Relative Humidity over Dome C, Antarctica. *Drones*, 7(8), 532. <https://doi.org/10.3390/drones7080532>

Robert-Coudert, Y., Chiaradia, A., Ainley, D., Barbosa, A., Boersma, P. D., Brasso, R., Dewar, M., Ellenberg, U., García-Borboroglu, P., Emmerson, L., Hickcox, R., Jenouvrier, S., Kato, A., McIntosh, R. R., Lewis, P., Ramírez, F., Ruoppolo, V., Ryan, P. G., Seddon, P. J., ... Trathan, P. N. (2019). Happy Feet in a Hostile World? The Future of Penguins Depends on Proactive Management of Current and Expected Threats. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00248>

Salines, G. (2012). Biosurveillance humaine, biomarqueurs et biosurveillance environnementale. *Annales Pharmaceutiques Françaises*, 70(4), 199-203. <https://doi.org/10.1016/j.pharma.2012.03.004>

Shah, K., Ballard, G., Schmidt, A. et Schwager, M. (2020). Multidrone aerial surveys of penguin colonies in Antarctica. *Science Robotics*, 5(47), eabc3000. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abc3000>

Southern Ocean protection takes a step backwards as CCAMLR fails to put conservation first - Antarctic and Southern Ocean Coalition. (2024, 25 octobre). <https://www.asoc.org/news/southern-ocean-protection-takes-a-step-backwards/>

Sparaventi, E., Rodríguez-Romero, A., Barbosa, A., Ramajo, L. et Tovar-Sánchez, A. (2021). Trace elements in Antarctic penguins and the potential role of guano as source of recycled metals in the Southern Ocean. *Chemosphere*, 285, 131423. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131423>

Sub-Antarctic and Antarctic Highly Pathogenic Avian Influenza H5N1 Monitoring Project. (2024, 5 décembre). *SCAR*. <https://scar.org/library-data/avian-flu>

Sumaila, U. R., Zeller, D., Hood, L., Palomares, M. L. D., Li, Y. et Pauly, D. (2020). Illicit trade in marine fish catch and its effects on ecosystems and people worldwide. *Science Advances*, 6(9), eaaz3801. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz3801>

Swathi, M., Srivastava, A., Kumar, A., Yadav, J., Gupta, D. C. et Mohan, R. (2025). Trends in Antarctic Sea Ice and Albedo: Impacts of Ocean-Atmospheric Processes. *International Journal of Climatology*, 45(6), e8791. <https://doi.org/10.1002/joc.8791>

Tan, A., Salman, M., Wagner, B. et McCluskey, B. (2023). The Role of Animal Health Components in a Biosurveillance System: Concept and Demonstration. *Agriculture*, 13(2), 457. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020457>

The Antarctic Treaty | Antarctic Treaty. (s. d.). Récupéré le 19 novembre 2025 de <https://www.ats.aq/e/antarctictreaty.html>

Thomas, R., Rignot, E., Casassa, G., Kanagaratnam, P., Acuña, C., Akins, T., Brecher, H., Frederick, E., Gogineni, P., Krabill, W., Manizade, S., Ramamoorthy, H., Rivera, A., Russell, R., Sonntag, J., Swift, R., Yungel, J. et Zwally, J. (2004). Accelerated Sea-Level Rise from West Antarctica. *Science*, 306(5694), 255-258. <https://doi.org/10.1126/science.1099650>

Trathan, P. N., García-Borboroglu, P., Boersma, D., Bost, C.-A., Crawford, R. J. M., Crossin, G. T., Cuthbert, R. J., Dann, P., Davis, L. S., De La Puente, S., Ellenberg, U., Lynch, H. J., Mattern, T., Pütz, K., Seddon, P. J., Trivelpiece, W. et Wienecke, B. (2015). Pollution, habitat loss, fishing, and climate change as critical threats to penguins. *Conservation Biology*, 29(1), 31-41. <https://doi.org/10.1111/cobi.12349>

Udevitz, M. S., Jay, C. V., Taylor, R. L., Fischbach, A. S., Beatty, W. S. et Noren, S. R. (2017). Forecasting consequences of changing sea ice availability for Pacific walruses. *Ecosphere*, 8(11), e02014. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2014>

Wagner, E. L., Rebstock, G. A. et Boersma, P. D. (2024). A fearful scourge to the penguin colonies: Southern giant petrel (*Macronectes giganteus*) predation on living Magellanic penguins (*Spheniscus magellanicus*) may be more common than assumed. *Ecology and Evolution*, 14(4), e11258. <https://doi.org/10.1002/ece3.11258>

Wang, Y., Lin, Y., Wu, S., Sun, J., Meng, Y., Jin, E., Kong, D., Duan, G., Bei, S., Fan, Z., Wu, G., Hao, L., Song, S., Tang, B. et Zhao, W. (2024). BioKA: a curated and integrated biomarker knowledgebase for animals. *Nucleic Acids Research*, 52(D1), D1121-D1130. <https://doi.org/10.1093/nar/gkad873>

Ware, D. G. W. (2001). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology: Continuation of Residue Reviews*. Springer Science & Business Media.

Wells, P. G. (1999). Biomonitoring the Health of Coastal Marine Ecosystems – The Roles and Challenges of Microscale Toxicity Tests. *Marine Pollution Bulletin*, 39(1), 39-47. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00120-4](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00120-4)

Who Governs Antarctica? Understanding the Unique Governance of the Frozen Continent - Antarctic and Southern Ocean Coalition. (s. d.). <https://www.asoc.org/ice-archive/who-governs-antarctica/>

Willaert, K., & Soete, A. (2025). The interaction between the BBNJ Agreement and the international deep sea mining regime : more questions than answers? *OCEAN DEVELOPMENT AND INTERNATIONAL LAW*, 56(2), 176–213. <https://doi.org/10.1080/00908320.2025.2472634>

Workshop, P. C. on I-S. M. and G. for C. A. to an I. O. H. B. S., Policy, B. on H. S. et Medicine, I. of. (2011). Introduction and Overview. Dans *Information Sharing and Collaboration: Applications to Integrated Biosurveillance: Workshop Summary*. National Academies Press (US). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK189584/>

Zmarz, A., Rodzewicz, M., Dąbski, M., Karsznia, I., Korczak-Abshire, M. et Chwedorzewska, K. J. (2018). Application of UAV BVLOS remote sensing data for multi-faceted analysis of Antarctic ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 217, 375-388. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.031>