

# Prospective recherches polaires



UNE PROSPECTIVE DE L'INSTITUT ECOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

cnrs

dépasser les frontières

[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)







# SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	3
INTRODUCTION	5
POURQUOI UNE RECHERCHE EN ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT DANS LES REGIONS POLAIRES	7
<b>CHANGEMENT GLOBAL &amp; BIODIVERSITES POLAIRES</b>	14
I. BIOGEOGRAPHIE - STRUCTURATION SPATIALE ET TEMPORELLE	16
II. ECOPHYSIOLOGIE - SEUIL DE TOLERANCE, ACCLIMATATION, PLASTICITE DES ORGANISMES	24
III. EVOLUTION, PHYLOGENIE, EMERGENCE DES ESPECES - CONSERVATION	32
IV. CONSERVATION - REGIONALISATION - RESTAURATION	35
ANNEXE 1 : Modèles animaux et végétaux suivis dans les programmes soutenus par l'IPEV	37
<b>CHANGEMENT GLOBAL, HOMMES &amp; SOCIETES HUMAINES POLAIRES</b>	38
I. REPONSES DES ENVIRONNEMENTS POLAIRES ET SUBPOLAIRES AU CHANGEMENT GLOBAL ET INTERACTIONS HOMMES-MILIEUX	41
II. APPROCHE MULTI-TEMPORELLE DES MODIFICATIONS CLIMATIQUES ET DE LEURS CONSEQUENCES SUR LES INTERACTIONS ENTRE LES HOMMES ET LES MILIEUX ARCTIQUES	45
III. RELATION HOMME / ANIMAL EN MILIEUX ARCTIQUES : CHANGEMENTS, RISQUES, ADAPTABILITE ET VULNERABILITE POLAIRES	52
CONCLUSION	56
ANNEXE 2 : Sources d'informations	60

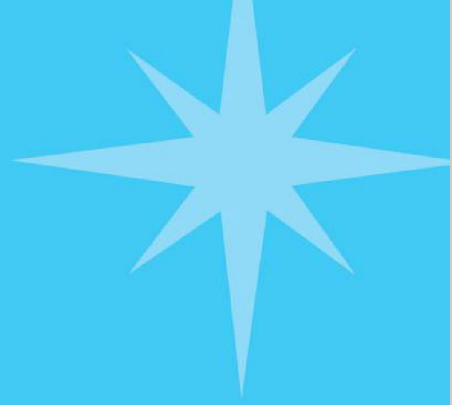


# recherches polaires

Prospective

Coordination :  
Robert Chenorkian et Mireille Raccurt

Avec la collaboration de :  
Nadia Ameziane, Sylvie Beyries, Eric  
Crubézy, Bruno David, Jean Pierre Féral,  
Yves Frenot, Yvon le Maho, Philippe  
Koubbi, Marc Lebouvier, Guillaume  
Lecointre, Emmanuèle Gautier.





## AVANT-PROPOS

Les régions polaires sont aujourd'hui profondément affectées par le changement global. La 4<sup>ème</sup> année polaire internationale (2007-2008) a permis de faire le point sur les perturbations climatiques et environnementales en cours et d'inclure pour la première fois la dimension humaine et sociale qui s'y rattache en Arctique. L'un des principaux enjeux liés aux changements anthropiques est d'arriver à prévoir l'évolution des structures humaines, de la biodiversité, les fluctuations de l'abondance et de la localisation des différentes populations animales et végétales. Pour l'INEE, le champ d'étude concerne tout à la fois, géosphère, biosphère et anthroposphère dans leurs interactions. C'est dans cette perspective que les principaux acteurs des différents champs scientifiques impliqués dans ces recherches ont défini les axes prioritaires de la recherche polaire pour les années à venir.

Cette réflexion s'appuie sur un existant solide. La recherche polaire française s'est construite une légitimité scientifique internationale qui repose sur des sites exceptionnels d'étude, tant en Antarctique qu'en subantarctique, où une activité d'observation ininterrompue depuis plus de 50 ans a permis d'alimenter des bases de données uniques au monde. Elle repose également sur l'Institut Polaire Français-Paul-Émile Victor à qui nous devons une logistique qui s'est professionnalisée d'année en année et la cohérence actuelle de nos actions de recherches. Traditionnellement moins présente en Arctique, la recherche française s'y développe aujourd'hui de plus en plus, dans ces régions où l'impact du changement global est particulièrement prégnant, écologiquement, socialement, économiquement et politiquement. Cette présence arctique/antarctique présente aussi l'intérêt de permettre le développement de recherches comparatives sur les pôles pour la plupart des thématiques scientifiques et des collaborations internationales.

Quatre grands objectifs complémentaires se dégagent de cet exercice de prospective : 1/ maintenir les réseaux de stations d'observation existants et développer des structures du type zone atelier Antarctique ou OHM (Observatoires Hommes/Milieus), véritables outils pluridisciplinaires d'analyse des socio-écosystèmes peu ou fortement anthropisés

qui permettent de décrire les changements passés et présents et de les lier entre eux dans la dynamique et la distribution des populations en relation avec les variations climatiques ; 2/ comprendre les mécanismes, de la molécule à l'écosystème, par lesquels la variabilité climatique affecte les processus biologiques ; 3/ modéliser et prédire l'impact des évolutions du système climatique sur les populations et les écosystèmes pour, 4/ instruire, alimenter la réflexion et participer à la mise en place de mesures de conservation, de protection ou de prévention, que ce soit pour les espèces menacées, les patrimoines archéologiques, ethnographiques et linguistiques des peuples autochtones et pour aider à un devenir soutenable de la Planète.

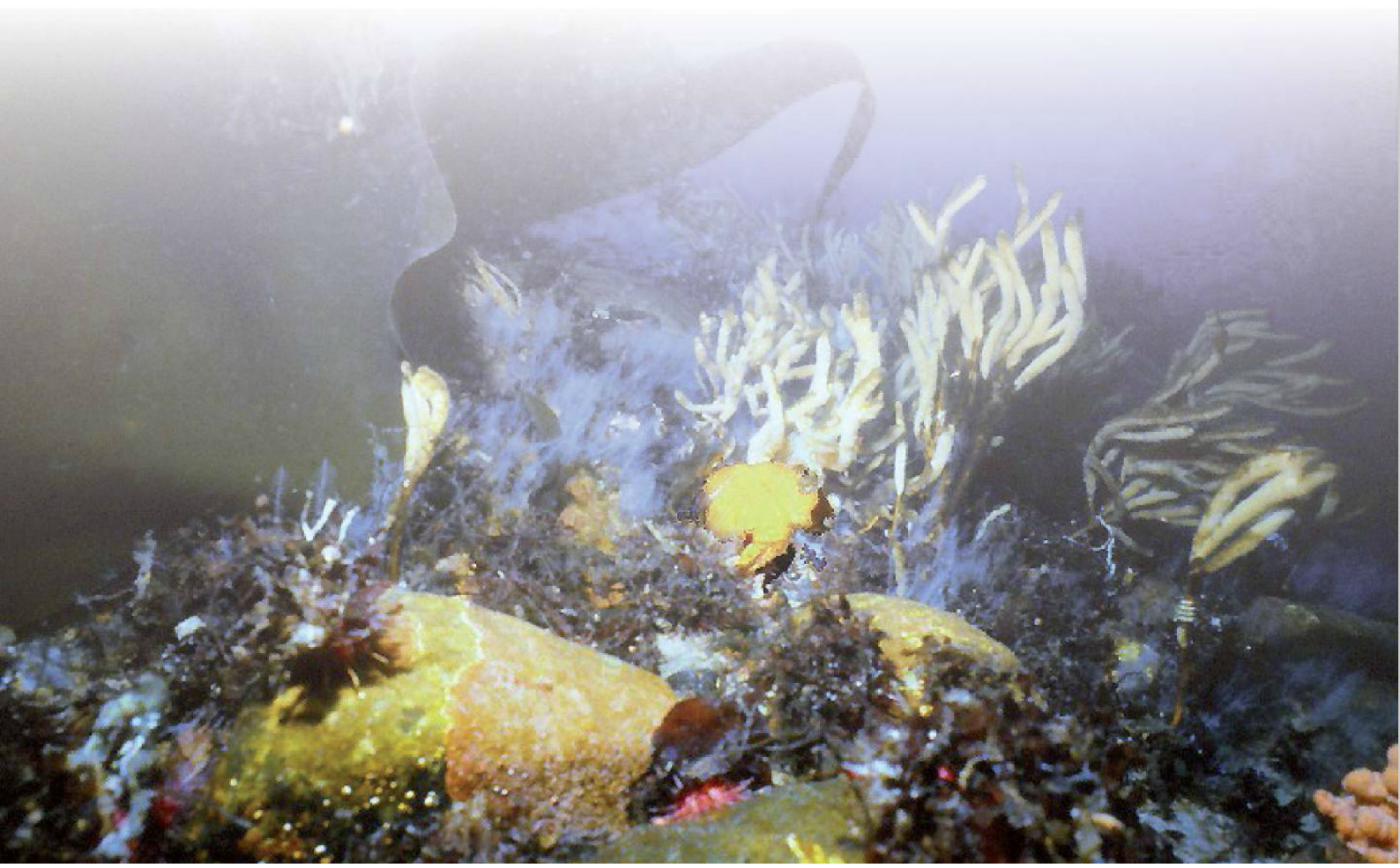
C'est une réponse scientifique robuste qu'il faut construire face à l'enjeu écologique et sociétal que constituent les transformations à l'œuvre dans les régions polaires.

**Françoise Gaill**

Directrice de l'Institut écologie et environnement du CNRS

**Robert Chenorkian**

Directeur adjoint scientifique, INEE, CNRS





## INTRODUCTION

**T**ous les modèles de projection climatique qui prennent en compte l'évolution des paramètres atmosphère / océan / glace pour les 20, voire les 100 années à venir montrent une hypersensibilité des environnements polaires au changement global. Les dernières avancées scientifiques montrent aussi que les pôles ne sont plus seulement les témoins lointains du réchauffement climatique mais de véritables acteurs participant à la disharmonie climatique qui pèse déjà sur les écosystèmes. Cette évolution du climat et ses conséquences sur les biodiversités et les sociétés humaines suscitent des questionnements scientifiques et donnent aux recherches polaires une importance toute particulière.

Les équipes françaises travaillant sur les stations antarctiques, subantarctiques et arctiques sont internationalement reconnues<sup>1</sup>. Au plan international, la France occupe la 7<sup>ème</sup> place pour les recherches qui concernent l'Arctique et la 5<sup>ème</sup> place pour celles qui concernent l'Antarctique. Si l'on considère uniquement le subantarctique, la France occupe la première place. Ce rôle de leader notamment en sciences de la vie est directement lié à une activité d'observatoires ininterrompue depuis plus de 50 ans.

Parmi les disciplines étudiées, la biologie, l'écologie et les sciences de l'environnement occupent une large part des recherches antarctiques (40 %) et arctiques (39%) à laquelle il faut ajouter les Sciences humaines et sociales (4 %), en nette progression depuis l'API.

La forte participation des communautés scienti-

fiques qui s'intéressent à l'Ecologie, aux Biodiversités et aux interactions que l'homme développe avec son milieu implique 26 UMR et UPR de l'INEE qui sont engagées dans 9 programmes de recherche en Antarctique, 10 en subantarctique et 12 programmes en Arctique, dont 5 dans les sciences humaines et sociales. Nombre de ces projets ont été intégrés aux actions de l'API comme le programme CEAMARC, contributeur du projet international Census of Antarctic Marine Life, le plus gros projet concernant la biodiversité marine à l'échelle de l'Océan austral de ces dernières années. On peut citer également le projet « Aliens in Antarctica » qui a mis en évidence le danger que constituent les introductions accidentelles d'espèces en Antarctique, dans un contexte de réchauffement global qui fragilise la biodiversité locale, ou bien encore la Zone Atelier sur l'Environnement Antarctique et Subantarctique qui joue un rôle très important dans le développement de la recherche française et sa visibilité internationale dans ces régions.

Cette mobilisation pluridisciplinaire reflète le besoin de connaissances, tant sur les mécanismes à l'œuvre dans les écosystèmes polaires que sur l'état et les dynamiques du vivant, dans le contexte actuel du changement global.

C'est dans cette réflexion que s'inscrit l'exercice de perspectives présenté dans ce document, exercice collaboratif pour lequel ont été sollicités les acteurs des différents champs scientifiques impliqués dans le suivi et la compréhension du Vivant, Hommes et Biodiversité de l'INEE, afin de définir quelles sont au-

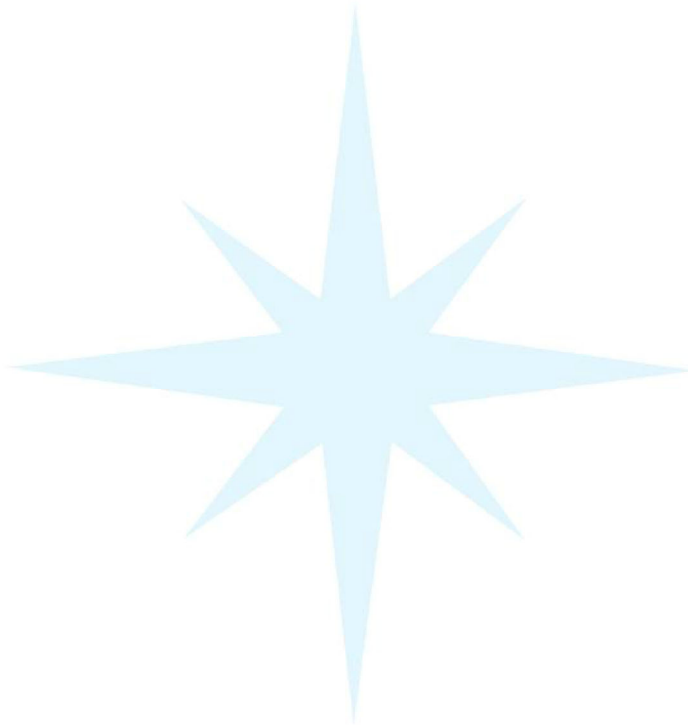
1 - Une analyse bibliométrique de la littérature scientifique polaire internationale depuis 2007, début de l'Année Polaire Internationale (API), jusqu'à fin 2010, montre l'évolution de l'orientation des recherches et répertorie 18741 références, tous domaines confondus, réparties de manière prédominante sur l'Arctique (13238 références), Masquillier M.-L., Nouvelle étude bibliométrique de la littérature scientifique sur la recherche polaire, INIST-CNRS, 28/07/2010, <<http://recherchespolaires.veille.inist.fr/spip.php?article576>>

aujourd'hui, dans ce cadre, les thématiques émergentes, les recherches innovantes qui vont permettre de répondre à la complexité actuelle des enjeux environnementaux dans les régions polaires.

Cette réflexion s'attache d'abord à montrer l'intérêt des recherches polaires en mettant l'accent sur leur caractère spécifique selon qu'elles se situent au Nord ou au Sud. Elle identifie également les différents champs thématiques reconnus et porteurs d'innovations scientifiques aussi bien en Biologie marine et terrestre que pour les interactions hommes-milieux puisque la Biodiversité est l'expression d'enjeux non seulement en termes de survie pour la biosphère, mais aussi pour les sociétés humaines en termes de conflit d'intérêts et de compétition pour les ressources. Puis sont présentées successivement les prospectives pro-

pres aux champs scientifiques centrés sur les Biodiversités et celles qui concernent les relations hommes-milieux, afin de mieux cerner leurs spécificités et leurs enjeux respectifs. L'objectif est de fournir ainsi les éléments pour une définition des stratégies à long terme, des orientations qu'il faudrait soutenir pour maintenir et renforcer la position internationale de ces recherches. Ces priorités scientifiques ont été réunies dans un bilan prospectif avec une évaluation des moyens nécessaires, moyens logistiques, technologiques, organisationnels, équipements et moyens humains.

Tous ces éléments sont fournis pour nourrir une réflexion prospective nécessaire au développement d'une recherche polaire innovante et compétitive au sein de l'Institut Écologie et Environnement du CNRS.





# POURQUOI UNE RECHERCHE EN ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT DANS LES REGIONS POLAIRES ?

**Les milieux polaires se caractérisent par des conditions climatiques particulières et extrêmes avec des modalités de changements temporel et spatial spécifiques qui en font des zones de rupture ou de front. L'une des causes majeures de ces particularismes est la limite physique de la congélation de l'eau et les conséquences qu'elle peut avoir sur les caractéristiques géomorphologiques des territoires et leur évolution, sur les biodiversités animales et végétales, sur l'homme et ses sociétés. Or, le réchauffement climatique affecte avec ampleur la plupart des secteurs polaires. En touchant directement au facteur essentiel de l'organisation des milieux et de leurs dynamiques, la glace, il conduit à des modifications profondes, brutales et décisives de leur devenir. Quels sont les enjeux actuels et futurs, pour l'écologie, la biodiversité et les interactions hommes-milieux dans ces zones ? Telles sont les questions qui sont aujourd'hui posées à notre communauté scientifique et auxquelles le présent document s'attache.**



## ARCTIQUE - ANTARCTIQUE, UNE RECHERCHE ADAPTÉE À LEURS PARTICULARITÉS

L'Arctique est un océan entouré de continents qu'occupent des populations humaines, l'Antarctique, un continent sans population humaine permanente et entouré d'océans. La distribution des mers et des terres implique une circulation atmosphérique et océanique spécifique à chaque pôle, qui les individualise dans leurs modalités de réponse au changement climatique.

L'Arctique, certes à des degrés divers selon les lieux, est significativement anthropisé depuis des millénaires alors que le Front Polaire, ou Convergence Antarctique, isole un environnement considéré encore comme peu perturbé par l'homme.

En Arctique, les activités humaines ont pendant longtemps été liées à la chasse et à la pêche, à la domestication du renne et, plus récemment, au Groenland et en Sibérie par exemple, à des activités agro-pastorales. Ces activités coexistent ou ont été remplacées à la fin de la période

moderne et à la période contemporaine par des activités industrielles importées des zones méridionales des états riverains, voire d'états ne relevant pas de la zone arctique. Sur les continents qui entourent l'Arctique vivent aujourd'hui, au dessus du cercle polaire, quatre millions de personnes dont 10% d'autochtones, qui furent certainement plus nombreux à certains moments du passé, tandis qu'il n'y a que quelques milliers de personnes qui transitent plus ou moins longuement en Antarctique<sup>2</sup>. Ces deux zones sont soumises à une circulation humaine grandissante liée au tourisme et à la pêche. L'ouverture du passage du nord-ouest et l'accès aux zones minières en Arctique, l'augmentation du trafic maritime lié au tourisme antarctique constituent des facteurs de perturbation (marées noires, eaux de ballast, etc.) des écosystèmes continentaux et marins déjà touchés par l'évolution climatique et ses conséquences sur les milieux.

2 - Pendant l'année polaire internationale (2007-2008) ce sont 8270 scientifiques ou logisticiens des Programmes Nationaux qui ont transité par l'Antarctique (données COMNAP) ; dans le même temps, plus de 40 000 touristes ont visité la Péninsule antarctique (données IAATO).



## CHANGEMENT GLOBAL ET QUESTIONNEMENTS DE LA RECHERCHE

Les zones polaires Nord/Sud, terrestres/marines abritent une biodiversité originale qui se manifeste par la composition taxonomique et la structure spécifique des communautés, le niveau d'endémisme élevé des espèces ou leurs caractéristiques biogéographiques et par leur degré de tolérance physiologique à des conditions environnementales souvent proches de leurs limites de développement. Bien que différentes en Arctique et en Antarctique, ces espèces ont pourtant réussi à s'implanter aux frontières de la vie. De la même façon, les sociétés humaines qui se sont établies et adaptées dans les zones arctiques ont développé des systèmes sociaux, économiques et culturels, des savoirs locaux, en adéquation avec les conditions extrêmes et les ressources qu'elles pouvaient y rencontrer. Elles sont donc aujourd'hui, particulièrement sensibles au changement global.

La survie des faunes et flores dans ces milieux hostiles, résultat d'une pression sélective, assorties de traits d'histoire de vie hors du commun (certains albatros, pétrels, poissons ou invertébrés marins pouvant vivre plus de 50 ans !), relève d'adaptations souvent très sophistiquées, qui peuvent limiter leur plasticité et les rendre plus vulnérables à un changement climatique rapide. Ainsi, alors que les manchots empereurs et royaux sont extrêmement bien adaptés à leur habitat, aux aléas climatiques et à leurs conséquences sur les ressources marines, la survie annuelle moyenne des manchots royaux de l'île de la Possession (Crozet) diminue-t-elle d'environ 10% lorsque la mer se réchauffe seulement de 0.3°C dans la zone où ils passent l'hiver, à la limite de la banquise antarctique<sup>3</sup>. L'étude de l'impact de la variabilité spatio-temporelle de l'environnement sur la dynamique et la génétique des populations ainsi que la valeur sélective des individus est donc essentielle.

Dans ces mêmes domaines de dynamique et de génétique des populations du passé au présent, l'étude de la grande faune arctique sauvage et domestique, rennes-caribous, cheval iakoute, aujourd'hui en très grand danger, permet de considérer les processus d'adaptation au cours des tentatives de « réensauvagement » (Arctique et Kerguelen pour le renne). L'importance que ces

animaux revêtent dans l'économie et la culture des sociétés traditionnelles justifie pleinement l'intérêt de ces études qui concernent aussi bien les restes archéologiques que les animaux actuels. Au delà des sociétés humaines, c'est l'adaptation d'*Homo sapiens* lui-même en situation autochtone dans l'Arctique qu'il convient de considérer. Il a, lui aussi, développé des capacités d'adaptation physiologiques qui lui sont propres et encore largement méconnues. Ainsi, le système vasculaire de certains Inuits, notamment au niveau des doigts, leur permet-il de travailler sans gants dans le froid. Il est connu qu'une partie de la diversité génétique, notamment mitochondriale, marqueur des lignées maternelles, diminue à mesure que l'on se rapproche du pôle chez les populations autochtones. La question d'une sélection naturelle au sein de l'espèce *H. sapiens* est un véritable défi pour les généticiens des populations et les anthropobiologistes. Seule la compréhension de certains mécanismes d'adaptation énergétique chez les populations autochtones vivant encore dans des conditions traditionnelles permettrait de mieux appréhender l'histoire des peuplements mondiaux, de même que certaines questions que la médecine se pose y compris ailleurs sur la planète.

Aux effets directs du réchauffement sur les écosystèmes se combinent ceux de l'anthropisation. Parmi ces effets anthropiques, les introductions volontaires ou involontaires d'espèces et le risque grandissant d'invasions d'espèces allochtones, profitant de conditions plus favorables pour se développer au détriment des espèces autochtones, entraînent une banalisation des communautés. Sur l'île verte à Kerguelen où le lapin a été introduit par l'homme, il ne reste qu'une espèce végétale originelle, l'*Acaena* sur un sol érodé. Faut-il envisager une biologie de restauration ? Mais lorsque le lapin est éliminé de l'île, c'est le pissenlit, plante invasive apportée par l'homme qui, favorisé par les changements climatiques actuels, colonise l'île entière et non les espèces végétales locales ! Ces phénomènes s'additionnent, conduisent petit à petit à la disparition de la biodiversité d'origine et au final à sa banalisation. Le risque est identique en milieu marin, même s'il est plus difficile à sui-

3 - Le Bohec C, Durant JM, Gauthier-Clerc M, Stenseth NC, Park YH, Pradel R, Grémillet D, Gendner J, Le Maho Y. 2008-King penguin population threatened by Southern Ocean warming. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 105(7):2493-7.



vre par manque de stations d'observation. Il est donc aujourd'hui essentiel de mettre en place les dispositifs pour faire face à ces enjeux d'identification, de compréhension, de connaissance, de préservation voire de remédiation des environnements et sociétés polaires.

Malgré leur éloignement des centres industriels, les régions polaires connaissent des apports d'origine anthropique (métaux lourds et composés organiques) par le biais de la circulation marine et du transport global d'éléments dans l'atmosphère. Les polluants organiques persistants (POPs) ont tendance à se déplacer sur de très longues distances et à se déposer en zone polaire par voie aérienne. Leurs propriétés de rémanence et de bioaccumulation les rendent extrêmement toxiques. C'est ainsi que les polluants organiques, en particulier, s'accumulent dans les tissus adipeux des prédateurs supérieurs et menacent ce niveau trophique essentiel. En Arctique comme en Antarctique, des niveaux élevés de polluants ont été rapportés, assortis d'effets très néfastes sur le comportement, la physiologie et le devenir de plusieurs espèces d'oiseaux et mammifères marins. Aucune étude n'a été réalisée chez l'homme.

Par ailleurs, les changements climatiques ouvrent de nouveaux territoires à la colonisation du vivant, avec la mise en place de processus invasifs et de dynamiques nouvelles (du micro-organisme à l'homme) développant des interactions très fortes (apparitions de nouveaux pathogènes, développement de zoonoses). En Arctique, l'exploitation minière investit de nouveaux territoires ou cherche à s'implanter (or, uranium, notamment). Le réchauffement climatique, en facilitant l'accès à certaines régions, ne pourra qu'accroître le phénomène. Les conséquences sont déjà très significatives sur l'éthologie des caribous au Nunavut (parcours de migration modifiés, diminution de la fréquentation des zones de vèlage, par exemple). Globalement l'impact sur le milieu et le vivant sera considérable. Il convient donc de se doter des moyens d'en apprécier les effets pour en identifier les formes et processus, leurs conséquences et contribuer à répondre à la demande sociétale de plus en plus forte sur le sujet. Les outils d'observation de l'INEE - Observatoires hommes-milieu et zones ateliers notamment - peuvent répondre à ces situations de paroxysme et de transformations brutales des anthropo-écosystèmes.







## LA PRÉSENCE FRANÇAISE DANS LES RÉGIONS POLAIRES

Historiquement très présente en Antarctique, la recherche française y a construit sa légitimité scientifique internationale. Moins présente en Arctique, elle tend cependant à se développer compte tenu de l'intérêt scientifique et politique de ces régions et du caractère bipolaire de la plupart des thématiques scientifiques.

La recherche polaire française repose largement sur l'Institut Polaire Français Paul-Emile Victor (IPEV), agence de moyens et de compétences au service de la recherche scientifique française dans les régions de hautes latitudes. L'IPEV est un Groupement d'Intérêt Public (GIP), doté d'un personnel permanent d'une cinquantaine de personnes et d'un budget annuel d'une trentaine de millions d'euros (dont la moitié environ sert à mettre en œuvre le navire océanographique Marion-Dufresne, l'autre moitié étant dédiée à la recherche polaire). Cet organisme assure annuellement la logistique de 60 à 70 programmes de recherche conduits par des scientifiques appartenant à près de 80 laboratoires répartis sur l'ensemble de l'hexagone. Ces programmes sont sélectionnés sur la base d'une évaluation de leur qualité scientifique rigoureuse, réalisée par un conseil scientifique international et indépendant de l'IPEV.

L'existence de territoires français, les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) ainsi que des infrastructures permanentes que sont les bases scientifiques des îles Crozet, Kerguelen, Amsterdam et Terre Adélie, témoignent d'un intérêt ancien de la France pour ces régions de l'hémisphère Sud et explique que 75% des programmes soutenus par l'IPEV concernent les régions australes. Ces infrastructures permettent de positionner les recherches sur un gradient de latitude allant du Plateau Antarctique (Concordia) et de l'Antarctique côtier (Dumont d'Urville) au Subantarctique (Crozet, Kerguelen) et au tem-

péré (Amsterdam). L'isolement géographique, les caractéristiques de leurs écosystèmes font de l'Antarctique et de ces îles périantarctiques des modèles d'un grand intérêt pour l'étude des réponses des espèces autochtones, des espèces introduites et de leurs interactions face aux modifications actuelles du climat.

Ces caractéristiques se retrouvent dans les parties insulaires de l'Arctique où l'IPEV est présent (Spitsberg) et pourraient être prises en compte pour une meilleure valorisation de la comparaison Nord/Sud. Les recherches qui concernent l'homme, son histoire, son adaptation, ses sociétés et ses comportements sont actuellement limitées à l'Arctique.

Les membres des laboratoires INEE, avec bien souvent le soutien de l'IPEV, sont engagés dans des programmes répartis autour de l'océan arctique, dans des zones parfois peu étudiées car difficiles d'accès, en raison de contraintes environnementales et/ou administratives difficiles. La Sibérie orientale (Iakoutie, Kamtchatka) représente une zone de recherche importante pour les communautés scientifiques INEE, particulièrement pour les interactions hommes-milieux. Ces études sont réalisées en collaboration avec les équipes nationales impliquées (Fédération de Russie, Danemark, Canada). Dans tous les cas, il s'agit de recherches originales conçues sur les spécificités des équipes françaises, telle la prise en compte du passé, qui ont fait émerger des projets dont les résultats sont susceptibles de modifier la connaissance actuelle de l'histoire du peuplement humain de ces régions (implantations médiévales dans l'Arctique sibérien et au Groenland par exemple). L'importance des relations bilatérales dans le cadre de la recherche arctique doit être soulignée.



## LES CHAMPS THÉMATIQUES MAJEURS POUR L'INEE

**Une première analyse montre que les recherches en écologie et environnement dans les régions antarctique et subantarctique ont considérablement évolué au cours de ces dernières années. Quatre thèmes scientifiques majeurs se dégagent nettement.**

- **Fonctionnement des écosystèmes polaires.** Les études doivent aborder les processus mis en jeu à différentes échelles spatiales, pour préciser comment les biotopes arctiques et antarctiques répondent aux changements environnementaux et, au-delà, au changement global, et dans quelle mesure les populations seront capables de s'y adapter. La biogéographie est envisagée là dans sa définition la plus actuelle, qui considère les êtres vivants dans leurs relations fonctionnelles et dynamiques et prend en compte toutes les dimensions temporelles et toutes les échelles de la répartition des espèces à la surface du globe (lieux, distances, territoires, flux, réseaux et tous les modes d'organisation spatiale).
- **Adaptation des organismes polaires aux milieux extrêmes d'une part et aux changements climatiques d'autre part.** Ces recherches introduisant la notion de résilience présentent un fort intérêt pour l'avenir de la biodiversité, elles sont aujourd'hui porteuses d'innovation et reposent de plus en plus sur des technologies de pointe. Les approches biochimique, physiologique et écologique devront s'intégrer dans un cadre de biologie et d'écologie évolutives.
- **Biodiversité et évolution.** Parmi les axes communs à la biologie animale et à la biologie végétale, il faut citer l'étude de la dynamique et de la génétique des populations, la définition des relations entre l'insularité, les modes de dispersion et les processus de spéciation (genèse de nouvelles espèces) et de diversification (séparation des espèces dans l'espace). La performance des outils d'observation n'est plus à démontrer, leur pérennisation est nécessaire pour l'étude des ressources vivantes renouvelables et l'estimation de l'impact de l'homme.
- **Biodiversité et conservation.** La connaissance écologique doit aider dans les prises de décisions en matière de conservation adaptée et c'est bien là le défi qui devra motiver les recherches polaires à venir.

Si la présence française s'est affirmée avec force et efficacité dans les terres australes, elle reste encore bien modeste dans le grand Nord où sa compétence est pourtant reconnue. Pour des raisons à la fois écologiques et politiques, les zones arctiques sont devenues le théâtre de bouleversements majeurs. La compréhension des processus mis en œuvre et de leurs effets est un axe essentiel pour la communauté scientifique qui s'attache à l'étude des interactions hommes-milieux. Ces chercheurs français bénéficient d'une grande indépendance qui tient à ce que la France n'est pas directement impliquée ni dans l'histoire ni dans le devenir des régions arctiques et qui facilite leur intégration dans les communautés autochtones.



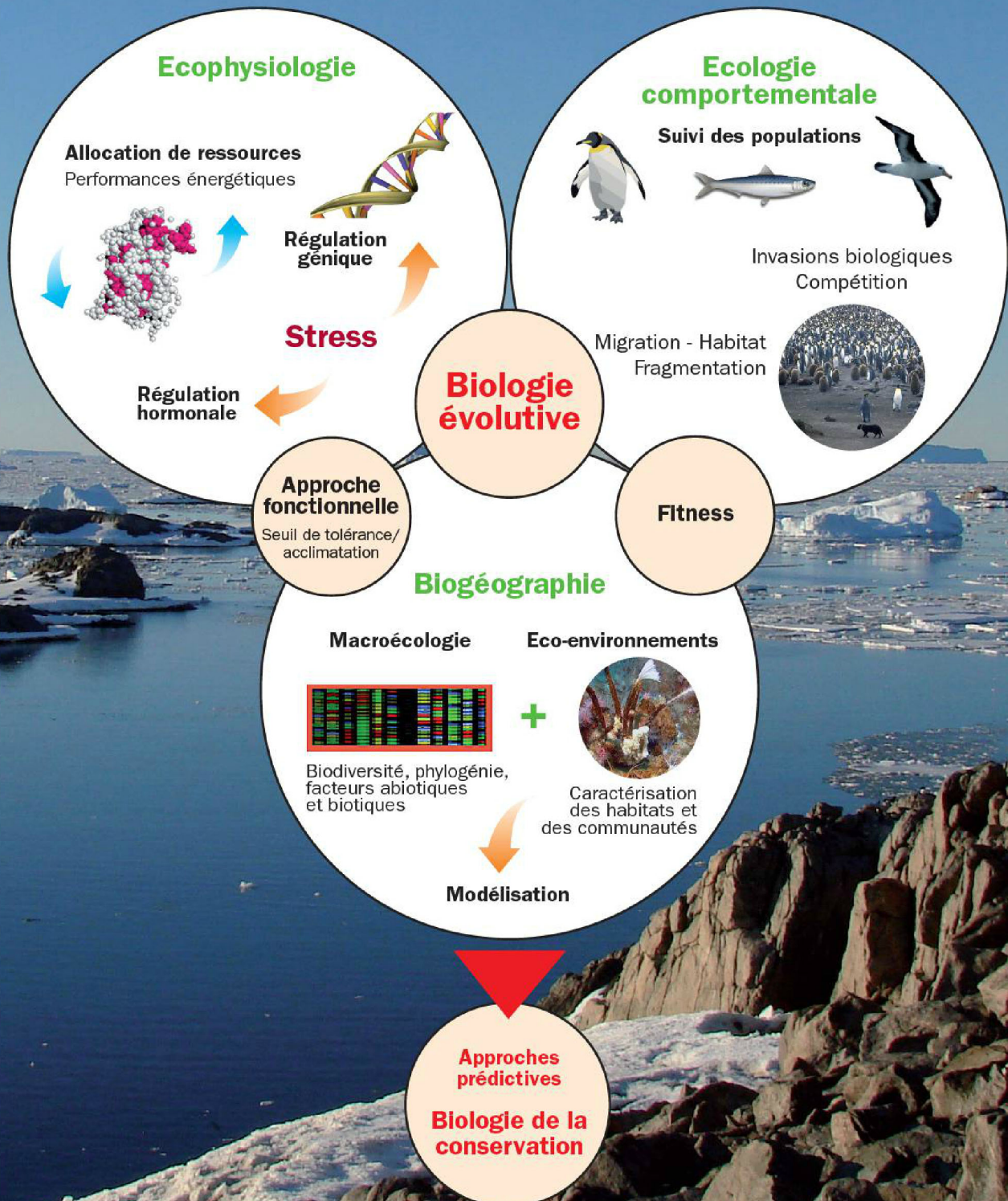
A cela il faut ajouter une grande complémentarité des disciplines mises en jeu, l'anthropologie et la paléanthropologie, l'archéologie, la géographie physique et humaine, les reconstitutions des paléomilieus, la médecine, la sociologie... qui permet de répondre aux trois thèmes scientifiques prioritaires :

- **Réponse des environnements et communautés humaines polaires et subpolaires au changement global et interactions Hommes-Milieus, dynamiques passées et actuelles.** L'étude des influences de l'homme sur l'environnement et réciproquement, se conçoit sur le passé et le présent, en observation et rétro-observation : études des paysages actuels et de leur histoire, de l'impact des variations climatiques passées (Tardiglaciaire, Holocène) et des mutations environnementales contemporaines. Ces études sont menées dans une perspective dynamique et évolutive.
- **Approche multi-temporelle - Co-évolution Hommes-Milieus.** L'anthropobiologie permet la caractérisation et la compréhension des processus biologiques qui ont permis et qui pourraient permettre l'adaptation de notre espèce face à un environnement évoluant rapidement et de façon massive. Le problème des maladies émergentes en zones polaires doit également faire partie des priorités.
- **Déséquilibre écologique et devenir des populations autochtones.** Un exemple : La relation homme-animal est actuellement fortement perturbée en milieux arctiques ; quelles en seront les conséquences socio-économiques et culturelles pour la majorité des peuples arctiques ? La question nécessite la mise en œuvre d'études sur le passé et le présent pour modéliser et penser l'avenir. La mise en place d'observatoires Hommes-Milieus (OHM) dans l'Arctique, en tant qu'outils de promotion de l'interdisciplinarité, lieux d'observations, rétro-observations, lieux d'études mais aussi de modélisation, d'expérimentation et d'écoute de la demande sociétale, si forte dans ces cadres, peut être une des phases majeures de développement pour la recherche de l'INEE dans les années à venir. L'étude des interactions homme-animal, culturellement si importantes, et de leur devenir est une voie particulièrement indiquée dans ce contexte (Renne/Caribou, par exemple).





Identification des champs scientifiques et interactions des différentes approches permettant d'appréhender l'impact du changement global sur les Biodiversités.





# Changement & global Biodiversité polaire

Avec les contributions de :

Nadia Amezlane, BOREA, CNRS-MNHN, Paris – Frédéric Angelier, CEBC, CNRS, Villiers en Bois – Thierry Boulinier, CEFE, CNRS-Universités de Montpellier – Olivier Chastel, CEBC, CNRS, Villiers en Bois – Bruno David, Biogéosciences, CNRS-Universités de Bourgogne, Dijon – Jean Pierre Féral, IMBE, CNRS-Université Aix-Marseille – Yves Frenot, IPEV, Brest – Pierre Galand, LECOB, Université Pierre et Marie Curie, Banyuls sur mer – Maurice Hüllé, IGEPP INRA, Rennes – Philippe Koubbi, LOV, CNRS-Université Pierre et Marie Curie – Marc Lebouvier, ECOBIO, CNRS-Universités Rennes 1 – Guillaume Lecointre, Systématique, adaptation, évolution, CNRS-MNHN, Paris – Karen McKay, GEMI, IRD-CNRS, Montpellier – Yvon Le Maho, IPHC, CNRS- Université de Strasbourg 1 – Mireille Raccurt, LEHNA, CNRS-Université Claude Bernard Lyon 1 – Jean Yves Toullec, Adaptation et diversité en milieu marin, CNRS-Université Pierre et Marie Curie, Station biologique de Roscoff.



# BIOGEOGRAPHIE - STRUCTURATION SPATIALE ET TEMPORELLE

Coordinateurs : Buno David, Philippe Koubbi et Jean Pierre Féral

Les projets de recherche actuels qui prennent en compte les facteurs biogéographiques et historiques s'appuient sur l'organisation géographique des pôles pour étudier la structuration spatiale et génétique de la faune et de la flore à différentes échelles, du local au global, continent, îles et océans. Quelques rappels géographiques nous ont paru nécessaires avant d'exposer séparément les avancées des recherches actuelles et les perspectives envisagées, tant au Nord qu'au Sud, en biologie marine, biologie terrestre et à l'interface terre/mer.

## I.1

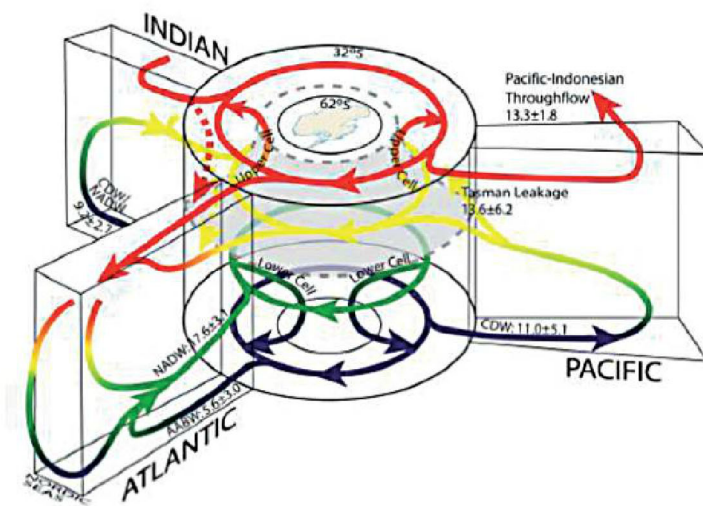
### Organisation géographique du Continent Antarctique, des Iles Subantarctiques et de l'Océan Austral

Le continent Antarctique, localisé au pôle sud depuis la fin du Crétacé est isolé des autres continents depuis la fin de l'Oligocène par l'océan Austral, avec ses principales barrières naturelles que constituent le courant circumpolaire et les différents fronts. Le courant marin circumpolaire antarctique a en outre favorisé le refroidissement du continent et l'accumulation des glaces.

Du fait du contact de l'Océan Austral avec les trois principaux océans de la planète (Pacifique, Indien, Atlantique), l'hydrodynamisme de l'océan Austral représente l'un des moteurs essentiels de la circulation thermohaline. Il en résulte une organisation des différentes masses d'eau autour de l'Antarctique selon une structuration latitudinale très marquée, avec des transitions abruptes en termes de caractéristiques physico-chimiques, limitant le brassage des eaux. On trouve principalement, de l'Antarctique vers l'Équateur, une répartition hétérogène des masses d'eau :

- **la PFZ (Polar Front zone)**, au nord de l'océan Austral avec la succession du Front Polaire Antarctique (FPA), du Front SubAntarctique (FSA) et du Front SubTropical (FST) ;
  - **la POOZ (Permanently Open Ocean zone)** se trouve entre la limite Nord du FPA et la limite d'extension maximale de la banquise au Sud ;
  - **la SIZ (Seasonal Ice zone)** s'étend du continent à la zone marginale de la glace de mer en hiver.
- Les zones climatiques et océaniques influencent les conditions environnementales des écosystèmes océaniques et terrestres répartis autour de l'Antarctique. Communément, on distingue 3 grandes écozones :

- **le milieu antarctique**, comprenant les zones continentales et océaniques (jusqu'au front polaire) ;
- **le milieu subantarctique**, entre le front polaire et la convergence subtropicale ;
- **le milieu antarctique maritime**, couvrant la Péninsule Antarctique et les îles Shetlands, Okney, Sandwich et Bouvet ; les chercheurs français sont très peu investis dans cette région où la France ne dispose d'aucune infrastructure.



Front Circumpolaire et circulation thermohaline. (Rapport du SCAR 2010)

Le continent Antarctique est un désert glacé. Des relevés météorologiques de la station russe de Vostok font état d'un record de  $-89,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  le 21 juillet 1983. En moyenne, la température à l'intérieur du continent fluctue entre  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  l'hiver et  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  l'été. Sur les côtes, les températures sont plus élevées avec des moyennes de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  l'été et  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  en hiver. Ces températures « extrêmes » sont associées à des précipitations rares ainsi qu'à des vents violents ( $200\text{ km/h}$ ) faisant de ce continent l'un des plus arides du globe.

A l'inverse, les îles de la zone subantarctique bénéficient de températures plus clémentes (entre  $-5$  et  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  avec une moyenne annuelle de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) associées à des vents importants ( $100\text{ km/h}$ ) et fréquents, ainsi qu'un taux d'humidité élevé (85%) dû aux précipitations quotidiennes (300 jours par an) et conséquentes (2500 mm par an).



### I.1.1

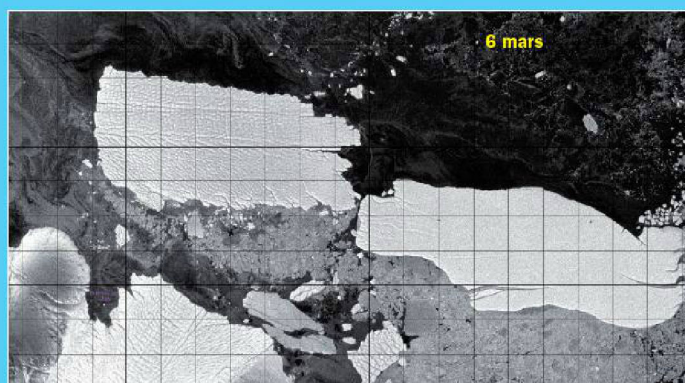
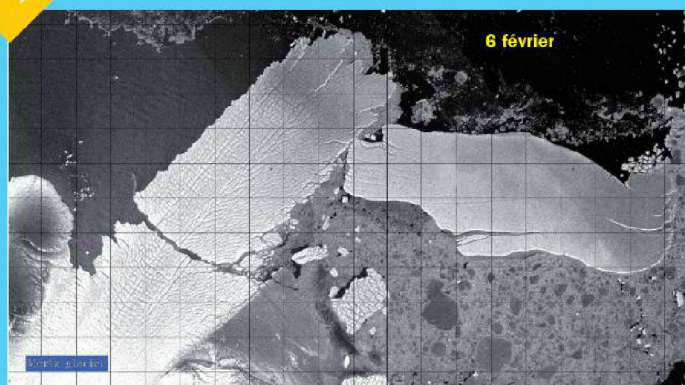
## Conséquences pour la biodiversité marine Principales avancées et perspectives des recherches

L'étude à macroéchelle de la biodiversité marine a été réalisée de deux manières : soit par l'intégration de connaissances d'experts selon l'initiative de régionalisation pélagique de Longhurst (1998) principalement basée sur le phytoplankton soit par l'utilisation de résultats liés à la biogéographie des espèces.

- L'initiative internationale de création d'un atlas biogéographique du milieu marin antarctique s'appuyant sur le programme Census of Antarctic Marine Life, comme le projet Scar-Mar-Bin permettra d'intégrer de nouvelles données sur la distribution géographique des espèces et de les coupler à une meilleure connaissance de l'environnement abiotique les influençant. Ces analyses à macroéchelle, couplées à des approches phylogénétiques et écophysiologiques nous renseignent sur les patrons de structuration de la biodiversité et sur son histoire, permettant d'établir des scénarios à la dimension de l'océan Austral.
- Il est également nécessaire de travailler à mésoéchelle. Une écorégionalisation couplant la ré-

gionalisation abiotique et la biogéographie permet de mieux comprendre les potentiels en biodiversité des écorégions, mais aussi de mieux évaluer les conséquences des changements environnementaux sur cette biodiversité. A mésoéchelle et submésoéchelle, il est essentiel d'étudier les zones de transition et leur stabilité. Ce sont les zones frontales, non seulement les grands fronts océaniques connus pour l'océan Austral mais aussi les fronts plus modestes comme les fronts de talus. Il en est de même au niveau du pourtour des îles océaniques favorisant la rétention des espèces et leur endémisme. D'autres secteurs étudiés dont l'importance est majeure pour les territoires français sont les zones de dépressions bathymétriques (fjords, canyons côtiers profonds ou systèmes de canyons de la marge continentale). Ces zones de transitions, point de confrontation de diverses communautés, habitats essentiels (zones de frayères, de nurseries) pour de nombreuses espèces de poissons, sont souvent identifiées en tant qu'écosystèmes marins vulnérables.

#### Exemple concret 1 :



La récente fracture du glacier Mertz fournit un modèle d'étude. En 2010, toute une partie du glacier, 80 km de longueur et 40 km de largeur, s'est détachée, modifiant largement la circulation des masses d'eau dans une zone au large de la Terre Adélie. Il sera particulièrement intéressant d'en suivre l'impact sur les populations zooplanctoniques, ichtyologiques et les prédateurs supérieurs. Un suivi au long terme est indispensable pour identifier clairement les conséquences dues à ces modifications de l'environnement par rapport aux variations interannuelles déjà constatées, liées aux fluctuations météorologiques et courantologiques.

Un iceberg géant de 80 km de longueur et 40 km de largeur s'est détaché du glacier Mertz en février 2010. Séquence d'images radar du satellite ENVISAT montrant le mouvement de l'iceberg du 6 février au 6 mars 2010. La grille superposée a un pas de 10 KM. (B. Legrezy)



Les divers facteurs historiques et environnementaux qui ont structuré les écosystèmes marins sont susceptibles d'être profondément modifiés dans le contexte du changement global. Il sera donc important de considérer :

- **L'histoire géomorphologique de ces secteurs est liée à leur l'histoire géologique puisque les glaciers ont façonné ces milieux.** Pendant les dernières glaciations, il existait peu de refuges pour les espèces du plateau continental de l'Est Antarctique. La colonisation de ce plateau a eu lieu après sa fragmentation en une série de dépressions bathymétriques et de bancs. On peut s'interroger sur le devenir des espèces à croissance lente qui peuplent actuellement le plateau continental, de plus en plus soumises au chalutage de fond par les icebergs et à la rupture des ice-shelfs libérant des zones marines autrefois couvertes par une glace épaisse.

- **Les courants circum-antarctiques** qui influencent la dispersion des larves, la distribution et l'endémicité des faunes. A macroéchelle, le rôle de barrière biogéographique "étanche" joué par le front polaire pourrait s'estomper, permettant la venue d'espèces invasives, notamment en provenance de l'Amérique du Sud, de Nouvelle-Zélande ou d'Australie méridionale. A mésoéchelle et submésoéchelle, le réchauffement climatique peut produire des perturbations dans la circulation des courants de surface, modifiant totalement la structuration et la répartition des faunes. L'utilisation du Continuous Plankton Recorder en zone subantarctique permettra d'étudier les espèces planctoniques, indicateur performant qui, associé aux données de distribution en mer des prédateurs supérieurs renseignera l'évolution de l'écosystème marin. La surveillance du mesoplancton sera aussi importante ; le « passage » de cette barrière de près de 20 000 ans par des espèces dont la phase larvaire est « océanique » pourra être le signal d'une recolonisation, en particulier des eaux côtières de l'Antarctique, par des

espèces dispersantes, changeant ainsi profondément les conditions actuelles.

- **L'extension de la banquise** qui offre un écosystème original, peu exploré, car la recherche n'en a qu'une vision estivale. Pourtant, si certains copépodes montrent une plasticité de leur cycle de vie en fonction du calendrier de la banquise, de nombreuses espèces comme le krill semblent complètement dépendantes de la glace de mer.

- **La circulation océanique** qui influence la diversité microbienne, elle-même impliquée dans les cycles biogéochimiques. Les possibles changements de la circulation océanique dus au réchauffement et à la fonte des glaces peuvent avoir un impact sur les cycles biogéochimiques. Comme les modèles prévoient une augmentation des apports détritiques et c'est déjà le cas à Kerguelen, les micro-organismes constituant la base de la dégradation, il serait important de comprendre comment ces apports pulsés vont influencer l'écosystème marin et plus particulièrement les grands fonds qui restent peu explorés.

- **La réévaluation permanente de la biodiversité marine des zones antarctiques et subantarctiques** qui a été longtemps considérée à tort comme plus faible que celle des régions tempérées et tropicales. Elle est encore très mal connue et les études récentes montrent qu'elle pourrait être beaucoup plus importante qu'on ne le pensait. Elle est sans cesse réévaluée dans le but de mieux connaître pour mieux protéger. Cette exploration bénéficie aujourd'hui de nouvelles méthodes comme le "barcoding" à large spectre, et il est bon de souligner que le Museum National d'Histoire Naturelle est le premier acteur du "barcode" antarctique avec la campagne CEAMARC. Cet inventaire de la biodiversité passe par une expertise taxonomique devenue rare aujourd'hui, laquelle nécessite des collaborations internationales.



Le "barcode" est une séquence d'ADN spécifique qui, comparée à une base de données regroupant tous les "barcodes" permet d'identifier une espèce.



### I.1.2

#### Conséquences pour la biodiversité à l'interface terre et mer Principales avancées et perspectives des recherches

La structuration biogéographique peut être extrêmement instructive pour comparer des espèces apparemment identiques mais qui se sont adaptées au cours des siècles à des températures décalées de plusieurs degrés. Des analyses phylogéographiques ont par exemple montré que les masses d'eau de l'Océan Austral ont un rôle prépondérant sur la structure génétique des populations de gorfous sauteurs. Les datations moléculaires suggèrent que la divergence entre les gorfous subantarctiques et subtropicaux pourrait être liée à la transition du Pléistocène Moyen, un changement climatique majeur qui s'est accompagné d'un décalage vers le Sud des isothermes des masses d'eau de l'Océan Austral. Cette redistribution des températures pourrait avoir causé une spéciation vicariante en séparant écologiquement des populations de gorfous auparavant génétiquement indifférenciées<sup>4</sup>.

- Ce type d'études qui entre dans une discipline émergente, la physiologie de la conservation, doit être développée, et généralisée à d'autres phylums, en particuliers d'organismes marins ben-

thiques qui, sessiles ou peu mobiles, et majoritairement sans phase de dispersion larvaire au cours de leur cycle de vie, sont d'autant plus sensibles aux effets du changement global. Ces espèces constituent des modèles nécessaires pour prévoir les impacts potentiels d'un changement climatique (*i.e.* un changement de température des masses d'eau) sur les espèces exposées. La considération explicite du rôle potentiel de la dispersion entre zones d'habitat favorables à différentes échelles géographiques apparaît primordiale pour la compréhension des réponses des populations et communautés aux changements environnementaux. Si les mécanismes fins commencent à être bien compris, un effort particulier devra porter sur les processus en jeu à de larges échelles spatiales (dizaines, centaines, milliers de kilomètres), échelles auxquelles des changements environnementaux forts pourraient entraîner des glissements d'aires de distribution plus ou moins rapides. Dans un tel contexte, les outils de la génétique des populations seront utiles, de même que la miniaturisation des moyens technologiques qui permet le suivi du mouvement des individus.

### I.1.3

#### Conséquences pour la Biodiversité terrestre Principales avancées et perspectives des recherches

La présence de territoires français situés entre 37°5 de latitude sud (Ile Amsterdam) et le continent antarctique en passant par des îles subantarctiques (Crozet, Kerguelen), d'âge variant entre quelques dizaines de milliers d'années à 30 MA, constituent une situation privilégiée pour comprendre la mise en place des faunes et flores terrestres australes.

- La combinaison entre situation insulaire et isolement extrême induit un fort taux d'endémisme

et une simplification des chaînes trophiques. Cette relative pauvreté faunistique et floristique des îles est compensée par une représentation démographique importante des populations, ce qui en fait un terrain idéal pour effectuer une approche quantitative de la biodiversité et pour tester un certain nombre d'hypothèses actuelles quant aux mécanismes de son évolution. Dans cette optique, l'étude de certains groupes taxonomiques encore insuffisamment connus (mousses lichens...) semble particulièrement importante.

4 - de Dinechin M, Ottvall R, Quillfeldt P, Jouventin P 2009 - Speciation chronology of rockhopper penguins inferred from molecular, geological and palaeoceanographic data, *Journal of Biogeography*, 36, 4 : 693-702.



## I.2

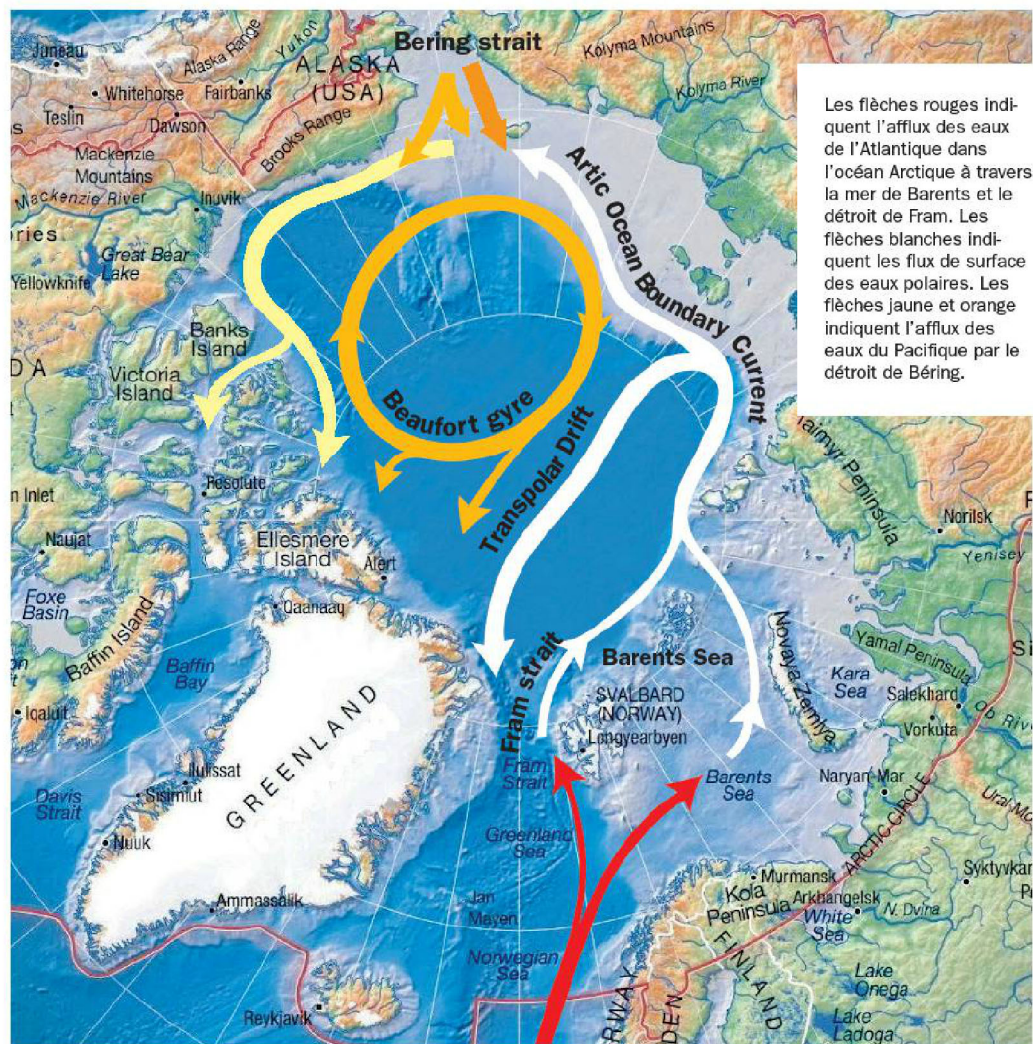
### Organisation géographique des régions Arctiques

Le refroidissement de ces zones a été largement perturbé par le climat extrêmement variant des dernières glaciations, il en résulte que les écosystèmes polaires du nord tels que nous les connaissons aujourd'hui évoluent depuis seulement 15 000 ans. Les « barren grounds » les plus au nord du Canada étaient ainsi encore couverts de toundras il y a 2000 ans.

Le pôle Nord se situe au centre d'une zone océanique de 12 à 14 millions de km<sup>2</sup>, presque entièrement entourée de terres. Sa partie centrale est occupée par une banquise permanente qui peut, l'hiver, déborder sur le Pacifique par le détroit de Béring et en Atlantique, le long des côtes du Groenland. La seule véritable ouverture se trouve entre le Groenland et la Norvège, large de 1500 km et marquée d'un sillon profond de 3000 m.

Cette organisation de l'espace structure les courants marins et la circulation atmosphérique, et explique l'importance que représentent les échanges thermiques entre le « Gulf Stream » d'un côté et le courant du Labrador de l'autre, dans les évolutions actuelles du climat. Même les scénarios les plus optimistes envisagent le risque d'une disparition progressive de la banquise arctique estivale et de l'inlandsis groenlandais.

Les écosystèmes de l'Arctique vont donc subir de profonds changements dans les années à venir. L'Année Polaire Internationale a mis l'accent sur l'importance et la variabilité des processus de remaniements à travers l'Arctique et a préconisé l'installation d'un réseau de mesure adapté aux grands gradients structurels de l'Arctique.





## I.2.1

### Conséquences pour les biodiversités Principales avancées et perspectives des recherches

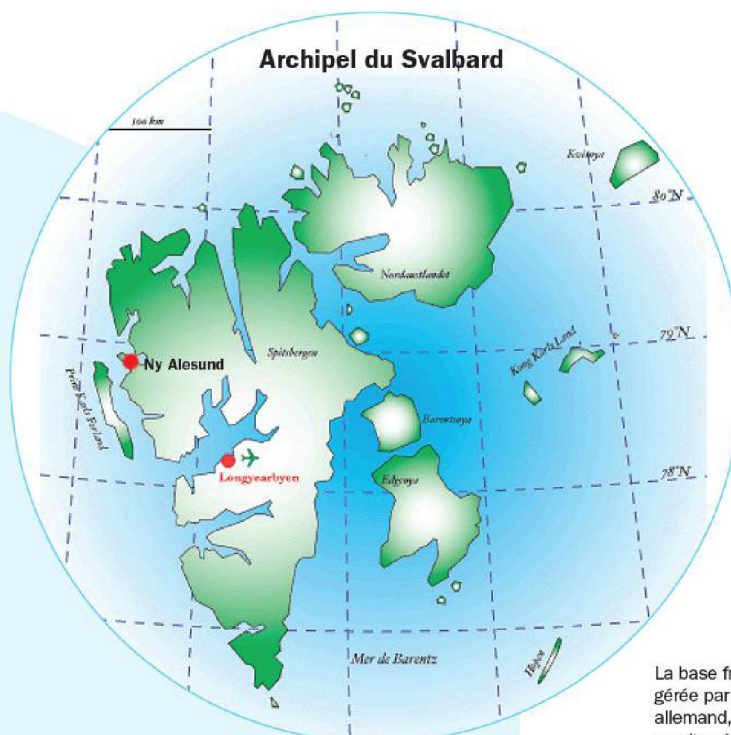
Par opposition à la situation australe, l'intérêt des recherches menées en Arctique est lié à l'absence d'isolement de la faune et de la flore de ces régions. Ces caractéristiques expliquent les écarts constatés en termes de diversité, spéciation, endémisme et adaptation des communautés arctiques par rapport aux communautés antarctiques. Cependant, des situations insulaires à fort endémisme existent en Arctique (Archipel du Svalbard par exemple) et autorisent les comparaisons Nord/Sud. La recherche française y dispose d'un accès à travers la base AWIPEV gérée conjointement par l'IPEV et son homologue allemand, l'Alfred Wegener Institut.

**Les questions scientifiques qui se posent pour l'Arctique sont du plus haut intérêt, y compris en démarche comparative, alors que la recherche française y est traditionnellement moins implantée qu'elle ne l'est au Sud.**

- Comme à l'extrême sud, le gradient de latitude peut être utilisé et le lien fonctionnel entre milieux polaires et subpolaires mériterait d'être mieux ex-

ploré. La colonisation et les relations phylogénétiques entre espèces continentales et insulaires sont encore très mal connues. Les espèces du haut Arctique ont par exemple leurs apparentés présents en subarctique, ces apparentés sont peut-être de bons candidats à une extension vers le nord et risquent donc de devenir des compétiteurs des espèces arctiques. D'une manière un peu simplifiée, aller voir au sud de l'aire de répartition d'une espèce pourrait donner des éléments prédictifs sur son devenir dans le contexte du réchauffement climatique annoncé.

- La situation insulaire des plateformes de recherches arctiques permet des études comparatives Nord/Sud, considérant que dans les 2 cas (Subantarctique et Spitzberg), certaines espèces se développent aux marges extrêmes de leur distribution grâce à des adaptations biologiques particulièrement restrictives. C'est le cas du puceron qui a perdu sa plasticité phénotypique dans le Nord et sa reproduction sexuée dans le Sud. Un autre exemple, la tique *Ixodes uriae*, parasite des populations d'oiseaux marins



La base franco-allemande AWIPEV gérée par l'IPEV et son homologue allemand, l'Alfred Wegener Institut se situe à Ny Alesund (Archipel du Svalbard).



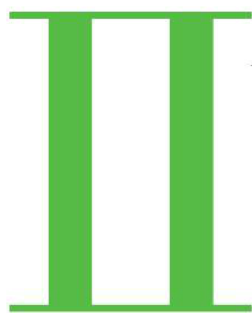


des deux pôles, montre une spécialisation pour ses espèces hôtes au sein de communautés au nord et au sud (sous-structuration au sein de colonies multi-spécifiques d'oiseaux marins) ; la dynamique de sa distribution aux latitudes extrêmes mérite donc d'être mieux connue. Comprendre la capacité de colonisation de ces parasites et de leurs organismes pathogènes associés, en fonction des changements dans la dynamique migratoire de certaines populations d'oiseaux, s'avère d'une grande importance pour prédire le risque d'émergence pour l'homme de maladies (comme la maladie de Lyme) dans les régions polaires. Ces recherches réclament les interactions disciplinaires nécessaires à la compréhension des interactions hommes-milieux dans des contextes essentiels pour le devenir des systèmes écologiques, la santé des populations et l'évolution des sociétés (*cf. infra*).

- Les études bipolaires montrent l'importance du système écologique et de la dimension spatiale sur la spécialisation, la spéciation des espèces et leur vulnérabilité face au réchauffement climatique.







## ECOPHYSIOLOGIE – SEUIL DE TOLERANCE, ACCLIMATATION, PLASTICITE DES ORGANISMES

Coordinateurs : Yvon Le Maho, Mireille Raccurt

**Les milieux polaires abritent une biodiversité spécifique dont la survie dépend d'adaptations souvent très sophistiquées, résultat d'une pression sélective qui au final pourrait limiter leur seuil de tolérance physiologique par rapport aux nouvelles contraintes écologiques. C'est par une approche mécanistique et fonctionnelle de l'impact des changements en cours sur les organismes polaires et ceci à plusieurs niveaux d'organisation biologique, de la réponse comportementale à la régulation génique, que le potentiel adaptatif de nombreuses espèces pourra être évalué.**

### II.1

## Adaptations des organismes aux environnements polaires

### II.1.1

#### Avancées actuelles des recherches

Pour survivre en milieu polaire, les organismes vivants ont dû développer des processus efficaces de résistance au froid. Ainsi, les endothermes, mammifères et oiseaux, ont amélioré les processus physiologiques permettant le maintien de leur température interne à un niveau élevé et constant (isolation, tachymétabolisme, thermogénèse). Les ectothermes (poissons, insectes, végétaux, etc.) ont développé certains mécanismes de résistance au gel. Face aux changements climatiques annoncés, ces espèces spécialisées dans la lutte contre le froid peuvent être incapables de surmonter des variations brutales de leur environnement thermique, à cause de leur relativement faible plasticité phénotypique et de l'impact du climat sur leurs ressources alimentaires. Comprendre les capacités et la plasticité de la fonction de thermorégulation, approfondir les mécanismes thermogéniques, thermolytiques et antigels, élucider le fonctionnement bioénergétique à basse température constituent autant d'enjeux majeurs pour comprendre la biodiver-

sité polaire. Ces approches peuvent bénéficier de la haute résolution actuelle des techniques biochimiques et bioénergétiques et des performances accrues des techniques de screening à haut débit en physiologie moléculaire / biologie intégrative.

Les travaux français ont permis des avancées importantes dans l'étude des adaptations physiologiques de modèles végétaux et animaux aux conditions extrêmes des régions antarctiques et subantarctiques. Privilégiant une approche intégrative allant de l'organisme entier à l'expression des gènes, les travaux sur les manchots, pétrels, albatros apportent une contribution majeure à nos connaissances sur les stratégies énergétiques des vertébrés. Le chou de Kerguelen a permis de décrypter les mécanismes de cryoprotection et d'osmorégulation. Les poissons et bactéries offrent une diversité de mécanismes enzymatiques à basse température qui enrichissent notre connaissance fondamentale et débouchent sur des applications biotechnologiques. Toutes ces adaptations spécifiques reposent sur des sys-

tèmes de régulations géniques et métaboliques, voire sur des molécules originales<sup>5</sup> qui pourraient être mieux exploitées aussi bien dans le domaine industriel (protéines antigel, enzymes thermostables...) que dans le domaine biomédical (protéines antimicrobiennes, ...).



## II.1.2 Perspectives

Il est légitime de penser que de telles adaptations à des conditions environnementales particulières peuvent limiter la capacité de réponse des organismes face à des modifications rapides du climat. Dans tous les cas, ces recherches font apparaître les organismes polaires comme des bio-indicateurs des changements environnementaux. Il faut donc :

- développer une approche mécanistique et fonctionnelle de l'impact des changements en cours sur les organismes polaires et ceci à plusieurs niveaux d'organisation biologique nécessitant :
  - des études de terrain visant à définir les capacités d'adaptation (plasticité phénotypique et microévolution) des organismes, populations et communautés aux changements climatiques en cours. Ces travaux reposent notamment sur l'utilisation de données de terrain issues de suivis individuels à long terme permettant d'utiliser des informations sur les relations de parenté génétique entre individus (génétique quantitative en populations naturelles) ;
  - le développement d'approches expérimentales sur le terrain et / ou en conditions contrôlées mettant en jeu des moyens lourds fixes (Ecotrons, écoaquatrons...) ou plus légers (moyens embarqués à forte réactivité) permettant de déterminer le seuil limite de tolérance des organismes au moyen d'études éco-physiologiques, biochimiques, moléculaires ;
  - parce que ces études des aspects adaptatifs de la résistance au stress sont généralement menées à l'échelle individuelle des organismes dans un cadre spatio-temporel trop étroit, pour une seule espèce à un instant T, il est important de les relier à des études plus larges portant sur la structure, la dynamique des communautés et le fonctionnement des écosystèmes s'appuyant notamment sur un corpus théorique solide. A l'instar de la macroécologie, il est urgent de développer une approche macrophysiologique dans les zones polaires ;
- faire émerger le côté appliqué de certaines recherches polaires (écophysiologie, éco-épidémiologie) devient une nécessité au plan sociétal. C'est une dimension qui est peu prise en compte dans les programmes de recherche étrangers et qui fait l'originalité et la force des programmes français.
- développer une valorisation de la chimiodiversité marine. Malgré sa très grande biodiversité, et donc une chimiodiversité potentiellement élevée des métabolites secondaires, la composante chimique du benthos antarctique et sub-antarctique n'est pas prise en compte par les programmes français. Des recherches devraient se développer en écologie chimique pour identifier les métabolites secondaires aussi bien en tant que bioindicateurs rendant compte des stress comme des adaptations, qu'en tant que métabolites originaux, aux propriétés d'intérêt thérapeutique ou industriel. Une telle thématique rassemblerait systématiciens, écologues, biologistes, chimistes et généticiens afin de constituer un réseau d'études et de valorisation de la chimiodiversité marine, qui ciblerait principalement les communautés benthiques de substrat dur de la zone côtière de l'Océan Austral, intéressantes pour leur grande richesse spécifique, richesse susceptible d'être menacée par le changement global.

5 - Gauthier-Clerc M, Le Maho Y, Clerquin Y, Drault S, Handrich Y. 2000 Penguin fathers preserve food for their chicks. Nature, 408, 9028-929.



## II.2

## Identification des facteurs écologiques abiotiques et biotiques pouvant agir comme des contraintes sur les organismes

- **Température air/eau, pluviométrie** : Depuis 1958, une augmentation moyenne générale de 0,6°C dans les zones polaires a produit des effets contrastés : la Péninsule Antarctique et l'Arctique ont connu un réchauffement de plus de 2°C alors que dans d'autres régions, la forte variabilité décennale et la circulation atmosphérique et océanique atténuent le réchauffement. De même la pluviométrie a évolué de façon différente selon les régions polaires provoquant localement de réelles désertifications aux impacts très importants (Péninsule Courbet à l'est de Kerguelen par exemple).

- **Les eaux océaniques** : Les écosystèmes de l'océan austral devraient être les plus durement touchés par l'acidification des océans en raison de la forte capacité des eaux froides à solubiliser le CO<sub>2</sub> et d'une remontée régionale d'eaux profondes hypercapniques. Les animaux dont la biologie nécessite d'importantes migrations verticales devraient donc être confrontés dans un océan futur à des changements drastiques de la chimie des carbonates. C'est le cas en particulier des ptéropodes, mollusques pélagiques, éléments essentiels du plancton et maillon indispensable du réseau trophique pélagique. L'acidification aura aussi un impact sur tous les groupes zoologiques benthiques possesseurs d'une carapace ou d'un squelette calcaire, cette calcification étant déjà pour certains d'entre eux contrariée par les basses températures (*Halicarcinus planatus*, crabe « mou » de Kerguelen). L'impact des changements de pH sur la biominéralisation est encore mal compris d'autant qu'il n'affecte pas de manière égale ni tous les groupes, ni tous les stades de développement. Chez les échinodermes, par exemple, la plupart des holothuries sont dépourvues de pièces calcaires alors que les oursins qui vivent dans le même milieu ont un

«squelette» développé ; par ailleurs leurs larves qui possèdent des spicules calcaires sont sensibles aux variations de pH.

- **La couverture glaciaire** : En Arctique, la couverture de banquise diminue progressivement de 4,5% par décennie, les modèles les plus optimistes annoncent sa disparition pour les années 2080. En Antarctique le phénomène est plus hétérogène mais un retrait de 25% de l'extension minimale de la glace de mer est constaté dans certaines régions notamment en Péninsule Antarctique. A ce phénomène s'ajoute la fonte des glaciers qui a pour conséquences directes une baisse de la salinité de l'eau de mer, un changement de pression osmotique, et surtout un profond remaniement de la circulation thermohaline. La glace de mer représente pourtant un refuge indispensable pour le développement de certaines espèces d'invertébrés marins tels que le krill et constitue un habitat essentiel pour les espèces cryopélagiques. A relativement court terme, la diminution de la banquise conduira directement à l'extinction des espèces qui en dépendent pour leur ponte ou pour leur alimentation. Des recherches émergentes et qui devront être soutenues tentent d'identifier un marqueur lipidique de la famille des isoprénoïdes qui permettrait de caractériser le réseau trophique dépendant de la banquise.

- **La glace de fond en Antarctique** : cette glace qui se forme tous les hivers sur 10 à 50 mètres de profondeur limite l'établissement d'espèces pluriannuelles dans la zone la plus superficielle. On peut donc s'attendre, dans un futur proche, à une remontée de plusieurs mètres du benthos côtier antarctique et à l'installation de nouvelles espèces, jusque là « rares » (ou considérées comme telles) ou invasives.



• **La fracture glaciaire** : Ce phénomène entraîne une profonde modification de la circulation des masses d'eau et favorise la fragmentation de l'écosystème avec l'alternance de zones perturbées, (« scouring » par les icebergs) ou non. Concernant le benthos austral, le rabotage des fonds côtiers par les icebergs (plus fréquents et profonds en Antarctique qu'en Arctique) explique que les espèces possédant une phase larvaire, potentiellement dispersante, prennent le dessus sur les espèces incubantes, non dispersantes, pourtant de loin les plus abondantes. Ceci est dû au fort potentiel colonisateur des premières, qui leur permet d'occuper rapidement et efficacement les territoires rabotés (et stérilisés) par les icebergs.

• **Les espèces envahissantes** : Reconnues au niveau mondial comme l'un des facteurs principaux d'érosion de la biodiversité, les espèces envahissantes ont généralement un impact considérable sur les écosystèmes polaires et sub-polaires dont les faunes et flores, isolées, à fort endémisme et peu diversifiées en milieux terrestres, n'ont pas développé de systèmes de défense contre des compétiteurs. Ainsi, en absence de prédateurs ou de grands herbivores autochtones, les introductions du chat et du lapin ont profondément altéré le fonctionnement des écosystèmes continentaux des Îles Kerguelen. Par ailleurs, le changement climatique permettra à des espèces originaires de zones tempérées froides de migrer vers les zones polaires et, en s'y installant, d'entrer en compétition avec les espèces autochtones ; ce scénario, déjà observable sur les îles subantarctiques, devient particulièrement vraisemblable pour des secteurs plus au sud de l'océan austral comme celui de la Péninsule Antarctique.

Seules des précautions adéquates et la surveillance de sites choisis en domaine marin côtier permettront de limiter l'installation d'espèces allochtones dont certaines pourraient devenir invasives et mettre en péril d'autres espèces. La disparition (effets combinés de plusieurs facteurs) des grandes algues brunes côtières (*Ma-*

*crocystis* et *Durvillea*), auraient, par exemple, des conséquences catastrophiques sur la dynamique des oiseaux et mammifères marins, sur la survie d'espèces de poissons, entre autre commerciales, dont les nurseries sont abritées par ces plantes.

• **L'anthropisation** : encore limitée dans l'extrême sud, elle est très forte en Arctique : industrialisation, tourisme, pêcheries industrielles et illégales, transport maritime, conséquences indirectes de l'activité des zones peuplées, introductions d'espèces (voir point précédent)... Parmi les conséquences de toutes ces activités, l'apport de métaux lourds et composés organiques, par le biais du transport global d'éléments dans l'atmosphère et la circulation marine, doit être souligné. Ce phénomène est renforcé par le changement climatique car la fonte des glaciers en Antarctique et de la banquise en Arctique entraîne la libération de certains polluants (DDT, mercure), autrefois piégés dans la glace. Si des études sur les niveaux de pollution sont régulièrement menées en Arctique, elles font largement défaut dans les territoires français qui s'étendent de la zone subtropicale à l'Antarctique, et en particulier dans l'Océan Indien sud. Il y a un besoin urgent d'informations sur les niveaux de pollutions présents chez les organismes marins de ce secteur dont certains sont endémiques et gravement menacés.

Les organismes polaires sont donc soumis, aussi bien en Arctique qu'en Antarctique, à des pressions diverses qui peuvent à terme moduler en profondeur les fonctionnements d'écosystèmes très originaux, uniques sur la Planète. Déterminer la réponse du vivant au changement global est ainsi un enjeu majeur qui implique une priorité à l'étude du fonctionnement des écosystèmes. L'approche se base sur des études transversales des écosystèmes terrestres et marins. Elle vise à évaluer l'impact des forçages biotique et abiotique sur la diversité, la structure et la résilience des réseaux trophiques.





## II.3

### Réponses du vivant et conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes

#### II.3.1

##### Avancées actuelles des recherches

**L'étude des écosystèmes marins** nécessite de privilégier les recherches sur les voies de transfert entre échelons trophiques, dans la colonne d'eau et dans la glace de mer. Des suivis saisonniers et interannuels sur les stratégies alimentaires et de reproduction couplés à des études physiologiques et biochimiques de l'énergétique, de la croissance, du stress thermique doivent permettre de mieux comprendre la réponse du vivant aux changements des contraintes physiques du milieu marin.

#### Exemple concret 2 :

**Analyse moléculaire de plusieurs espèces de krill pour évaluer leur potentiel adaptatif face à une augmentation de température de leurs milieux.** La plupart des études menées sur le krill antarctique, essentiellement *Euphausia superba*, se sont focalisées sur sa biologie (cycle de vie, répartition, reproduction, dynamique populationnelle, ...) ou sa biochimie, en tant que ressource de plus en plus exploitée par l'industrie de la pêche. Cette pression de la pêche industrielle (+40%/an) additionnée à l'impact des changements environnementaux seraient responsables d'une baisse de 30 à 80% de la population au niveau de la Péninsule Antarctique et pourrait, à plus ou moins long terme, mettre en péril l'équilibre de toute la région antarctique et subantarctique. C'est par des techniques innovantes de modélisation *in vitro* qui permettent non seulement de mesurer l'influence de la température sur le comportement et la mortalité des animaux mais aussi d'intégrer l'analyse transcriptomique comparative de plusieurs espèces de krill, que des marqueurs de stress thermique pourront être identifiés. Une analyse phénotype/génotype permettra d'apprécier le potentiel « adaptatif » de chaque espèce et de prédire d'éventuels bayages sélectifs au sein des populations.



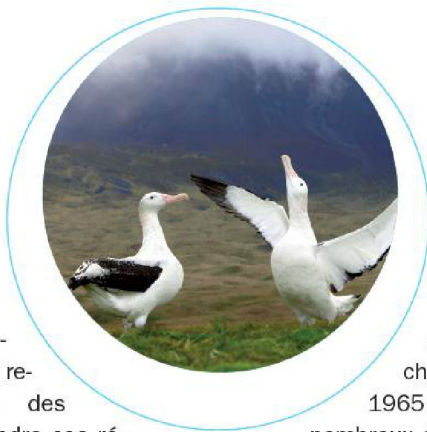
**A l'interface terre/mer**, la miniaturisation et la capacité des dispositifs d'acquisition de données permettent d'utiliser des oiseaux et mammifères marins comme des indicateurs de l'évolution et de la localisation des ressources marines (krill, calmars, poissons mésopélagiques) en fonction des changements climatiques. Cette instrumentation des animaux, pour laquelle la France est leader, est devenue routinière, appliquée à différentes espèces, albatros,

manchots, phoques et devrait profiter des avancées technologiques en micro-électronique et informatique.

De plus, la recherche biologique française dans les régions polaires bénéficie de plus de 50 ans de travail continu sur les mêmes colonies d'animaux qui ont abouti à une base de données unique. Ce sont 27 espèces d'oiseaux de mer et de pinnipèdes qui sont ainsi suivies annuellement.

Ces suivis démographiques à long terme ont





mis en évidence des déclin locaux de population, des changements de phénologie<sup>6</sup> (dates de migration, de reproduction, de floraison des plantes, etc.). Pour comprendre ces réponses, il est essentiel d'associer aux données à long terme, l'étude des mécanismes physiologiques qui déterminent le degré d'acclimatation aux variations de l'environnement. De façon intégrée et originale, les travaux français menés aux Pôles ont montré le rôle clé des hormones de stress qui agissent sur la capacité d'ajustement aux conditions du milieu (changement climatique). Cette capacité d'ajustement pourrait être affectée par les polluants (perturbateurs endocriniens)<sup>7</sup>.

Les mécanismes comportementaux de choix d'habitat, responsables de la fidélité des oiseaux à un site de reproduction ou de leur dispersion, sont des éléments clés qui doivent être pris en compte pour appréhender les variations d'effectifs locaux et les changements potentiels d'aire de distribution en réponse à des changements environnementaux.

Les modifications de la circulation des organismes pathogènes et des parasites qui en résultent marquent des enjeux essentiels. La détermination des mécanismes de persistance et de circulation des agents infectieux au sein des populations d'oiseaux sauvages des zones polaires est importante à la fois pour les agents susceptibles d'être nouvellement arrivés dans ces zones, mais aussi pour ceux largement présents naturellement, tels que les virus de l'influenza aviaire ou la bactérie responsable de la maladie de Lyme<sup>8</sup>. Dans ce second cas, les systèmes polaires, par leur forte simplicité en termes de diversité spécifique et de forte structuration spatiale, offre des modèles éco-épidémiologiques de choix. La combinaison d'études de terrain, d'analyses génétiques des populations et d'immunologie renseigne sur les échanges entre populations à différentes échelles spatiales et se révèle nécessaire à l'évaluation des risques d'émergences de maladies. Les enjeux sociétaux

sont des plus importants (cf. *infra*)

**Au niveau terrestre**, le réchauffement observé depuis 1965 s'est traduit par le retrait de nombreux glaciers notamment sur l'archipel de Kerguelen entraînant une colonisation végétale et animale des terrains ainsi libérés de glace.

Une des priorités de la biologie terrestre a été d'étudier les premières étapes de la pédogénèse et les processus de colonisation.

De nouvelles recherches en écologie microbienne, qui ont bénéficié du développement des outils de biologie moléculaire, apparaissent comme particulièrement innovantes en Arctique où la fonte du pergélisol favorise l'activité microbienne et les voies anaérobiques de la dégradation de la matière organique qui conduisent à la formation de méthane, l'un des principaux gaz à effet de serre<sup>9</sup>. La fonte du pergélisol pourrait donc ainsi accélérer fortement le réchauffement climatique. Les projets en cours s'appuient sur des techniques de séquençages de nouvelle génération pour estimer la diversité des micro-organismes dans les processus de transformation du carbone. Ils ont pour objectif d'identifier les facteurs environnementaux qui contrôlent l'activité des micro-organismes et de mesurer en laboratoire et sur site les quantités de gaz produites et émises.

Les zones polaires possèdent une biodiversité terrestre d'un très grand intérêt, à la fois patrimonial et fondamental. Elles comportent en effet, chez les végétaux et chez les invertébrés, de nombreuses espèces endémiques dont la phylogénie et l'histoire de colonisation, notamment dans l'hémisphère sud, sont encore inconnues. Un travail de systématique doit se poursuivre dans le but de compléter nos connaissances sur la biodiversité des écosystèmes terrestres.

Les observations au long terme ont permis l'étude des relations espèces autochtones/espèces introduites dans le contexte actuel des changements climatiques et d'appréhender, grâce à des modèles végétaux ou animaux variés, les mécanismes des invasions biologiques<sup>10</sup>. L'impact des espèces envahissantes

6 - Weimerskirch H, Louzao M, de Grissac S, Delord K. 2012 - Changes in wind pattern alter albatross distribution and life-history traits. *Science*. 13;335(6065):211-4.

7 - Nordstad T, Moe B, Bustnes JO, Bech C, Chastel O, Goutte A, Sagerup K, Trounev C, Herzke D, Gabrielsen GW. 2012 - Relationships between POPs and baseline corticosterone levels in black-legged kittiwakes (*Rissa tridactyla*) across their breeding cycle. *Environ Pollut* 24, 164C:219-226.

8 - Chambert, T., Staszewski, V., Lobato, E., Choquet, R., McCoy, K.D., Tveraa, T. & Boulinier T. Exposure of Black-legged kittiwakes to Lyme disease spirochetes: dynamics of the immune status of adult individuals and effects their survival. *Journal of Animal Ecology*, published on line.

9 - Merilä P, Galand PE, Fritze H, Tuittila ES, Kukko-Oja K, Laine J, Yrjälä K. 2006 - Methanogen communities along a primary succession transect of mire ecosystems. *FEMS Microbiol Ecol*. 55(2):221-9.

10 - Chown SL, Huiskes AH, Gremmen NJ, Lee JE, Terauds A, Crosbie K, Frenot Y, Hughes KA, Imura S, Kiefer K, Lebouvier M, Raymond B, Tsujimoto M, Ware C, Van de Vijver B, Bergstrom DM. 2012 - Continent-wide risk assessment for the establishment of non-indigenous species in Antarctica. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2012 Mar 5.



est en effet particulièrement sensible dans ces écosystèmes peu diversifiés et dysharmoniques (e.g. peu d'herbivores, pas de grands herbivores, pas de grands prédateurs...) car les espèces autochtones apparaissent souvent peu à même de répondre aux modifications du climat par comparaison aux espèces envahissantes que leur plasticité métabolique rend souvent opportunistes.

De plus, une augmentation des températures de quelques dixièmes de degré peut faire passer une espèce introduite au statut d'espèce envahissante. En théorie, de nombreuses espèces introduites volontairement ou non par l'homme ne

survivent pas dans les conditions polaires et sub-polaires peu favorables à leur cycle biologique. Une progression constante de ces espèces « échappées » est pourtant constatée. Ce sont le plus souvent des espèces très communes de nos régions qui trouvent maintenant un milieu favorable à leur épanouissement au détriment des espèces autochtones. C'est le cas de la mouche bleue *Calliphora vicina* qui a bénéficié d'une augmentation de la température moyenne de 1.3°C sur 50 ans aux Kerguelen pour se développer depuis les années 1980, exerçant une pression toujours plus forte sur l'espèce endémique, sans ailes, *Anatalanta aptera*.

## II.3.2 Perspectives

### Les stations d'observation

Toutes ces études, qu'elles concernent les organismes marins, les oiseaux ou les végétaux ont un besoin commun d'outils d'observation. La multiplication des sites d'études le long d'un gradient latitudinal allant de Kerguelen à l'île d'Amsterdam, en passant par l'archipel de Crozet constitue un réseau d'acquisition de points de mesures déterminants pour une recherche subpolaire de haut niveau qui se traduit par une forte productivité scientifique (1<sup>er</sup> rang mondial) des équipes opérant dans ces zones.

- **La pérennisation des stations d'observation est essentielle** ; développer des réseaux longitudinaux et latitudinaux de points de mesures apparaît comme une nécessité pour les études relatives à l'impact du changement global. Les bases de recherche françaises dans l'Océan austral constituent un tel réseau et celui-ci pourrait être considérablement enrichi par le développement de systèmes d'observations analogues dans les îles Eparses, plus au nord sous les tropiques.
- Aucun système d'observation n'est encore consacré au domaine maritime, en particulier côtier, malgré l'augmentation prévisible des pressions qu'il subit. Il importe donc de **définir des sites marins côtiers d'observation**, basés sur les résultats des campagnes et des travaux effectués depuis les années 70, qui seront suivis tous les un à dix ans, selon leur intérêt et la vitesse probable des phénomènes qui s'y déroulent. Seul un tel travail permettra une mise en place de plans de gestion aussi pertinents en mer qu'à terre (p.e. dans le cadre de la Réserve Naturelle des Terres Australes Françaises).
- **Une approche similaire est souhaitable en Arctique**, par le biais d'un réseau de points de mesure allant du Svalbard à la Bretagne, en passant par le Groenland et Terre Neuve (Saint Pierre et Miquelon). Il faut préciser que plusieurs programmes mis en place en Arctique, notamment via des collaborations internationales, ont déjà permis de tisser un réseau géographique étendu pour des espèces d'oiseaux marins modèles (à forts effectifs et large distribution géographique), telles que la mouette tridactyle et le mergule nain. Des démarches sont en cours de développement par l'IPEV, auprès du Canada et de la Suède, pour permettre aux scientifiques français d'accéder aux stations de terrain du haut Arctique afin de faciliter les comparaisons nord-sud en milieux subpolaires.
- **Les outils d'observation sont également indispensables** à la poursuite du développement des travaux sur les processus éco-épidémiologiques et évolutifs mis en jeu dans les réponses des populations, communautés et écosystèmes aux changements environnementaux en cours notamment en Arctique. L'étroite



interaction des études concernant les pathogènes, les vecteurs, les maladies, les réponses sociales aux situations nouvelles ainsi créées et leurs conséquences, considérées en termes

de dynamiques dans le temps et l'espace est donc absolument essentielle pour répondre aux enjeux de santé publique qui vont être massivement posés.

### **L'écologie microbienne**

Le développement de l'écologie microbienne en Arctique apparaît également comme un enjeu essentiel. Les émissions de méthane n'étant pas prises en compte dans les modèles climatiques actuels, il est urgent d'évaluer comment la diversité microbienne va influencer la libération du carbone stocké dans les sols gelés. Le défi pour les années à venir est de comprendre comment le réchauffement des pôles influence la diversité microbienne, et comment cette diversité à son tour influence le fonctionnement des écosystèmes polaires.



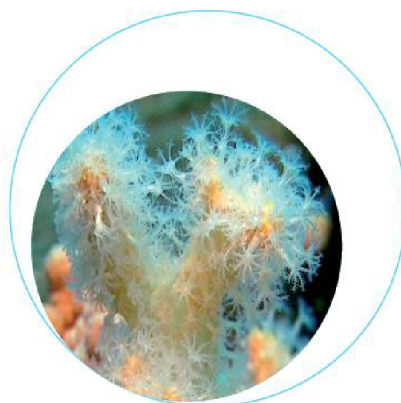




## EVOLUTION, PHYLOGENIE, EMERGENCE DES ESPECES - CONSERVATION

Coordinateur : Guillaume Lecointre, Marc Lebouvier

**Actuellement, le taux élevé des extinctions d'espèces nous poussent à penser qu'il ne serait pas sage « d'attendre et voir » jusqu'à ce que nous ayons les informations nécessaires pour décider sur quelles zones nous devrions nous focaliser pour conserver la plus grande partie du patrimoine évolutif des régions polaires. Vaut-il mieux conserver des espèces rares ou des caractères rares ? Quelles stratégies de conservation adopter ?**



### Principales avancées des recherches

La connaissance de la phylogénie et de l'histoire évolutive des faunes et flores polaires renseigne la qualité patrimoniale du vivant (au sens du patrimoine historique du globe). La phylogénie établit aussi la rareté des caractères, leur profondeur temporelle. Plus fondamentalement, la phylogénie, préalable à la classification, est la base de la catégorisation des espèces. La taxonomie dite « alpha » n'échappe pas à cette contrainte et la caractérisation moléculaire de la biodiversité à l'échelle péri-spécifique, en expansion spectaculaire depuis un peu plus de cinq ans, en constitue la preuve.

A cette catégorisation moléculaire il faut ajouter la connaissance des modalités par lesquelles les pôles et leurs flores et faunes ont changé dans le passé, la datation de l'apparition des espèces, leur évolution, qui vont renseigner leur devenir. La phylogénie, la taxonomie et l'évaluation de l'endémisme établissent la dimension historique et estiment l'unicité des faunes et des flores. Par exemple, le plateau continental antarctique a été décrit comme un générateur de bouffées d'espèces (« species flocks ») en partie en raison des glaciations successives qui ont fragmenté les habitats benthiques. Ces « flocks » concernent sur-



tout les faunes côtières et peu les grands fonds. La phylogéographie, jointe à la génétique des populations, nous renseigne sur les événements historiques récents mais aussi sur l'état de santé génétique des espèces<sup>11</sup>.

La phylogénie est un complément nécessaire aux approches biogéographiques qu'elle permet de restituer dans le contexte de l'histoire des clades, aboutissant à une vision intégrative de la biodiversité.

La dimension historique des faunes et des flores, les outils, les concepts et méthodes qui en fondent l'abord permettent de catégoriser les espèces, d'assurer un suivi temporel des effets des perturbations sur les faunes et les flores, et d'instruire la mise en place d'une politique et des dispositifs de conservation (e.g. Aires Marines Protégées, Réserves naturelles...). Ces recherches dépendent des stations d'observation de la biodiversité et des programmes à long terme qui sont actuellement bien développés en Antarctique et Subantarctique. **La Zone Atelier de recherches sur l'environnement antarctique et subantarctique**, créée en 2000, fédère de nombreuses disciplines : systématique, biogéographie, écologie, écophysiologie, éthologie, génétique... pour étudier les modifications de la

biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes antarctique et subantarctique sous la double influence des activités de l'homme et des changements actuels du climat, ces deux facteurs se trouvant souvent en interaction. Les stations d'observation de ce type constituent des outils de recherche essentiels qui peuvent s'avérer également d'utiles outils de gestion. Les séries de données écologiques dont disposent les équipes de cette Zone Atelier, depuis plus de 50 ans pour les plus anciennes, sans équivalent au niveau mondial, permettent d'analyser 1) les réponses adaptatives des organismes natifs aux changements environnementaux, 2) de déceler les introductions, 3) de décrire les processus d'invasions biologiques et leurs impacts et 4) d'établir des mesures de conservation.

## III.2

### Perspectives

#### III.2.1

#### Systèmes d'observation et de suivis

Toutes les communautés scientifiques impliquées dans les recherches polaires s'accordent sur une première urgence : le renforcement en Antarctique et le développement en Arctique de système d'observation à long terme de type zone atelier, structures pluridisciplinaires essentielles pour suivre ces milieux et envisager des scénarios de conservation pertinents.

- **En Antarctique**, l'inclusion de sites marins côtiers informant notamment sur le benthos et les échanges à l'interface terre-océan pourrait compléter utilement le réseau existant. Faire perdurer des programmes comme le projet ANR ANTFLOCKS dédié à l'exploration et la compréhension de l'évolution de la biodiversité benthique antarctique s'inscrit dans les priorités.

11 - Janko K, Marshall C, Musilová Z, Van Houdt J, Couloux A, Cruaud C, Lecointre G. 2011 - Multilocus analyses of an Antarctic fish species flock (Teleostei, Notothenioidi, Trematominae): phylogenetic approach and test of the early-radiation event. Mol Phylogenet Evol. 60(3):305-16



• **En Arctique**, il n'existe aucun système de suivi organisé des écosystèmes et les stations de recherche existantes ne couvrent qu'une petite partie de leur variabilité. Il existe des réseaux comme SIOS, ArcticWolves ou IPY Arctic Predators qui ne prennent pas en compte les invertébrés ni la flore (la toundra y est perçue comme le compartiment d'entrée des écosystèmes), ni les environnements marins. Pourtant, compte tenu de son extrême fréquentation humaine et de sa grande sensibilité aux changements climatiques, les écosystèmes arctiques sont amenés à subir de grands changements (verdissement par croissance des arbustes et des arbres, colonisation d'espèces mobiles tels que le renard roux ou certains insectes ravageurs et déclin des espèces endémiques tels que lemming, renard polaire ou chouette harfang). Il est probable que l'Arctique soit confronté à des invasions biologiques de faune et de flore dont certaines auront pour origine le compartiment subarctique. Ce risque potentiel affecte même les îles en raison d'une fréquentation humaine importante qui apporte très certainement son lot d'espèces candidates à l'immigration (plusieurs bateaux de croisière par semaine avec plusieurs milliers de passagers à bord).

Il semble important de mettre en place des systèmes d'observation et de suivi (stations d'observation de la biodiversité, zones ateliers, observatoires hommes-milieux) qui permettent

d'évaluer et d'étudier ces processus le long de gradients latitudinaux englobant des stations du Haut Arctique et du Subarctique. Un axe de type Abisko (Arctique suédois), Ny Ålesund (Haut Arctique) serait des plus pertinents. De tels dispositifs pourraient constituer des outils de recherche et des réseaux collaboratifs complémentaires de ceux déjà présents dans le polaire/subpolaire antarctique, la comparaison entre les deux pôles étant particulièrement enrichissante pour la connaissance des processus biologiques.

• Dans le cas des larges populations d'oiseaux marins, distribuées d'une façon fragmentée en domaines insulaires et le long des côtes, un réseau de sites d'études développé dans le cadre de collaborations internationales, ancré sur quelques sites de suivi mis en place depuis plus de 10 ans (notamment dans le Kongsfjord, au Svalbard, et à l'Est du Finnmark, Norvège), et en comparaison avec d'autres localités (Atlantique nord, Alaska), permet une approche intégrée des réponses aux changements environnementaux d'une espèce clef telle que la mouette tridactyle. Un soutien à ce type de réseau pourrait être un moyen particulièrement efficace de contribuer, sur une large échelle spatiale, au développement et à la pérennisation de suivi physiologique (stress, polluants), épidémiologiques, comportementaux (suivi en mer) et démographiques.

### III.2.2

#### Catégorisation des espèces

Le développement des techniques d'identification moléculaire de type « Barcoding » devrait permettre de connaître rapidement les compositions des écosystèmes polaires, continentaux, planctoniques, cryopélagiques ou benthiques en fonction du cycle des saisons et ainsi, année après année, de suivre les perturbations des écosystèmes via leurs représentations taxonomiques.

• Cette caractérisation rapide passe par des séquences de gènes parfois « standards », des recherches et des mises au point de marqueurs sont cependant nécessaires chez beaucoup de taxons clés. Le séquençage rapide pour un usage de type « code barre » permet

ainsi le suivi des ajustements. Ce suivi est fondé sur les concepts de la taxonomie et de la systématique. Il nécessite des bases de données de séquences dont la mise en place demande des moyens et la contribution de taxonomistes.

# IV

## CONSERVATION REGIONALISATION RESTAURATION

Coordinateurs : Nadia Ameziane, Philippe Koubbi

La conservation des Biodiversités polaires fait partie des grandes priorités internationales. La France occupe une place d'observateur permanent au sein du Conseil arctique qui traite des questions environnementales et des risques qui menacent aujourd'hui toute cette région. En Antarctique, également, les préoccupations liées au changement climatique et à l'impact de l'homme ont pris tout leur sens depuis l'entrée en vigueur du protocole de Madrid. La CCAMLR (Convention sur la conservation de la flore et de la faune marines de l'Antarctique ou le CPE (Comité pour la protection de l'environnement) s'appuient sur des expertises scientifiques pour élaborer des règles de protection de l'environnement et de conservation des ressources antarctiques.

### IV.1

#### Réflexions actuelles

Les projets de mise en réserve, la désignation d'Aires marines protégées (AMP) passent par une réflexion internationale dans laquelle la France est très active. Cette réflexion englobe les paramètres abiotiques, les communautés biologiques, l'habitat global des espèces ou leurs habitats essentiels (zones de reproduction, de nutrition), les activités anthropiques (pêche) pour proposer des scénarios de conservation.

Les scénarios de conservation qui devront être proposés doivent considérer plusieurs contraintes majeures. Si le souhait est de conserver des caractères rares, alors il faut conserver les espèces ciblées qui les portent. Mais une espèce ne se conserve de manière durable que si elle s'épanouit dans son milieu, et ceci avec le potentiel de diversité génétique qui lui permettra de faire face aux aléas de demain.

- **Il s'agit donc de focaliser les efforts de conservation sur des écosystèmes entiers en priorisant la conservation des habitats.** Comme toute entité complexe, ceux-ci doivent être catégorisés, et

spatialement répertoriés. Les écosystèmes à préserver doivent avoir été envisagés comme pouvant supporter certaines modalités de l'activité humaine (surtout en zones arctiques) et les espèces ciblées doivent avoir été étudiées du point de vue de leur possible acclimatation, voire de leur adaptation à plus long terme, aux conséquences de ces activités. Le patrimoine historique porté par ces espèces, leur « santé génétique » actuelle, leur « souplesse » biochimique, physiologique, comportementale et démographique face aux changements environnementaux, devront constituer les prismes « passé-présent-futur » par lesquels toute recommandation de conservation doit être instruite.

- **Ces questions sont au cœur du débat qui concerne la définition d'Aires Marines Protégées (AMP).** D'une façon générale, une AMP est un espace délimité en mer, sur lequel est fixé un objectif de protection de la nature à long terme. Cet objectif est rarement exclusif. Il est souvent, soit associé à un objectif local de développement socio-économique, soit ar-



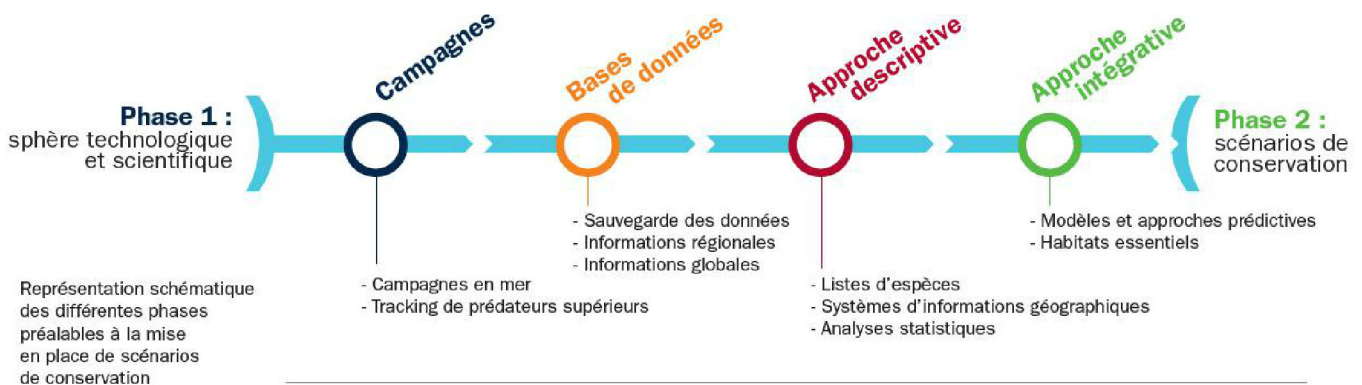
ticulé avec une gestion durable des ressources. Une aire marine protégée se caractérise également par un certain nombre de mesures de gestion mises en œuvre au profit de l'objectif de protection : suivi scientifique, programme d'actions, chartes de bonne conduite, protection du domaine public maritime, réglementation, surveillance, information du public... Le but est le maintien des capacités d'écosystèmes clés pour les ressources ou pour des espèces patrimoniales.

Les motivations peuvent être de divers ordres :

- la protection d'espèces ou d'habitats rares et/ou menacés,
- la préservation d'un ensemble d'habitats remarquables,
- la protection ou la reconstitution de ressources halieutiques,
- la protection de la biodiversité,
- la gestion durable d'un milieu naturel

- soumis à de multiples usages,
- la restauration des milieux dégradés,
- la mise en place de mesures écologiques compensatoires à des activités destructrices,
- un espace de référence scientifique.

Leur localisation en haute mer ou dans l'océan côtier lointain pose des difficultés concernant leur suivi et leur surveillance, puisque l'activité économique y est intégrée. Comment les définir à grande échelle ? L'éco-régionalisation est une voie qui est explorée tout comme la biogéographie mais il sera essentiel d'intégrer des aspects plus fonctionnels définissant les habitats de succès (adaptation, conditions trophiques, stabilité versus perturbation du milieu,...). La France s'est engagée dans ce processus au sein de la CCAMLR et nous rejoignons ici la notion de zones ateliers, structures essentielles pour suivre ces milieux, véritables sentinelles de l'évolution de notre planète.



## IV.2

### Perspectives

La désignation d'écosystèmes vulnérables et la mise en place de mesures de conservation nécessitent que soit favorisée l'interdisciplinarité déjà présente dans les structures telles que les zones ateliers évoquées plus haut.

C'est par des programmes conjoints entre laboratoires, des partenariats scientifiques internationaux, avec la participation des TAAF qui abritent déjà des réserves naturelles, et en liaison avec les acteurs économiques et ministères concernés, qu'il sera possible de créer de véritables réseaux de territoires et d'aires marines protégés.

Transformer la connaissance écologique en mesures de conservation adaptées représente un enjeu majeur qui devra motiver les recherches polaires à venir pour un développement durable.



# MODÈLES ANIMAUX ET VÉGÉTAUX SUIVIS DANS LES PROGRAMMES SOUTENUS PAR L'IPEV

## OISEAUX ET MAMMIFÈRES MARINS

### Antarctique et Subantarctique

#### PROGRAMME 109 (WEIMERSKIRCH – CHIZÉ)

- Grand albatros (Crozet)
- Albatros d'Amsterdam (Amsterdam)
- Albatros à sourcils noirs (Kerguelen)
- Albatros à bec jaune (Amsterdam)
- Pétrel géant antarctique (Crozet Kerguelen Terre Adélie)
- Pétrel bleu (Kerguelen)
- Prion de Belcher (Kerguelen)
- Prion de la Désolation (Kerguelen)
- Skua subantarctique (Kerguelen)
- Pétrel à menton blanc (Crozet)
- Manchot royal (Crozet)
- Manchot papou (Crozet)
- Gorfou macaroni (Crozet)
- Gorfou sauteur (Crozet, Amsterdam)
- Pétrel des neiges (Terre Adélie)
- Fulmar antarctique (Terre Adélie)
- Damier du Cap (Terre Adélie)
- Skua de Mc Cormick (Terre Adélie)
- Manchot empereur (Terre Adélie)
- Otarie antarctique (Crozet)
- Otarie subtropicale (Amsterdam)
- Eléphant de mer (Kerguelen)
- Orque (Crozet)
- Phoque de Weddell (Terre Adélie)

#### PROGRAMME 119

(GROSCOLAS/ROBIN - STRASBOURG)

- Manchot royal (Crozet)

#### PROGRAMME 131 (DUCHAMP - LYON)

- Manchot royal (Crozet)
- Manchot adélie (Terre Adélie)

#### PROGRAMME 137 (LE MAHO - STRASBOURG)

- Manchot royal (Crozet)
- Manchot adélie (Terre Adélie)
- Manchot Empereur (Terre Adélie)

#### PROGRAMME 354 (BONADONNA - MONTPELLIER)

- Skua subantarctique (Kerguelen)
- Pétrel bleu (Kerguelen)
- Prion de la Désolation (Kerguelen)
- Manchot royal (Kerguelen)

#### PROGRAMME 394 (BOST - CHIZÉ)

- Manchot royal (Crozet Kerguelen)
- Gorfou macarooni (Kerguelen)
- Cormoran de Kerguelen (Kerguelen)
- Manchot papou (Kerguelen)
- Gorfou sauteur (Amsterdam)

#### PROGRAMME 1014 (CHARASSIN - MNHN)

- Baleines - toutes espèces (Terre Adélie)

#### PROGRAMME 1037 (GILBERT - STRASBOURG)

- Eléphant de mer (Kerguelen)

### Arctique

#### PROGRAMME 330 (CHASTEL - CHIZÉ)

- Mouette tridactyle (Spitsberg)

#### PROGRAMME 333 (BOULINIER - MONTPELLIER)

- Mouette tridactyle
- Puffins
- Guillemot

#### PROGRAMME 388 (GRÉMILLET – MONTPELLIER)

- Mergule nain

#### PROGRAMME 450 (CHARRIER – ORSAY)

- Morse
- Phoque barbu

#### PROGRAMME 1162 (DANCHIN – TOULOUSE)

- Mouette tridactyle

## VERTÉBRÉS INTRODUITS (SUBANTARCTIQUE)

#### PROGRAMME 136

(LEBOUVIER / CHAPUIS - RENNES / MNHN)

- Lapin
- Souris
- Rat

#### PROGRAMME 279 (PONTIER - LYON)

- Chat (Kerguelen)

#### PROGRAMME 1041 (LABONNE - ST PÉE/NIVELLE)

- Salmonidés toutes espèces (Kerguelen)

#### PROGRAMME 1081

(LOISON/Yoccoz - LYON / TROMSO)

- Renne (Kerguelen)

## ORGANISMES MARINS

### Antarctique et Subantarctique

#### PROGRAMME 422 (PAULET - BREST)

- Bivalve *Adamussium colbecki*

#### PROGRAMME 1010 (MASSÉ - PARIS VI)

- Diatomées marines

#### PROGRAMME 1039 (TOULLEC - ROSCOFF)

- *Euphausia superba* (Terre Adélie)
- *Euphausia crystallorophias* (Terre Adélie)

#### PROGRAMME 345 TERRE ADÉLIE

(FÉRAL - MARSEILLE)

- Echinodermes *Abatus nimrodii*  
*Abatus ingens*  
*Sterechinus neumayeri*

#### PROGRAMME 195 KERGUELEN (FÉRAL - MARSEILLE)

- Echinodermes *Abatus cordatus*  
*Sterechinus diadema*
- Mollusques *Mytilus edulis*  
*Mytilus galloprovincialis*

#### PROGRAMME 1124 (LECOINTRE - MNHN)

- crinoid echinodermes avec un intérêt spécial à *Promachocrinus kerguelensis*
- échinid echinodermes avec un intérêt spécial aux genres *Sterechinus* et *Abatus*, ainsi qu'à l'espèce *Aporocidaris milleri*

- *notothenioid teleosts* avec un intérêt spécial à *Notothenia coriiceps*, *Trematomus bemaichii* et *T. hansonii*
- crustaceans
- Algae

#### PROGRAMME 1142 (KOUBBI - VILLEFRANCHE)

- *Euphausia crystallorophias*
- *Euphausia superba*
- *Pleuraogramma antarcticum*
- *Pleuraogramma antarcticum*
- *Pagothenia borchgrevinkii*
- *Trematomus newnesi*
- Diatomées : *Fragilaropsis* spp., *Chaetoceros criophilus*, *Rhizosolenia* spp., *Corethron pennatum*
- Copépodes, *Oithona similis*, *Oncaea curvata*, *Uchirella rostromagna*, *Calanoides acutus*, *Metridia gerlachei*, *Paralabidocera Antarctica*, *Stephos longipes*, *Drescheriella glacialis*

### Arctique

#### PROGRAMME 1008 (WEINBAUER - VILLEFRANCHES)

- Algues Lithothamnion glaciale (Spitsberg)
- Bivalve *Serripes groenlandicus* (Spitsberg)
- Ptéropode *Limacina helicina* (Spitsberg)

#### PROGRAMME (CHAUVAUD - BREST)

- bivalve

## INVERTÉBRÉS TERRESTRES

### Subantarctique

#### PROGRAMME 136 (LEBOUVIER - RENNES)

- *Anatalanta aptera* - Diptère (Crozet Kerguelen)
- *Calliphora vicina* - Diptère invasif (Kerguelen)
- *Merizodus soledadinus* - Coléoptère invasif (Kerguelen)
- *Notodiscus hookerii* - Gastéropode (Crozet)
- *Myzus ascalonicus* - Puceron invasif (Kerguelen)
- *Rhopalosiphum padii* - Puceron invasif (Kerguelen)
- *Dendrodriilus rubidus tenuis* - vers de terre invasif (Crozet, Kerguelen)
- *Microscoclex* sp (4 espèces) - vers de terre (Crozet, Kerguelen)

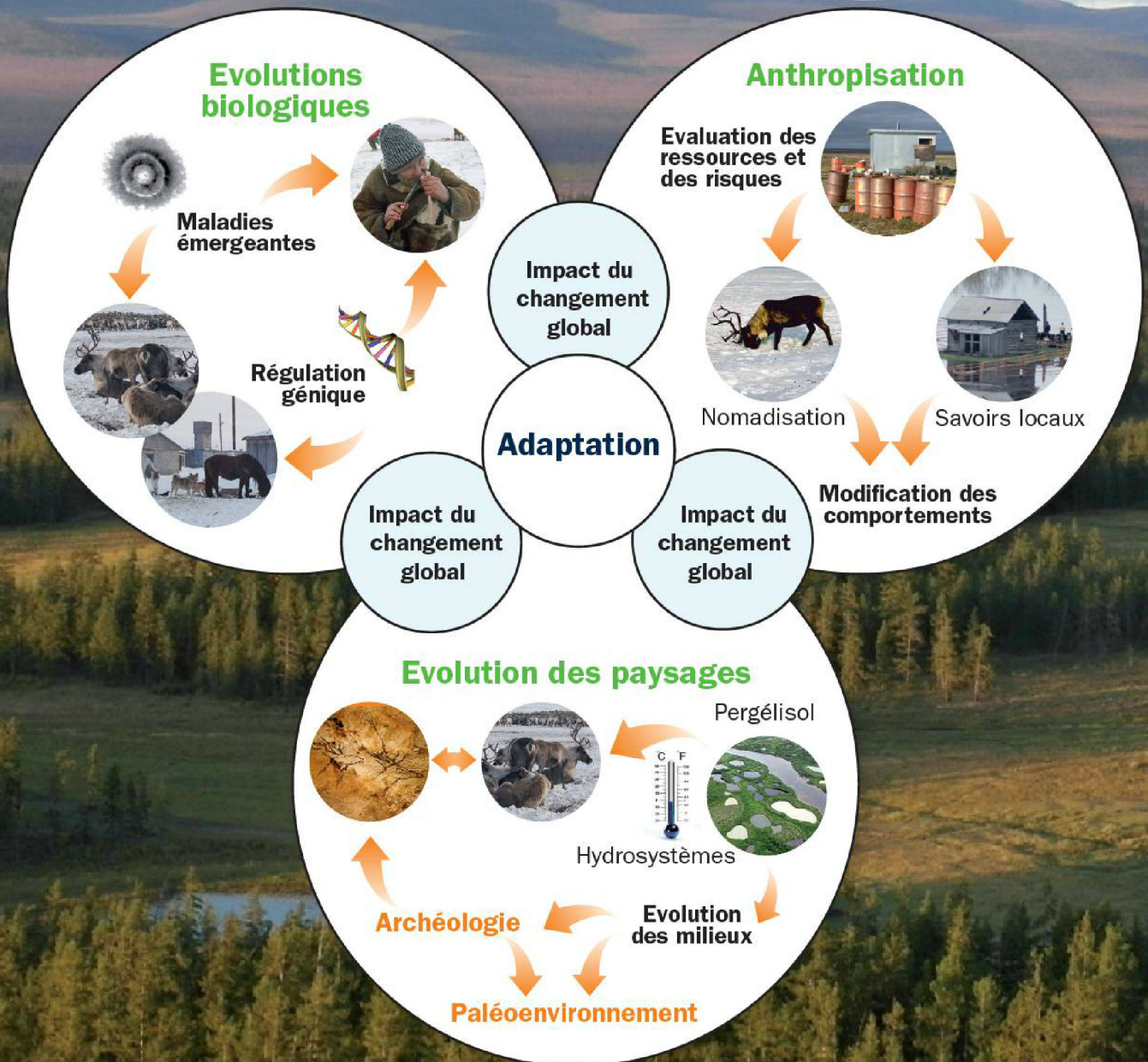
## PLANTES

### Subantarctique

- *Pringlea antiscorbutica* ou Chou de Kerguelen (Crozet, Kerguelen)
- *Lyallia kerguelensis* (Kerguelen)
- *Acaena magellanica* (Kerguelen)
- *Taraxacum officinale* - invasive (Kerguelen)
- *Poa annua* - invasive (Kerguelen, Crozet)
- *Phytica arborea* (Amsterdam)
- *Sphagnum* sp. (Amsterdam)



Identification des champs scientifiques et interaction des différentes approches permettant d'appréhender l'impact du changement global sur l'homme et les sociétés humaines polaires





# Changement global, hommes & sociétés humaines polaires

Avec les contributions de :

Marie-Françoise André, GEOLAB, CNRS-Université Blaise Pascal Clermont 2 – Sylvie Beyries, CEPAM, CNRS-Université de Nice, Sophia Antipolis – Sylvie Blangy, CEFE, CNRS-Universités de Montpellier – Caroline Bouakaze, AMIS, CNRS-Université Paul Sabatier Toulouse 3 – **Daniel Brunstein**, LGP CNRS-Université Paris 1 – **Robert Chernorkian**, Directeur Adjoint Scientifique INEE, CNRS, Paris – **Eric Crubézy**, AMIS, CNRS-Université Paul Sabatier Toulouse 3 – **Armelle Decaulne**, GEOLAB, CNRS-Université Blaise Pascal Clermont 2 – **Emilie Gauthier**, Laboratoire Chrono-environnement, CNRS-Université de Franche-Comté, Besançon – **Emmanuèle Gautier**, LGP CNRS-Université Paris 8 – **Eva-Maria Geigl**, IJM, CNRS-Université Paris 7 – **Vincent Jomelli**, GEOLAB, CNRS-Université Paris 1 – **Thierry Letellier**, AMIS, CNRS-Université Paul Sabatier Toulouse 3 – **Bertrand Ludes**, AMIS, Université de Strasbourg – **Jean-François Maghaval**, AMIS, CNRS-Université Paul Sabatier Toulouse 3 – **Dominique Marguerie**, CReAAH, CNRS-Université de Rennes 1 – **Marie-Thérèse Marty**, TRACES, CNRS-Université du Mirail, Toulouse 2 – **Marie Roué**, Eco-anthropologie et ethnologie, CNRS-MNHN, Paris – **Catherine Thèves**, AMIS, CNRS-Université Paul Sabatier Toulouse 3.





## Contexte

Le Quaternaire fut particulièrement instable sur le plan climatique et les conséquences de cette variabilité sur l'organisation et le fonctionnement des écosystèmes et des sociétés ont été considérables. Les régions polaires et subpolaires furent confrontées cycliquement à la progression et aux retraits des calottes glaciaires, des glaciers et du pergélisol. Des régions aujourd'hui tempérées ont été recouvertes alors par l'inlandsis. Elles connurent, au terme du Pléistocène, la fin de la glaciation würmienne puis le réchauffement holocène (stades 2 et 1) qui constituent des analogues parfaits de ce que sont et deviennent les zones polaires.

Ces régions, comme les autres il y a quelques 15 000 ans, sont de nos jours les plus exposées aux conséquences du réchauffement climatique dont l'importance et la rapidité induisent des conséquences extrêmement prégnantes et à très fort impact sur l'environnement comme sur les sociétés. La différence, considérable, est qu'aujourd'hui le changement n'est plus seulement climatique mais global et qu'il se combine avec une très forte pression démographique à l'échelle de la Planète, une économie mondialisée et de très forts enjeux géostratégiques, qui enchainent très fortement aux modifications dues au climat, des conséquences extrêmement fortes pour les sociétés et les milieux polaires.

Les sociétés traditionnelles arctiques se sont structurées de manière très spécifique en raison des très fortes pressions que ce milieu extrême a fait peser sur elles. Elles ont dû faire face, ces trois derniers siècles, à des facteurs anthropiques exogènes et puissants qui les ont contraintes à des rééquilibrages économiques, sociaux et culturels très importants. C'est dans ce contexte que le changement global les affecte, posant avec force la question de leur évolution et de la survie des savoirs et modèles traditionnels.

La compréhension de ces phénomènes et de leurs interactions constitue donc aujourd'hui un enjeu essentiel.



# REPONSES DES ENVIRONNEMENTS POLAIRES ET SUBPOLAIRES

AU CHANGEMENT GLOBAL ET INTERACTIONS HOMMES-MILIEUX

Coordinateur : Emmanuèle Gautier

## I.1

### Avancées des recherches

Le réchauffement produit des modifications majeures dans les cycles de l'eau, principalement dans la permanence des phases solides, qui vont induire d'une part des disparités fortes dans les stabilités et les résistances et d'autre part une abondance inhabituelle de la ressource dans sa phase liquide. Les hétérogénéités et les instabilités induites vont se traduire par des dynamiques d'érosion et de mobilisation particulièrement fortes et modificatrices qui vont avoir des conséquences directes sur les sociétés en faisant apparaître des risques nouveaux ou accrus : modifications des disponibilités alimentaires pour l'homme et l'animal, augmentation de la fréquence et de l'intensité des processus extrêmes (avalanches, coulées de débris, inondations, sécheresses...) aptes à affecter très fortement les fonctionnements économiques et sociaux.

Ainsi l'augmentation de l'épaisseur du tapis neigeux affecte-t-elle lourdement la ressource herbacée des rennes et caribous. Les « crises de verglas » comme en connaît le Canada provoque

des dysfonctionnements majeurs dans les réseaux électriques et dans les réseaux routiers. Il convient donc d'en analyser l'intensité par région, la fréquence et d'établir des liens avec les circulations atmosphériques spécifiques.

Les sociétés arctiques sont fortement dépendantes des cours d'eau : les villes principales sont généralement localisées sur les berges des fleuves qui leur assurent des axes de transport majeurs ; l'essentiel des échanges commerciaux se fait par voie d'eau. L'aggravation de la puissance des crues, de leur durée, mais aussi de la durée des basses eaux aura des conséquences lourdes sur les inondations des structures urbaines et industrielles, ainsi que sur la navigation fluviale.

La question de l'eau en termes de ressource et de risques est au cœur des interactions entre l'évolution des milieux polaires/subpolaires et les sociétés vivant dans ces milieux. La compréhension des mécanismes en jeu et de leurs dynamiques est donc des plus importantes.





### I.1.1

#### La réponse des hydrosystèmes périglaciaires fluviaux au changement climatique en cours

En contexte glaciaire, la permanence du pergélisol est un élément de stabilité générale qui impacte les régimes fluviaux et la dynamique globale des systèmes. L'élévation de la température (+1° pour le pergélisol en Yakoutie depuis les années 80, par exemple) induit un épaississement de la couche active et entraîne un changement des processus d'érosion, de sédimentation des fleuves et notamment une instabilité des berges. Les eaux relativement chaudes des débâcles de printemps entraînent un recul important des berges (variant entre 4 et 40 m par an pour la Lena, par exemple). Le changement hydro-climatique et ses conséquences morpho-dynamiques entraînent

des perturbations socio-économiques importantes. Les fleuves arctiques constituent en effet des axes de développement urbain, industriel et portuaire majeurs. En raison des difficultés de circulation par voie terrestre, l'essentiel des transports de matières premières et de produits finis se fait par voie fluviale. L'aggravation des risques hydrologiques qui se manifeste déjà par une augmentation de la fréquence des grandes crues, met directement en péril les infrastructures urbaines et portuaires. De plus, l'augmentation de l'érosion des berges engendre une instabilité du lit navigable qui provoque une difficulté croissante de la navigation sur les fleuves subarctiques.

### I.1.2

#### Reconstitution paléo-environnementale des glaciers

La caractérisation des évolutions passées est un des éléments essentiels pour la compréhension des changements que subissent actuellement les hydrosystèmes. Cette caractérisation passe par exemple par la reconstitution de l'évolution des glaciers au cours de l'Holocène et la détermination des conditions climatiques responsables de cette évolution. Les recherches récentes ont permis de bien documenter la déglaciation aux moyennes latitudes de l'hémisphère nord. On sait par exemple que l'évolution basse fréquence des glaciers alpins a été asynchrone avec celle des glaciers tropicaux ou des moyennes latitudes de l'hémisphère sud<sup>12</sup>. En revanche, certaines phases d'avancées de haute fréquence étaient synchrones entre les tropiques et les moyennes latitudes de l'hémisphère nord notamment au cours du Petit Age Glaciaire. Comment se sont comportés les glaciers des hautes latitudes par rapport au reste du monde ? Deux régions d'études ont été sélectionnées jusqu'à présent, à savoir la zone sub-Antarctique des Iles

Kerguelen (Programme IPEV Kesaaco 2010-2014, Programme Lefe Kcrumble 2011-2014, Programme Smingue UJF, 2011) et le Groenland (Programme ANR Green Greenland, 2010-2014). Dans chacune de ces deux régions les recherches visent à cartographier les moraines holocènes et à les dater à partir de techniques géochronologiques récentes (<sup>10</sup>Be et lichénométrie GEV). Le but est de documenter l'évolution des glaciers au cours du temps en en déterminant les causes et de décrire l'évolution des températures/précipitations à leur surface en s'appuyant sur des modèles glaciologiques. Ces recherches reposent sur une collaboration pluridisciplinaire combinant géomorphologues, glaciologues et modélisateurs du climat, notamment. Outre leur intérêt propre, ces recherches présentent aussi celui de permettre une bonne appréhension des cadres dans lesquels se sont développées les occupations animales et humaines de ces zones au cours du temps et de servir ainsi à leur compréhension.



### I.1.3

## La réponse des systèmes de pentes polaires et subpolaires aux fluctuations climatiques holocènes et à la pression anthropique contemporaine

**En péninsule Antarctique**, les travaux ont porté sur la réponse aux variations climatiques holocènes d'une « oasis » dépourvue de glace<sup>13</sup>. Couplé avec des données paléo-environnementales recueillies par des équipes scandinaves et britanniques, un scénario d'évolution géomorphologique holocène en 6 étapes a été reconstitué, et deux indicateurs potentiels de l'optimum holocène ont été identifiés : 1) des phénomènes d'alvéolisation littorale liés à la disparition de la plateforme du George VI Sound (optimum marin de 6.5 ka BP) ; 2) des lithobiofilms lichéniques et cyanobactériens (optimum terrestre de 3-4 ka BP). Ces travaux permettent de mettre en perspective l'impact géoenvironnemental du réchauffement contemporain qui, bien que très marqué dans la péninsule Antarctique (+ 2°C en 50 ans), apparaît très en retrait par rapport aux épisodes antérieurs de réchauffement qui ont vu un retrait glaciaire et une extension de la végétation beaucoup plus poussés qu'aujourd'hui.

**Dans l'Arctique et le Subarctique**, les effets conjoints du réchauffement contemporain et des interventions humaines sur les milieux de toundra ont fait l'objet de synthèses<sup>14</sup> et de travaux de terrain conduits principalement en Islande mais intégrés au réseau international SEDIBUD (Sediment budgets in cold environments). Au sud de l'île, les modalités et les rythmes d'ajustement du continuum glacio-fluvial depuis la fin du Petit Âge Glaciaire ont été précisés sur la base d'une approche systémique<sup>15</sup>. Au nord et au nord-ouest de l'Islande, la fréquence et la distribution des épisodes avalancheux post-Petit Âge Glaciaire ont été étudiés en croisant signatures morphosédimentaires et informations dendrogéomorphologiques<sup>16</sup>. L'analyse des conditions de déclenchement et de la distribution spatio-temporelle des avalanches et des coulées de débris (debris flows) a débouché sur des propositions visant à améliorer la prévention et la gestion des risques associés à ces dynamiques de versant qui affectent les implantations humaines le long des fjords islandais.



13 - André M.-F., Hall K. 2005. Honeycomb development on Alexander Island, glacial history of George VI Sound and palaeoclimatic implications (Two Step Cliffs / Mars Oasis, W Antarctica). *Geomorphology* 65 : 117-138.

14 - André M.-F. 2009. From climatic to Global Change geomorphology: contemporary shifts in periglacial geomorphology. Geological Society of London. Special Publication, 320 : 5-28

15 - Chenet M., Roussel E., Jomelli V., Grancher D. 2010. Asynchronous Little Ice Age glacial maximum extent in southeast Iceland. *Geomorphology*, Volume 114, Issue 3, pp. 253-260.

16 - Decaulne A., Sæmundsson Þ. & Jónsson H.P. 2009 An overview of postglacial sediment records from col-luvial accumulations in Northwestern and North Iceland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 41-1, 37-47.

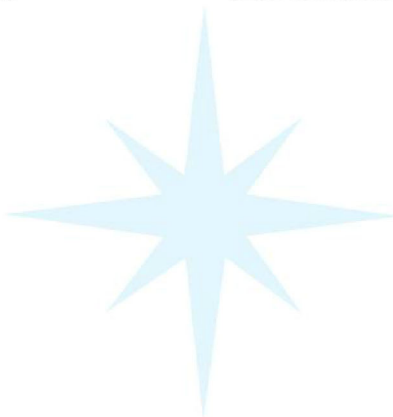


## I.2

## Perspectives

Un premier point se dégage nettement : des approches multi-scalaires sont nécessaires pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les environnements polaires et subpolaires et envisager des scénarios d'évolution pertinents.

- Si le changement lui-même (évolution thermique et pluviométrique) commence à être solidement documenté, la réponse des milieux est à l'heure actuelle très mal connue. Cette réponse est fonction du système lui-même : les glaciers, le pergélisol ne sont pas régis par les mêmes facteurs et ont leur propre rythme d'évolution et de résilience. De plus, les facteurs zonaux/azonaux jouent un rôle fondamental : altitude, continentalité, héritages, végétation... et sont autant de facteurs modulant la réponse du système. Les contraintes globales (température, précipitations) entrent en interaction avec des contraintes locales, créant une réponse différenciée des milieux. Le changement doit être donc appréhendé à une échelle régionale afin de mettre en évidence les invariants ou les réajustements propres à un système donné. Il s'agit donc de caractériser finement les modes et rythmes de déglaciation, de fonte des pergélisols et leurs impacts sur les environnements (modification de la biodiversité, des risques... par exemple). L'analyse fine des réponses des milieux glaciaires et périglaciaires doit reposer sur la mise en place d'outils d'observation appuyés sur des sites où les différentes composantes du milieu seront équipées et suivies sur plusieurs années ; ces données, couplées à des observations réalisées à une plus large échelle spatiale et temporelle, permettent d'appréhender dans son ensemble la réponse du milieu.
- Les conséquences induites par l'évolution des milieux doivent être également prises en compte à différentes échelles spatiales et temporelles :
  - **Sur les versants** : la modification des processus de décompression / déstabilisation des versants induit des changements dans l'intensité et dans la fréquence de certains processus.
  - **Le recul glaciaire** peut induire des modifications dans l'activité de processus, facteurs de risques accrus pour la société, tels les avalanches, les coulées de boue. En effet, il a été observé dans les Alpes des avalanches plus longues, des coulées de boue plus fréquentes. Ce recul glaciaire peut aussi faciliter la colonisation d'espèces invasives, comme le renne ou le chat aux Kerguelen qui bénéficient du recul du glacier Cook.
  - **Les cours d'eau** : le changement des températures de l'air et du sol accompagné des modifications de la pluviométrie déterminent des évolutions de la saisonnalité des écoulements, et par là de l'intensité / fréquence des crues et étiages.
  - **La biogéographie** doit s'appuyer sur le suivi de la progression des fronts de colonisation des espèces « méridionales », et sur la caractérisation des rythmes et territoires, des zones refuges des peuplements et l'analyse spatiale de leurs évolutions.





# APPROCHE MULTI-TEMPORELLE DES MODIFICATIONS CLIMATIQUES ET DE LEURS CONSEQUENCES SUR LES INTERACTIONS ENTRE LES HOMMES ET LES MILIEUX ARCTIQUES

Coordinateurs : Robert Chenorkian, Eric Crubézy

Ces recherches sont diachroniques et multi-scalaires, elles reposent sur l'étude des environnements dans le temps et des archives naturelles. Elles sont fondamentalement interdisciplinaires et intègrent les problématiques et les outils des biosciences, des géosciences et de l'archéologie.

Ainsi, la paléoécologie (palynologie, analyse macrofossile, xylo-dendrologie, anthracologie), l'archéo-entomologie, l'archéozoologie, la géoarchéologie (micromorphologie, sédimentologie, stratigraphie), la géomorphologie, l'archéologie et la géographie culturelles, l'ethno-anthropologie lorsqu'elle est possible, croisent-elles leur expérience autour de marqueurs d'évolution pertinents.

Les analogues du passé permettent non seulement de caractériser un état moyen mais aussi de mettre en évidence le changement en termes d'intensité, de rythme et de durée. Ces analogues permettent aussi de discriminer dans le changement actuel la part du naturel de celle liée à l'homme. Ces archives sont essentiellement sédimentaires, mais aussi biologiques, animales (de la bactérie aux vertébrés) et anthropiques.

## II.1

### Changements environnementaux, paysagers et culturels en Terres Arctiques. Approches multi-temporelles

#### II.1.1

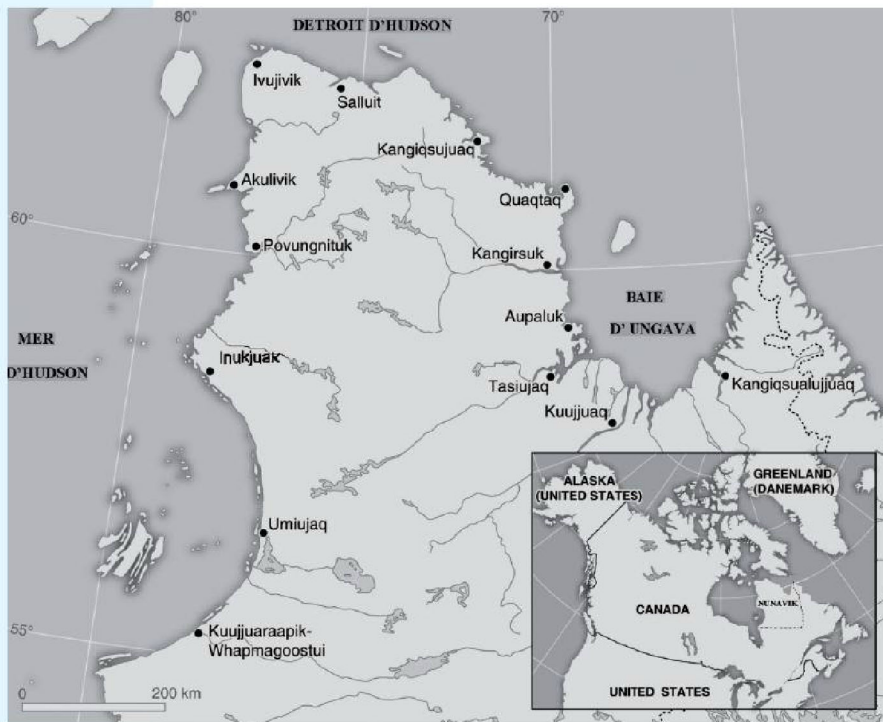
##### Recherches actuelles

Deux exemples d'études sont ici évoqués, l'un en Arctique canadien et l'autre au Groenland, pour illustrer l'importance d'une meilleure connaissance des dynamiques passées pour comprendre le présent et anticiper l'avenir.

**En Arctique canadien**, les travaux menés en collaboration dans des programmes de recherche canadiens s'insèrent dans les problématiques suivantes :

- les dynamiques environnementales des grands cycles climatiques quaternaires et des événements climatiques rapides,
- les interactions hommes-milieux et les stratégies d'adaptation des populations humaines,
- le suivi de la biodiversité végétale et animale en lien avec les changements environnementaux et culturels,
- le suivi de l'évolution du pergélisol dans les tourbières.





La région d'étude est le Nunavik et le Labrador, dans la péninsule d'Ungava, à l'Est de la Baie d'Hudson. Cette région présente un gradient bioclimatique latitudinal fort intéressant, des sols et des végétations qui s'étendent du 55 au 62° latitude N ; depuis un pergélisol sporadique à continu ou bien de la toundra forestière subarctique (55 – 58° N) au domaine de la toundra arctique (58 – 62° N).

En fouillant des sites d'habitat paléoesquimaux (-4000 à -800 BP) et néoesquimaux (-800 à -200 BP), deux grandes sociétés culturelles résultant d'un mouvement migratoire en plusieurs vagues à partir de l'Alaska, les archéologues et paléoenvironmentalistes suivent les objectifs suivants :

- établissement de la profondeur temporelle des réactions des communautés nordiques à l'accélération des changements environnementaux et face aux mutations culturelles ;
- suivi de l'évolution spatio-temporelle des territoires et des écoumènes des sociétés paléo- et néoesquimaudes ;
- relations entre distribution et disponibilité en ressources animales, types d'habitats humains et économies de subsistance ;
- stratégies d'acquisition et d'exploitation des matières premières (ligneuses, lithiques et osseuses) liées aux changements environnementaux et culturels.

L'étude du bois flotté actuel déposé sur les plages arctiques en relation avec celui découvert dans les sites archéologiques, renseigne sur l'évolution de la circulation des courants océaniques en lien avec les changements climatiques, ainsi que sur la consommation et la transformation de cette ressource originale par les Paléo- et Néo-esquimaux.

La dimension sociale, culturelle, mythique de la relation des habitants avec leur environnement est étudiée à travers les récits, les croyances traditionnelles, l'iconographie et les interviews. Les entretiens portent sur la perception du territoire, des paysages, sur la représentation de l'environnement, sur celle des changements climatiques et sur les relations aux matières premières dont le bois. L'objectif de cette approche est de connaître comment les Inuits se construisent une identité à partir de leur relation à l'environnement et au territoire, comment cette identification est une forme d'appropriation de leur patrimoine environnemental et paysager.

**Au Groenland**, la colonisation agro-pastorale médiévale a suscité des travaux depuis 2006. Au-delà de l'aspect romanesque de l'aventure viking au Groenland (986 AD-vers 1450 AD), cette époque constitue un modèle de référence particulièrement adapté pour l'étude des relations entre une communauté humaine et son environnement, de la conquête à l'abandon.

Le but de ces recherches est de :

- comprendre les mécanismes d'interaction entre le forçage climatique et le forçage anthropique sur

la dynamique sédimentaire de systèmes lacustres dont les bassins versants ont été colonisés par les agriculteurs vikings ;

- évaluer les mutations environnementales liées à l'emprise de l'agro-pastoralisme et la résilience du milieu après l'abandon des colonies ;
- préciser les connaissances de l'histoire du peuplement arctique à l'époque médiévale. Toutes ces études sont résolument pluridisciplinaires et concernent les paramètres biotiques (pollen, diatomées, chironomes...) et abiotiques (sédimen-



tologie géochimie...), retrouvés dans des carottes de sédiments prélevées au fond de lacs, non perturbés par les variations de niveau d'eau ou par les effets du gel et sélectionnés en fonction de leur proximité avec des habitats comme c'est souvent le cas, du fait des relations que l'homme entretenait avec son bétail.

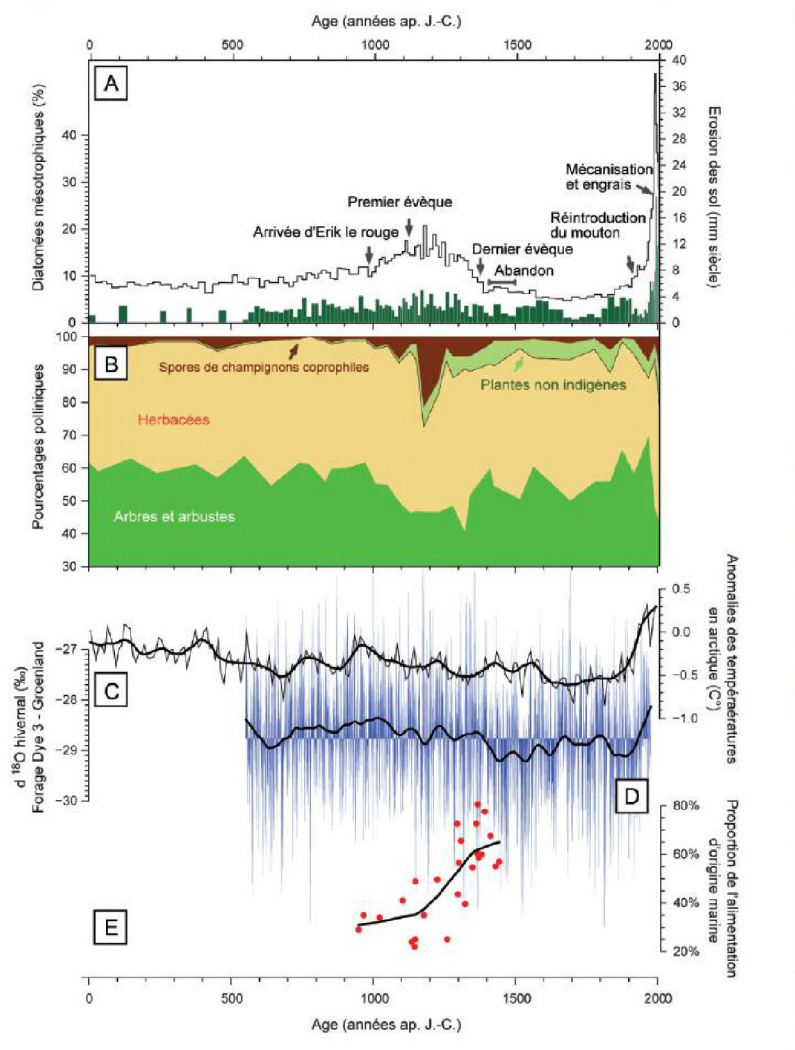
Les résultats en termes d'impact de l'homme se traduisent de différentes manières, en fonction des proxys abordés :

- la palynologie met en évidence un impact sur l'environnement végétal : apparition de plantes non indigènes, augmentation de certaines plantes héliophiles, réduction du couvert de bouleau blanc, pression pastorale détectée par le biais des spores de champignons coprophiles, etc.
- d'un point de vue sédimentologique et géochimique (C/N,  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{13}\text{C}$ ), ces activités agricoles ont déstabilisé le bassin versant et engendré une érosion modérée des sols (2 fois supérieure à la

normale). Ces modifications ont cependant été insuffisantes pour transformer le système lacustre. Les analyses de diatomées montrent que le lac Igaliku est resté oligotrophique. Les analyses montrent également que, dès 1300, soit 150 ans avant l'abandon final, la pression pastorale diminue fortement.

Après l'abandon de la colonie, seule la résilience végétale est incomplète : les plantes importées se sont maintenues dans l'environnement.

- A partir de 1920, une agriculture centrée sur l'élevage du mouton est réintroduite dans le sud du Groenland. L'impact des activités développées plus particulièrement depuis les années 1980 est sans précédent. Avec la mécanisation, l'érosion des sols est 5 fois supérieure à celle des périodes non-anthropisées et en raison des quantités d'engrais et d'effluents largués dans le bassin versant, le lac est devenu mésothrophique.



Séquence sédimentaire du lac d'Igaliku (sud Groenland) : comparaison entre les données historiques, les changements environnementaux enregistrés par différents proxys (érosion des sols, diatomées, pollens et micro-fossiles non polliniques), l'évolution des températures, l'évolution du  $\delta^{18}\text{O}$  hivernal du forage Dye 3 et la proportion de l'alimentation d'origine marine viking. (Massa et al. 2012 Quaternary Science Reviews)



## II.1.2 Perspectives

Ces études nécessitent de faire coexister des temporalités différentes - millénaires, siècles, années - et de croiser les évolutions du vivant, de l'homme et de ses cultures et les modifications des milieux.

- **Les enjeux actuels** visent donc à augmenter la capacité de résolution des études en paléoenvironnement en termes de caractérisation et de dynamiques. Ouvrir la perception du passé en direction du plus récent et vers le plus ancien.
- **Ces travaux mettent en œuvre une approche multiproxies** (biotiques et abiotiques) et des analyses d'archives naturelles à haute résolution, une multidisciplinarité des sources (biochimie moléculaire) et de l'environnement (géochimie, biomarqueurs).
- **L'interdisciplinarité entre sciences sociales et sciences de la nature** est nécessaire pour travailler sur les territoires dont la structure et la dynamique sont fortement dépendantes des activités humaines.
- **Les outils d'analyse spatiale** se développent très rapidement, ce qui incite à une réflexion sur leur mise en partage avec toute l'interopérabilité nécessaire au bon fonctionnement des échanges. Une mise à disposition des bases et métabases de données provenant de réseaux larges, pluridisciplinaires, nationaux et internationaux, devrait favoriser l'analyse efficace des processus à large échelle.







## II.2

### Coévolution hommes/milieus, les maladies émergentes

La zone arctique, du fait de ses environnements spécifiques, présente des disparités dans les conditions de vie et les pratiques culturelles de ses populations traditionnelles. Elle constitue un terrain privilégié pour la recherche des phénomènes d'adaptation et d'acclimatation du corps humain. En effet, les polymorphismes génétiques ont été sélectionnés par ces environnements et pratiques culturelles et il est donc possible d'identifier et d'apprécier les risques pathologiques potentiels propres à ces populations de l'Arctique, en fonction des changements environnementaux passés et présents. Ainsi, l'évolution des disponibilités et des pratiques alimentaires, de la biologie des adaptations à l'alimentation, des systèmes sociaux, constituent des champs d'investigations à exploiter.

#### II.2.1

##### Avancées des recherches en anthropobiologie

L'enjeu de ces études réside dans la caractérisation et la compréhension des processus biologiques qui ont permis l'adaptation de notre espèce aux transformations rapides et massives de ses environnements. Le milieu arctique a entraîné des adaptations humaines, anatomiques, physiologiques et culturelles, particulières. Les populations qui y vivent sont actuellement confrontées à des changements sociétaux et environnementaux drastiques, dont certains, tel le développement de maladies émergentes, pourraient devenir des questions de santé publique dépassant largement le cadre des populations autochtones, leur diffusion pouvant entraîner un problème international.

Le milieu froid que représente l'Arctique permet une conservation exceptionnelle des vestiges archéologiques et notamment de l'ADN. Les corps gelés, tels ceux que l'on trouve en Sibérie, en république Sakha (région de Verkhoïansk notam-

ment), permettent ce type d'études. L'Arctique peut donc être considéré comme une zone d'observation exceptionnelle permettant le développement de recherches spécifiques. Il peut s'agir de questions de recherche fondamentale, telle l'évolution hommes-milieus sur le long terme, de questions plus appliquées sur le vieillissement et l'obésité qui pourraient tenir compte de paramètres que l'on ne peut trouver ailleurs (liés aux conditions «extrêmes»), ou encore de questions concernant les maladies émergentes qui risquent de s'y développer.

Le nouveau LIA COSIE, « Coévolution hommes-milieus en Sibérie orientale », créé en 2011, entre le CNRS, la Fondation Russe pour la recherche fondamentale et l'université fédérale du Nord-Est (Iakoutsk), l'université médicale d'état de Krasnoïarsk, les universités de Toulouse III et de Strasbourg, illustre l'importance des relations bilatérales dans le cadre de la recherche arctique.



## II.2.2

### Perspectives

Dans le contexte actuel, l'anthropobiologie identifie trois thèmes essentiels : le vieillissement, les réponses métaboliques et physiologiques caractérisant l'acclimatation du corps humain face aux changements d'environnements et de pratiques culturelles et le risque qu'encourent les populations autochtones face aux maladies émergentes.

- **Le vieillissement** : C'est l'une des préoccupations majeures des sociétés occidentales actuelles et l'une des questions sociétales importantes auxquelles aura à faire face l'humanité dans les 50 années à venir. Il peut être perçu sur le plan biologique (effets matériels : qu'est-ce que le vieillissement ?) et culturel (comment est-il vécu ?). Le milieu « extrême » qu'est l'Arctique entraîne-t-il un vieillissement semblable chez les populations autochtones et allochtones qui y sont soumises, par rapport à d'autres populations mondiales ?

- **Réponses humaines aux changements environnementaux et culturels** : La compréhension des équilibres énergétiques, des perturbations métaboliques qui engendrent l'obésité, une autre grande question de société, d'intérêt international pourrait bénéficier d'études fondamentales menées auprès des communautés de l'Arctique. Malgré d'importantes recherches en génétique menées ces cinq dernières années, aucun élément indiscutable n'est venu en effet étayer l'hypothèse du génome économe. La question des haplogroupes mitochondriaux devrait être explorée chez les populations de l'Arctique par rapport à d'autres populations.

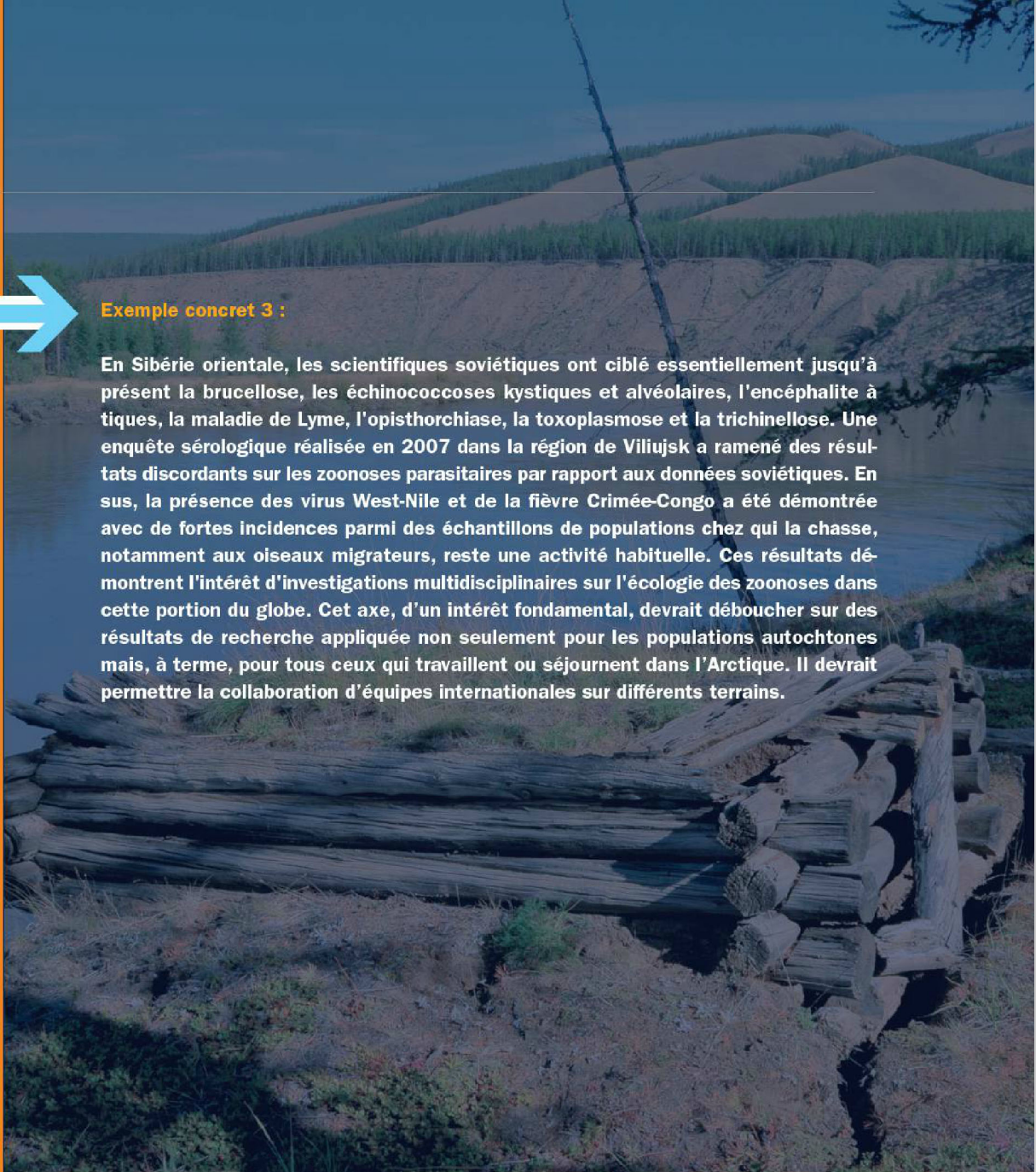
- **Les maladies infectieuses** sont à l'origine d'une sélection rigoureuse des populations humaines ayant entraîné chez l'Homme l'apparition de résis-

tances reposant sur un support génétique. Par ailleurs, toutes ces maladies ont été, à un moment ou à un autre, émergentes au sein des populations humaines. Lors des siècles derniers, l'arrivée massive des populations d'origine européenne et de leur culture a parfois entraîné le développement de maladies inconnues des populations traditionnelles (rougeole, variole, scarlatine, tuberculose, typhus, syphilis, etc.) qui ont fait de terribles ravages jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. L'augmentation actuelle de la température générale sur les zones polaires entraîne un changement de territoires des populations de pathogènes, des hôtes ou des vecteurs (*Clostridium botulinum*, *Campylobacter jejuni*, *Salmonella enterica*, *Clostridium perfringens*, *Staphylococcus aureus*, *Shigella sp.*). Les populations de ces régions sont, plus que dans les pays industrialisés, soumises aux maladies à transmission alimentaire ou vectorielle, soit au travers d'activités professionnelles et de pratiques nutritionnelles séculaires, soit du fait de l'émergence de nouveaux risques par perturbation de l'écosystème. Si l'on excepte les maladies infantiles, la tuberculose et la dissémination possible de l'infection par le VIH, les risques infectieux majeurs sont zoonotiques. L'étude de ces maladies émergentes et tout particulièrement des zoonoses, excellents marqueurs pour étudier les relations de l'homme avec son environnement, doit se mettre en œuvre dans le passé comme pour le présent, sur le long terme.

Ces recherches nécessitent des travaux de paléopathologie et des investigations auprès des populations actuelles. L'évolution des milieux, de la relation homme-animal (animaux domestiques ou sauvages), l'évolution des pratiques alimentaires et des organisations sociales sont au centre de ces études. Elles ciblent les maladies infectieuses, dont les zoonoses, dans leurs effets sur l'évolution des populations au cours du dernier millénaire, avant et après leurs contacts avec les Européens, et explorent l'évolution éventuelle des génomes bactériens.

De tels programmes nécessitent de rassembler les techniques de la biologie moléculaire et de la génomique sur des échantillons provenant des populations modernes et anciennes et l'analyse des deux composantes bactériennes et humaines sur plusieurs terrains géographiques. Ils supposent la mise en œuvre 1) des technologies de génétique de pointe sur des échantillons très différents (nature intrinsèque de l'échantillon et ADN ancien *versus* ADN moderne), 2) des traitements bioinformatiques, 3) des analyses phylogénétiques, 4) de la construction de modèles éco-épidémiologiques Hommes/Bactéries/Virus. Ils devraient permettre de poser des hypothèses de coévolution Homme/Pathogènes (Bactérie/Virus), de transmission (Vecteurs/Interhumains), et d'émergence des maladies infectieuses pour les populations humaines anciennes *versus* contemporaines de cette région du monde. L'interaction avec les recherches sur les faunes vectrices est essentielle pour la bonne compréhension des dynamiques et de leur devenir (*cf. supra*).





### Exemple concret 3 :

En Sibérie orientale, les scientifiques soviétiques ont ciblé essentiellement jusqu'à présent la brucellose, les échinococcoses kystiques et alvéolaires, l'encéphalite à tiques, la maladie de Lyme, l'opisthorchiose, la toxoplasmose et la trichinellose. Une enquête sérologique réalisée en 2007 dans la région de Viliujsk a ramené des résultats discordants sur les zoonoses parasitaires par rapport aux données soviétiques. En sus, la présence des virus West-Nile et de la fièvre Crimée-Congo a été démontrée avec de fortes incidences parmi des échantillons de populations chez qui la chasse, notamment aux oiseaux migrateurs, reste une activité habituelle. Ces résultats démontrent l'intérêt d'investigations multidisciplinaires sur l'écologie des zoonoses dans cette portion du globe. Cet axe, d'un intérêt fondamental, devrait déboucher sur des résultats de recherche appliquée non seulement pour les populations autochtones mais, à terme, pour tous ceux qui travaillent ou séjournent dans l'Arctique. Il devrait permettre la collaboration d'équipes internationales sur différents terrains.

### Avancées méthodologiques :

Les chercheurs français (archéologues et paléogénétiens) ont mis en évidence en région sub-arctique et arctique une épidémie de tuberculose au début du XVIIIe siècle. Cette épidémie, retrouvée à partir de l'étude de lésions squelettiques, a été confirmée par la mise en évidence de l'ADN de la mycobactérie. Les travaux en cours démontrent que la souche impliquée dans le décès de ces sujets est européenne. D'autres données biologiques, provenant des mêmes fouilles, sont en cours d'étude pour la phylogénie de la variole et de son impact sélectif sur le pool génique des populations de l'Arctique sibérien du XVe au XIXe siècle. De plus, les derniers travaux<sup>17</sup> montrent que l'on peut mettre en évidence des maladies infectieuses responsables de décès (en l'occurrence la coqueluche) sans point d'appel historique, en séquençant, *via* des techniques de génomique, la totalité des restes d'ADN (dont les bactéries responsables du décès *via* des bactériémies) contenue dans la pulpe dentaire, ce qui est une avancée méthodologique considérable pour l'étude des interactions hommes-milieux.

17- Thèves C, Senescau A, Vanin S, Keyser C, Ricaut FX, Alekseev AN, Dabernat H, Ludes B, Fabre R, Crubézy E. 2011 Molecular identification of bacteria by total sequence screening: determining the cause of death in ancient human subjects. PLoS One. 6(7):e21733.





## RELATION HOMME / ANIMAL EN MILIEUX ARCTIQUES :

### CHANGEMENTS, RISQUES, ADAPTABILITES ET VULNERABILITÉS POLAIRES

Coordinateur : Sylvie Beyries

**La relation homme-animal est un des fondements essentiels des sociétés arctiques, très profondément tributaires de cette ressource. Son importance s'apprécie donc depuis le domaine de l'économie jusqu'à celui de la culture et de la conception du Monde. L'analogie du dernier glaciaire permet d'aborder cette relation dans une démarche comparative du passé et du présent, très opportune et productive pour l'identification des dynamiques de développements et d'évolutions et la conception des modélisations.**



### **Etude génétique et paléogénétique des derniers grands herbivores de l'arctique, les rennes et les chevaux lakoutes**

Les analyses génétiques et paléogénétiques des rennes et des chevaux en lakoutie, ainsi que de certains de leurs agents pathogènes, contribue à une meilleure connaissance de la dynamique de leurs populations dans le temps et dans l'espace en fonction des changements climatiques. En particulier, la phylogéographie et la phylochronologie

peut permettre d'établir un inventaire de ces espèces et de modéliser la réaction de ces espèces aux changements climatiques, fournissant ainsi des éléments importants pour une politique intelligente de conservation et pour une gestion des troupeaux mariant aspects économiques, écologiques et culturels.

#### **III.1.1**

#### **Avancées des recherches**

L'analyse paléogénétique des restes animaux (archéologiques ou de musées) contribue significativement à la caractérisation précise de la taille des populations animales anciennes, des degrés de flux génétique et des relations entre populations et permet donc de faire des inférences sur la stabilité génétique et géographique des populations à moyen terme. Ces contributions sont d'une importance majeure dans les décisions de conservation et de gestion.



**Les caribous en Amérique et les rennes en Eurasie**, deux sous-espèces *Rangifer tarandus*, sont les derniers grands herbivores de l'arctique. Les populations de caribous, les derniers survivants de la mégafaune de Béringie sont en fort déclin (environ 60%). Cette baisse est attribuée aux modifications anthropogéniques de l'habitat en même temps qu'au réchauffement climatique. L'analyse génétique des caribous en Yukon du Sud au Canada, aussi bien à partir d'animaux vivants que des restes datant de 6000 ans, a montré qu'il y a eu, il y a 1000 ans, un événement de remplacement partiel des populations qui coïncidait avec la période médiévale chaude et pour lequel il n'y avait pas d'indications auparavant<sup>18</sup>. Les résultats suggèrent que face à l'augmentation de la pression anthropogénique et de la variabilité climatique, il est plus important de soutenir la capacité d'expansion des troupeaux des caribous aussi bien en nombre qu'en surface que de protéger la survie de quelques troupeaux forestiers individuels, isolés et sédentaires, la perte de quelques petits troupeaux n'affectant pas énormément la diversité génétique générale des caribous dans la région.

Il faut envisager la fragmentation de l'habitat des caribous et des rennes, sauvages et domestiqués, comme fortement probable puisque le ré-

chauffement climatique actuel pourrait dépasser l'augmentation de la température observée au cours de l'Holocène.

Ceci aura de fortes implications non seulement sur la survie de l'espèce sauvage, mais aussi sur la diversité génétique des domestiqués. La fermeture des frontières a en effet, entraîné une forte modification de la structure génétique des troupeaux de rennes en un siècle pour le nord de la Scandinavie.

**Les chevaux iakoutes**, qui vivent en totale liberté en dépit des températures hivernales extrêmement basses (fréquemment - 60°C) ont fourni dans le passé leurs produits corporels et leur force de travail aux peuples iakoutes pour un minimum de soins. On ne leur fournit ni nourriture, ni écurie, ils vivent loin des hommes et ne sont guère éloignés de l'état sauvage. C'est donc un cheval particulièrement rentable qui produit un service énorme pour un entretien minimum. Aujourd'hui, il est utilisé surtout comme bête à viande, et les utilisations de l'animal mort l'emportent sur les utilisations de l'animal vivant. Sa place dans la société présente et à venir est donc un des éléments économiques et culturels de toute première importance dans ce contexte où les sociétés évoluent en essayant de sauvegarder leur identité.

### III.1.2 Perspectives

Ces recherches ont une finalité fondamentale (caractérisation et histoire des populations de ces deux animaux essentiels pour les sociétés polaires depuis des millénaires) et appliquée (modéliser les changements du passé pour prévoir les conséquences du changement climatique et aménager l'avenir). Elles se déclinent en trois items :

- **les approches paléogénétiques** de la dynamique des populations de rennes en fonction des changements climatiques majeurs au cours du Pléistocène en Europe de l'Est et surtout en France. Ces études fondent l'établissement de modèles prédictifs pour le devenir des populations de rennes en Sibérie à la suite du réchauffement climatique actuel ;

- **les études génétique et paléogénétique des populations de rennes sibériens**, aussi bien actuelles qu'anciennes (échantillons archéologiques et muséaux) qui permettent une meilleure compréhension de leur dynamique au cours de l'Holocène, avant et après leur domestication et contribueront ainsi à l'élaboration de consignes pertinentes pour les mesures de conservation à prendre ;

- **les études génétique et paléogénétique des chevaux sibériens**, et en particulier les chevaux iakoutes, depuis le Pléistocène. Ces études concernent l'identification de leur origine et de leur centre de domestication et donc l'analyse de leur ancienneté, leur originalité ou, au contraire, leur universalité, sujet de débats scientifiques.

18 - Kuhn TS, McFarlane KA, Groves P, Mooers AØ, Shapiro B. 2010 Modern and ancient DNA reveal recent partial replacement of caribou in the southwest Yukon. *Mol Ecol.* 19(7):1312-23.



## III.2

## Homme/animal et Arctique : Rennes/Caribous, un indicateur des effets du changement global sur le monde arctique traditionnel

*Rangifer tarandus* (renne/caribou) est un animal emblématique des milieux arctiques et de leurs cultures depuis la fin du Pléistocène. Très important à la fin du Paléolithique supérieur en Europe occidentale, *R. Tarandus* se trouve aujourd'hui sur la plus grande partie de la zone arctique (la très grande majorité des troupeaux monitorés/domestiques sont en Eurasie alors que sur le continent américain c'est le caribou sauvage qui domine). Dans tous les cas et de tous temps, il a joué et y joue un rôle essentiel dans l'économie comme dans la culture des hommes de ces régions.

Carte de répartition des populations de renne/caribou en 2004 ; en rayé les troupeaux suivis d'un point de vue scientifiques ; on notera l'existence d'une petite zone à l'extrémité ouest de l'Alaska et au Groenland (60 et 61). (D. Russel, B. Ulvevadet, 2004)





### III.2.1

#### Rennes domestiques, rennes sauvages face au réchauffement climatique

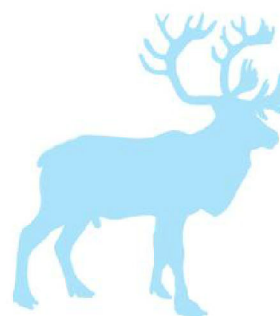
Qu'il soit sauvage ou domestique, le renne ou le caribou se nourrit principalement de lichen. En climat arctique, la régénération des sols étant extrêmement lente, le mouvement des troupeaux est donc constant et dépend de la qualité des pâturages ainsi que de la structure de la démographie du troupeau.

La taille des troupeaux est aussi très variable selon les régions. En Sibérie orientale, les troupeaux peuvent atteindre plus de 2000 têtes. En Norvège, on compte aujourd'hui 165 000 bêtes pour 2000 éleveurs ; des troupeaux ont en moyenne une centaine de têtes. Ces chiffres sont en diminution constante. Cet animal fragile, particulièrement sensible aux modifications de son environnement, peut donc être considéré comme une sentinelle des changements, de ceux du passé comme de ceux qui sont en cours d'intervention.

Le changement global affecte massivement les conditions de vie de ces grands vertébrés : modification du couvert végétal et de son accessibilité hivernale, des autres faunes, des pathologies et de leurs dynamiques.

La privatisation des terres et l'exploitation des ressources naturelles or, gaz, charbon, uranium, pétrole... ont pris un nouvel essor dans toutes

les régions du nord et ajoutent à la modification des droits d'usage des territoires, des perturbations majeures sur les habitudes des troupeaux et leurs modes de vie. L'exploitation des minerais est extrêmement polluante et source de dérangement pour les troupeaux (création de route, aéroport, bruit...). Le contexte social est aussi très évolutif et fortement touché.



### III.2.2

#### Axes de développement : observation et rétro-observation sur le long terme des animaux et de leurs milieux

Le renne a déjà connu un contexte de réchauffement massif à la fin du Tardiglaciaire en Europe occidentale qui a conduit à la disparition de l'inlandsis. Les traces des modifications alimentaires que le renne a dû subir se retrouvent dans les rapports des isotopes stables du Carbone et de l'Azote (C/N,  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) et leur comparaison avec des données actuelles pourraient éclairer le passé (la disparition du renne dans les zones aujourd'hui tempérées) et permettre une meilleure compréhension des dynamiques du présent et des voies d'évolution pour l'avenir. Une description des conditions qui prévalent au-

jourd'hui (avancée des végétations arbustives, colonisation par des espèces végétales et animales venues de zones méridionales, évolution des pathologies) fondée sur l'observation et la collecte des savoirs traditionnels, associé à un suivi sur le long terme et dans l'espace peut permettre de mettre en place un outil très affiné pour estimer le devenir de l'animal dans l'évolution du monde arctique traditionnel.

L'étude de la dynamique de la population des rennes marron à Kerguelen peut fournir des éléments de comparaison et montre encore une fois l'importance des recherches bipolaires.



## CONCLUSION



### BILAN PROSPECTIF

L'étude, voire la préservation du vivant, Hommes et Biodiversités, dans les zones polaires est donc un enjeu scientifique majeur pour les années à venir. Le bilan prospectif ici présenté montre le bon positionnement de la recherche polaire dans les équipes de l'INEE et les forces en présence. Il met l'accent également sur la nécessité de faire perdurer, de valoriser ou de développer un certain nombre d'approches :

- qui intègrent :

- **la profondeur temporelle de l'évolution de l'Homme et de ses sociétés, de son impact sur l'environnement** au moins au cours des 15 000 dernières années, depuis la dernière phase glaciaire ;
- **l'histoire évolutive des espèces à plus long terme**, afin de comprendre l'origine et la mise en place de la biodiversité observée actuellement dans ces milieux. L'établissement de scénarios est indispensable à la prédiction des effets de forçages comme ceux induits par les changements climatiques en cours ;
- **les aspects adaptatifs** développés à l'échelle du modèle biologique en réponse aux conditions extrêmes et aux changements climatiques, à la pression anthropique, aux compétiteurs envahissants et aux polluants (approches écophysiologiques, biochimiques et moléculaires) **dans des études plus larges portant sur la structure, la dynamique des communautés (y compris humaines) et le fonctionnement des écosystèmes** ; la dimension spatiale des processus en jeu (dispersion et fonctionnement en métapopulations notamment) est prise en compte dans les études actuelles ;

- qui utilisent **les technologies nouvelles** :

- "barcoding", systématique alpha, révisions taxonomiques, phylogénie, biogéographie, phylogéographie pour une caractérisation rapide des organismes dans le but de mieux connaître pour mieux préserver ;
- biologie moléculaire, génomique, anthropobiologie, paléopathologie pour une meilleure compréhension de l'évolution de l'homme dans son environnement ;
- relevés et enregistrements grâce à des capteurs de plus en plus perfectionnés qui renseignent à la fois sur l'écologie de ces prédateurs (démographie, stratégie comportementale, énergétique...) et sur les caractéristiques physiques (température, salinité...) et biologiques (ressources pélagiques ou halieutiques) de l'océan, pour le suivi non invasif, à terre et en mer, de divers animaux (vertébrés marins prédateurs et leurs proies pélagiques ou organismes benthiques).

- qui privilégient **les observations sur le long terme**, pour appréhender l'ampleur des changements liés à l'évolution climatique et aux impacts anthropiques grandissants. Certains de ces systèmes d'observations doivent bénéficier d'outils technologiques innovants, tels que RFID (Radio Frequency Identification) avec antennes fixes ou mobiles, robots, LOPC (Laser Optical Plankton Counter), ROV (Remotely Operated Vehicle), AUV (Autonomous Underwater Vehicles) etc... . Même si la recherche est mieux organisée dans les zones polaires sud du fait de la présence de bases françaises et de structures fédératrices (zone atelier), la volonté d'un développement de systèmes d'observation émerge en Arctique et mérite d'être soutenue (station d'observation de la biodiversité, zones ateliers, observatoires hommes-milieux).

- qui permettent **la mise en place de bases de données** ambitieuses afin de faciliter les études temporelles et spatiales et les collaborations internationales ;

- qui enrichissent **la connaissance du vivant** au sens le plus large des écosystèmes terrestres et marins. **L'histoire de l'homme en milieu polaire** est encore mal connue. Son impact sur l'environnement et ses modalités se croisent avec l'évolution récente de la biodiversité. Il est nécessaire de considérer les dynamiques et, pour chaque échelle spatiale et temporelle de ces milieux, d'établir des cartographies dynamiques afin d'apprécier la diversité spécifique, la diversité phylogénétique et la diversité fonctionnelle en y intégrant les impacts anthropiques.



Parmi les défis des dix prochaines années, il faudra : 1) poursuivre l'intégration des approches biochimique, physiologique et écologique dans un cadre de biologie et d'écologie évolutives ; 2) savoir aborder les processus mis en jeu à différentes échelles spatiales, pour préciser comment les biotopes arctiques et antarctiques répondent aux changements environnementaux et, au-delà, au changement global, et dans quelle mesure les populations seront capables de s'adapter ; 3) apprécier pour les communautés humaines, les processus d'anthropisation qu'elles induisent, les réponses économiques et sociales qu'elles apporteront à une évolution massive et rapide des conditions de vies sur les zones polaires, ainsi qu'à l'évolution des conditions de santé qui pourraient en résulter.

Tout ceci passera par une interdisciplinarité des recherches, la poursuite et le renforcement des observations à long terme combinées à des approches expérimentales, par la mise en œuvre d'une Ecologie Globale comme outil d'étude et de réponse aux changements.







## LES MOYENS NÉCESSAIRES

### Les Moyens à la mer

La mise en œuvre d'une recherche de haut niveau dans les milieux marins polaires ou subpolaires, telle que décrite dans le présent document, implique le recours à des moyens à la mer, à des engins embarqués conséquents dont certains sont aujourd'hui disponibles, et à des moyens de plongée accrus. Il faut néanmoins distinguer les recherches océanographiques de la région Arctique, de celles qui se situent autour des îles subantarctiques et au large de la Terre Adélie.

#### En Arctique

En effet, le contexte de réchauffement climatique marqué au nord et de régression rapide de la banquise rend nécessaire l'utilisation de navires de classe glace qui ne sont pas aujourd'hui disponibles en France. Une recherche collaborative au niveau européen, voire avec l'Amérique du Nord doit donc se développer pour que notre communauté nationale puisse accéder aux navires brise-glace tel que le Polar Stern. La création de l'UMI (Unité mixte de recherche Internationale) entre le CNRS et l'Université Laval de Québec, doit pouvoir favoriser cette approche internationale. L'acquisition d'engins tels que AUV (Autonomous Underwater Vehicle), ROV (Remotely Operated Vehicle) ou encore échantillonneurs standards est nécessaire à la mise en place de systèmes d'observation à long terme sur des sites clés de l'Océan Arctique pour un suivi même hivernal.

Les besoins émergents pour la recherche française concernent plus particulièrement les stations côtières, leur accès et leurs installations qui devraient permettre la stabulation de certains organismes dans des conditions non stressantes et des expérimentations en conditions contrôlées. Le développement de tels équipements doit être encouragé à Ny Ålesund, au Spitsberg. L'IPEV y dispose déjà d'infrastructures permanentes (laboratoires, embarcations...) et son implication dans le programme SIOS (Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System, figurant sur la roadmap ESFRI) doit être mise à profit pour que les scientifiques français puissent prendre une part active au développement d'une véritable station d'observation de l'Arctique à Ny Alesund.

#### En Subantarctique

Les îles subantarctiques françaises, Crozet, Kerguelen et Amsterdam, sont ravitaillées par le Marion-Dufresne. Le positionnement récurrent de ce navire dans l'Océan Indien en fait donc une plateforme de choix pour effectuer des campagnes océanographiques d'envergure dans l'Océan Austral. Ce navire est particulièrement bien équipé pour effectuer des carottages sédimentaires grâce à son carottier Calypso unique au monde, des relevés bathymétriques grâce à son sondeur multi-faisceaux, et des prélèvements classiques en géophysique et géochimie marine. En revanche, ce navire est mal adapté pour accueillir des engins tels que ROV ou AUV, plus orientés vers des recherches dans le domaine de la biodiversité. Il serait donc opportun qu'à l'occasion de la jouvence des appareils scientifiques du Marion-Dufresne, prévue à l'horizon 2015, les modifications nécessaires lui soient apportées pour permettre d'embarquer de tels engins et d'étendre ainsi ses domaines de recherche. Une telle évolution, menée dans le cadre de l'UMS « Flotte Océanographique Française » et reposant sur l'interopérabilité de ses engins, bénéficierait d'ailleurs, au-delà de la communauté « polaire », à l'ensemble de la communauté scientifique.

En ce qui concerne les recherches côtières, les TAAF et l'IPEV ont pu disposer jusqu'à ces dernières années d'un navire de 25 m, à chalutage arrière, la Curieuse, qui a permis le développement de nombreux programmes. L'avenir de ce moyen à la mer, qui sert également la logistique de programme terrestre autour de Kerguelen, où il n'y a aucun autre moyen de locomotion ou de secours, doit impérativement être préservé. La création de la Réserve Naturelle des Terres Australes Françaises, en 2006, justifie également le maintien de ce navire pour remplir des missions de gestion.

Enfin, le laboratoire de biologie marine présent à Kerguelen doit être remis à niveau de manière à apporter les infrastructures à terre nécessaires au développement de nouveaux programmes.

#### En Terre Adélie

L'Astrolabe, navire de classe glace assure la desserte française en Antarctique. De nouveaux équipements ont permis ces dernières années la réalisation de travaux de qualité qui alimentent la réflexion actuelle, au niveau international, sur le bien fondé de créer, dans cette région, une Aire Marine Protégée. Ces travaux ne peuvent cependant se dérouler que sur une période d'une quinzaine de jours par an, au mois de janvier, et les campagnes sont souvent écourtées du fait de conditions de glaces de mer difficiles. Le renouvellement de l'As-

trolabe doit être envisagé avant 2017 et plusieurs hypothèses sont à l'étude car le coût de construction d'un vrai brise-glace qui conserve des capacités océanographiques est hors de portée des moyens actuels. Il est pourtant primordial pour que les recherches amorcées se poursuivent et pour assurer un suivi des systèmes d'observation à la mer qui ont déjà été mis en place.

Le besoin d'une embarcation côtière, semblable à la Curieuse dans les îles subantarctiques, permettant de travailler à partir de Dumont d'Urville se fait aujourd'hui sentir. Elle permettrait en particulier d'effectuer des opérations de dragage, de mise à l'eau de ROV et servirait de plateforme de plongée.

Enfin, la construction d'un véritable laboratoire de biologie marine à Dumont d'Urville, envisagé depuis plusieurs années par l'IPEV, doit pouvoir voir le jour afin de donner un nouvel essor à ces recherches en Antarctique.

## **Les stations d'observation de la biodiversité, zones ateliers et observatoires hommes-milieux**

Toutes les communautés de l'INEE qui sont impliquées dans la recherche polaire mettent en avant l'importance des structures d'observations du vivant et des sociétés. Si chacune à ses caractéristiques propres (études de communautés ou d'écosystèmes marins, terrestres, ou des sociétés humaines en interactions avec leurs milieux), toutes ont en commun un besoin d'outils aptes à suivre les évolutions de ces systèmes complexes. La géospatialisation des données et leur exploitation dynamique, le caractère multi scalaire des études et donc des données produites, l'interopérabilité des données pour aborder l'interprétation des phénomènes complexes sont aussi des traits communs aux différents dispositifs d'observation de l'INEE. Toutes ces spécificités partagées mettent en perspective une réflexion à construire sur l'observation en écologie globale.

## **Les bases de données**

A des degrés très divers, toutes les communautés expriment un très fort besoin en bases de données. Celles-ci concernent autant des méta-bases thématiques que spécifiques. Elles sont, pour une large part, issues des dispositifs d'observations et de l'exploitation des données qui y sont produites.

Ce besoin de la recherche polaire pourrait même être considéré comme prototype des systèmes complexes à construire dans la réflexion actuellement en cours à l'INEE.

## **Les financements des doctorants et post-doctorants**

La modification des circuits traditionnels et les contraintes qui pèsent aujourd'hui sur un financement de la recherche en pleine mutation ont raréfié les soutiens à la recherche doctorante. Dans le contexte polaire plus encore qu'ailleurs, eu égard aux difficultés d'accès et de travail inhérentes aux milieux, la couverture de ces besoins apparaît essentielle tant pour le développement actuel de la recherche et sa bonne dynamique que pour l'avenir de la communauté des chercheurs dans les domaines polaires.

## **Spécificité des ingénieurs de terrain**

Les caractéristiques de la recherche développée par la communauté INEE et la diversité de ses champs d'application nécessitent d'importants développements instrumentaux et analytiques. Ils se déclinent en moyens de suivis (loggers), de robotique (en terrestre et marin), avec un accent fort sur la miniaturisation, la récupération des informations à distance, les analyses des données géolocalisées et de leurs dynamiques et enfin la conception de modèles adaptés.

Pour ce faire, les très étroites interactions qui existent entre la communauté scientifique de l'INEE et celles des SPI, des informaticiens, mathématiciens et statisticiens doivent être approfondies.

Afin d'atteindre au mieux ces objectifs il paraîtrait très opportun de pouvoir disposer d'un corps spécifique d'ingénieurs et techniciens apte à cette intégration.



## SOURCES D'INFORMATIONS

---

### LIVRES :

**Impacts of a Warming Arctic: Arctic climate assessment,**  
Cambridge, Cambridge University Press, 2004 - [www.acia.uaf.edu](http://www.acia.uaf.edu)

**Les Milieux polaires**

Godard Alain et André Marie-Françoise, Paris, Gallimard, coll. « Découvertes », 2005

**Le Grand Défi des pôles**

Imbert Bertrand et Lorius Claude, nouv. éd., Paris, Gallimard, coll. « Découvertes », 2006

**Régions polaires : quels enjeux ?**

Frenot Yves, Paris, Le Pommier/Cité des sciences et de l'industrie, coll. « Le collège de la cité », 2007

**Pôles en péril**

Gauthier-Clerc Michel, Paris, Buchet-Chastel, 2007

**GIEC, Climate change 2007: The physical Science Basis. Summary for policymakers**

[www.ipcc.ch/2007](http://www.ipcc.ch/2007)

**The Future History of the Arctic. How Climate, Resources and Geopolitics are Reshaping the North, and Why it Matters to the World**

Emmerson Charles, Vintage Books, 2010.

---

### SITES INTERNET :

Année polaire internationale 2007-2008 :  
[www.ipy.org](http://www.ipy.org) - [www.annee-polaire.fr](http://www.annee-polaire.fr)

Centre d'études nordiques à Québec :  
[www.cen.ulaval.ca](http://www.cen.ulaval.ca)

Convention sur la conservation de la faune et la flore marines de l'Antarctique (CCAMLR) :  
[www.ccamlr.org](http://www.ccamlr.org)

Council of Managers of National Antarctic Programs (COMNAP) :  
[www.comnap.aq](http://www.comnap.aq)

Conseil arctique :  
[www.arctic-council.org](http://www.arctic-council.org)

Exchange for Local Observations and Knowledge of the Arctic :  
[www.eloka-arctic.org](http://www.eloka-arctic.org)

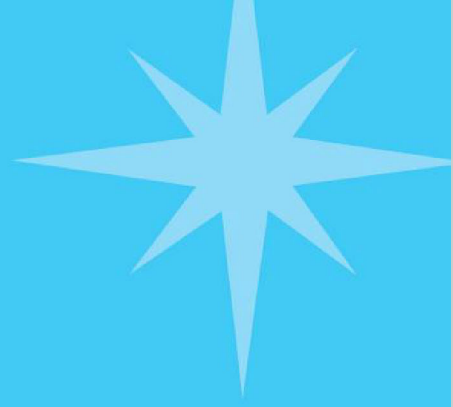
Inuit Qaujisarvingat (Inuit Knowledge center) "a place to learn for and about Inuit":  
[www.inuitknowledge.ca](http://www.inuitknowledge.ca)

Institut polaire français Paul-Émile-Victor (IPEV) :  
[www.institut-polaire.fr](http://www.institut-polaire.fr)

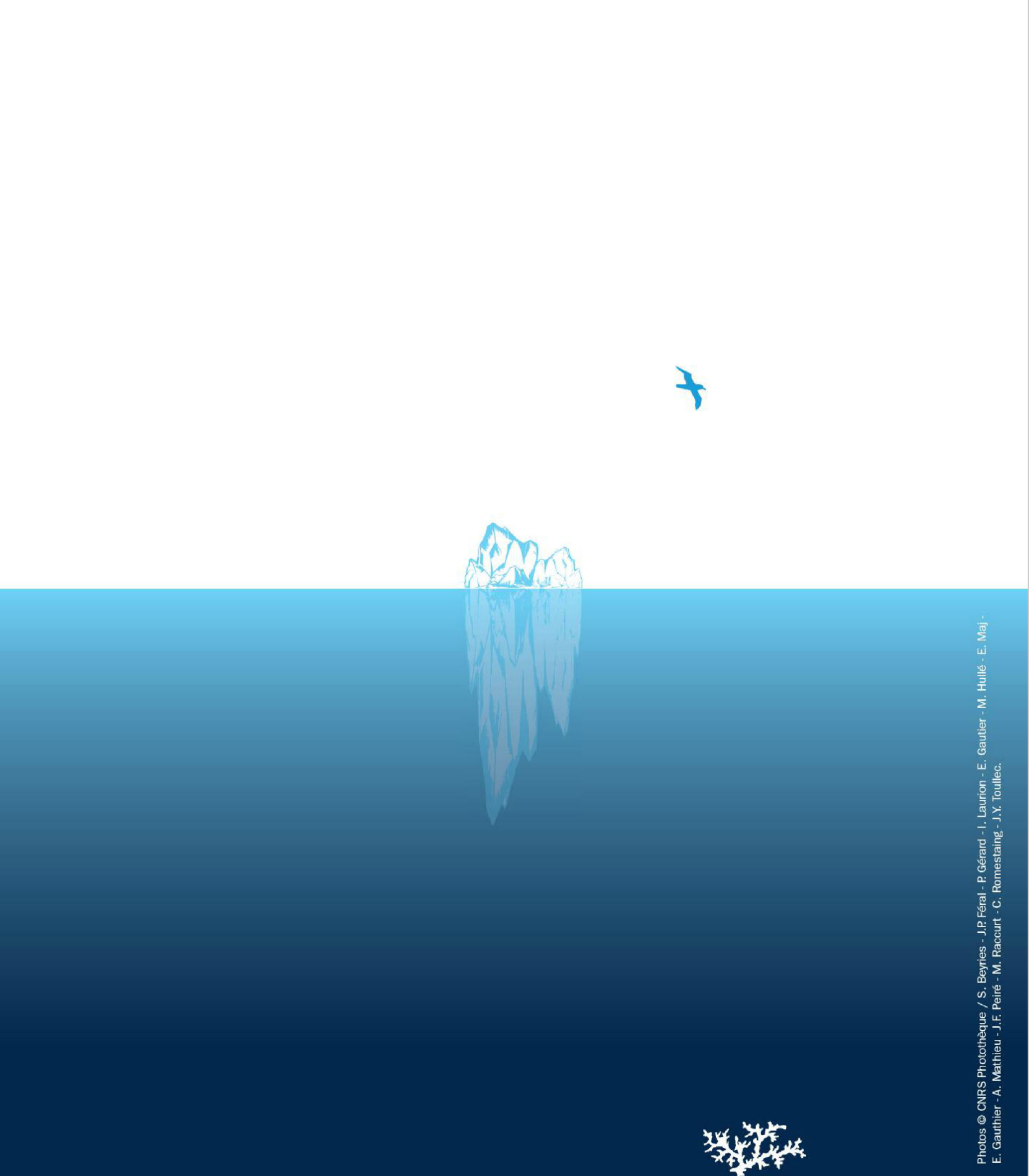
International Arctic Science Committee :  
[www.iasc.info](http://www.iasc.info)

Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) :  
[www.scar.org](http://www.scar.org)

Terres australes et antarctiques françaises (TAAF) :  
[www.taaf.fr](http://www.taaf.fr)







Photos © CNRS Photothèque / S. Beyries - J.P. Féral - P. Gérard - I. Laurion - E. Gautier - M. Huijé - E. Maj - E. Gauthier - A. Mathieu - J.F. Peiré - M. Raccourt - C. Rometstaing - J.Y. Toullec.



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)



**Les Cahiers Prospectives**