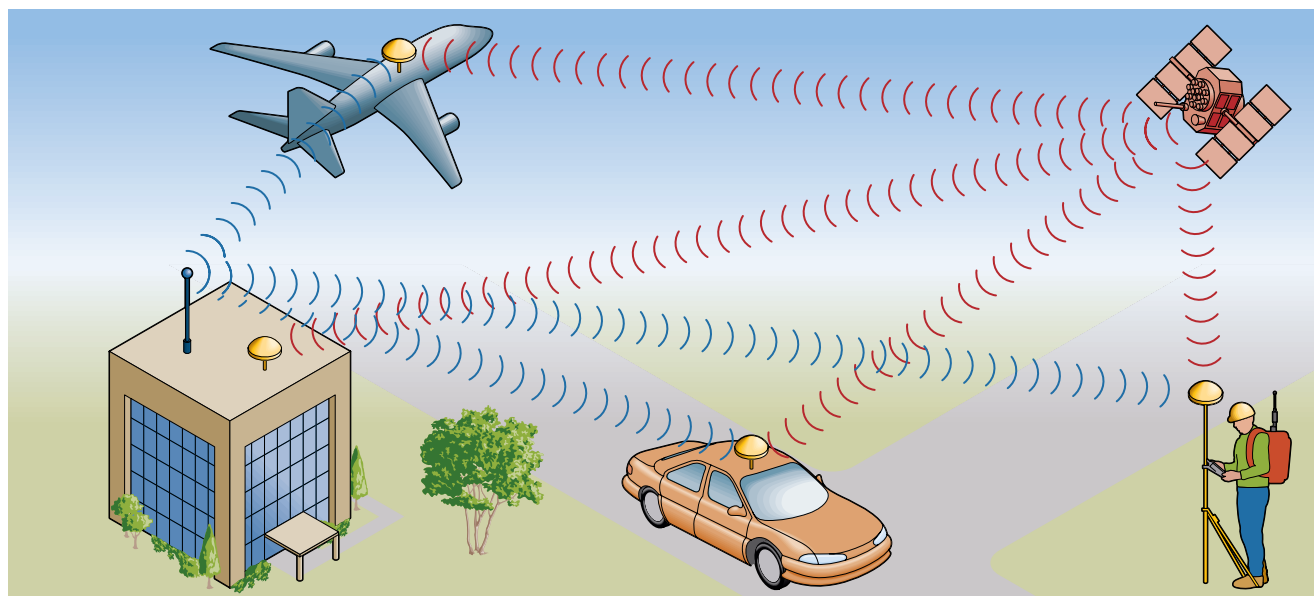




6. L'UTILISATION DU GPS EN MODE DIFFÉRENTIEL permet d'obtenir des précisions supérieures à celles que la Défense américaine voulait imposer. Un récepteur fixe, de position connue, calcule l'erreur d'horloge contenue dans le signal émis par le satellite (en rouge) et

envoie, par radio, les corrections à appliquer aux récepteurs mobiles voisins (en bleu). La méthode fait passer la précision du système d'une centaine de mètres à moins d'un mètre. De nombreux fournisseurs proposent aujourd'hui ce service.

côtes transmettent les corrections près des principaux ports.

Les militaires américains doivent-ils continuer de coder les informations en temps de paix, obligeant ainsi d'autres services publics à dépenser de l'argent pour corriger les erreurs et transmettre les résultats? La question s'est posée avec encore plus d'acuité pendant la guerre du Golfe et lors de l'intervention américaine en Haïti, quand le Département américain de la Défense a désactivé les procédures de sécurité du GPS, parce qu'il ne disposait pas d'assez de récepteurs militaires

à envoyer en opérations et qu'il avait besoin de récepteurs civils (les troupes américaines en ont même acheté par correspondance). Les autorités militaires américaines ont parié que l'ennemi n'aurait pas de missiles guidés par le GPS et qu'il n'avait pas l'habitude de la vente par correspondance.

De surcroît, la Russie achève la mise au point d'un système de positionnement précis par satellite nommé GLO-NASS, semblable au système GPS. Le système russe ne sera pas codé, de sorte que n'importe quel possesseur d'un récepteur adapté pourra l'utiliser. L'existence de ce système ouvert et la large diffusion des corrections GPS annuleront les éventuels avantages militaires qui résultaient de la dégradation de la précision des horloges des satellites du GPS. L'Académie des sciences américaine a recommandé la suppression du décalage des horloges, mais la position du Département de la Défense reste... décalée.

Chaque semaine, de nouvelles utilisations de la localisation par satellites sont proposées. Les météorologues obtiennent des informations sur l'état de l'atmosphère en analysant la propagation des signaux GPS. En outre, le GPS est de plus en plus utilisé pour aider la navigation maritime ou aérienne, ainsi que pour le guidage automobile. Des récepteurs expérimentaux guident même les aveugles. L'Agence spatiale européenne pilote le projet GNSS-1 de navigation aérienne

fondé sur le GPS. En ajoutant quelques satellites sur des orbites géostationnaires, les problèmes de précision ou de fiabilité, tel celui évoqué au début de cet article, seraient éliminés. Le premier de ces satellites devrait être lancé à la fin de 1997.

Les usages civils sont bien plus nombreux que les utilisations militaires et, au début du prochain millénaire, la vente des services du GPS devrait rapporter environ cinq milliards de francs par an à l'économie américaine : cet outil militaire est devenu une source de revenu national. Dans les prochaines années, une question deviendra alors inévitable : qui doit contrôler le système GPS?

Thomas HERRING est professeur à l'Institut de technologie du Massachusetts.

Bradford H. HAGER, Robert W. KING et Mark H. MURRAY, *Measurement of Crustal Deformation Using the Global Positioning System*, in *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 19, pp. 351-382, 1991.

Tom LOGSDON, *The Navstar Global Positioning System*, Van Nostrand Reinhold, 1992.

GPS World, magazine bimensuel publié par Advanstar Communications, 859 Williamette Street, Eugene OR 97401, États-Unis.

Sur le World Wide Web : <http://igscb.jpl.nasa.gov/> et <http://www.unavco.ucar.edu/>



7. LA DÉFORMATION DE LA CROÛTE TERRESTRE est mesurée par le suivi de récepteurs GPS dans des zones géologiquement actives comme celle de Tien Shan, en Asie centrale. Le GPS permet de surveiller l'accumulation des contraintes dans le sol.

L'imagerie acoustique dans l'océan

MICHAEL BUCKINGHAM • JOHN POTTER • CHAD EPIFANIO

En enregistrant les réflexions et les diffusions des bruits de la mer sur les objets immergés, on forme des images en couleurs de ces objets sans recourir à des sonars.

Le cinéma nous a souvent fait entendre le bruit caractéristique des sonars : les échos indiquent au sous-marinier la position des cibles. Naguère, le bruit de fond de l'océan était considéré comme une nuisance, car il masquait les signaux intéressants : les vagues qui déferlent, les bateaux qui passent, la pluie qui tombe et les diverses espèces marines, telle la crevette, qui produisent des bruits caractéristiques, contribuent à la cacophonie de ce que l'on a mal nommé «le monde du silence». Aussi les ingénieurs ont-ils longtemps cherché à éliminer le bruit de fond pour obtenir les signaux.

Aujourd'hui, on cherche à utiliser le bruit de fond plutôt qu'à le supprimer, car les objets plongés dans l'océan modifient ce champ sonore ambiant en fonction de leur forme, de leur composition et de leur position. Le son ambiant dans l'océan est analogue à la lumière du jour dans l'atmosphère : à l'extérieur, nous voyons les objets parce qu'ils diffusent et réfléchissent la lumière du jour. De même, les sons qui emplissent l'océan jouent le rôle de «lumière du jour acoustique», et nous pouvons réaliser des images d'objets sous-marins en utilisant le bruit ambiant comme source d'«éclairage». Nos premiers résultats montrent que la nouvelle imagerie acoustique devrait être utile dans de nombreuses circonstances, de la sécurité des ports à la détection des mines sous-marines.

À ce jour, les images obtenues sont assez grossières, et leur résolution est bien inférieure à celle des images

optiques. Notre vue est précise, parce que la pupille dilatée est 10 000 fois plus grande que la longueur d'onde de la lumière visible, ce qui permet à l'œil de recevoir un grand nombre de longueurs d'onde. L'obtention d'une résolution acoustique analogue nécessiterait un récepteur de 600 mètres de diamètre ! Cependant, comme l'eau absorbe presque tout le rayonnement électromagnétique (notamment la lumière), le son est le moyen privilégié (et souvent le seul) d'obtenir des informations sur ce qui se passe dans les profondeurs océaniques.

Les Anciens se préoccupaient déjà du son dans l'eau, Aristote et Pline le Jeune se demandaient si les poissons entendaient. Dans la Chine antique, les pêcheurs localisaient les bancs de poissons en plongeant une tige de bambou dans l'eau : ils écoutaient le bruit de la mer à l'extrémité placée dans l'air. Plus tard, Léonard de Vinci développa cette idée : il écrivit dans ses études sur les propriétés de l'eau que, «si l'on se place sur son bateau immobile, et si l'on place le bout d'un long tube dans l'eau et l'autre extrémité sur son oreille, on entendra les bateaux éloignés».

Néanmoins, c'est seulement durant la Première Guerre mondiale que les inventeurs fabriquèrent les premiers systèmes de localisation sous-marine pour faire face à la menace des sous-marins. Ces appareils rudimentaires sont à la base de tous les sonars suivants, dont la mise au point s'est accélérée au cours de la Seconde Guerre mondiale. Le principe de fonctionnement des sonars les plus perfectionnés

reste identique à celui de leurs ancêtres : ils transmettent activement les sons dont ils reçoivent l'écho produit par la cible, ou bien ils reçoivent passivement les sons produits par un émetteur.

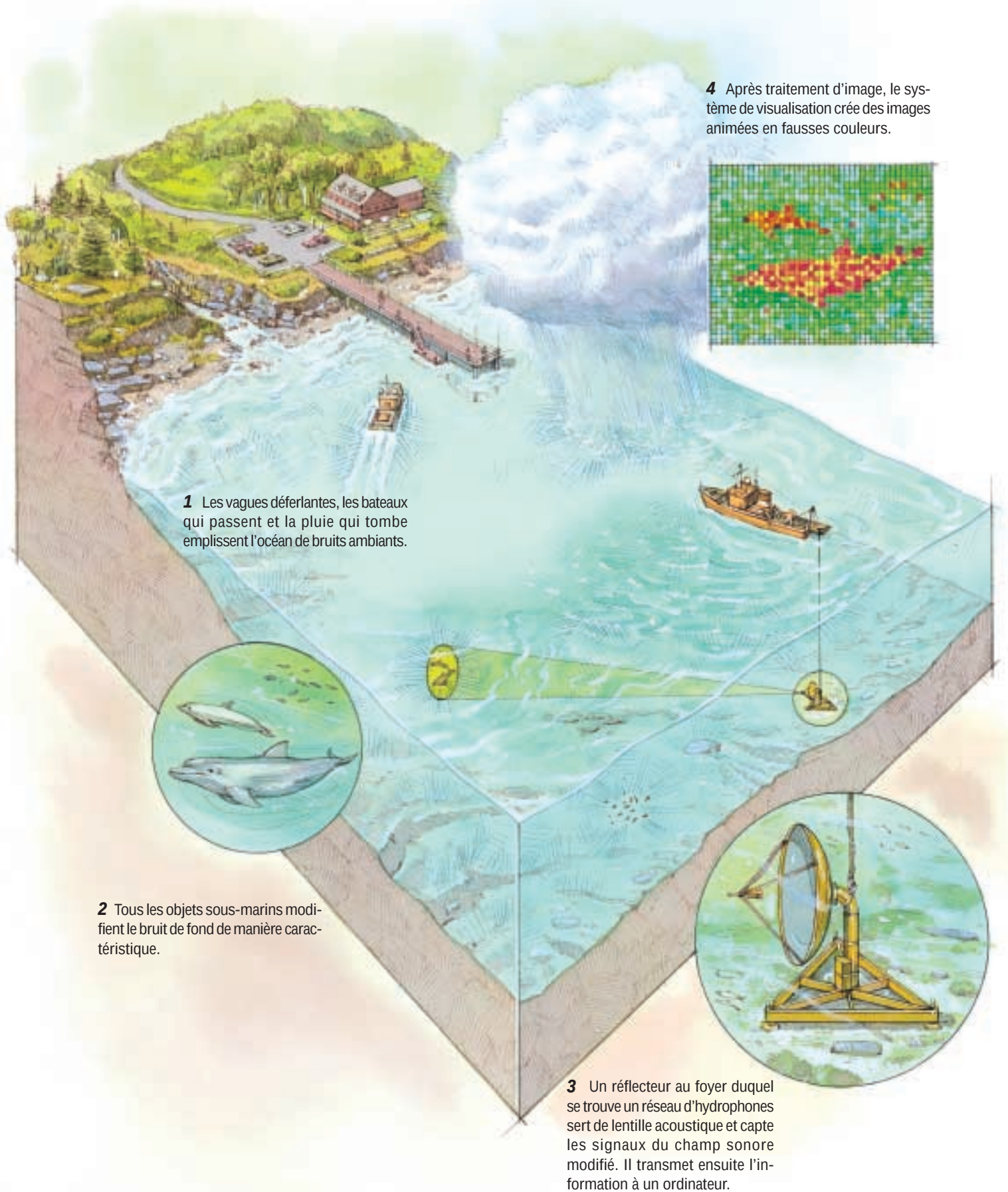
L'important rôle historique des techniques active et passive explique pourquoi on n'a cherché que récemment une manière nouvelle de «voir» dans l'océan. En comprenant, au milieu des années 1980, que la vision n'est ni active, ni passive (dans le sens de regarder des sources de lumière directe), l'un d'entre nous (M. Buckingham) posa les bases d'une visualisation acoustique sous-marine analogue à celle de l'œil. Cette nouvelle technique pallierait les principaux inconvénients des techniques classiques de détection sous-marine : l'écholocalisation révèle la présence de l'opérateur, tandis que la détection passive, indécélable, ne repère pas les cibles silencieuses.

La première expérience

En 1991, nous avons effectué les premières expériences d'imagerie acoustique dans l'océan Pacifique, au large de la Californie. Le dispositif principal était un récepteur acoustique, formé d'un réflecteur parabolique de 1,2 mètre de diamètre et d'un hydrophone (un microphone sous-marin) en son foyer.

Le réflecteur servait de lentille acoustique. L'expérience devait indiquer si un objet placé dans le «faisceau» (ou champ d'écoute) du récepteur modifiait le bruit perçu. Un panneau

Le principe de l'imagerie acoustique



1 Les vagues déferlantes, les bateaux qui passent et la pluie qui tombe emplissent l'océan de bruits ambiants.

2 Tous les objets sous-marins modifient le bruit de fond de manière caractéristique.

3 Un réflecteur au foyer duquel se trouve un réseau d'hydrophones sert de lentille acoustique et capte les signaux du champ sonore modifié. Il transmet ensuite l'information à un ordinateur.

4 Après traitement d'image, le système de visualisation crée des images animées en fausses couleurs.

rectangulaire en contre-plaqué, d'un demi-mètre carré de surface et recouvert de néoprène (un bon réflecteur et diffuseur du son) servait de cible. Nous avons trouvé que, pour les fréquences comprises entre 5 et 50 kilohertz (la gamme de fréquences produites par les vagues qui se brisent et qui sont la source principale du bruit ambiant de l'océan), l'intensité du bruit doublait lorsque la cible était placée dans le champ d'écoute du récepteur. Ce résultat persistait lorsque la distance entre la cible et le récepteur était portée de 7 à 12 mètres. De surcroît, la cible réfléchissait certaines fré-

quences et en absorbait d'autres : elle avait une «couleur» acoustique que l'on pouvait traduire en couleur optique, de manière à créer des images acoustiques en fausses couleurs.

Après ce premier succès, nous avons perfectionné le dispositif. Le réflecteur parabolique muni d'un hydrophone en son foyer ne «regarde» que dans une direction, ce qui correspond à un seul pixel d'une image. Pour former une image plus complète, nous devons obtenir plus de pixels, en utilisant plus de «faisceaux» récepteurs (un peu comme l'œil composé de la mouche). L'intensité du son reçu par chaque récepteur

pourrait alors être transformée en un niveau de luminosité d'un pixel sur un moniteur vidéo. Comme pour les photographies dans les journaux, le contraste entre les pixels permettrait à l'œil d'interpréter le résultat comme une image à grains plus ou moins fins.

Nous avons d'abord tenté de créer des images composées d'une centaine de pixels. Au milieu de l'année 1992, nous avons commencé à concevoir une nouvelle lentille acoustique que nous avons nommée ADONIS (l'acronyme d'*acoustic-daylight, ambient noise imaging system*, soit «système d'imagerie à bruit ambiant, en lumière acoustique naturelle»). Avec la Société EDO, qui a fabriqué un réseau elliptique de 128 hydrophones pour ADONIS, nous avons construit un réflecteur sphérique de trois mètres de diamètre au foyer duquel nous avons placé les hydrophones. Ce système avait un champ total d'environ six degrés (horizontalement) sur cinq degrés (verticalement), ce qui représente un dixième de la vision angulaire d'un appareil photographique.

En août 1994, nous avons immergé ADONIS pour la première fois, au large de la Californie, à partir d'une plateforme de recherche de l'Institut Scripps. Des panneaux carrés de un mètre de côté, en tôles d'aluminium recouvertes de néoprène, constituaient les cibles. Les panneaux étaient montés en différentes configurations sur des châssis carrés placés au fond de la mer. L'ensemble de l'électronique, logé dans un caisson métallique étanche, était placé le long du mât qui supportait le réflecteur. Cet appareillage électronique devait transformer les données récoltées par ADONIS en signaux numériques. À partir de ces données, transmises vers la surface, un micro-ordinateur placé en surface affichait des images en fausses couleurs sur son écran.

Voir ou ne pas voir

Après les inévitables aléas des mises au point, nous avons utilisé ADONIS pour observer l'alignement de trois panneaux, qui formaient ainsi une cible horizontale, de un mètre de haut sur trois mètres de large, à une distance de 18 mètres d'ADONIS. Sur l'écran, nous vîmes apparaître une forme rectangulaire floue qui remplissait presque entièrement l'image elliptique (voir la figure 1). Nous contemplions la première image acoustique utilisant le bruit de fond.

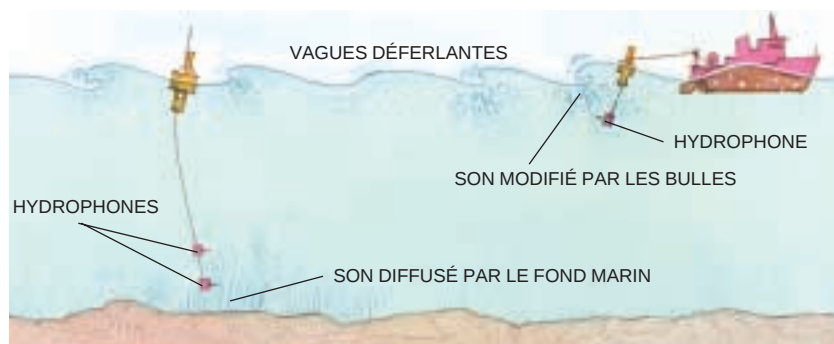
De nouvelles utilisations du bruit de fond

L'imagerie acoustique en son naturel n'est que l'une des techniques d'observation à distance fondées sur le bruit de fond dans les mers. Les océanographes ont récemment mis au point d'autres techniques semblables. Certains, par exemple, utilisent le bruit ambiant pour déterminer les propriétés acoustiques du fond de la mer et, dans une certaine mesure, sa composition. Dans les eaux peu profondes (moins de 200 mètres) des plateaux continentaux, le bruit est réfléchi par le fond de la mer. La façon dont le son est réfléchi indique la vitesse à laquelle les ondes se propagent dans le sol. On détermine ainsi la composition du fond, car le bruit se propage à des vitesses différentes dans les roches et dans le sable.

Pour réaliser ces mesures, on déploie une flotte de bouées auxquelles sont suspendus des hydrophones, ce qui permet de cartographier le fond de la mer au moyen du bruit ambiant. On cherche aujourd'hui si cette technique évite l'emploi de sonars, que l'on doit promener à la surface de la zone étudiée, afin d'enregistrer des échos.

Le bruit de fond révèle également des mécanismes qui se produisent en surface. Notamment, il indique la quantité de gaz atmosphérique que les océans absorbent. Les climatologues qui se préoccupent du réchauffement ont besoin de connaître la quantité de gaz échangée entre l'atmosphère et les océans. Le bruit ambiant peut les aider, car le déferlement des vagues, qui est le principal responsable du bruit ambiant, est également la principale cause des transferts gazeux de l'atmosphère dans l'océan. En amenant l'air dans l'eau, ce mécanisme crée une couche de bulles juste sous la surface. Ces bulles modifient le son des vagues déferlantes d'une manière caractéristique, dont la signature acoustique est détectée par l'hydrophone placé sous les bulles.

À partir d'une simple mesure acoustique, on prévoit la quantité d'air dans la couche de bulles et la profondeur à laquelle les bulles s'étendent. Ces deux quantités sont liées à la quantité de gaz qui pénètre dans l'océan. Des essais préliminaires montrent la faisabilité d'un tel système.



LE BRUIT DE FOND permet aussi bien de mesurer les propriétés acoustiques du fond de l'océan (à gauche) que la quantité de gaz absorbée par la mer (à droite).

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

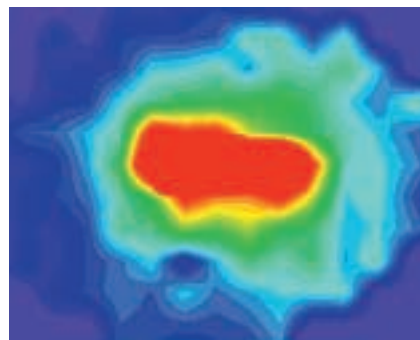
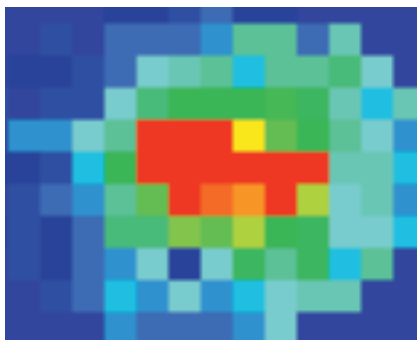
Diego. Simultanément, les biologistes du parc étudiaient leur réaction à la présence de cibles dans «leur» bassin ; les orques, semble-t-il, considèrent que tout objet placé dans le bassin leur appartient.

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.

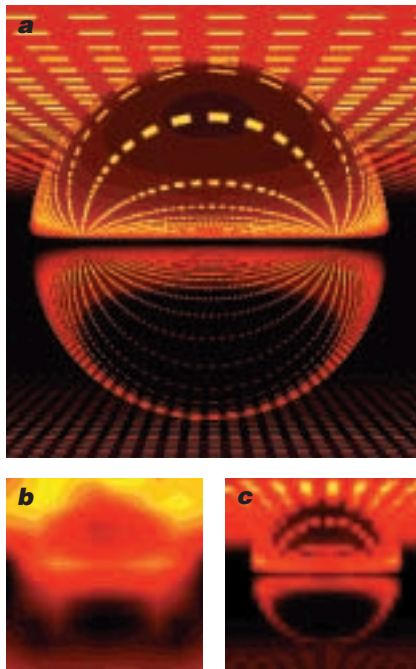
Alors que nous regardions les données brutes (c'est-à-dire sans renforcement de l'image), une forme vague s'afficha subitement sur l'écran : pen-



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.
