

RÉSUMÉ

Contexte

L'océan Austral (SO) a été isolé des autres mers du monde pendant des millions d'années, ce qui a permis l'évolution de taxons endémiques au cours de sa longue histoire. Il est donc caractérisé par des niveaux élevés de diversité endémique à tous les niveaux trophiques. Ces espèces marines adaptées au froid sont menacées par le changement global, certaines parties de l'Antarctique se réchauffant à un rythme beaucoup plus rapide que d'autres régions de la Terre. RECTO a utilisé une approche multidisciplinaire, incluant des méthodes génétiques et génomiques pour construire des phylogénies datées, reconstruire l'histoire des populations et étudier les modèles phylogéographiques. Les niches trophiques ont été estimées grâce à des analyses d'isotopes stables et l'évolution adaptative potentielle a été testée en analysant les caractères morphologiques clés et en les cartographiant sur des phylogénies datées. Des modèles d'énergie dynamique ont été développés pour certains taxons, tandis que des modèles de distribution des espèces basés sur les données d'occurrence existantes ont modélisé la distribution actuelle et future de certains taxons dans le cadre de différents scénarios climatiques. Un modèle hydrodynamique de courant océanique basé sur COHERENS a été développé pour une partie de l'océan Austral afin de simuler la dispersion des taxons marins avec la modélisation des particules.

Objectifs

RECTO a évalué les capacités d'adaptation des principaux taxons aux changements climatiques futurs dans l'océan Austral, avec six objectifs : (1) Reconstruire l'histoire des populations et les phylogénies de certaines faunes ; (2) Relier l'histoire des populations et les refuges aux changements climatiques passés. (3) Estimer la variation des traits morphologiques et la largeur des niches écologiques ; (4) Utiliser les limites et les traits physiologiques et énergétiques pour modéliser les distributions actuelles et futures des espèces ; (5) Intégrer les modèles de distribution dans les modèles hydrodynamiques et particulaires ; (6) Développer différents scénarios sur la façon dont les taxons cibles répondront aux changements climatiques futurs.

Conclusions

Expéditions: Le consortium RECTO a organisé avec succès une expédition en voilier en Antarctique en tant que plateforme de recherche agile et durable et la première participation de scientifiques belges à une croisière péruvienne. Les chercheurs de RECTO se sont également rendus à deux reprises à la station belge Princess Elisabeth pour surveiller les pétrels des neiges, mais aussi pour tenter avec succès d'acquérir des échantillons marins de la côte Princess Ragnhild, importante sur le plan écologique, alors qu'ils étaient basés à la station.

Méthodes: Les méthodes de recherche appliquées dans RECTO ont apporté de nombreuses contributions importantes à la science, notamment en faisant progresser la taxonomie intégrative des organismes antarctiques et en produisant plusieurs guides de terrain. RECTO a également augmenté de manière significative les ressources moléculaires dans les bases de données en libre accès : des milliers de codes-barres ADN et 20 nouveaux mitogénomes d'amphipodes, de bivalves et d'étoiles de mer de l'Antarctique ont été assemblés et annotés, ce qui sera très utile pour les futures recherches phylogénétiques et moléculaires. Un protocole pour l'application des techniques modernes de

génomique des populations à une grande variété d'organismes antarctiques avec un séquençage à représentation réduite a été développé et appliqué avec succès. RECTO a également développé des méthodes permettant d'utiliser des échantillons historiques des collections pour des analyses d'isotopes stables et de microbiome. Des méthodes phylogénétiques intégratives ont été développées et appliquées pour comprendre la macroévolution et l'adaptation des poissons et des amphipodes de l'Antarctique. Des expériences physiologiques à long et à court terme ont été menées avec succès pour étudier les effets de l'acidification des océans sur les étoiles de mer et les oursins, qui devraient être hypersensibles à un pH plus faible en raison de leur squelette de calcite. RECTO a également fait d'énormes progrès dans le développement de modèles de budget énergétique dynamique et de distribution des espèces pour les organismes de l'Antarctique afin de prévoir les performances physiologiques et la distribution actuelles et futures dans le cadre de différents scénarios de changement climatique. Un modèle océanographique pour le SO a été développé avec succès à partir du modèle COHERENS pour simuler le transfert larvaire et la connectivité génétique de divers taxons marins antarctiques, également dans le cadre de différents scénarios climatiques.

Résultats scientifiques : 1. *Génétique* - Nous avons pu confirmer une diversité cryptique supplémentaire chez les amphipodes, les échinodermes et les poissons, augmentant les estimations permanentes de la biodiversité et indiquant une variation génétique localisée qui doit être prise en compte lors de la conception de zones protégées. Les données génétiques ont également montré que les organismes cibles de RECTO ont survécu aux glaciations passées dans différents refuges - nous avons trouvé des preuves pour tous les types de refuges comme suggéré par Allcock & Struggnell (2012) et des indications supplémentaires pour des refuges multiples. Nous avons également observé que même des espèces antarctiques étroitement apparentées ont survécu dans différents refuges du Pléistocène. Ces résultats ont des implications importantes pour la survie future éventuelle ou le risque d'extinction en raison du changement climatique. Nous avons observé des expansions récentes de populations chez certains taxons, indiquant des goulots d'étranglement dans le passé ; il reste à étudier si ces populations continueront à s'étendre pendant le réchauffement climatique. Sur la base de données de séquences d'ADN issues d'approches génomiques des populations et de mitogénomes, nous avons trouvé une différenciation génétique entre les populations de l'ouest de la péninsule antarctique AP et de l'ouest du sud et aussi de l'est de l'Antarctique dans plusieurs taxons (bivalves, amphipodes, poissons) ; ceci implique une endémicité locale et des adaptations locales, qui sont non seulement importantes à inclure pour développer des plans de gestion de la conservation appropriés mais qui augmenteront aussi le risque d'extinction de ces taxons sous l'effet du changement climatique.

Nous avons mené les premières études sur la taille de la population et la connectivité génétique des pétrels des neiges à la station belge Princesse Elisabeth - la population est beaucoup plus importante que prévu et forme génétiquement une grande population avec des échanges génétiques réguliers. Alors que les niches trophiques des oiseaux juvéniles étaient similaires, celles des oiseaux adultes différaient, indiquant des zones d'hivernage et des proies différentes.

2. *Microbiome* - La première étude du microbiome d'échantillons historiques et récents de poissons de l'Antarctique a révélé des changements dans la composition du microbiome au cours de l'ontogenèse et entre différentes décennies. La comparaison des microbiomes entre les échantillons historiques et contemporains a confirmé la possibilité de changements drastiques du microbiome intestinal de *Trematomus* au cours du siècle dernier.

3. *Écologie trophique et macroécologie* - Contrairement à ce qui était connu des étoiles de mer des environnements tempérés, nous avons constaté que les étoiles de mer du SO présentaient une grande diversité trophique et n'étaient pas toujours des prédateurs supérieurs. La profondeur et la taille du corps étaient les principaux facteurs influençant leur écologie trophique. Une telle diversité trophique est importante pour prédire la sensibilité des étoiles de mer aux futurs changements environnementaux. Nous avons également découvert que l'absence de rupture saisonnière de la glace de mer a entraîné la simplification du réseau alimentaire dans l'Antarctique oriental, ce qui montre que les changements attendus de la glace de mer dus au changement climatique pourraient avoir des effets considérables sur les réseaux alimentaires benthiques et le fonctionnement de l'écosystème du SO. En étudiant la disparité de la forme de la tête et en construisant des phylogénies datées des poissons *Trematomus* de l'Antarctique, nous avons trouvé des preuves de la nature adaptative de la diversification et de la spéciation rapide des *Trematomus*, ce qui pourrait avoir des implications importantes pour les adaptations futures de ces taxons dans le cadre du changement global. Au cours de l'évolution des étoiles de mer et des amphipodes de l'Antarctique, la diversification s'est surtout produite au cours des 5 derniers millions d'années. Cette évolution "rapide" pourrait expliquer l'existence de nombreux complexes d'espèces et être attribuée à une pompe de diversité par l'impact des cycles glaciaires-interglaciaires. Ces résultats montrent que la spéciation et l'adaptation dans l'océan Austral sont lentes et prennent des millions d'années.

4. *Physiologie* - L'étude des effets possibles de l'acidification des océans sur les échinodermes a montré que les juvéniles devraient souffrir parce qu'ils restent exposés à un faible pH dans la poche de couveuse pendant leur développement.

5. *Modélisation* - La modélisation écologique et les expériences physiologiques ont montré que des espèces invasives comme le crabe de Patagonie peuvent atteindre l'Antarctique au plus tard en 2100. La modélisation océanique a en outre montré que le risque d'introduction de ces espèces exotiques par les eaux de ballast peut être réduit si les navires échangent leurs eaux de ballast à au moins 200 milles nautiques des côtes.

Les méthodes de modélisation écologique ont été considérablement améliorées tout au long du projet RECTO, mais il a également été conclu que les modèles à l'échelle de l'ensemble de l'OS ne sont pas significatifs en raison de la faible qualité (disparité) des ensembles de données sur l'occurrence des espèces et l'environnement. Les modèles de distribution des espèces (SDMs) devraient plutôt être exécutés à l'échelle régionale ; malheureusement, les scénarios actuels du GIEC ne sont pas bien adaptés à l'étude de l'écologie des espèces en raison de leur résolution spatiale trop faible. Il est donc également difficile de les relier aux SDM régionaux pour prédire les réponses des espèces aux futurs scénarios de changement climatique. Nous recommandons d'améliorer encore la disponibilité des bases de données en libre accès, également à partir de campagnes, et de fournir des modèles climatiques à des échelles régionales dès que possible afin de permettre l'exécution de modèles plus adéquats. En gardant ces limites à l'esprit, les SDM peuvent être des outils puissants pour illustrer les réponses futures au changement climatique, également pour les gestionnaires et les politiciens. Par exemple, deux études sur la région du plateau de Kerguelen ont conclu que les espèces ayant des niches écologiques étroites et les espèces endémiques dont la distribution est limitée aux zones côtières étaient plus sensibles au changement climatique. Un autre exemple d'application réussie de modèles de budget énergétique dynamique à deux espèces de limnées de l'Antarctique et de régions aux températures plus élevées a montré que la quasi-totalité de l'énergie disponible dans les réserves

était allouée à l'entretien somatique et à la croissance chez l'espèce antarctique, et peu à la reproduction. Cela explique le taux de reproduction 40 fois plus faible, tandis que la capacité d'assimilation des ressources a été estimée 10 fois plus faible chez l'espèce antarctique, ce qui a entraîné un taux de croissance 2,5 fois plus faible.

6. Validation et sensibilization - En plus de faire progresser les méthodes de plusieurs disciplines et de produire des résultats scientifiques très intéressants, RECTO a également été un projet extrêmement réussi en ce qui concerne la validation et la sensibilisation : il a produit jusqu'à présent 58 publications A1, neuf documents de données publiés et d'innombrables communiqués de presse et autres activités visant à informer le public sur le projet, ses expéditions et ses résultats scientifiques. 63 étudiants et jeunes chercheurs ont été supervisés et formés, et 82 posters et exposés ont été présentés lors de conférences nationales et internationales. Le consortium RECTO a également été étroitement associé à l'organisation de la réunion internationale SCAR Biology en Belgique en 2017.

7. Recommandations supplémentaires - L'énorme succès de RECTO illustre le potentiel d'un grand projet intégratif et multidisciplinaire avec de multiples partenaires belges comme noyau pour attirer les étudiants et les jeunes chercheurs, pour faire progresser la science de manière significative et pour fournir des suggestions appropriées pour la politique scientifique et la gestion sur les stratégies de conservation de l'océan Austral. Sur la base de cette expérience, nous recommandons que des possibilités de financement pour de tels grands projets restent disponibles à l'avenir auprès de Belspo, car ils permettent d'inclure des équipes des trois communautés de recherche belges.

Keywords: Southern Ocean, refugia, trophic ecology, species distribution modelling, dynamic energy budgets, macroevolution, particle modelling, invasive species