



**HAL**  
open science

## **Kerguelen, un archipel sous haute surveillance**

Jean-Pierre Feral, Jean-Pierre Beurier, Christian Marschal, Gilles Marty,  
Sébastien Motreuil, Elie Poulin, Jean-Claude Roca, Thomas Saucède

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Feral, Jean-Pierre Beurier, Christian Marschal, Gilles Marty, Sébastien Motreuil, et al..  
Kerguelen, un archipel sous haute surveillance. 2016, pp.33-39. hal-01541147

**HAL Id: hal-01541147**

**<https://hal.science/hal-01541147>**

Submitted on 17 Jun 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# KERGUELEN, un archipel sous haute surveillance



Par Jean-Pierre Féral,  
Jean-Pierre Beurier,  
Christian Marschal,  
Gilles Marty,  
Sébastien Motreuil,  
Elie Poulin,  
Jean-Claude Roca  
et Thomas Saucède

Texte et photos

Membres du programme  
PROTEKER (programme  
IPEV n° 1044) ayant  
participé à l'exploration  
et à l'installation des sites  
de suivi à long terme.

Suivi vidéo des fonds à *Macrocystis* du site de l'îlot Channer.

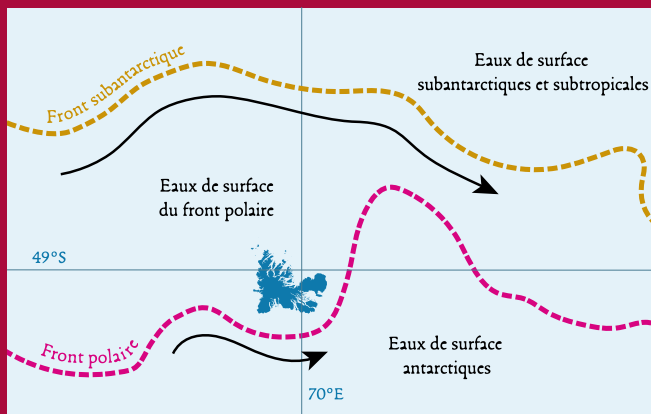
AVEC SES CÔTES DÉCOUPÉES ET SANS CESSER BATTUES PAR LES VENTS, LES KERGUELEN SONT RESTÉES LONGTEMPS INACCESSIBLES AUX BIOLOGISTES MARINS. SI SA SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET SON ISOLEMENT EXCEPTIONNELS RENDENT CET ARCHIPEL PARTICULIÈREMENT VULNÉRABLE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES, ILS EN FONT AUSSI UN LABORATOIRE IDÉAL POUR EN ÉTUDIER LES EFFETS...

## **Kerguelen, des îles dans le vent, à la limite des domaines antarctique et subantarctique**

L'archipel des Kerguelen constitue une des parties émergées du plateau de Kerguelen-Heard ; il est isolé dans le sud de l'océan Indien à une distance d'environ 3 500 km de la Réunion, 5 000 km de l'Australie et seulement 2 000 km des côtes de l'Antarctique. La température moyenne annuelle y est de 4,5 °C, avec des *maxima* en janvier et février de 8 °C en moyenne et des *minima* en août de 2 °C seulement. Le vent d'ouest souffle quasi continuellement ("Cinquantièmes hurlants") à une moyenne de 35 km/h et qui peut atteindre 200 km/h. Les vagues de 12 à 15 m ne sont pas rares. Les côtes de Kerguelen sont très découpées, notamment sous l'effet de l'érosion glaciaire.

La baie du Morbihan (100 km<sup>2</sup>) est située dans la partie orientale de l'archipel. Encombrée d'îles et d'îlots, elle ne communique avec le large que par la passe Royale (13 km de large) par laquelle la mer pénètre jusqu'à 50 km dans les terres. La présence de fjords est exceptionnelle à cette latitude.

En ce qui concerne la côte, les marées de type semi-diurne ont une amplitude maximale de 1,80 m dans la baie du Morbihan et de 1,2 à 1,6 m à l'extérieur. Les températures moyennes de l'eau varient entre



Position du front polaire par rapport aux îles Kerguelen (*redessinée et simplifiée d'après Y.-H. Park et al., 2014*) Le plateau de Kerguelen est l'un des principaux obstacles à l'écoulement d'ouest en est du courant circumpolaire antarctique (flèches noires). Les variations latitudinales attendues des systèmes frontaux (fronts polaire et subantarctique) créeront des zones de mélange entre masses d'eau ou mettront en contact le benthos côtier avec des eaux aux caractéristiques différentes en matière de température, salinité et nutriments.

5 °C en été et 2 °C en hiver, en surface, à Port-aux-Français, seul site suivi depuis plusieurs décennies. Les fjords peuvent être sujets à des épisodes de dessalure importants, en fonction de la fonte des glaces et des arrivées d'eau douce. On peut observer des gradients de salinité importants, créant des zones de transition qui peuvent faire barrière à certains organismes. Les vents dominants, quant à eux, soufflent vers l'est, déplaçant les eaux de surface vers la passe Royale par où elles sortent. Elles sont remplacées, surtout au cours des tempêtes d'hiver, par des eaux du large qui pénètrent dans la baie vers 50 m de profondeur, apportant nutriments, plancton et necton.

Un siècle s'écoulera entre la découverte de l'archipel par Yves Joseph de Kerguelen de Trémarec, en 1772, et la première expédition scientifique qui s'y intéressera. Menée entre 1873 et 1874 par Wyville Thomson à bord du *Challenger*, elle ne sera suivie que par quelques autres jusque dans les années soixante. Entre 1961 et 1970, P. Arnaud, R. Delépine, J.-C. Hureau et M. Ranou sont les premiers biologistes à véritablement étudier la faune et la flore marines et P. Grua apportera les premiers éléments de connaissance *in situ* du benthos\* marin côtier. En 1968, le laboratoire BIOMAR, construit à Port-aux-Français, et l'arrivée de *La Japonaise* (une vedette de 14 m) permettront le développement de programmes marins à plus long terme dans la baie du Morbihan, aux Kerguelen. A. Guille lancera le programme Benthos-Mac (1970-85) qui récoltera les premières données sur la faune des fonds sédimentaires. Depuis 1985, ce programme, coordonné par J.-P. Féral, inclut désormais l'étude des adaptations physiologiques et des mécanismes qui régissent la biodiversité. Il s'accomplit selon une approche évolutive, en ajoutant systématiquement la plongée aux arts trainants\* pour l'observation, l'échantillonnage ou l'expérimentation. Dès 1990, l'arrivée du chalutier de 24 m *La Curieuse* permettra d'étendre les investigations sur toutes les côtes des Kerguelen, sauf à l'ouest, battue en permanence. L'exploration, comme le suivi de sites côtiers à l'extérieur de la baie, nécessite en effet des moyens nautiques adaptés à une mer souvent très forte.

Départ d'une palanquée qui va relever les capteurs de température installés sur le site de Port-Christmas. À l'arrière-plan, on distingue ce qui reste de la fameuse arche des Kerguelen effondrée au début du siècle dernier.



## Les algues brunes géantes

Très diverses, les macrophytes marines sont des éléments importants des paysages sous-marins côtiers des Kerguelen. Deux très grandes espèces d'algues brunes phéophycées, *Macrocystis pyrifera* et *Durvillea antarctica*, occupent une place particulière du point de vue écologique.

*M. pyrifera* est la plus grande des algues géantes (jusqu'à 60 m de long), dites "kelp". Fixée au fond par de solides crampons (haptères) dont la base peut atteindre 1,5 m de diamètre, cette laminaire forme des peuplements très denses, souvent comparés à des forêts sous-marines du fait que les frondes forment l'équivalent d'une canopée qui atteint la surface. La croissance peut être extrêmement rapide (30 cm/jour). Les "herbiers" – ou plutôt les forêts – de *Macrocystis* se développent sur des fonds de 3 à 25 m, selon la transparence de l'eau, couvrant parfois de très grandes étendues et rendant la navigation pratiquement impossible. Les différentes parties de l'algue (haptères, stipes, frondes) servent de support ou abritent un nombre considérable d'invertébrés et près de 200 espèces d'algues rouges. Les tempêtes arrachent régulièrement des pieds qui viennent s'échouer et pourrir sur les plages, s'accumulant sur plusieurs mètres d'épaisseur et formant un écosystème particulier. Il est aussi probable que ceux de ces pieds qui dérivent au large servent de "radeau" à des espèces qui pourraient ainsi se disperser sur de grandes distances. Ce phénomène de "rafting" est évoqué pour expliquer, par exemple, la diversité des mollusques et des crustacés dans l'océan Austral.

*Durvillea antarctica*, en forme de lanières caoutchouteuses pouvant atteindre 10 m de longueur, se rencontre dans la zone de balancement des marées, le long des côtes battues, très solidement ancrée aux rochers par des crampons. Du fait de l'agitation du milieu où vit *D. antarctica*, les frondes sont dépourvues de faune associée. Ce n'est qu'à la suite du creusement de galeries dans leur masse par des organismes foreurs (crustacés isopodes) que ces crampons peuvent servir d'abri. Compte tenu du fait que *D. antarctica* vit en mode battu, ces galeries dans son organe de fixation affaiblissent beaucoup la résistance de l'algue à l'arrachement. Très différent de celui des *Macrocystis*, le rôle de *Durvillea* est néanmoins majeur dans la protection physique de la côte.



*Macrocystis pyrifera*.

## Une situation géographique exceptionnelle

En raison des changements climatiques qui y sont observés depuis plus d'un demi-siècle, il est plus que jamais important d'acquiescer des données fiables sur ces milieux. Ces changements touchent tout autant la circulation atmosphérique autour du continent antarctique et la température de l'océan Austral que les fronts océaniques\* (qui ont tendance à se déplacer vers le sud) et il est extrêmement difficile d'en estimer les effets en raison de la situation particulière de l'archipel : il se trouve en effet sur la route du courant circumpolaire antarctique (dit aussi Grande dérive ouest), courant qui circule d'ouest en est autour de l'Antarctique. Celui-ci est considéré comme la limite nord de l'océan Austral et influence le climat océanique, froid et extrêmement venteux des Kerguelen. D'un point de vue hydrologique, les Kerguelen se situent quasiment sur le front polaire : une zone d'environ 30 à 50 km de large qui

entoure l'Antarctique et dont la position fluctue en latitude selon l'endroit et la saison. C'est là que les eaux froides antarctiques plongent sous les eaux plus chaudes des régions subantarctiques, créant une véritable barrière hydrologique. Dans quelle mesure les changements climatiques actuels (hausse des températures, diminution des précipitations) et leurs conséquences (variations du niveau marin et de la biodiversité : disparition d'espèces, changements d'aires de répartition, remplacements, espèces "exotiques" parfois envahissantes) affecteront les Kerguelen ? Pour le savoir, les données doivent être collectées sur le long terme. Aujourd'hui, à l'absence d'informations de cet ordre s'ajoute la méconnaissance des effets combinés des changements sur les organismes et les peuplements. L'archipel, par sa position unique et les possibilités logistiques que représente la base de Port-aux-Français est donc un lieu favorable pour l'installation de sites de suivi côtiers. Le programme de l'IPEV Proteker lancé en 2011 a pour objectif de mettre

## Les sites PROTEKER

Huit sites ont été choisis au cours de la première phase de Proteker (triangles rouges). Des thermo-enregistreurs et des placettes de colonisation ont été installés sur tous ces sites. Pour mieux les caractériser, l'exploration des zones plus profondes autour des sites a été faite au moyen de chalutages à 50 et 100 m de profondeur et par observations directes grâce à un ROV. Les dix autres sites (triangles bleus) ont permis de valider la représentativité des sites choisis.

## Port-Christmas

Ce site, à l'extrême nord de la grande île, est abrité dans la baie de l'Oiseau; il est comparable à celui de la baie d'Audierne, au sud, mais plus calme. Les *Macrocystis* y forment aussi des forêts, mais on n'observe pas (ou très peu) de pieds arrachés. Les peuplements des tombants ont la particularité d'héberger, de manière abondante parfois, la gorgone *Onogorgia nodosa*. On y rencontre souvent des représentants d'une autre famille de poissons des glaces, les Channichthyidae.

## Ilot des Trois Bergers

Cet ilot est à vue de Port Couvreur, dans le Bras de la Fonderie. Il présente des tombants verticaux descendant presque sans interruption jusqu'à 35-40 m. Ils sont couverts d'une faune diversifiée, mais moins que les sites de la baie du Morbihan. C'est un des sites où l'on observe le plus facilement des oursins crayons (*Ctenocidaris nutrix*) et d'abondants spécimens de l'étoile de mer géante *Labidiaster annulatus*. Les températures mesurées diffèrent de celles des autres sites par les très grandes variations journalières (plus de 1 °C) observées trois années de suite au cours du réchauffement estival.



## Fjord des Portes Noires

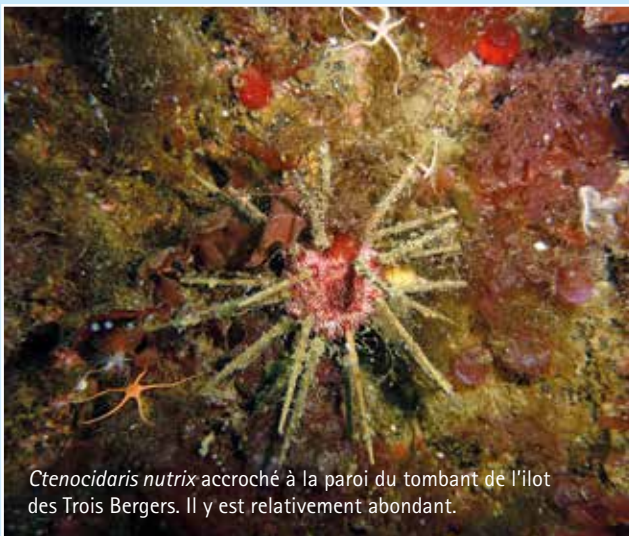
Ce site a été installé au delà des seuils du fjord. Celui-ci recueille l'eau douce des rivières et est très affecté par la fonte annuelle des glaces. Les mesures de salinité effectuées au cours de l'été 2014-2015 révèlent une couche dessalée sur les dix premiers mètres, où la température passe de 3,1 °C à 2,9 °C. La sédimentation y est intense et l'eau souvent chargée de particules. Il y a relativement moins de *Macrocystis*. Les fonds et les parois sont très vaseux. La grande moule striée *Alaucomya ater* est attachée comme sur la majorité des éboulis. On y trouve beaucoup d'oursins (*Sterechinus diadema*) et plusieurs espèces d'holothuries dendrochirotes ainsi que l'astérie *Glabraster antarctica*.

## Iles du Prince de Monaco

Ce site, situé dans la baie d'Audierne, ouverte vers le large, sur la côte sud de la grande île, représente la situation la plus exposée. Il est caractérisé par une forêt de *Macrocystis* bien développée. L'eau y est claire, souvent agitée. C'est le site où les pieds de *Macrocystis* arrachés par les tempêtes et flottant au-dessus du fond sont le plus souvent observés. La densité des peuplements est moindre que dans les sites plus abrités (baie de l'Oiseau, baie du Morbihan). Des algues filamenteuses (*Desmarestia chordalis*) peuvent avoir un développement saisonnier rapide et suffisamment important pour recouvrir de très grandes surfaces, ce qui rend difficile la récupération de matériel après un an d'immersion.

## Ilot Channer

Cet ilot, à vue de Port-aux-Français, a été choisi car il se trouve sur la route du courant entrant dans la baie du Morbihan. Pas de grand tombant, mais un chaos de blocs descendant progressivement vers une fosse à fond boueux. Les forêts de *Macrocystis* ressemblent à celles des sites de mer ouverte.



*Ctenocidaris nutrix* accroché à la paroi du tombant de l'ilot des Trois Bergers. Il y est relativement abondant.

## Ile Suhm

Le site de Suhm est sur la route du courant sortant de la baie du Morbihan. Il a été installé sur un tombant relativement abrité, très riche en éponges et en tuniciers. Il est plus éloigné du fond que les deux précédents, le tombant se poursuivant sur une vingtaine de mètres. La couverture (faune et flore) est spectaculaire et se distingue des autres sites par sa diversité et la densité des peuplements (beaucoup d'hydriaires, dont des *Tubularia* abondantes, d'ascidies *Cnemidocarpa*, *Ascidia*, *Sycozoa*, *Aplidium*, d'éponges *Clathria*, *Latrunculia*). C'est le site où la colonisation des placettes a été la plus rapide.



*Nacella kerguelensis* sur une fronde de *Macrocystis* de la baie du Hopeful. La coquille est entièrement colonisée par des ascidies, des bryozoaires et des algues rouges.

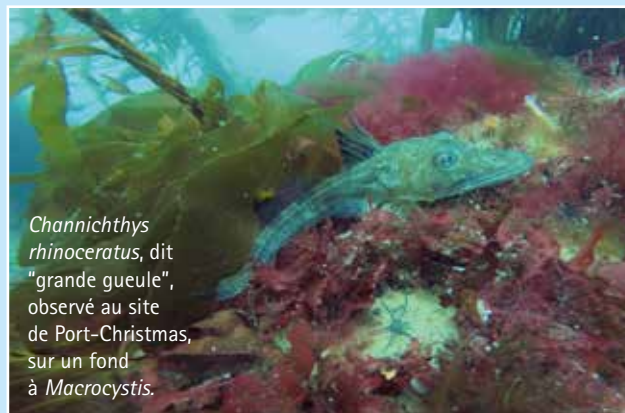


Les *Macrocystis* sont souvent le support de ces holothuries dendrochirotes blanches *Pentactella laevigata*.

## Ile Haute

L'Ile Haute est située dans le fond de la baie du Morbihan. Des moutons corses y ont été introduits en 1957 et éradiqués en 2012. Le site de suivi se trouve sur la route des embarcations qui abordaient systématiquement cette île, mais il ne présente pas de signe d'anthropisation. À petite profondeur, l'herbier d'algues brunes géantes est très développé. Les pieds sont plus clairsemés à mesure qu'on va en profondeur et surtout les stipes et les frondes sont très souvent couchés sur un fond vaseux. De très nombreuses holothuries *Pentactella laevigata* sont fixées aux stipes comme aux frondes, tentacules déployés pour capter une nourriture abondante (plancton et particules en suspension).

La colonisation des placettes s'est révélée relativement lente au cours des premières années, ce qui a surpris étant donné la très épaisse (plus d'un décimètre) couche d'organismes (éponges, bryozoaires, anémones, hydriaires, tuniciers, échinodermes) qui recouvre la roche, eux-mêmes servant de support ou d'abri à des annélides ou des mollusques.



*Channichthys rhinoceros*, dit "grande gueule", observé au site de Port-Christmas, sur un fond à *Macrocystis*.

## Ile Longue

L'Ile Longue a abrité un élevage extensif de 3 500 moutons Bizet du Cantal de 1950 à 2012. Le site est situé face à la presqu'île Jeanne d'Arc, dans la passe de Buenos-Aires, c'est-à-dire du côté opposé au trafic maritime engendré par l'élevage. Le paysage sous-marin est semblable à celui du site de l'Ile Haute, avec pour principale différence une plus grande abondance (en quantité et en diversité) d'éponges, en particulier dans les éboulis et les grottes à la base des tombants qui servent aussi d'abri à des poissons des glaces de la famille des Nototheniidae.



Placettes de colonisation : au moment de l'installation à l'îlot Channer (à gauche) et après un an d'immersion à l'île Longue (à droite). De nombreux organismes (algues, ascidies, éponges, bryozoaires) se sont installés.

en place un observatoire marin pluridisciplinaire collectant mesures océanographiques, cartographie benthique, analyses génétiques, écophysiologicals, isotopiques et écologiques. Outre l'inventaire et le suivi écologique de la biodiversité, il a aussi pour ambition de fournir des critères scientifiques aux gestionnaires en charge des politiques de protection et de conservation.

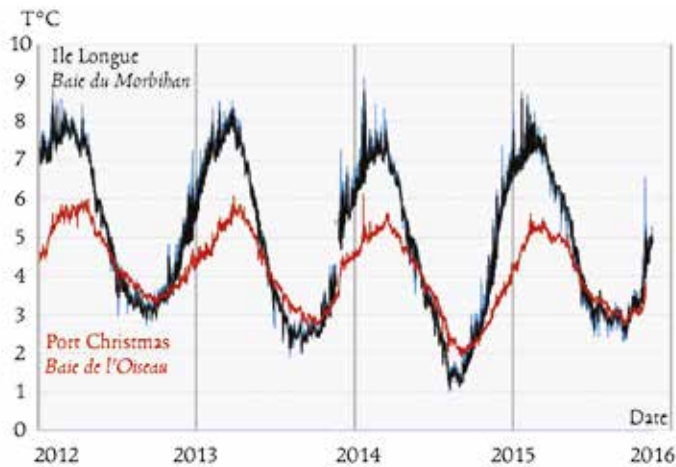
### Un programme d'observation durable

Les trois premières campagnes d'été menées à bord de *La Curieuse* entre 2011 et 2014 avaient pour objectif de revisiter les sites déjà explorés au cours de précédents programmes. Le choix des sites obéit à deux impératifs : ils doivent non seulement être représentatifs d'habitats subantarctiques, mais aussi être facilement accessibles. En effet, ils doivent être suffisamment protégés pour que le matériel immergé soit en sécurité et que les gestionnaires de la réserve naturelle nationale des Terres australes puissent en assurer le suivi. L'appareillage de mesure est installé à 5 m et à 15 m de profondeur et des placettes de colonisation sont disposées à 10 m. Elles sont composées de huit carreaux d'argile crue de 20 sur 20 cm fixés sur des parois de tombants rocheux afin d'étudier les organismes qui s'y fixent au cours du temps. Chaque année, un carreau est récupéré. La faune et la flore fixées sont récoltées, dénombrées et identifiées ; elles sont ensuite préparées pour l'analyse des ADN et ARN présents, ce qui permettra de détecter les très petits organismes et les microbes. Le carreau prélevé est remplacé par un nouveau. L'année suivante, un carreau de deux ans et le "nouveau carreau" d'un an seront traités de la même façon. Cela révélera à la fois l'évolution de la colonisation après deux années d'immersion ainsi que la ressemblance (ou la différence) à la colonisation originale. Répéter ces opérations durant plusieurs années donnera une image de la colonisation de chaque site et indiquera s'il est ouvert à des apports externes ou pas, car un site qui dépend de l'autorecrutement est moins résilient et donc plus vulnérable.



À ce jour, la température est déjà mesurée en continu, à raison d'une prise par heure. D'autres capteurs seront installés au cours de la deuxième phase de Proteker, qui a pour objectifs le suivi des stations de référence (relevé des instruments installés, observations et prélèvements associés aux placettes de colonisation), la cartographie des habitats benthiques associés (sonar, ROV et prélèvements en plongée) et le renforcement des observations et des analyses (instrumentation et caractérisations génétiques, trophiques et écologiques de taxons indicateurs). Les résultats attendus doivent permettre de produire des modèles de distribution de la biodiversité marine côtière aux Kerguelen et d'en évaluer la sensibilité face aux changements environnementaux prévus.

Entretenir et développer cet observatoire sous-marin fera de l'archipel des Kerguelen une sentinelle à l'égard des effets des changements climatiques sur les îles subantarctiques. À ce titre il fait partie de la Zone atelier antarctique et subantarctique (ZATA) de l'institut Écologie



Suivi des températures (une mesure par heure) de l'eau de mer à 5 m (en bleu) et à 15 m (en noir) de profondeur dans la baie du Morbihan et à l'extérieur, du 6 janvier 2012 au 9 décembre 2015. Les valeurs maximales sont relativement constantes au cours des années, tandis que les minimales montrent des variations de plus d'un degré Celsius entre années successives. Les résultats sont mis en ligne sur le site du programme et actualisés après chaque campagne : [www.proteker.net/~Thermorecorders-.html](http://www.proteker.net/~Thermorecorders-.html).

et Environnement du CNRS (INEE). Il appartient aussi au groupe d'action ANTOS (*Antarctic Near-shore and Terrestrial Observing System*) du SCAR (*Scientific Committee on Antarctic Research*) dont le but est d'établir un système intégré et coordonné de surveillance de l'environnement transrégional et transcontinental. Ceci permettra d'identifier et de suivre le changement environnemental et sa variabilité à des échelles biologiquement pertinentes et d'utiliser cette information pour des études en sciences biologiques, physiques, et de la Terre. 🌸

Nous sommes reconnaissants à l'IPEV (programme 1044), aux TAAF et à la RNN TAF pour leur soutien. Nous remercions aussi les équipages de *La Curieuse* et du *Commerson* sans qui l'observatoire sous-marin des Kerguelen n'aurait pas pu être installé.

### Glossaire

**Arts traînants** : les engins de pêche traînés par des navires : différents types de dragues ou de chaluts, tamis. On qualifie d'arts dormants les engins de pêche posés au fond ou en pleine eau, comme les filets, les casiers, les lignes ou les palangres.

**Benthos** : l'ensemble des organismes aquatiques (faune et flore) vivant sur ou dans le fond des mers et océans, des lacs et des rivières.

**Front océanique** : zone de discontinuité entre deux masses d'eau ayant des propriétés physiques (température, salinité) différentes. Ces fronts jouent le rôle de frontière entre des zones où les températures, la salinité et la concentration en nutriments sont différentes. Ils abritent des espèces animales et végétales distinctes.

## Les moulières à *Mytilus* et à *Aulacomya*

Deux espèces de Mytilidae habitent les côtes de l'archipel : *Mytilus edulis*, la moule bleue et *Aulacomya ater*, la moule striée. Ces peuplements s'observent en mode calme ou abrité, particulièrement pour *M. edulis* dont la présence indique souvent la proximité d'eau douce ou dessalée. Typiquement, le peuplement à *Aulacomya*, après s'être mêlé dans les premiers mètres au peuplement à *Mytilus*, remplace totalement ce dernier au delà de 5 m environ. Il peut localement se développer jusqu'à 70 m et plus. Enfin, il existe des moulières "pures" à *Mytilus edulis*, notamment dans le fjord Henri Bossière où un véritable récif de moules de 300 m de longueur sur 10-20 m de largeur barre quasi totalement le fjord. Les moules, installées sur la vase sableuse, fixées les unes aux autres par grappes, y forment un peuplement très dense. Elles sont vivantes sur une épaisseur de 20 à 30 cm. Au-dessous, on ne trouve que des coquilles mortes enduites de vase noire. D'autres "moulières de seuil" existent à l'île aux Moules et à l'entrée du fjord Larose. Certaines baies, comme la baie des Swains, sur la côte sud, sont tapissées de moules entre à peu près 2 et 100 m de profondeur (*Aulacomya*). Ces moulières créent un peuplement particulier, constitué, entre autres, du seul crabe des Kerguelen, *Halicarcinus planatus*, du gastéropode prédateur *Trophon albolabratu*s, de très nombreux isopodes et amphipodes. Il y a parfois accumulation de sédiments entre les moules et de nombreuses algues se développent sur leurs valves : on observe alors un peuplement d'accompagnement très enrichi à la fois par la faune de fonds meubles et par celle des algues photophiles.

Moules bleues (*Mytilus edulis*) et moules striées (*Aulacomya ater*) de la Baie des Swains, au sud de la grande île.



### Pour en savoir plus

- > **Duchêne J.-C., 1989** – *Kerguelen: Recherches au bout du monde*. Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises, mission de recherche, Paris.
- > **Duhamel G. et Welsford D. (Eds.), 2011** – *The Kerguelen Plateau, Marine Ecosystem and Fisheries*, Société Française d'Ichtyologie, Paris.
- > **Park Y.-H., Durand I., Kestenare E., Rougier G., Zhou M., d'Ovidio F., Cotte C. et Lee J.-H., 2014** – "Polar Front around the Kerguelen Islands : An up to-date determination and associated circulation of surface/subsurface waters", *Journal of Geophysical Research Oceans*, vol. 119, p. 6575-6592 (Doi:10.1002/2014JC010061).