

TANGO – Estimation des points de bascule de l’habitabilité des écosystèmes benthiques antarctiques sous des scénarios futurs de changement climatique mondial

La péninsule antarctique occidentale (WAP) est caractérisée par des changements environnementaux rapides et drastiques des écosystèmes marins côtiers, dont beaucoup dépendent de la glace de mer. Les changements de dynamique de celle-ci, le recul accéléré des glaciers, l’effondrement des plates-formes glaciaires, le réchauffement des eaux de surface et les modifications de la production primaire locale sont quelques-uns des effets observés du changement climatique dans cette région. Dans le cadre de ce projet financé par le BELSPO, intitulé ‘Estimating Tipping points in habitability of Antarctic benthic ecosystems under GLObal future climate change scenarios’ (TANGO), nous avons étudié la réponse des écosystèmes marins côtiers et peu profonds aux changements environnementaux. Les impacts du changement climatique, ont été abordés le long d’un gradient latitudinal le long de la WAP représentant potentiellement les effets actuels et futurs sur les écosystèmes côtiers.

L’ensemble de sites de recherche s’étend sur environ 600 km représentant un gradient de dépendance à la glace de mer. Sur ces sites, une étude écologique intégrée a été menée, combinant des mesures du cycle biogéochimique du carbone de l’atmosphère, à travers la colonne d’eau jusqu’au sédiment, avec plusieurs approches du réseau trophique et une cartographie détaillée des habitats. Nos objectifs étaient de démêler le fonctionnement de ces habitats côtiers peu profonds en relation avec les conditions changeantes de la glace de mer le long de ce gradient nord-sud, avec une durée d’englacement plus courte au nord et où les changements sont les plus extrêmes. Comme les changements physiques rapides interagissent avec les processus biologiques à différentes échelles spatiales, ce projet visait à développer des approches mécanistiques pour (1) détecter les signaux d’alerte précoce des seuils écologiques, (2) quantifier les impacts des altérations induites par le climat sur la glace de mer et la température sur les réseaux trophiques et les cycles du carbone, et (3) évaluer l’habitabilité et la stabilité à long terme des écosystèmes côtiers antarctiques sous un changement global continu. Nous avons étudié les effets du changement climatique à différents niveaux d’organisation, de l’individu aux interactions entre espèces, processus et fonctions, jusqu’aux écosystèmes entiers, les résultats d’un niveau alimentant le niveau suivant.

Deux campagnes d’échantillonnage (TANGO 1 et 2) ont eu lieu à bord du RV Australis, un navire petit, agile et à faible impact, permettant d’atteindre des zones inexplorées, jamais étudiées auparavant et pertinentes pour ce projet. Afin d’échantillonner le long d’un gradient nord-sud représentant différents impacts du changement climatique, les expéditions TANGO se sont concentrées sur cinq systèmes insulaires : l’île Dodman (66°00’S, 65°46’W) et l’île Blaiklock (67°33’S, 67°12’W) lors de TANGO 1, et l’île Melchior (64°19’S, 62°56’W), l’île Hovgaard (65°6’S, 64°4’W) et le port Føyn (64°32’S, 61°59’W) lors de TANGO 2, respectivement en février-mars 2023 et 2024. La collecte d’échantillons et de données s’est principalement basée sur des relevés par ROV avec analyse d’images, des prélèvements de sédiments et de benthos par des plongeurs scientifiques, et des prélèvements de glace de mer et d’eau depuis le navire ou un petit zodiac. Des pièges à sédiments ont également été déployés à plusieurs endroits. Des travaux expérimentaux supplémentaires ont été réalisés à divers endroits à bord ou dans différentes stations de recherche antarctiques de la région.

Dans un premier work package, nous nous sommes concentrés sur les espèces clés pour comprendre l’importance respective des descripteurs environnementaux tels que la température et les ressources alimentaires sur leurs performances physiologiques. Une première étape de notre recherche a été de

compléter des bases de données génétique de référence, essentielle pour l'identification moléculaire des espèces étudiées et de la biodiversité antarctique. Ceci est également important pour identifier les contenus intestinaux sur base génétique ainsi que pour les études d'ADN environnemental. Grâce à de nouvelles approches, nous avons augmenté les estimations de la richesse spécifique par rapport aux identifications morphologiques. Nous avons généré 110 nouveaux codes-barres ADN identifiant de multiples espèces clés sur nos sites d'échantillonnage, principalement pour les phylums Echinodermata, Mollusca, Polychaeta et Crustacea. Notre approche par barcoding a permis d'identifier au moins 10 espèces nouvelles pour la Science et détecté plusieurs cas de diversité cryptique potentielle.

Une expérience à long terme sur plusieurs générations sur la performance physiologique de l'espèce clé d'étoile de mer antarctique *Odontaster validus* (Lamare et al., 2024) a confirmé que des températures plus élevées ont des effets drastiques. Dans cette expérience, l'exposition des adultes à des températures plus élevées n'a pas permis de pré-adapter la population au réchauffement climatique : au contraire, la progéniture de ces adultes exposés a montré une survie réduite, une croissance ralentie et un arrêt du développement larvaire. Si de tels effets transgénérationnels de températures élevées sont courants parmi de nombreuses espèces, cela suggère une perturbation plus grande de l'écosystème que prévu.

De plus, il a été observé que le microbiote intestinal des espèces clés varie spatialement, ajoutant une couche cachée de biodiversité cruciale pour la résilience de l'hôte et façonnant leur réponse physiologique. Le microbiome des organismes peuvent donc aider ceux-ci à faire face à des conditions extrêmes, mais leur rôle dans un changement rapide est mal compris.

Dans un deuxième work package, nous avons étudié les propriétés du réseau trophique et la flexibilité trophique des taxa clés dans des conditions de changement environnemental. L'analyse du contenu intestinal de certains taxa benthiques abondants a révélé une occurrence fréquente de diatomées chez plusieurs espèces hôtes, en accord avec le rôle écologique établi des diatomées dans les réseaux trophiques antarctiques. Cependant, différentes espèces d'échinodermes ont montré des preuves de connectivité trophique avec les forêts de macroalgues via la voie détritique (c'est-à-dire le « réseau trophique brun »). De plus, la diversité des sources de carbone utilisées s'est avérée plus élevée dans les habitats rocheux que dans les environnements sédimentaires, probablement en raison de l'incorporation de carbone dérivé des macroalgues dans les zones rocheuses. Dans les habitats sédimentaires, le réseau trophique semble couplé à la décomposition de la matière organique et à l'assimilation ultérieure par le microphytobenthos.

Malgré les différences régionales le long de la WAP, la structure trophique verticale globale reste largement conservée. La production primaire des microalgues de glace de mer et des microalgues benthiques contribue aux sources de carbone utilisées par les consommateurs benthiques dans différents habitats. Ainsi, la diversité des sources alimentaires est également liée aux changements de la couverture de glace de mer. Le réchauffement aura donc des effets profonds sur les propriétés du réseau trophique, notamment sur la quantité, la diversité et l'origine des sources primaires de carbone. Comme une augmentation de la biomasse et de la diversité de la couverture de macroalgues et des changements non linéaires dans la production planctonique/sympagique sont prédits, les réseaux trophiques dans les habitats à fond mou pourraient passer d'une dépendance à la colonne d'eau (production planctonique/sympagique) à une dépendance plus forte au benthos (production primaire de microalgues/macroalgues). Nous avons en outre observé que certaines espèces

d'invertébrés benthiques sont probablement suffisamment plastiques dans leur régime alimentaire pour s'adapter à ces changements, tandis que beaucoup ne le sont pas. Par conséquent, des changements drastiques dans la diversité benthique et les propriétés des réseaux trophiques sont susceptibles de se produire dans un avenir proche.

Un modèle de réseau trophique dans une zone de retrait glaciaire a montré que la fonte des glaciers ne réduit pas simplement la disponibilité globale de la production primaire. En effet, le système devient moins dépendant de la production benthique autotrophe et du recyclage interne, et plus dépendant des apports détritiques et des taxa opportunistes, signalant une réorganisation fonctionnelle du réseau trophique benthique sous une fonte intensifiée. À mesure que le retrait glaciaire le long de la péninsule antarctique s'accélère, de tels changements sont susceptibles de s'intensifier, remodelant la structure des communautés benthiques, réduisant l'efficacité du transfert de carbone et modifiant les voies énergétiques dans les fjords antarctiques peu profonds.

Un troisième work package a étudié la production primaire planctonique, l'export pélagique, le stockage benthique et le flux de carbone le long du gradient latitudinal. La glace de mer, présente uniquement dans les stations méridionales, contenait des concentrations significatives de chlorophylle a dans les couches de « gap » c'est-à-dire les couches poreuses remplies d'eau de mer au sein de la glace de mer en cours de fonte qui sont trouvées principalement à la fin de l'été. Les concentrations de chlorophylle dans la colonne d'eau sont deux à trois fois plus élevées dans le sud (c'est-à-dire, les îles Dodman et Blaiklock) que dans le nord (c'est-à-dire, l'île Melchior, l'île Hovgaard et le port Føyn). La présence de glace de mer semblait également entraîner un flux vertical de matière organique plus important vers le fond marin, distinguant les stations nord et sud. Ces différences dans les taux de dépôt n'étaient cependant pas liées à des différences dans les taux de minéralisation benthique ou les propriétés des sédiments. Les taux de minéralisation sédimentaires dépendent principalement de la proximité avec les sources de dépôts glaciaires. En effet, les profils biogéochimiques varient selon la distance au glacier.

Le microphytobenthos semble jouer un rôle important dans le cycle des sels nutritifs benthiques dans ces habitats sédimentaires peu profonds, augmentant généralement la rétention des sels nutritifs dans le fond marin pendant les périodes d'activité photosynthétique. Les sédiments les plus fins, situés à proximité des sorties de glaciers, présentaient les taux d'accumulation de solutés dans l'eau interstitielle les plus élevés et une signature d'un environnement fortement réducteur. Dans presque toutes les stations, les flux de méthane provenant des sédiments sont supérieurs aux flux sédiment-eau moyens mesurés autour de l'Antarctique. Les observations des eaux de surface, censées représenter une image intégrée des processus biogéochimiques en dessous, ont indiqué que la demande en carbone inorganique dissous (DIC) par les producteurs primaires de la colonne d'eau et benthiques fait de la WAP un puits de CO₂ pendant les étés antarctiques. La nature fine des sédiments des sites visités, où la minéralisation anoxique devrait dominer la minéralisation de la matière organique, et la présence de gaz à effet de serre (GES) dans les écoulements sous-glaciaires font également de la WAP une source saisonnière de GES tels que le méthane et le N₂O.

Un quatrième work package a traité de la complexité et du fonctionnement des écosystèmes à différentes échelles spatiales le long du gradient climatique. Les macroalgues jouent des rôles dépendants de l'échelle dans la structuration des communautés benthiques antarctiques peu profondes : en tant qu'indicateurs larges des conditions de la glace de mer, de la productivité et de la complexité de l'habitat à grande échelle, et en tant que moteurs biotiques directs et ingénieurs

d'écosystèmes à plus fine échelle. De plus, nos résultats soulignent l'importance de la dynamique de la glace en tant que moteur de la composition des communautés benthiques à plusieurs échelles spatiales dans la zone d'étude. À partir de notre analyse de réseau bayésien basée sur les relevés ROV, il n'est pas directement clair comment les futures diminutions de la couverture de glace de mer affecteront les communautés benthiques, mais nous pouvons utiliser les dépendances statistiques entre les macroalgues et d'autres taxa pour inférer d'éventuels changements indirects dans la composition de la faune dus aux changements d'abondance des macroalgues. De plus, le benthos antarctique peu profond n'est pas uniquement façonné par les facteurs environnementaux, mais aussi par un réseau dynamique d'interactions entre espèces qui varient en intensité selon les densités et les contextes.

Sur la base de nos résultats, nous avons formulé plusieurs recommandations spécifiques, dont la plus importante est de poursuivre l'étude des effets du ruissellement glaciaire et des émissions de GES sédimentaires afin d'affiner le bilan carbone antarctique. Nous recommandons également d'adopter des plans de gestion intégrés qui tiennent compte des caractéristiques sensibles à l'échelle spatiale envisagée, telles que les interactions entre espèces et la complexité de l'habitat, et qui prennent en compte les grands facteurs climatiques.

En s'alignant sur le Système du Traité sur l'Antarctique et le GIEC, nos résultats peuvent être intégrés dans les modèles climatiques mondiaux et les stratégies d'atténuation des changements globaux.