



L'océan Austral

Philippe Koubbi
Gabriel Reygondeau
Claude De Broyer
Andrew Constable
William W.L. Cheung

La partie australe de l'océan mondial est la plus isolée de toute activité industrielle ou anthropique. Pourtant, depuis plusieurs décennies, de nombreux observateurs rapportent des changements significatifs aussi bien des écosystèmes que des espèces qui y vivent. Ces perturbations ont été dans la majorité des cas attribuées aux conséquences de l'activité humaine qu'elles soient indirectes (augmentation de la température, modification de la saisonnalité de la banquise, conséquences du trou dans la couche d'ozone, acidification des eaux) ou directes (exploitation des ressources vivantes par les pêches). La magnitude de ces pressions varie en fonction des régions de l'océan Austral. Si l'image d'un océan peu diversifié est gravée dans l'esprit collectif, il n'en est rien comme le montre l'Atlas biogéographique de l'océan Austral (De Broyer *et al.*, 2014) où plus de 9064 espèces ont été identifiées. Les perturbations déjà observées sont supposées altérer le fonctionnement de ces écosystèmes et des réseaux trophiques. Cela concerne la modification des habitats des espèces pélagiques et benthiques, des producteurs primaires jusqu'aux prédateurs supérieurs, des organismes côtiers aux espèces des profondeurs, de la zone subantarctique sans glace aux zones couvertes par la banquise. Un exemple connu est la modification du régime de la glace de mer autour de la péninsule Antarctique. Cependant, l'intensité de ce changement s'observe à des degrés différents autour du continent. Cette banquise est pourtant nécessaire à l'accomplissement du cycle de vie de nombreuses espèces comme le krill antarctique dont la biomasse exceptionnelle est à la base de l'alimentation de nombreux prédateurs comme les oiseaux ou les mammifères marins. Les icebergs ou la dislocation récente d'importantes plateformes glaciaires sont également connus pour avoir un impact majeur sur les communautés benthiques. Enfin, les zones subantarctiques, à la limite nord de l'océan Austral seraient les plus concernées par le réchauffement climatique. Dans ce contexte, il est important d'estimer comment la biodiversité de cet océan, habituée à des conditions extrêmes depuis près de 34 millions d'années, pourra s'adapter à ces nouvelles conditions.

INTRODUCTION

L'océan Austral fut le dernier océan à être exploré. Situé au sud de la planète, c'est le seul océan qui ne soit pas entouré par des continents (figure 1). Il entoure le continent Antarctique, terre de science, gérée au niveau international par le traité de l'Antarctique. Cet océan est donc l'opposé de l'autre océan polaire, l'océan Arctique, qui est entouré par les continents américain et eurasien avec des pays limitrophes exerçant leur souveraineté.

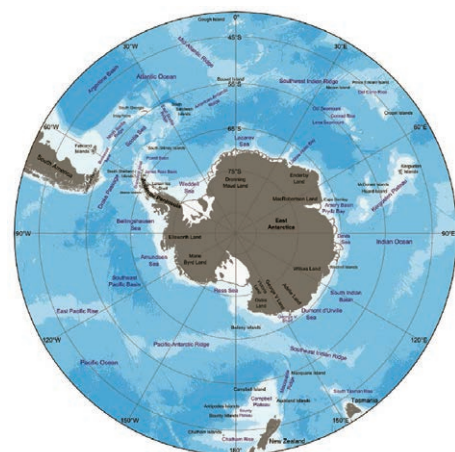


Fig.1 — L'océan Austral (De Broyer *et al.*, 2014).

L'Antarctique et l'océan Austral n'ont pas toujours été des milieux extrêmes. L'Antarctique était plus tempérée quand il appartenait au super-continent austral, le Gondwana. Il y a près de 34 millions d'années (Crame, 2014), il s'est progressivement détaché des autres continents de l'hémisphère sud ce qui a permis l'ouverture du passage de Drake. L'océan Austral s'est isolé hydrologiquement vis-à-vis des autres océans avec un refroidissement de plus de 4 °C des eaux de surface. C'est à ce moment qu'on suppose la formation de la glace de mer. Plusieurs refroidissements ont ensuite été observés entraînant d'importants changements faunistiques dont la disparition de plusieurs espèces (Crame, 2014).

Cette histoire est importante pour comprendre quelles pourraient être les conséquences du changement climatique sur une biodiversité s'étant adaptée à des conditions extrêmes sur une si longue période. Il est donc nécessaire d'avoir un état de la biodiversité marine. Le récent Atlas biogéographique de l'océan Austral (De Broyer *et al.*, 2014) regroupe l'ensemble des connaissances sur cette biodiversité. Nos connaissances commencent avec les explorations scientifiques menées en 1772-1775 par l'explorateur James Cook. Elles se sont poursuivies par de nombreuses missions illustres (De Broyer *et al.*, 2014) jusqu'à la récente année polaire internationale (2007-2009) avec le programme "Census of Antarctic Marine Life" (2005-2010). Durant ce programme, 18 navires scientifiques ont sillonné l'océan Austral afin d'étudier la biodiversité de celui-ci sous toutes ses formes. Il s'agissait aussi de préciser la phylogénie de ces espèces. Au niveau global, il fallait préciser la biogéographie des espèces en étudiant les habitats potentiels de celles-ci par l'analyse statistique et la modélisation comme l'ont fait, par exemple, Cuzin *et al.* (2014) pour les euphausiacés (krill), Duhamel *et al.* (2014) pour les poissons ou Eléaume *et al.* (2014) et Saucède *et al.* (2014) pour les échinodermes. Il va de soi que la température est l'un des éléments majeurs expliquant la biogéographie de ces espèces. Plusieurs travaux ont également tenté de définir des écorégions qui se distinguent les unes des autres en fonction de leurs caractéristiques abiotiques hydrologique ou géographique (Longhurst, 2007; Raymond, 2014) et par les différences d'assemblages d'espèces

y vivant (Koubbi *et al.*, 2011; Hosie *et al.*, 2014). Malgré ces efforts, il existe de nombreux secteurs inexplorés tant le long des côtes de l'Antarctique qu'en zone océanique et les grandes profondeurs sont globalement peu connues malgré de multiples études récentes (Brandt *et al.*, 2014; Rogers et Linse, 2014).

S'il est nécessaire de considérer les conséquences des changements environnementaux, cette préoccupation doit se transcrire rapidement dans la gestion des écosystèmes par l'évaluation de zones à protéger. Cependant, en premier, nous devons définir quelles sont les limites de l'océan Austral et pourquoi cette biodiversité est exceptionnelle.

COMMENT VONT SE MODIFIER LES LIMITES DE L'OCÉAN AUSTRAL

La définition des régions océaniques commence par l'analyse des données océanographiques (Post *et al.*, 2014). L'océan Austral communique au nord avec les océans Atlantique, Indien et Pacifique.

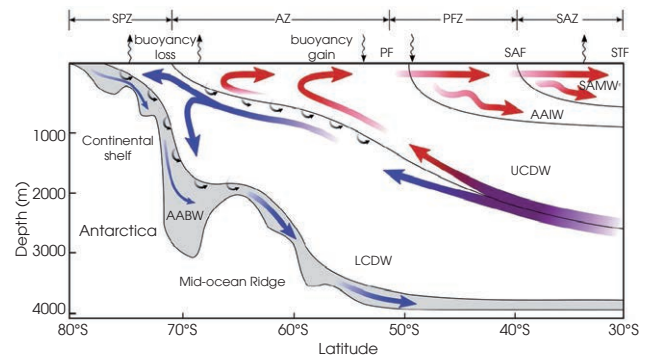


Fig.2 — Section latitudinale montrant les masses d'eaux et les fronts en fonction de la profondeur du continent Antarctique jusqu'au Front subtropical (FST) (Post *et al.*, 2014). Le Front polaire antarctique (FPA) et le Front subantarctique (FSA) sont indiqués. Les fronts délimitent différentes zones : la zone subantarctique (ZSA), la zone frontale polaire (ZFP), la zone antarctique (ZA) et la zone subpolaire (ZSP). Les masses d'eaux sont indiquées : l'eau de mode subantarctique (SAMW); l'eau antarctique intermédiaire (AAIW); l'eau profonde circumpolaire supérieure (UCDW); l'eau profonde circumpolaire inférieure (LCDW); l'eau antarctique de fond (AABW). Les flèches indiquent la direction des masses d'eaux. On note que l'eau de fond antarctique se crée au niveau du continent et circule ensuite en profondeur.

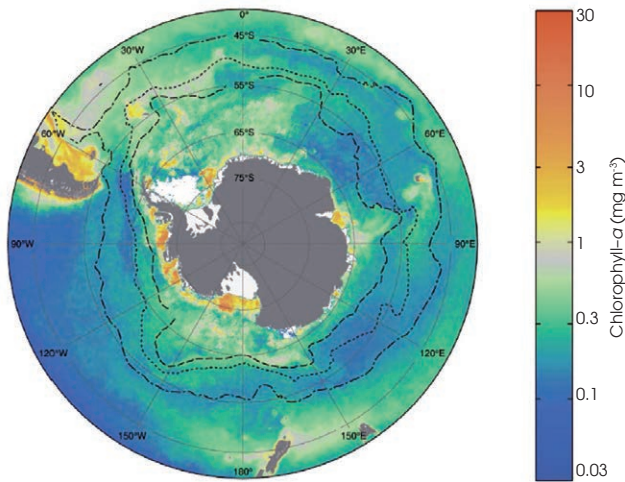


Fig.3 — Concentrations moyennes estivales entre 2002 et 2010 de chlorophylle-a estimées par les données satellites MODIS Aqua (Post *et al.*, 2014). Du sud au nord, on observe en pointillés, le front lié à la limite sud du courant circumpolaire antarctique, la position moyenne du Front polaire antarctique et le Front subantarctique.

Plusieurs fronts majeurs sont présents dans l’océan Austral (figure 2). En premier, le Front subtropical (FST) que nous définirons comme la limite nord de cet océan. En allant vers le sud, on trouvera le Front subantarctique (FSA) puis le Front polaire antarctique (FPA). La zone subantarctique s’étend entre le FST et le FSA, la zone frontale polaire entre le FPA et le FSA et la zone antarctique au sud du FPA. Plus au sud, d’autres fronts marquent la limite sud du courant circumpolaire antarctique. Il ne faut pas considérer ces fronts comme des barrières fixes, ils varient latitudinalement en fonction des forçages climatiques saisonniers. Certains de ces fronts sont le siège d’une forte production phytoplanctonique qui favorise la production secondaire planctonique (figure 3). C’est le cas autour des îles subantarctiques qui enrichissent le milieu en fer et en éléments nutritifs utiles à la croissance du phytoplancton. Au sud de ces îles, entre la limite nord du FPA et la limite de la zone de glace saisonnière, se trouve la zone océanique jamais couverte de glace, qui est sous l’influence du courant circumpolaire antarctique. Cette zone

est particulière puisque classée comme HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) soit une région avec de fortes concentrations en nutriments mais de faibles concentrations en chlorophylle soit en phytoplancton. Cela s’explique par le manque de certains éléments essentiels au phytoplancton comme le fer.

Cependant, plus de la moitié de l’océan Austral est marquée par la zone de glace saisonnière (figure 4) autour du continent Antarctique. On y observe en été les plus fortes concentrations en chlorophylle-a (figure 3). Des modifications importantes de l’étendue, de la durée de présence de la banquise ou de son épaisseur ont été constatées en péninsule Antarctique ouest où une diminution de la superficie de 5 à 6 % par décade a été observée. Cependant, cette tendance n’est pas globale autour du continent puisqu’à l’inverse, en mer de Ross, on observe une augmentation de 4,5 à 5 % (Constable *et al.*, 2014). L’étendue n’est pas le seul facteur à prendre en compte, la durée de présence saisonnière de la glace de mer a également diminué dans la région ouest de la péninsule Antarctique avec une perte

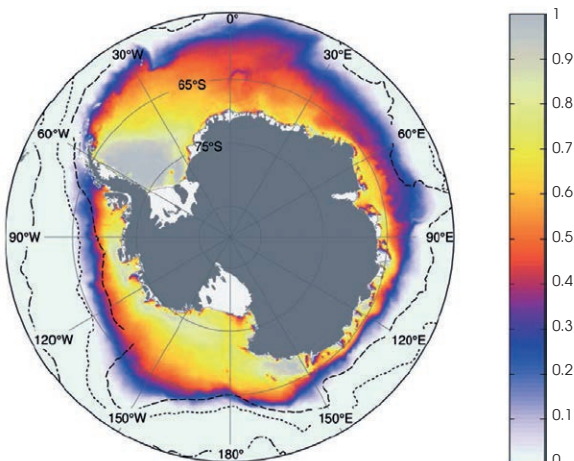


Fig.4 — Cartographie de la proportion de durée annuelle de banquise de 85 % de concentration (Post *et al.*, 2014). Les polynies sont visibles le long du continent (couleurs bleues). Les tirets indiquent la position du front sud du courant circumpolaire antarctique, le pointillé la position moyenne du Front polaire antarctique et le pointillé avec tirets au nord, la position du Front subantarctique.

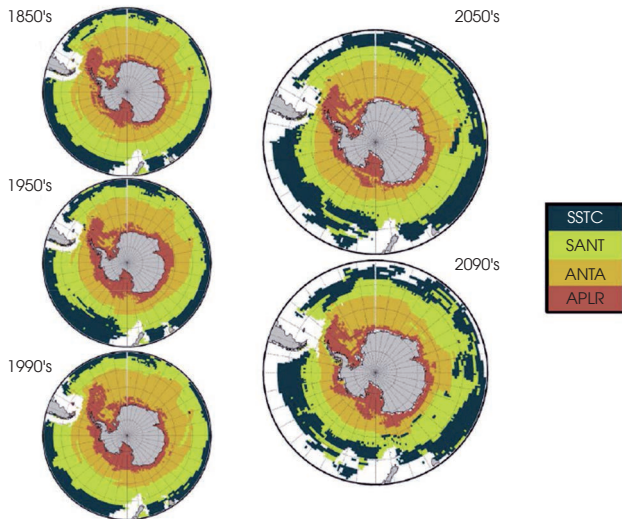


Fig.5 — Distribution des provinces biogéochimiques de l'océan Austral pour les décennies 1850, 1950 et 1990 et leur projection pour 2050 et 2100 (Reygondeau et Huettmann, 2014). Les provinces actuelles ont été définies par Longhurst (2007).

en nombre de jours équivalente à ce qui est observé en Arctique. Là aussi, il s'agit d'observations régionales puisque l'inverse est constaté dans d'autres secteurs montrant bien que divers facteurs sont impliqués pour expliquer le régime de la glace de mer. Proche du continent, diverses zones nommées polynies sont exemptes de banquise toute l'année ou périodiquement. Ces zones sont souvent situées près des côtes où l'action de la topographie et des vents empêche la glace de mer de se maintenir localement (figure 4). Les polynies sont très importantes pour la production biologique puisqu'au printemps, elles permettent la pénétration de la lumière dans l'eau alors que les zones adjacentes couvertes de glace restent dans la pénombre. Dès les premiers signes printaniers et de début de rupture de la banquise, la production primaire commence et alimente autant les écosystèmes pélagiques que benthiques.

Dans son livre nommé « Ecological Geography of the Sea », Longhurst a identifié 4 provinces dites biogéochimiques dans le biome polaire auquel appartient l'océan Austral. Ces provinces ont été nommées respectivement : South SubTropical Convergence province (SSTC), SubANTarctic water ring province (SANT), ANTArctic province (ANTA) et Austral PoLaR province (APLR) (figure 5). Chacune de ces provinces délimite conceptuellement les différents types de forçages environnementaux ou hydrologiques majeurs pouvant être rencontrés. Longhurst délimita spatialement la distribution de ces provinces à partir d'observations satellites combinées aux échantillons océanographiques et biologiques prélevés lors de missions. Récemment, Reygondeau et Huettmann (2014) ont pu caractériser statistiquement ces provinces biogéochimiques. La méthodologie mise au point a permis d'évaluer les changements

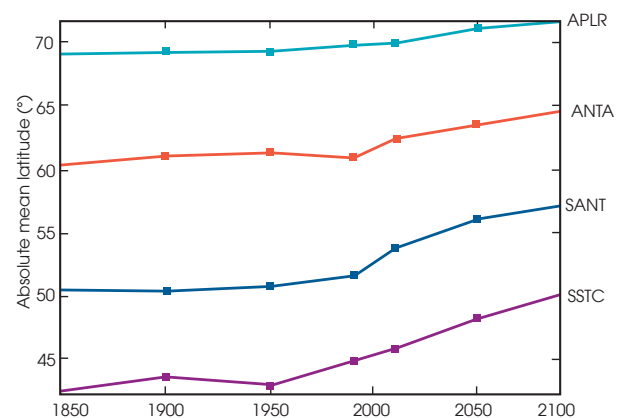
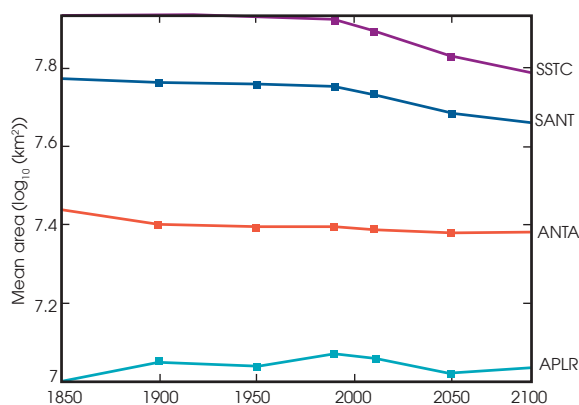


Fig.6 — Evolution de la surface et de la latitude moyenne de chacune des provinces biogéochimiques (Reygondeau et Huettmann, 2014).

de distribution spatiale des 4 provinces en fonction des variations saisonnières et interannuelles (Reygondeau *et al.*, 2013) ou à long terme. Les résultats de l'étude présentée en figure 5 montrent un déplacement vers les pôles de l'ensemble des provinces australes. Toutefois, la vitesse du changement apparaît différente entre les provinces (figure 6). En effet, les provinces dites subantarctiques (SSTC et SANT) apparaissent comme étant les plus altérées par les changements des conditions environnementales liées aux changements climatiques. Leurs centres de distribution se trouvent plus rapidement déplacés vers le sud que les provinces dites polaires (ANTA et APLR). Ces changements ont pour conséquence une diminution drastique (de l'ordre de 15 %) de la surface totale de la zone subantarctique qui se voit écrasée face à la résilience des zones *stricto* australes (perte < 5 % de leurs aires) et par l'expansion des systèmes subtropicaux au nord.

Ces modifications des provinces biogéochimiques de l'océan Austral peuvent être directement attribuées aux différents effets provoqués par le changement climatique. Les analyses menées dans le cadre du consortium NEREUS (figure 7) à partir de nombreux paramètres environnementaux structurant l'environnement marin (température, salinité, concentration en oxygène, production primaire, pH, % de couverture de glace et composantes de direction U et V du courant) confirment l'hétérogénéité spatiale de l'amplitude et des paramètres forçants du changement climatique au niveau de l'océan Austral. Il apparaît que les zones situées plus au nord (zones subantarctiques) sont affectées plus durement par les différents effets du changement climatique (figure 7a) et particulièrement par l'augmentation des températures de surface de l'océan (figure 7b). Les zones les plus australes (ANTA et APLR) apparaissent comme des zones plus préservées par la sévérité des changements globaux. Néanmoins, certains paramètres structurants pour le développement des espèces marines apparaissent modifiés dans ces zones (figure 7b). En effet, malgré une variation moindre comparée aux zones subantarctiques, les zones australes montrent un changement marqué de la couverture de glace, de la température de surface ainsi que du pH et de la production primaire. Bien que l'amplitude de ces changements apparaît moindre comparée aux zones subantarctiques, les effets sur des organismes endémiques adaptés aux conditions extrêmes, apparaissent comme une « épée de Damoclès » pour la biodiversité de ces zones.

UNE BIODIVERSITÉ UNIQUE FACE À DES CHANGEMENTS MAJEURS

UNE BIODIVERSITÉ UNIQUE FACE À DES CHANGEMENTS MAJEURS

Les espèces de cet océan se sont adaptées à des conditions de vie extrêmes. Le réchauffement climatique a des impacts de degrés divers

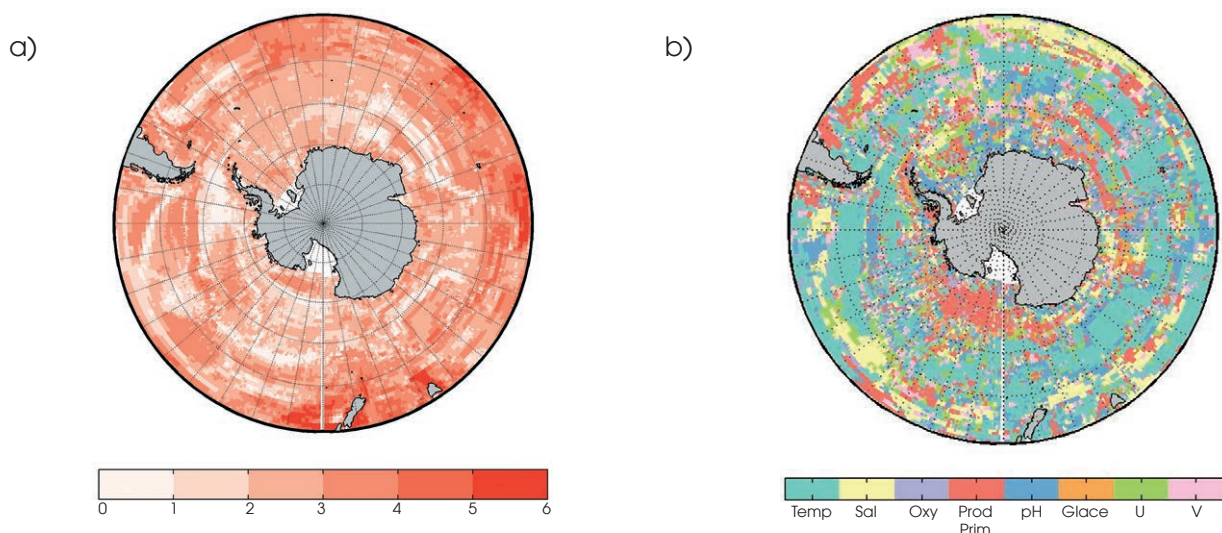


Fig.7 — (a) État de perturbation environnementale et (b) paramètre structurant le changement. Temp : Température; Sal: Salinité; O₂: concentration en oxygène; PP: Production primaire; pH: pH; Glace: % couverture de glace; U et V: composantes du courant.



suivant les régions de l'océan Austral mais est, par exemple, particulièrement marqué au niveau de la péninsule Antarctique et au niveau des îles subantarctiques (Constable *et al.*, 2014). L'exposition aux UV s'est accrue en raison de la présence du trou dans la couche d'ozone dont l'étendue est maximale à chaque printemps austral. L'acidification est devenue une nouvelle menace. Ces changements pourraient modifier les habitats des espèces, les écosystèmes et le fonctionnement des réseaux trophiques. À cela se rajoutent plusieurs impacts anthropiques dont l'exploitation des ressources vivantes.

Le benthos antarctique

Le benthos antarctique se caractérise par une grande biodiversité, un endémisme élevé, et, par endroits, des biomasses parmi les plus importantes connues. En termes de composition, certains groupes sont absents ou pauvrement représentés dans l'océan Austral (stomatopodes, cirripèdes balanomorphes, décapodes « marcheurs », bivalves). Les crabes brachyours sont totalement absents de la région antarctique alors que des fossiles attestent de leur présence avant le refroidissement des eaux polaires au Cénozoïque. D'autres groupes, par contre, y ont opéré une intense radiation. C'est le cas des pycnogonides, des amphipodes et des isopodes qui présentent une richesse spécifique remarquable, probablement due en partie - pour ces deux derniers groupes - à la conquête des niches laissées vacantes par la disparition des décapodes.

La diversité spécifique du benthos antarctique apparaît aujourd'hui largement sous-estimée. D'une part, l'approche moléculaire a mis en évidence de nombreuses espèces cryptiques (Held, 2014; Eléaume *et al.*, 2014; Havermans, 2014) et d'autre part, de larges zones de l'océan Austral restent à inventorier, en particulier les zones profondes où les premières prospections systématiques ont livré de très nombreuses espèces inconnues (Brandt *et al.*, 2014).

Le paradigme de la distribution circumpolaire des espèces benthiques a aussi été mis en cause par l'approche moléculaire : nombre d'espèces considérées comme circumpolaires ou même cosmopolites se sont révélées représenter des

complexes d'espèces à distribution restreinte, souvent allopatriques. La même approche moléculaire a néanmoins confirmé la large distribution circumpolaire de certaines espèces.

Les peuplements macrobenthiques sur le plateau continental peuvent être remarquablement abondants, formant par endroits des massifs de « bioconstructeurs » érigés, composés surtout d'espèces suspensivores comme les éponges, les bryozoaires, les hydrocoraux, les ascidies ou les crinoïdes, offrant à de nombreux autres organismes un substrat tridimensionnel, des ressources alimentaires et des opportunités de symbioses. Mais la distribution spatiale de ces peuplements, comme leur composition, leur abondance et biomasse, ou encore leur rôle écofonctionnel, peut varier considérablement en fonction de la profondeur ou de la géographie (Gutt *et al.*, 2014).

Les impacts potentiels des changements climatiques (température, pH, couverture de glace, érosion par icebergs, quantité et qualité des ressources trophiques) sur les communautés benthiques restent encore difficiles à déterminer, par manque de connaissances suffisantes des cycles vitaux et du rôle écofonctionnel des espèces benthiques, de leurs différents degrés de sensibilité aux facteurs environnementaux impliqués, de leurs multiples interactions, ainsi que des facteurs responsables - aux différentes échelles spatiales et temporelles - de la grande diversité des peuplements benthiques (voir Ingels *et al.*, 2012).

Les récentes approches expérimentales de la vulnérabilité potentielle d'une sélection d'organismes benthiques (oursins, foraminifères...) face aux impacts des changements de l'environnement physique (en particulier le réchauffement et le déclin du pH) ont clairement mis en évidence les limites physiologiques létales et fonctionnelles de ces espèces endémiques (Peck *et al.*, 2010) sans cependant permettre déjà une généralisation à l'ensemble de la biodiversité benthique (Kaiser *et al.*, 2013).

Le « charruage » des fonds marins par les icebergs est le processus physique qui affecte le plus les communautés benthiques sur le plateau



continental antarctique jusqu'à 300 m de profondeur ou plus. Le réchauffement des eaux sapant la base des plates-formes glaciaires autour du continent provoque une augmentation de la fréquence des vélages d'icebergs et par conséquent un impact accru sur le benthos péricontinental.

Poissons antarctiques démersaux

Le cas des poissons démersaux antarctiques est aussi unique, car leur histoire évolutive est connue et un des groupes, les Notothenioidei, est à près de 86 % endémique de l'océan Austral (Duhamel *et al.*, 2014). Issus d'un groupe de poissons tempérés, ils se sont adaptés à l'océan Austral lors de son refroidissement. Les espèces les plus polaires ont ainsi développé des glycoprotéines antigels qui évitent à leur sang et à leurs tissus de se cristalliser en raison de la température de l'eau de mer. Lors de ce refroidissement, ces poissons ont colonisé toutes les niches écologiques qui sont devenues vacantes par la disparition des autres espèces ne s'étant pas adaptées à ce changement. Certaines espèces de Notothenioidei sont endémiques de leur région ou de leur île, d'autres sont circumpolaires vivant soit dans des environnements stables (habitat dans des éponges), soit dans des environnements perturbés (par exemple par les icebergs) ou dans la banquise pour le poisson cryopélagique *Pagothenia borchgrevincki*. Quelques espèces sont exploitées commercialement comme la légine antarctique et la légine australe. Certains de ces poissons ont perdu leur aptitude physiologique à lutter contre le réchauffement du milieu, s'étant habitués à vivre dans un milieu où l'amplitude thermique est faible. On imagine mal pour le moment les conséquences d'un réchauffement climatique dont les effets seraient autant écologiques qu'économiques.

Organismes pélagiques

Pour les organismes pélagiques, les patterns spatio-temporels qui les influencent, qu'il s'agisse du plancton, de poissons de pleine eau ou de céphalopodes, sont étroitement liés aux structures des masses d'eaux, aux courants, aux caractéristiques des zones frontales et à la dynamique saisonnière de la banquise. À ce jour, les connaissances sur les espèces pélagiques sont souvent limitées à la zone épipélagique où pé-

nètrent les rayons lumineux favorables à la photosynthèse du phytoplancton. Les connaissances sont plus restreintes dans les zones plus profondes comme la zone mésopélagique où pourtant se trouvent en abondance des espèces de poissons qui sont les proies privilégiées de nombreux prédateurs.

Les études de ces dernières décennies ont montré que le FSA est un front biogéographique majeur pour plusieurs secteurs de l'océan Austral comme l'ont constaté Hosie *et al.* (2014) sur le plancton ou Koubbi (1993) et Duhamel *et al.* (2014) sur les poissons mésopélagiques. Le FST et le FPA étaient reconnus comme tel depuis longtemps. En considérant les trois fronts septentrionaux de l'océan Austral (FST, FSA et FPA), la zone de la glace saisonnière et le plateau continental antarctique, on peut expliquer les distributions latitudinales de nombre d'espèces pélagiques (Atkinson *et al.*, 2012; Hunt et Hosie, 2005, 2006a, b) essentielles au fonctionnement du réseau trophique comme les copépodes (Hosie *et al.*, 2014), les euphausiacés dont fait partie le krill antarctique ou le krill des glaces (Cuzin *et al.*, 2014) ou les poissons mésopélagiques (Koubbi *et al.*, 2011 et Duhamel *et al.*, 2014). S'ajoutent à cela des particularités régionales comme au niveau des îles subantarctiques où on peut observer des espèces planctoniques endémiques comme le copépode *Drepanopus pectinatus* au niveau des îles Crozet, Kerguelen et Heard. Ces espèces endémiques ne sont pas forcément rares localement car ce copépode domine à plus de 90 % l'ensemble du zooplancton de la baie du Morbihan aux îles Kerguelen (Razouls et Razouls, 1990) mais nul ne peut dire comment ces espèces s'adapteront à l'augmentation de température. De la zone subantarctique au continent, on observe ainsi une succession d'espèces dont les distributions devraient se déplacer vers le sud en liaison avec le déplacement vers le sud des zones frontales (Constable *et al.*, 2014). Cependant, les espèces néritiques (associées aux plateaux) ne pourront pas migrer et c'est le milieu pélagique de diverses îles subantarctiques qui pourrait être profondément modifié.

Sur le plateau continental antarctique, le krill des glaces est dominant mais au niveau du talus cela



sera le krill antarctique. Cette espèce emblématique de cet océan sera très fortement abondante, en particulier dans le secteur Atlantique de l'océan Austral au niveau de la mer de la Scotia et de la péninsule Antarctique. Le krill antarctique est très dépendant des conditions de glace hivernale qui sont importantes pour la reproduction de l'espèce, sa survie et la croissance des jeunes. Les densités de krill ont diminué de près de 30 % depuis les années 1980 (Atkinson *et al.*, 2004). Cette diminution pourrait avoir plusieurs raisons dont en premier la diminution de la durée et de l'étendue vers le nord de la banquise. Cependant, d'autres hypothèses sont soulevées comme les modifications d'abondances des proies ou l'augmentation des populations de baleines (Murphy *et al.*, 2012). Les questionnements actuels tentent de comprendre comment le réseau trophique pélagique basé sur le krill antarctique pourrait être modifié suite au réchauffement climatique en un réseau trophique basé sur d'autres espèces dont les copépodes et les poissons lanternes tel que cela existe au niveau de la zone frontale polaire. Il s'ajoute à cela la prolifération pendant les périodes "chaudes" d'organismes gélatineux comme les salpes qui dominent alors l'écosystème. Cela a pour conséquence de moins fortes abondances en krill certaines années et malheureusement, les salpes ne sont pas des proies intéressantes pour les prédateurs.

Dans cette zone de la glace de mer, plusieurs espèces font tout ou une partie de leur cycle de vie sous la banquise ou dans ses anfractuosités (Swadling *et al.*, 2014). Certaines de ces espèces sont capables d'adapter la durée de leurs différents stades de développement en fonction de la dynamique de la glace de mer. C'est le cas du copépode *Paralabidocera antarctica* dont la durée des stades copépodites varie entre différentes régions de l'Est Antarctique en liaison avec la durée de présence de la banquise (Loots *et al.*, 2009; Swadling *et al.*, 2014). Mais cette plasticité n'existe pas pour toutes les espèces.

Oiseaux de mer

Grâce aux nouvelles technologies de télémétrie par satellite et aux observations en mer, il est maintenant possible de connaître la distribution en mer et à toutes les saisons des oiseaux et mammifères

marins. Il existe autant de réponses qu'il y a d'espèces. On estime que les changements actuels et futurs modifieront les habitats de ces espèces ou leur tolérance et adaptation aux conditions abiotiques (Constable *et al.*, 2014). En péninsule Antarctique, le déclin des populations de manchots adéliques semble être lié à la diminution de l'extension de la glace de mer, ce qui diffère des observations en mer de Ross et dans certaines régions de l'Est Antarctique où les conditions de glace sont différentes (Constable *et al.*, 2014). Ces signes actuels nous indiquent que le changement principal sera celui des réseaux trophiques. Les habitats trophiques de certaines espèces sont pélagiques et dépendent des structures océanographiques comme les fronts. Par exemple, les manchots royaux des îles Crozet s'alimentent au niveau du FPA localisé bien au sud de l'archipel. Ils y trouvent des poissons mésopélagiques en abondance qui sont ici plus accessibles. Avec les changements prévus, le FPA devrait se localiser plus vers le sud, ce qui doublera la distance à parcourir pour ces manchots (Péron *et al.*, 2012).

PROTÉGER ET SUIVRE À LONG TERME LES ÉCOSYSTÈMES

Les changements majeurs que l'on observe depuis près de 30 ans sont donc principalement liés à l'augmentation de la température avec pour conséquence le déplacement vers le sud des zones frontales et des régions décrites précédemment. Ces changements ne sont pas uniformes sur tout l'océan Austral mais s'observent à des degrés divers suivant les régions de celui-ci (Constable *et al.*, 2014). Parmi ces modifications, l'enrichissement en gaz carbonique et son absorption par l'océan Austral entraîne une acidification de celui-ci (Midorikawa *et al.*, 2012). Comme le CO₂ est plus soluble dans les eaux froides, les eaux polaires attaqueront plus facilement les organismes ayant des coquilles en carbonate de calcium. Cela concerne notamment les mollusques ptéropodes qui sont des organismes planctoniques entourés par une fine coquille et dont le rôle d'herbivore est essentiel (Roberts *et al.*, 2014). Les invertébrés benthiques ayant une coquille calcifiée sont également concernés.



Si nous pouvons poser des hypothèses concernant les changements futurs que subira l'océan Austral, il est nécessaire de pouvoir protéger les zones les plus remarquables en biodiversité ainsi que les plus vulnérables de cet océan. Il faut également proposer des zones de référence scientifique où tout impact humain sera réduit afin d'étudier comment les écosystèmes vont se modifier suite aux changements climatiques. La CCAMLR (Commission pour la conservation de la faune et de la flore marines de l'Antarctique) a pour mission d'évaluer tous les ans les ressources marines de l'océan Austral grâce à une approche écosystémique. Faisant partie du système du Traité sur l'Antarctique, la CCAMLR a mis en place des programmes de suivi afin de détecter les changements que pourrait subir l'écosystème marin (www.ccamlr.org). Plus récemment, elle a entrepris de définir un système représentatif d'Aires marines protégées (AMP). Si diverses AMP ont été déclarées au niveau des îles subantarctiques par les états souverains, la zone de haute mer hors juridictions nationales ne peut être protégée que par le consensus des 25 membres siégeant à la CCAMLR. Ainsi, la CCAMLR a désigné en 2009 une première AMP de 94000 km² autour des îles des Orcades du Sud. D'autres zones candidates sont actuellement proposées comme l'Est Antarctique, la mer de Ross et bientôt, la mer de Weddell ou la péninsule Antarctique. Sur chacun de ces secteurs, il s'agit de conserver la biodiversité représentative de ces régions et de proposer des zones de référence scientifique. Cependant, l'aboutissement de ces négociations est difficile et sera peut-être très long. Il est indispensable de considérer à leur hauteur l'impact des changements climatiques pour la conservation.

En attendant, il est nécessaire de suivre à long terme l'écosystème marin. Plusieurs programmes internationaux sous l'égide du SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) se sont développés comme le programme SOOS (Southern

Ocean Observing System) qui incite au suivi de paramètres physico-chimiques et biologiques. Un autre programme du SCAR est le SO-CPR (Southern Ocean Continuous Plankton Recorder). Le Continuous Plankton Recorder (CPR) est utilisé depuis les années 1930 dans l'Atlantique nord et a permis de montrer des changements majeurs des communautés planctoniques en Atlantique. Le programme SO-CPR a commencé en 1991, il utilise principalement les navires scientifiques de plusieurs pays dont, depuis 2013, le « Marion Dufresne » autour des îles subantarctiques des Terres australes et antarctiques françaises. Près de 200 taxons planctoniques sont identifiés dans ce programme qui a permis l'étude de la distribution spatiale du zooplancton et de sa variabilité saisonnière et interannuelle. Hosie *et al.* (2014) a montré les variations latitudinales des assemblages mensuels du zooplancton. En France, ce programme est inscrit dans la Zone atelier antarctique du CNRS <http://za-antarctique.univ-rennes1.fr> qui a parmi ses objectifs de développer et pérenniser des réseaux d'observations à long terme de la biodiversité polaire sur le principe du LTER (Long Term Ecological Research). Les recherches des laboratoires impliqués dans ce programme bénéficient du soutien logistique de l'IPEV (Institut Paul Émile Victor), l'institut polaire français (www.ipev.fr).

Ces initiatives nationales et internationales avec les quelques exemples donnés ici sont indispensables pour comprendre les effets des changements climatiques, non pas uniquement à l'échelle de l'océan Austral mais aussi à l'échelle régionale car, comme nous l'avons vu, il existe des distinctions importantes entre les îles subantarctiques, la péninsule Antarctique, l'Est Antarctique et les autres secteurs de cet océan. Si nous commençons à percevoir les conséquences en surface de ces changements, il est indispensable de se préoccuper des milieux profonds benthiques et pélagiques.



RÉFÉRENCES

- ATKINSON A., SIEGEL V., PAKHOMOV E.A., JESSOPP M.J., LOEB V., 2009 – *A Re-Appraisal of the Total Biomass and Annual Production of Antarctic Krill*. Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers 56, 727-740.
- ATKINSON A., WARD P., HUNT B.P.V., PAKHOMOV E.A., HOSIE G.W., 2012 – *An Overview of Southern Ocean Zooplankton Data: Abundance, Biomass, Feeding and Functional Relationships*. CCAMLR Science 19, 171-218.
- BRANDT A., VAN DE PUTTE A.P., GRIFFITHS H.J., 2014 – *Southern Ocean Benthic Deep-Sea Biodiversity and Biogeography*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 233-239.
- CONSTABLE A.J., MELBOURNE-THOMAS J., CORNEY S.P., ARRIGO K.R., BARBRAUD C. *et al.*, 2014 – *Climate Change and Southern Ocean Ecosystems I: How Changes in Physical Habitats Directly Affect Marine Biota*. Global Change Biology: DOI: 10.1111/gcb.12623
- CRAME A., 2014 – *Evolutionary settings*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 32-35.
- CUZIN-ROUDY J., IRISSON J.-O., PENOT F., KAWAGUCHI S., VALLET C., 2014 – *Southern Ocean Euphausiids*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 309-320.
- DE BROYER C., KOUUBI P., GRIFFITHS H.J., RAYMOND B., UDEKEM D'ACÓZ C. D' *et al.*, 2014 – *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, XII+498 pp.
- DUHAMEL G., HULLEY P.-A., CAUSSE R., KOUUBI P., VACCHI M. *et al.*, 2014 – *Biogeographic Patterns of Fish*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 328-362.
- ELÉAUME M., HEMERY L.G., AMÉZIANE N., ROUX M., 2014 – *Phylogeographic Patterns of the Southern Ocean Crinoids (Crinoidea: Echinodermata)*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 448-455.
- GUTT J., BARNES D.K.A., LOCKHART S.J., 2014 - Classification and spatially explicit illustration of Antarctic macrobenthic assemblages: A feasibility study. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 229-232.
- HAVERMANS C., 2014 – *Phylogeographic Patterns of the Lysianassoidea (Crustacea: Peracarida: Amphipoda)*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 441-447.
- HELD C., 2014 – *Phylogeography and Population Genetics*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 437-440.
- HOSIE G., MORMÈDE S., KITCHENER J., TAKAHASHI K., RAYMOND B., 2014 – *Near Surface Zooplankton Communities*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 422-430.
- HUNT B., HOSIE G., 2005 – *Zonal Structure of Zooplankton Communities in the Southern Ocean South of Australia: Results from a 2 150 Km Continuous Plankton Recorder Transect*. Deep-Sea Research I 52, 1241-1271.
- HUNT B., HOSIE G., 2006a – *The Seasonal Succession of Zooplankton in the Southern Ocean South of Australia, Part I: the Seasonal Ice Zone*. Deep Sea Research I 53, 1182-1202.
- HUNT B., HOSIE G., 2006b – *The Seasonal Succession of Zooplankton in the Southern Ocean South of Australia, Part II: the Sub-Antarctic to Polar Frontal Zones*. Deep Sea Research I 53, 1203-1223.
- INGELS J., VANREUSEL A., BRANDT A., CATARINO A.I., DAVID B. *et al.*, 2012 – *Possible Effects of Global Environmental Changes on Antarctic Benthos: a Synthesis Across Five Major Taxa*. Ecology and Evolution 2(2): 453-485.
- KAISER S., BRANDAO S.N., BRIX S., BARNES D.K.A., BOWDEN D.A. *et al.*, 2013 – *Patterns, Processes and Vulnerability of Southern Ocean Benthos: a Decadal Leap in Knowledge and Understanding*. Marine Biology 160 (9): 2295-2317.
- KOUUBI P., 1993 – *Influence of the Frontal Zones on Ichthyoplankton and Mesopelagic Fish Assemblages in the Crozet Basin (Indian Sector of the Southern Ocean)*. Polar Biology 13(8): 557-564.
- KOUUBI P., MOTEKI M., DUHAMEL G., GOARANT A., HULLEY P.A. *et al.*, 2011 – *Ecoregionalisation of Myctophid Fish in the Indian Sector of the Southern Ocean: Results from Generalized Dissimilarity Models*. Deep-sea Research II 58: 170-180.
- LONGHURST A., 2007 – *Ecological Geography of the Sea*. 2 ed., London: Academic Press, London, 390 pp.
- LOOTS C., SWADLING K.M., KOUUBI P., 2009 – *Annual Cycle of Distribution of Three Ice-Associated Copepods Along the Coast Near Dumont D'urville, Terre Adélie (Antarctica)*. Journal of Marine Systems 78(4): 599-605.



- MIDORIKAWA T., INOUE H.Y., ISHII M. *et al.*, 2012 – *Decreasing pH Trend Estimated from 35-Year Time Series of Carbonate Parameters in the Pacific Sector of the Southern Ocean in Summer*. *Deep Sea Research I* 61: 131–139.
- MURPHY E.J., CAVANAGH R.D., HOFMANN E.E. *et al.*, 2012 – *Developing Integrated Models of Southern Ocean Food Webs: Including Ecological Complexity, Accounting for Uncertainty and the Importance of Scale*. *Progress in Oceanography* 102: 74–92.
- PECK L.S., MORLEY S., CLARK M., 2010 – *Poor Acclimation Capacities in Antarctic Marine Ectotherms*. *Marine Biology* 157(9): 2051–2059.
- PÉRON C., WEIMERSKIRCH H., BOST C.A., 2012 – *Projected Poleward Shift of King Penguins' (Aptenodytes Patagonicus) Foraging Range at the Crozet Islands, Southern Indian Ocean*. *Proceedings of the Royal Society B* 279: 2515–2523.
- POST A.L., MEIJERS A.J.S., FRASER A.D., MEINERS K.M., AYERS J. *et al.*, 2014 – *Environmental Settings*. In *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*. Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 46–64.
- RAYMOND B., 2014 – *Pelagic Regionalisation*. In *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*. Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 418–421.
- RAZOULS C., RAZOULS S., 1990 – *Biological Cycle of a Population of Subantarctic Copepod, Drepanopus pectinatus (Clausocalanidae), Kerguelen Archipelago*. *Polar Biology*, 10: 541–543.
- REYGONDEAU G., LONGHURST, A., MARTINEZ, E., BEAUGRAND, G., ANTOINE, D., MAURY, O., 2013 – *Dynamic Biogeochemical Provinces in the Global Ocean*. *Global Biogeochemical Cycles* 27: 1046–1058.
- REYGONDEAU G., HUETTMANN F. 2014 – *Past, Present and Future State of Pelagic Habitats in the Antarctic Ocean*. In *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 397–403.
- ROBERTS D., HOPCROFT R.R., HOSIE G.W., 2014 – *Southern Ocean Pteropods*. In *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 276–283.
- ROGERS A.D., LINSE K., 2014 – *Chemosynthetic Communities*. In *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 240–244.
- SAUCEDE T., PIERRAT B., DAVID B., 2014 – *Echinoids*. In *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 213–220.
- SWADLING K.W., 2014 – *Sea-Ice Metazoans*. In *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 321–325.