

de Claude. Le groupe de recherche de Francesco De Martini, de l'Université de Rome I «La Sapienza», a expérimenté avec succès cette méthode en 1997. La paire auxiliaire de photons était intriquée en fonction des positions des photons : le faisceau engendrant le photon A était coupé en deux par une lame séparatrice et envoyé vers deux parties différentes du dispositif de Claude, les deux alternatives étant liées par intrication à une découpe similaire du photon B de Jean. L'état à téléporter était également porté par le photon A de Claude (ici, son état de polarisation). Avec un seul photon jouant les deux rôles, la détection des quatre états de Bell possibles devient une simple mesure standard à une particule : il ne s'agit plus que de détecter le photon de Claude dans un des deux lieux possibles, avec une des deux polarisations possibles. L'inconvénient de ce dispositif tient à ce que, si l'on donnait à Claude un état X inconnu et distinct à téléporter, il faudrait qu'elle transfère cet état à la polarisation de son photon A.

La polarisation d'un photon, caractéristique qui a fait l'objet de la téléportation dans les expériences d'Innsbruck et de Rome, est une quantité discrète, en ce sens que tout état de polarisation est une superposition de seulement deux états discrets, les polarisations horizontale et verticale. Le champ électromagnétique associé à la lumière présente également des caractéristiques continues qui peuvent être décrites comme la superposition d'un nombre infini d'états élémentaires. Par exemple, un faisceau lumineux peut être «comprimé», ce qui signifie qu'on peut obtenir une très grande précision ou absence de bruit pour une de ses caractéristiques, mais au détriment de la précision d'une autre caractéristique (toujours Heisenberg). En 1998, le groupe de recherche de Jeffrey Kimble, à l'Institut de technologie de Californie, a téléporté un tel état comprimé d'un faisceau lumineux à un autre, mettant ainsi en évidence le phénomène de téléportation appliqué à une variable continue.

Ces expériences, aussi remarquables soient-elles, n'ont pas résolu le problème de la téléportation quantique de gros objets, qui se heurte à deux difficultés majeures. Tout d'abord, il faut une paire intriquée d'objets de la même sorte. Par ailleurs, l'objet à téléporter et les paires intriquées doivent être suffisamment isolées de leur environnement. En cas

de fuite d'information de l'environnement ou vers l'environnement par des interactions isolées, les états quantiques des objets se dégradent : ce processus est la décohérence. On imagine mal comment parvenir à isoler ainsi totalement un gros appareillage, et encore moins une créature vivante qui respire de l'air et qui rayonne de la chaleur. Mais qui peut prédire la rapidité des progrès scientifiques à venir?

Nous pourrions certainement utiliser les technologies existantes pour téléporter des états élémentaires, comme ceux des photons dans nos expériences, sur des distances de quelques kilomètres, peut-être même jusqu'à des satellites. La technologie de téléportation d'états d'atomes individuels est aujourd'hui accessible : le groupe de recherche de Serge Haroche, à l'École normale supérieure de Paris, a mis en évidence l'intrication d'atomes. On peut raisonnablement s'attendre à observer l'intrication de molécules et à réaliser leur téléportation d'ici une dizaine d'années.

Il est probable que la téléportation sera d'abord utilisée dans le domaine de l'informatique quantique, où la notion ordinaire d'élément binaire (les 0 et les 1) est généralisée à des bits quantiques (ou *qubits*), qui sont des superpositions et des intrications de 0 et de 1. La téléportation pourrait servir à transférer de l'information quantique entre des processeurs quantiques. Les téléporteurs quantiques pourraient servir d'éléments de base à la construction d'un ordinateur quantique. La bande dessinée de la page 41 illustre une situation intéressante où la combinaison de la téléportation et de l'informatique quantique présente un avantage : tout se passe pratiquement comme si on avait reçu l'information téléportée instantanément, sans avoir à attendre qu'elle arrive par les voies normales.

Le débat Bohr-Einstein

La mécanique quantique est certainement l'une des théories physiques les plus élaborées et les plus surprenantes. Les problèmes qu'elle pose à notre intuition du monde lui a valu d'être sévèrement critiquée par Einstein. Ce dernier soutenait que la physique devait essayer de décrire la réalité indépendamment de son observation, mais il réalisait néanmoins que nous sommes confrontés à des problèmes inextricables dès que nous essayons de coller une telle réalité phy-

sique aux membres d'une paire intriquée. Son illustre collègue, le physicien danois Niels Bohr, insistait sur la nécessité de prendre en compte le système entier (dans le cas d'une paire intriquée, l'ensemble formé par les deux particules). Ce que préconisait Einstein, à savoir la description de l'état réel indépendant de chaque particule, est dépourvu de sens dans le cas d'un système quantique intriqué.

La téléportation quantique descend directement des expériences de pensée débattues par Einstein et Bohr. Quand nous analysons l'expérience, nous nous heurterions à toutes sortes de problèmes si nous commençons à nous interroger sur la nature et sur les propriétés des particules individuelles intriquées. Nous devons analyser avec prudence la signification du terme «avoir» une polarisation. Nous sommes nécessairement amenés à conclure que les seules choses que nous pouvons examiner sont des résultats expérimentaux obtenus à l'aide de mesures. Dans notre mesure de polarisation, le signal du détecteur nous permet de construire une image mentale où le photon «avait» effectivement une polarisation donnée à l'instant de la mesure. Mais nous ne devons pas perdre de vue que cela est une vue de l'esprit. Elle n'est valable que si nous parlons de cette expérience en particulier, et il ne faut pas la transposer à la légère à une autre situation.

En reprenant la pensée de Bohr, je dirais que nous comprenons la mécanique quantique si nous réalisons que la science ne décrit pas la nature telle qu'elle est, mais exprime plutôt ce que nous pouvons en dire. Aujourd'hui, la principale utilité des expériences de physique fondamentale telles que la téléportation est de nous aider à mieux comprendre notre monde quantique.

Anton ZEILINGER travaille à l'Institut de physique expérimentale de Vienne.

Charles H. BENNETT, *Quantum Information and Computation*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 10, pp. 24-31, octobre 1995.

D. BOUWMEESTER, J.W. PAN, K. MATTLE, M. EIBL, H. WEINFURTER et A. ZEILINGER, *Experimental Quantum Teleportation*, in *Nature*, vol. 390, pp. 575-579, 11 décembre 1997.

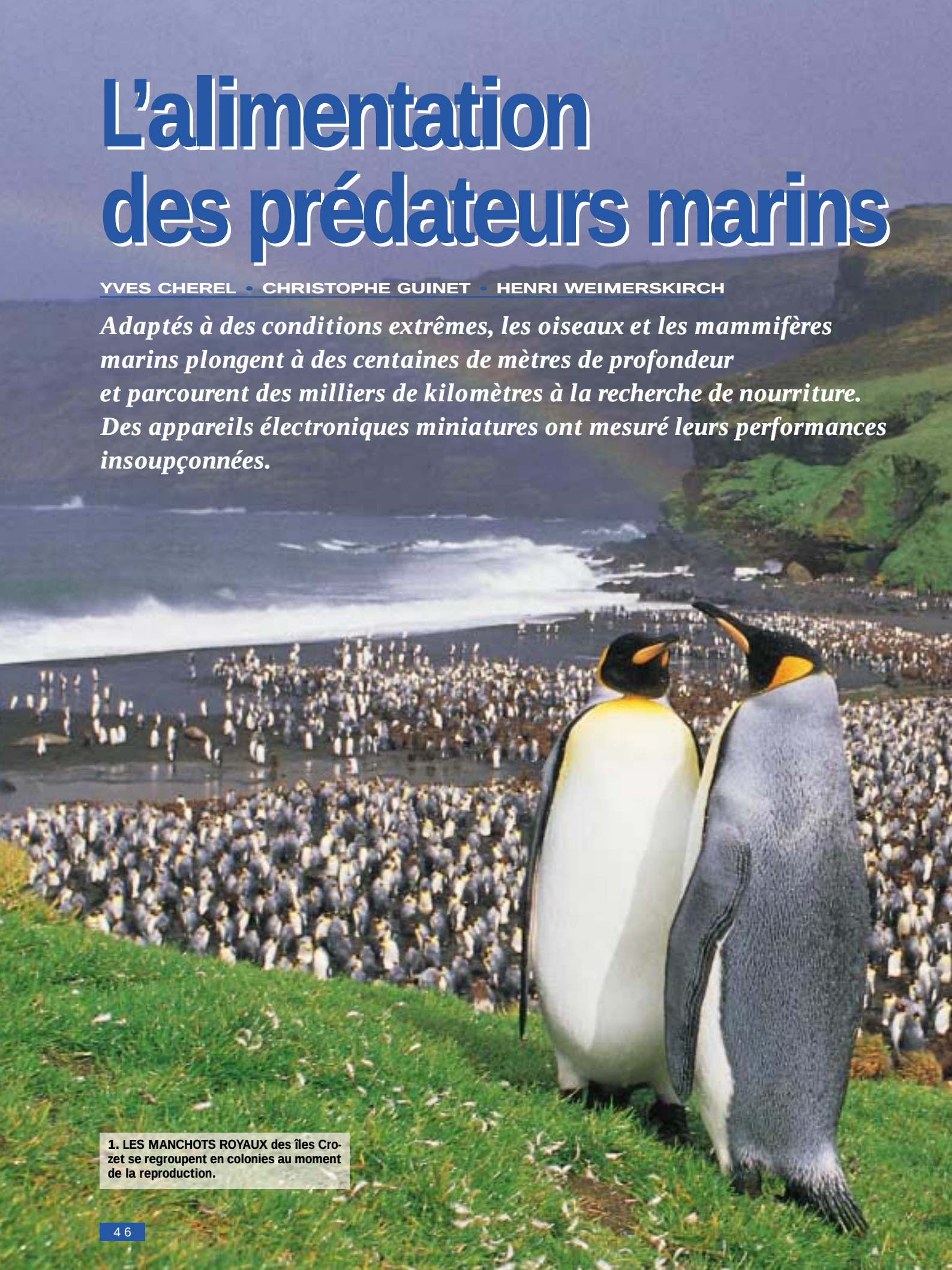
Quantum Information, numéro spécial de *Physics World*, vol. 11, n° 3, mars 1998.

A.J. LEGGETT, *Quantum Theory : Weird and Wonderful*, in *Physics World*, vol. 12, n° 12, pp. 73-77, décembre 1999.

L'alimentation des prédateurs marins

YVES CHEREL • CHRISTOPHE GUINET • HENRI WEIMERSKIRCH

Adaptés à des conditions extrêmes, les oiseaux et les mammifères marins plongent à des centaines de mètres de profondeur et parcourent des milliers de kilomètres à la recherche de nourriture. Des appareils électroniques miniatures ont mesuré leurs performances insoupçonnées.

A large colony of King penguins is gathered on a grassy hill overlooking the ocean. Two penguins are in the foreground, facing each other. The background shows a vast expanse of penguins stretching down the hill towards the water. The sky is overcast.

1. LES MANCHOTS ROYAUX des îles Crozet se regroupent en colonies au moment de la reproduction.

Ses ailes de géant déployées, un grand albatros quitte son nid pour un voyage alimentaire qui durera quatre semaines pendant lesquelles il parcourra plus de 15 000 kilomètres avant de relayer son partenaire, resté pour couvrir, dans l'archipel Crozet au Sud de l'océan Indien. À quelques centaines de kilomètres, des manchots royaux adultes plongent en apnée pendant cinq minutes jusqu'à 300 mètres de profondeur pour rapporter de la nourriture à leurs poussins.

Le suivi de ces performances exceptionnelles n'est possible que depuis une dizaine d'années, grâce à la miniaturisation et au perfectionnement d'appareils électroniques devenus suffisamment légers et peu encombrants pour être fixés sur les oiseaux et les mammifères marins : les stratégies alimentaires des albatros, des manchots, des phoques et des otaries sont pour la première fois mesurables. Où vont les prédateurs marins pour se nourrir ? Que mangent-ils ? Comment pêchent-ils ? Nous pouvons aujourd'hui répondre à ces questions et les résultats obte-

nus montrent que nous avons sous-estimé les capacités de ces animaux.

Grâce au soutien logistique et financier de l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires de Brest, nous étudions les prédateurs marins des Terres australes et antarctiques françaises (les îles Crozet, Kerguelen, Saint-Paul et Amsterdam, ainsi que la Terre Adélie, sur le continent antarctique) situées dans l'océan Indien (voir la figure 2). Sur ces terres préservées, d'importantes colonies de prédateurs se reproduisent : leur grande taille, leur caractère peu farouche et l'accessibilité des colonies ont fait de certains d'entre eux des modèles de choix pour l'étude des stratégies d'alimentation des oiseaux et mammifères marins.

Des oiseaux long-courriers

Les oiseaux marins ne reviennent à terre que pour se reproduire ; ils passent donc l'essentiel de leur vie loin des côtes, en dehors de leur cycle reproducteur ou pendant celui-ci, entre deux relais d'incubation ou de garde des poussins. Les derniers

modèles de balises Argos pèsent environ 20 grammes : ils permettent aujourd'hui le suivi des déplacements en mer d'oiseaux de taille moyenne dont la masse corporelle est de l'ordre du kilogramme. Chaque balise émet un signal spécifique reconnu par des satellites qui transmettent les informations au centre de Toulouse. Celui-ci transmet à son tour l'information aux laboratoires de recherche en France, environ une heure après avoir localisé l'animal : on visualise ainsi jour après jour les voyages alimentaires de chaque individu sur un écran d'ordinateur.

Nos travaux sur les pétrels à menton blanc (*Procellaria aequinoctialis*) nichant à Crozet révèlent l'étendue de la surface océanique exploitée par les oiseaux : pendant l'incubation, c'est-à-dire à la fin du printemps, les adultes prospectent les eaux subtropicales jusqu'aux côtes de l'Afrique du Sud, à 3 500 kilomètres au Nord-Ouest de leur lieu de nidification. En revanche, pendant la période d'élevage du poussin, en été, ces oiseaux alternent des voyages alimentaires courts et longs : les premiers sont favorables au poussin, qui



est souvent nourri, mais défavorables aux adultes, qui consomment leurs réserves énergétiques ; celles-ci sont restaurées au cours des voyages longs (voir la figure 6). Les pétrels à menton blanc capturent des poissons sur le plateau de Crozet pendant les trajets courts, et pêchent, pendant les trajets longs, du krill antarctique (des bancs de petits crustacés de l'espèce *Euphausia superba*) que le retrait progressif de la glace de mer rend accessible à des milliers de kilomètres au Sud. Ces différentes manières d'une même espèce d'exploiter l'environnement marin illustrent le compromis adaptatif entre l'investissement parental et la condition physique, donc la survie, des adultes reproducteurs.

Lors de leurs voyages alimentaires, les albatros, les pétrels et les manchots effectuent soit des trajets directs vers un endroit précis où ils passent l'essentiel de leur temps avant de retourner rapidement à la colonie, soit des trajets en boucle qui ne privilégient aucune zone particulière. Ils utilisent pré-

férentiellement les endroits de forte productivité marine tels que les bords des plateaux continentaux et les fronts océaniques. Lors de leurs déplacements, les oiseaux tiennent également compte de la météorologie. Les grands albatros (*Diomedea exulans*) de Crozet volent le plus souvent par vent arrière ou trois quarts arrière. Ils parcourent ainsi jusqu'à plus de 900 kilomètres par jour sans dépenser beaucoup d'énergie. Les albatros sont également sensibles au nyctémère, c'est-à-dire à l'alternance du jour et de la nuit. Ils volent surtout le jour et les nuits de pleine lune, et profitent des nuits sombres pour se reposer.

Un appétit d'oiseau

Le suivi satellitaire nous indique le trajet des oiseaux, mais ne nous renseigne pas sur les rythmes d'alimentation et sur les quantités de proies ingérées. Rory Wilson, de l'Institut d'océanographie de Kiel, a mis au point des capteurs électroniques qui enregistrent la température de l'estomac (voir la figure 4). Les oiseaux sont homéothermes, c'est-à-dire que la température de leur corps est maintenue constante quelles que soient les conditions extérieures, alors que leurs proies, hétérothermes, sont à la température de l'eau de mer dans laquelle elles vivent. Ainsi, à chaque ingestion de proies, la température stomacale du prédateur diminue. La durée

du retour à la température initiale est proportionnelle à la masse des proies : grâce à la mesure de cette température stomacale, on détermine la quantité de nourriture ingérée.

Fixés à une patte, d'autres capteurs d'activité indiquent quand l'oiseau est posé ou en vol, et la température des masses d'eau prospectées. Toutefois, à la différence des balises Argos, ces appareils stockent les données dans une mémoire électronique sans les transmettre : l'animal équipé doit donc être recapturé, et la mémoire de l'appareil transmise à celle d'un ordinateur pour obtenir les informations enregistrées.

Avec, d'une part, ses trois mètres d'envergure pour une masse corporelle de huit à douze kilogrammes et, d'autre part, sa docilité, le grand albatros est l'animal le plus étudié à ce jour. Cette espèce se nourrit d'organismes de grande taille dont on mesure facilement le nombre et la masse. Pendant les trajets en boucle de plusieurs milliers de kilomètres au-dessus des eaux océaniques, les albatros capturent une quarantaine de proies, soit 10 à 15 kilogrammes ingérés (environ deux à trois kilogrammes par jour). En moyenne, ils restent 60 pour cent de leur temps en vol et se nourrissent majoritairement pendant la journée.

Les remarquables performances des oiseaux et des mammifères marins dépendent de leurs facultés de localisation et de capture des proies. Quel est le menu de ces prédateurs ? Deux écueils limitent sa détermination : d'une part, le retour des animaux à terre uniquement pour la reproduction restreint la collecte directe des proies à cette période de l'année ; d'autre part, les éléments recueillis, tels les contenus stomacaux ou les fèces, sont digérés. L'identification des proies n'est alors possible que par l'analyse des restes résistants à la digestion, tels les otolithes (des petites concrétions de calcaire logées dans l'oreille interne qui participent, chez les vertébrés, au sens de l'équilibre), les squelettes des poissons osseux, les béc cornés des céphalopodes et les carapaces des crustacés (voir la figure 3).

L'essentiel de l'alimentation des oiseaux et mammifères marins est constitué de poissons, de calmars et de crustacés. Autour du continent antarctique, le krill est la proie privilégiée des prédateurs, cependant, nous avons mis en évidence l'importance d'autres organismes dans le réseau alimentaire autour des archipels de Cro-



2. LES TERRES AUSTRALES ET ANTARCTIQUES FRANÇAISES, composées de la Terre-Adélie sur le continent antarctique, ainsi que des îles Crozet, Kerguelen, Amsterdam et Saint-Paul, abritent de nombreuses colonies de prédateurs marins tels les albatros.

zet et Kerguelen : ce réseau est dominé par d'autres espèces d'euphausiacés, par le crustacé amphipode *Themisto gaudichaudii* et par les poissons-lanternes (ces poissons océaniques de la famille des myctophidés émettent de la lumière par des organes nommés photophores disposés le long de leur corps). Ces derniers, dont l'importance n'est reconnue que depuis une dizaine d'années, constituent environ le tiers des cinq millions de tonnes de ressources marines consommées annuellement par les communautés d'oiseaux et de mammifères des îles Crozet et Kerguelen.

Nous avons également montré que les grands albatros exploitent une ressource originale de l'océan Austral : les calmars adultes de la famille des *Onychoteuthidae*, qui meurent après s'être reproduits ; moins denses que l'eau, ils remontent alors progressivement à la surface et deviennent ainsi accessibles aux albatros. Le suivi satellitaire a montré qu'une zone où les oiseaux concentrent leur activité de recherche alimentaire, sur le bord Sud-Est du plateau qui entoure l'archipel Crozet, est une zone de reproduction privilégiée de ces calmars.

Des plongeurs émérites

Alors que les albatros et les pétrels se nourrissent en surface, les manchots, les pingouins, les cormorans et les mammifères marins plongent pour capturer leurs proies. Leur comportement de pêche échappe ainsi à l'observation visuelle, et les rares données disponibles émanaient d'individus pris

dans des filets ou, pour les cachalots, dans des câbles sous-marins.

Dans les années 1980, Gerald Kooyman, de l'Institut océanographique Scripps de San Diego, a mis au point et utilisé des enregistreurs électroniques de plongée pour les phoques et pour les otaries, puis pour les manchots. Ces appareils sont dotés d'un capteur de pression qui indique la profondeur et, parfois, d'une turbine qui mesure la vitesse de nage des animaux. Les enregistreurs sont le plus souvent collés sur le dos des oiseaux et des mammifères marins, qui doivent être recapturés afin de récupérer les appareils : ces derniers livrent alors des informations telles que la profondeur de chaque plongée, sa durée, le temps de récupération en surface et les vitesses descendante et ascendante. Plus la fréquence d'acquisition des données est élevée, plus les caractéristiques des plongées sont définies avec précision.

Yann Tremblay, du Centre d'études biologiques de Chizé, a ainsi mis en évidence deux nouveaux types de comportement alimentaire chez les manchots : d'une part, les plongées synchrones de plusieurs individus indiquent qu'ils sont capables de chasser en groupe et, ainsi, de coopérer pour optimiser la capture de proies (voir *Les manchots*, par Yann Tremblay et Yves Cherel, rubrique « Perspectives scientifiques », *Pour la Science*, octobre 1998) ; d'autre part, ces oiseaux effectuent aussi bien des plongées pélagiques, en pleine eau, que des plongées benthiques, c'est-à-dire juste au-dessus du fond.

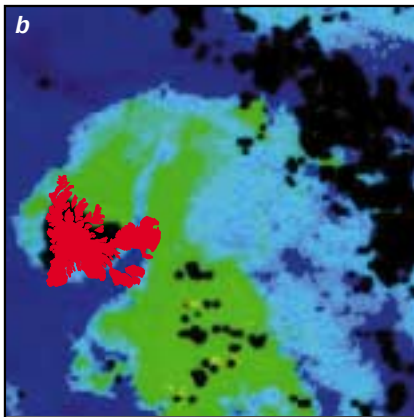
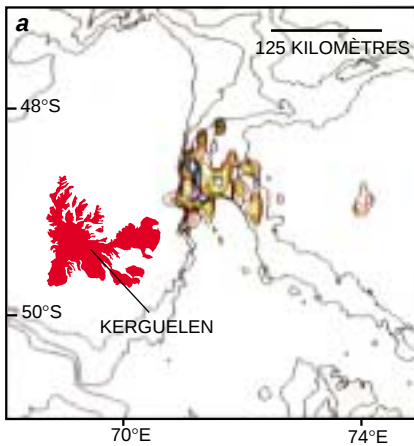


3. LES OTOLITHES sont des petites concrétions calcaires, qui, dans l'oreille interne, participent du sens de l'équilibre. Ils résistent à la digestion et renseignent sur le régime alimentaire des prédateurs marins dont on analyse le contenu de l'estomac.



4. LES GRANDS ALBATROS se prêtent de bonne grâce à l'étude de leurs stratégies alimentaires : ils sont suivis en vol grâce à des balises Argos (flèche à gauche) fixées sur leur plumage (à droite, en haut). De plus, des sondes stomacales enregistrent le moment de l'inges-

tion et la quantité de proies avalées. Pour s'assurer de la présence de ces sondes stomacales qui sont parfois régurgitées, on utilise un détecteur de métal (à droite, au centre). L'état nutritionnel de ces oiseaux est suivi par des pesées régulières (à droite, en bas).



5. LES SITES DE PÊCHE des otaries à fourrure (*en haut*) ont été identifiés à l'aide de balises Argos et d'enregistreurs de plongée (les lignes de couleurs indiquent, du rouge vers le bleu, la densité croissante de ces animaux). L'imagerie satellitaire (*en bas*) montre qu'ils choisissent des zones riches en chlorophylle (*en vert*) dues à la présence de plancton végétal : celui-ci est ingéré par le plancton animal que capture les poissons-lanternes myctophidés, les proies favorites des otaries.



6. LES PÉTRELS À MENTON BLANC (a), qui nichent sur l'archipel de Crozet, adoptent des trajets alimentaires différents selon que leurs œufs ont éclos ou non : lors de l'incubation, ils prospectent les eaux au large de l'Afrique du Sud, alors que pendant l'élevage du poussin, ils alternent les trajets courts, favorables au poussin, autour de l'archipel et les trajets longs vers le Sud, pour reconstituer leurs réserves énergétiques (b).

Les capacités de plongée des oiseaux et des mammifères marins ont été largement sous-estimées. Par exemple, le manchot empereur (*Aptenodytes forsteri*), la plus grande espèce de manchots, plonge couramment à 400 mètres de profondeur pendant quatre à cinq minutes. Les meilleures performances connues sont celles des deux espèces d'éléphants de mer qui se reproduisent en Californie (*Mirounga angustirostris*) et dans l'Océan austral (*Mirounga leonina*) : lors de voyages alimentaires qui durent plusieurs mois, ces phocidés passent plus de 90 pour cent de leur temps submergés, et ne remontent à la surface que pour respirer. Ils effectuent en moyenne 2,5 plongées par heure, entre 250 et 600 mètres de profondeur, pendant 15 à 40 minutes, et le temps moyen passé en surface entre deux plongées est seulement de deux minutes.

L'équipe de Burney Le Boeuf, de l'Université de Californie à Santa Cruz, a montré que les deux sexes de l'espèce Nord-américaine prospectent des zones différentes et très éloignées des îles où ils se reproduisent : les mâles migrent de la Californie en remontant vers le Nord le long du talus continental jusqu'aux îles Aléoutiennes, où ils effectuent majoritairement des plongées benthiques. En revanche, les femelles plongent au-dessus des grands fonds, dans des zones très étendues du nord de l'océan Pacifique.

Les difficultés techniques et logistiques liées au mode de vie exclusivement marin ont limité les travaux sur les cétacés. Toutefois, une étude canadienne a révélé les capacités de deux baleines à bec : ces hyperoodons boréaux (*Hyperoodon ampullatus*) plongent régulièrement dans un canyon sous-marin à plus

de 800 mètres de profondeur et atteignent 1 450 mètres lors d'une plongée de 70 minutes ; ces animaux ont des habitudes de plongée supérieures à celles des cachalots qui s'alimentent en routine «seulement» de 400 à 600 mètres de profondeur.

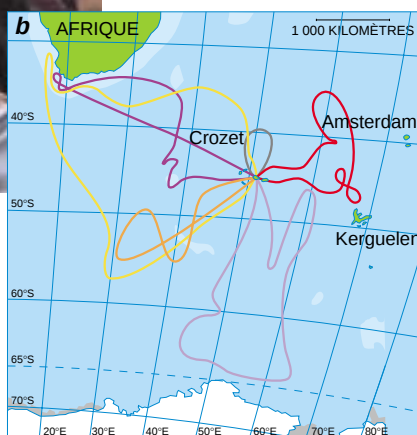
Par ailleurs, la mise au point de systèmes vidéo miniaturisés nous renseigne également sur l'écologie des prédateurs marins. Par exemple, les éléphants de mer, les dauphins et les phoques arrêtent de nager lorsqu'ils atteignent une certaine profondeur, et continuent alors la descente passivement pendant le reste de la plongée : ils réduisent ainsi leur dépense énergétique. Les images vidéo ont également détaillé un comportement insolite du phoque de Weddell (*Leptonychotes weddellii*) en Antarctique. En expulsant brutalement de l'air par ses narines dans les fissures de la glace, il chasse les poissons qui y sont réfugiés.

Des stratégies inconnues

Les capteurs électroniques ont d'abord permis la description des comportements de recherche alimentaire des prédateurs. Aujourd'hui, les résultats sont complétés par les méthodes classiques de travail dans les colonies de reproduction et par l'imagerie satellitaire : ils permettent ainsi une approche pluridisciplinaire et intégrative des interactions entre les prédateurs et le milieu marin qu'ils prospectent.

En collaboration avec Guy Duhamel, du Laboratoire d'ichtyologie du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, et Charles-André Bost, du Centre d'écologie et de physiologie énergétiques de Strasbourg, nous avons comparé, à Kerguelen, le comportement alimentaire des otaries à fourrure (*Arctocephalus gazella*) et des manchots royaux (*Aptenodytes patagonicus*) avec celui des poissons myctophidés. Grâce à l'approche combinée d'études à terre pour équiper les animaux et de travaux en mer sur un navire océanographique, nous avons prélevé des poissons, après seulement quelques heures, là où les otaries et les manchots avaient été localisés par le système Argos et aux profondeurs indiquées par les enregistreurs de plongée embarqués.

Nous avons montré que ces animaux prédateurs utilisent des stratégies d'alimentation différentes et complémentaires pour exploiter les myctophidés. Les manchots royaux,





7. LES GORFOUS SAUTEURS (a), les albatros à bec jaune (b), les manchots royaux (c), les otaries à fourrure (d) et les éléphants de mer (e) dont on étudie le comportement alimentaire, sont également des auxiliaires océanographiques pour l'analyse des caractéristiques physiques et biologiques de l'océan Austral.

qui sont des prédateurs visuels, se nourrissent pendant la journée aux dépens de poissons regroupés en bancs serrés en profondeur, alors que les otaries femelles, plus aptes à voir la nuit et munies de vibrisses sensorielles, plongent exclusivement la nuit à de faibles profondeurs, où elles capturent les poissons qui migrent en surface pour se nourrir dès la nuit tombée.

Nous avons également reliés les techniques de pêche des prédateurs avec des paramètres d'océanographie physique, telles la bathymétrie et les températures de surface, et des paramètres biologiques, telles les données satellitaires de chlorophylle de surface et la répartition spatiale des myctophidés : nous avons ainsi déterminé les zones préférentielles d'alimentation des oiseaux et des otaries (voir la figure 5). Ces études nous renseignent sur la plasticité écologique des prédateurs selon les variations de leur environnement.

L'alliance de l'écologie et de l'électronique progressera encore dans les années à venir ; elle dépasse déjà l'étude des seuls oiseaux et mammifères marins. L'utilisation d'appareils miniaturisés et la détermination du régime alimentaire permet de collecter des informations sur la biologie des proies elles-mêmes : les prédateurs deviennent alors des bio-indicateurs des ressources marines (voir *Oiseaux de mer bio-indicateurs*, par Yves Cherel, Henri Weimerskirch, Christophe Guinet et Pierre Jouventin, *Pour la Science*, juillet 1995). Ils peuvent également recueillir

à moindre coût des informations précieuses en océanographie physique.

À partir des données acquises sur des grands albatros de Crozet équipés de balises Argos et d'enregistreurs de température à la patte, on a reconstitué une carte des températures de surface du sud de l'océan Indien, dans une zone où les mesures *in situ* nécessaires à la validation des données satellitaires sont rares et coûteuses à obtenir.

De même, par leur capacité de plongée et leurs longs voyages alimentaires, les éléphants de mer sont de bons auxiliaires pour échantillonner les paramètres physiques dans les 1 000 premiers mètres de la colonne d'eau, tels que la température, mais aussi, avec la mise au point de nouveaux capteurs, la salinité et la concentration en chlorophylle.

Les nouveaux moyens d'étude des prédateurs marins apportent des infor-

mations importantes pour leur conservation. Les populations d'albatros et de pétrels de l'hémisphère Sud déclinent, car les oiseaux se blessent avec les appâts des palangres, ces lignes de fond munies de cordelettes aux extrémités desquelles sont fixés des hameçons. Lors de la mise à l'eau des lignes, les palangriers tuent ainsi, chaque année, plusieurs dizaines de milliers d'oiseaux en haute mer et près des côtes. La localisation satellitaire indique les zones marines à protéger prioritairement. Elle met en évidence une fois de plus le besoin d'une législation internationale au-delà des eaux nationales et des zones d'intérêt économique qui ne couvrent souvent qu'une petite partie des zones d'alimentation des oiseaux. Ceux-ci sont protégés sur leurs zones terrestres de reproduction, mais pas en haute mer.

Yves CHEREL, Christophe GUINET et Henri WEIMERSKIRCH sont écologues au Centre d'études biologiques de Chizé, du CNRS (www.cebc.cnrs.fr).

R. GENTRY et G. KOOYMAN, *Fur Seals. Maternal Strategies on Land and at Sea*, Princeton University Press, 1986.

B. LE BŒUF et R. LAWS, *Elephants Seals. Population Ecology, Behavior and Physiology*, University of California Press, 1994.

R. WILSON, *Foraging Ecology*, in *The Penguins*, pp. 81-106, Oxford University Press, 1995.

G. ROBERTSON et R. GALES, *Albatross Biology and Conservation*, Surrey Beatty and Sons, 1998.

H. WEIMERSKIRCH, Y. CHEREL, F. CUENOT-CHAILLET et V. RIDOUX, *Alternative Foraging Strategies and Resource Allocation by Male and Female Wandering Albatrosses*, in *Ecology*, vol. 78, pp. 2051-2063, 1997.

T. WILLIAMS, R. DAVIS, L. FUIMAN, J. FRANCIS, B. LE BŒUF, M. HORNING, J. CALAMBOKIDIS et D. CROLL, *Sink or Swim : Strategies for Cost-efficient Diving by Marine Mammals*, in *Science*, vol. 288, pp. 133-136, 2000.

