

Les plongeurs avaient placé une source sonore au centre de la cible pour nous aider à aligner ADONIS avec les panneaux, mais c'était inutile : nous pouvions repérer la cible uniquement grâce au bruit ambiant. Nous avons alors reculé la cible à 38 mètres d'ADONIS, c'est-à-dire aussi loin que nous le pouvions sans gêner le trafic portuaire. Nous craignions que les performances ne diminuent avec la distance, mais si la taille de la cible sur l'écran se réduisit, l'océan aux alentours formait un bel arrière-plan, qui faisait ressortir la cible rectangulaire de manière spectaculaire.

ADONIS pouvait-il détecter des objets mobiles? Un moteur hydraulique monté à l'intérieur du mât de support pouvait faire tourner le réflecteur sur lui-même, d'un tour en 12 minutes. Alors que le réflecteur sphérique tournait lentement, nous avons vu la cible apparaître sur un côté de l'écran, glisser vers le centre et disparaître de l'autre côté. C'était la preuve que nous pouvions créer des images animées.

Que se passerait-il enfin si l'on changeait la forme de la cible? Les plongeurs ont remplacé la cible en forme de barre par quatre panneaux, qui formaient une croix avec un trou carré de un mètre de côté au centre. Verrions-nous le trou à une distance de 38 mètres?

Les premières images brutes de la cible cruciforme étaient confuses. Nous voyions la forme de la croix, mais l'apparence du trou central fluctuait. Depuis lors, nous avons réexaminé les données et effectué quelques traitements informatiques. Il apparaît que le spectre de puissance du bruit – l'intensité du son aux différentes fréquences – peut servir de fonction discriminatoire. Or, nous l'avons vu, les fréquences correspondent aux couleurs. Ainsi nous identifions aisément les quatre coins vides et le trou de la cible cruciforme : les panneaux de la cible apparaissent d'une «couleur» différente de celle des régions vides, y compris le trou central. C'était comme si les panneaux étaient «rouges» et le trou «bleu». Aujourd'hui, nous explorons cette technique comme moyen de renforcement des images acoustiques.

Voir le monde marin

Ayant ainsi testé notre technique à l'aide de cibles fixes, nous avons augmenté la difficulté et cherché à suivre le déplacement d'orques dans le bassin extérieur du Parc marin de San

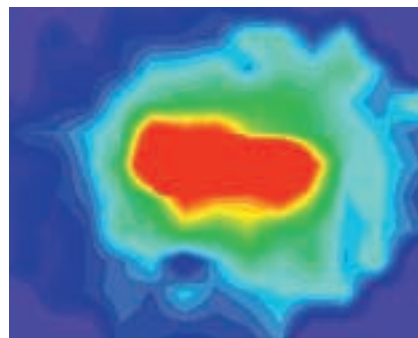
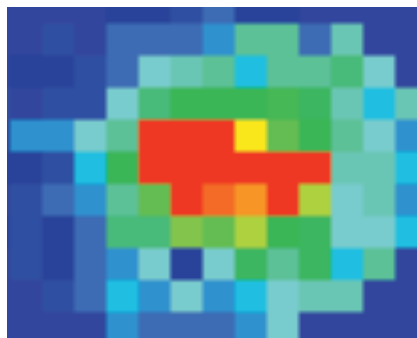
Diego. Simultanément, les biologistes du parc étudiaient leur réaction à la présence de cibles dans «leur» bassin ; les orques, semble-t-il, considèrent que tout objet placé dans le bassin leur appartient.

En février 1995, nous installions notre système dans le bassin, pendant que les orques y nageaient librement, nous portant autant d'attention que nous leur en portions. Prudents au début, ils se sont vite habitués au grand réflecteur sphérique. Les orques étaient curieuses de constater que, lorsqu'ils produisaient un cliquettement en face du réflecteur sphérique, le son leur était renvoyé plus intense en raison de son effet focalisant. Un jeune mâle, Splash, a poussé l'aventure plus loin, en prenant l'un des câbles d'électronique pleins de graisse dans sa bouche, pour le mâcher. Un autre animal a nagé rapidement vers le réflecteur sphérique

et a sauté par-dessus. Il fallait réagir : les entraîneurs ont transféré les orques dans un autre bassin, où ils pouvaient s'amuser avec leurs propres jouets en attendant que nous soyons prêts.

Après un faux départ (secoués durant le transport, tous les circuits électroniques du boîtier sous-marin étaient déconnectés), nous avons à nouveau mis l'appareil en marche, et les données ont commencé à affluer. Initialement, nous n'étions pas certains du résultat, car le bruit de fond dans le bassin pouvait être différent de celui de l'océan. Toutefois, nous avons observé que les pompes et autres machineries produisent un niveau sonore ambiant élevé, comparable à celui de l'océan.

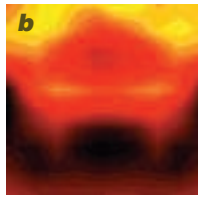
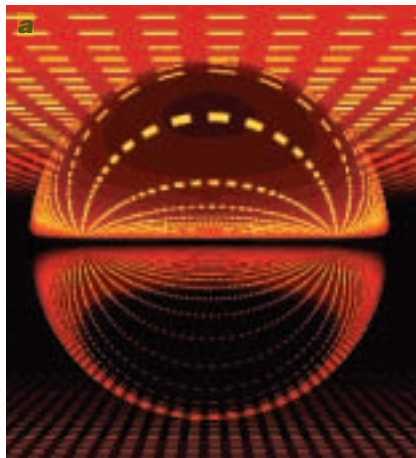
Alors que nous regardions les données brutes (c'est-à-dire sans renforcement de l'image), une forme vague s'afficha subitement sur l'écran : pen-



1. UNE CIBLE RECTANGULAIRE (à gauche) était vue par ADONIS comme une forme vaguement allongée et artificiellement colorée en rouge (en haut, à gauche). Chaque «pixel» représente le signal d'un hydrophone. Un traitement de l'image a amélioré celle-ci (à droite).



2. LES ORQUES du Parc marin de San Diego ont été détectés par ADONIS, le premier système d'imagerie acoustique utilisant le bruit de fond. Le réflecteur, avant son immersion, apparaît à droite de la photographie.



3. DES SIMULATIONS donnent un aperçu des possibilités de l'imagerie acoustique en son naturel. Ici on a calculé l'image que des systèmes complexes donneraient d'une sphère d'acier. On a supposé que le bruit ambiant proviendrait des vagues, représentées par des traits jaunes. Un système à 90 000 pixels donnerait une excellente résolution (a), mais il serait difficile à réaliser. Les images actuelles sont composées d'une centaine de pixels (b), mais on prévoit des systèmes qui formeront des images à 900 pixels (c).

dant les quelques secondes où elle resta visible, nous vîmes (de nos yeux) l'un des orques qui se déplaçait dans le champ de vision d'ADONIS. Durant cette période, les hydrophones et les entraîneurs ont confirmé que les orques eux-mêmes n'émettaient pas de sons, ce qui indiquait que les images que nous voyions résultaient du bruit de fond acoustique. Nous devons encore étudier les images des orques et les comparer avec les enregistrements vidéo que nous avons tournés simultanément pour confirmer que nous avons bien visualisé les orques, mais les observations préliminaires et l'expérience au large de la Californie nous rendent confiants.

Plusieurs applications de l'imagerie acoustique en son naturel sont envisageables. La technique pourrait notamment être utilisée pour la détection des mines sous-marines qui explosent à la réception d'un signal sonar. Elle pourrait également donner une «vision sonore» à des automates sous-marins qui, contournant les obstacles, permettraient, sans opérateur humain, de contrôler la structure des plates-

formes pétrolières. Indétectable, cette technique d'imagerie acoustique est adaptée au contrôle des ports. De même, l'absence d'interférences sonores avec les mammifères marins permettrait des dénombrements qui ne perturberaient pas le comportement des animaux. Du reste, on peut se demander si ces mammifères utilisent l'imagerie acoustique en son naturel.

Des progrès sont attendus. Au cours de récents essais, ADONIS a distingué, d'après leur couleur acoustique, des objets flottants : bouées en plastique, sphères en titane ou barils en polychlorure de vinyle qui contenaient du sable mouillé et de la mousse. Des analyses préliminaires laissent prévoir que ces barils pourront être vus même au fond de la mer.

Nous en sommes à un stade qui rappelle celui des premiers jours de la télévision : ce qui est important, ce n'est pas la qualité de l'image, mais le fait que des images existent. Au cours des mois à venir, nous remplacerons le réflecteur sphérique par un réseau à commande de phase constitué d'un millier d'hydrophones. Simultanément nous mettrons au point des algorithmes spécialisés pour renforcer les images et assurer la reconnaissance automatique de l'image. Nous espérons ainsi améliorer la qualité des images acoustiques, et donner aux successeurs d'ADONIS la possibilité d'être les caméras sous-marines du futur.

Michael BUCKINGHAM est professeur d'acoustique à l'Institut Scripps de La Jolla, où Chad EPIFANIO est chercheur. John POTTER est directeur du Laboratoire d'acoustique de l'Université de Singapour.

Michael J. BUCKINGHAM, Broderick V. BERKHOUT et Stewart A.L. GLEGG, *Imaging the Ocean with Ambient Noise*, in *Nature*, vol. 356, pp. 327-329, 26 mars 1992.

Michael J. BUCKINGHAM, *Theory of Acoustic Imaging in the Ocean with Ambient Noise*, in *Journal of Computational Acoustics*, vol. 1, n° 1, pp. 117-140, mars 1993.

John R. POTTER, *Acoustic Imaging Using Ambient Noise : Some Theory and Simulation Results*, in *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 95, n° 1, pp. 21-33, janvier 1994.

Michael J. BUCKINGHAM et John R. POTTER, *Acoustic Daylight Imaging : Vision in the Ocean*, in *GSA Today*, vol. 4, n° 4, pp. 97-102, avril 1994.

Télomères, télomérase et cancer

CAROL GREIDER • ELIZABETH BLACKBURN

La télomérase est une enzyme qui agit sur les extrémités des chromosomes. Détectée dans de nombreux cancers humains, elle serait une cible nouvelle pour les traitements anticancéreux.

« Il ne faut point juger des gens sur l'apparence », rappelle La Fontaine à propos du paysan du Danube ; il ne faut juger ni des animaux ni des choses. Certains cailloux, au fond de l'eau, se révèlent être des poissons vénéneux ; des insectes carnivores à l'affût d'une proie prennent l'apparence de jolies fleurs. Même des composants cellulaires ont parfois une apparence trompeuse. Ainsi les extrémités des chromosomes, que l'on a longtemps crues immuables, s'allongent ou raccourcissent sans cesse dans la plupart des organismes.

Au cours des 15 dernières années, les études de ces variations de longueur ont révélé l'existence d'une enzyme, la télomérase, qui favoriserait le développement de nombreux cancers chez l'homme. Des médicaments qui inhiberaient cette enzyme feraient peut-être régresser plusieurs de ces cancers. Simultanément les biochimistes ont trouvé une relation entre la longueur des télomères et le vieillissement : les variations de cette longueur joueraient un rôle dans le vieillissement des cellules humaines.

On s'intéresse aux télomères et à la télomérase depuis les expériences réalisées dans les années 1930 par Barbara McClintock, à l'Université de Columbia, et par Herman Muller, à l'Université d'Édimbourg. Ces deux chercheurs, qui étudiaient séparément des organismes différents, ont compris qu'un élément particulier assurait la stabilité de l'extrémité des chromosomes. H. Muller inventa le mot «télomère», à partir des mots grecs signifiant

«la fin» (*telos*) et «la partie» (*meros*). B. McClintock observa qu'en l'absence de ces éléments terminaux les chromosomes fusionnent, changent de structure et présentent diverses anomalies, ce qui menace la fiabilité de la réplication des chromosomes, ainsi que la survie des cellules qui les contiennent.

C'est seulement dans les années 1970 que l'on a déterminé la composition exacte des télomères. En 1978, nous avons montré que les télomères de *Tetrahymena*, un organisme unicellulaire cilié, fréquent dans les mares, ne sont composés que d'une séquence de nucléotides simple et très courte – *TTGGGG* – qui se répète plusieurs fois (les nucléotides sont les briques constitutives de l'ADN ; on les désigne généralement par une lettre qui représente la base chimique qui caractérise chaque nucléotide ; ainsi, pour les nucléotides *T*, la base est la thymine, et pour les nucléotides *G*, c'est la guanine).

Depuis notre travail, de nombreux biologistes ont caractérisé les télomères de divers animaux, de plantes et de micro-organismes. Dans la plupart des cas, les télomères ont de petites sous-unités répétées, souvent riches en nucléotides *T* et *G*. Ainsi, les télomères de l'homme et de la souris ont une séquence caractéristique *TTAGGG*, et les vers de terre une séquence *TTAGGC* (*A* et *C* désignent respectivement les nucléotides nommés adénine et cytosine).

La découverte de la télomérase a permis aux biologistes de résoudre une énigme ancienne : comment l'ADN se réplique-t-il à ses extrémités ? Au début des années 1980, on avait montré que,

pour une raison inconnue, le nombre des sous-unités répétées des télomères varie selon les organismes, selon les cellules d'un même organisme et même selon l'âge des cellules (toutefois, chaque espèce a ses caractéristiques : chez *Tetrahymena*, le nombre moyen de répétitions dans chaque télomère est égal à 70 ; chez l'homme, il est égal à 2 000). Pourquoi ces variations ?

À la recherche de la télomérase

Les cellules qui se divisent doivent reproduire tous leurs gènes en deux exemplaires, de façon que chaque cellule fille reçoive un lot complet de gènes. Si le bagage héréditaire était incomplet, les cellules filles ne fonctionneraient pas correctement et mourraient, car les gènes, constitués de séquences de nucléotides, servent à fabriquer l'ARN et les protéines, les molécules qui assurent les fonctions cellulaires. Dans un chromosome, les gènes sont répartis sur la molécule d'ADN, limitée par les deux télomères.

En 1972, à l'Université Harvard, James Watson constata que les ADN polymérases, les enzymes qui assurent la réplication de l'ADN, ne recopient pas les chromosomes jusqu'aux extrémités : elles omettent de copier une petite région, un fragment du télomère. Si les cellules ne compensaient cet «oubli», les chromosomes raccourciraient à chaque division cellulaire et, en quelques générations, les télomères des gènes essentiels seraient réduits : ce serait la fin de la lignée cellulaire