

Par ailleurs, des modifications biologiques se déroulent au rythme des séquences de troisième ordre. Outre l'augmentation brusque du taux de renouvellement des foraminifères pendant les phases de baisse et de montée du niveau marin, des phénomènes comparables ont été récemment découverts dans des groupes beaucoup plus complexes, comme les céphalopodes (le groupe des pieuvres et des calmars).

Ces changements climatiques, associés aux variations de l'épaisseur de la tranche d'eau et des étendues respectives des terres et des mers, ont des conséquences importantes sur les écosystèmes. En milieu marin, les baisses brusques des eaux isolent certaines mers, favorisent les apports trophiques d'origine continentale et diminuent les profondeurs. Dans la zone littorale, les fonds sont mieux éclairés et plus agités. À l'inverse, les montées du niveau marin en période transgressive développent les communications entre mers, modifient les tracés des courants, diminuent les arrivées de matières nutritives issues des terres voisines et augmentent l'épaisseur de l'eau entre la surface et les fonds, plus sombres et plus calmes. Les variations du niveau marin ont donc joué un rôle dans l'évolution de la vie, par leurs conséquences sur les renouvellements de la faune, par effets de stress, adaptations à de nouvelles niches écologiques et migrations de populations.

Jacques REY est professeur à l'Université Paul Sabatier, à Toulouse. René CUBAYNES est professeur agrégé au Lycée Lapeyrouse, à Albi.

P. VAIL, J.-P. COLIN, R. JAN du CHENE, J. KUCHLY, F. MEDIAVILLA et U. TRIFILLIAFF, *La stratigraphie séquentielle et son application aux corrélations chronostratigraphiques dans le Jurassique du bassin de Paris*, in *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 8, n° 3, pp. 1301-1321, 1987.

C. WILGUS, B. HASTINGS, C. KENDALL, H. POSAMENTIER, C. ROSS et J. VAN WAGONER, *Sea-Level Changes : an Integrated Approach*, in *Soc. Economic Paleontologists and Mineralogists*, Sp. Public, n° 42, 1988.

J. REY, L. BONNET, R. CUBAYNES, A. QAJOUN et C. RUGET, *Sequence Stratigraphy and Biological Signals : Statistical Studies of Benthic Foraminifera from Liassic Series*, in *Paleogeography Palaeoclimatology-Palaeoecology*, vol. 111, pp. 149-171, 1994.

La localisation par satellite

THOMAS HERRING

À quelques milliers de kilomètres au-dessus de nos têtes, 24 satellites permettent une localisation à un millimètre près.

Pour la phase finale de l'approche, l'avion obéissait aux ordres du pilote automatique, sans utiliser le radioguidage de l'aéroport. En orbite à plus de 20 000 kilomètres d'altitude, les satellites du système de localisation GPS (*Global Positioning System*) fournissaient à l'appareil les informations nécessaires pour se guider.

Lorsque le GPS a indiqué que le sol n'était plus qu'à une centaine de mètres sous le train d'atterrissage, l'appareil a ralenti sa descente. Puis, brusquement, l'alarme du pilote automatique s'est déclenchée : il avait perdu le contact avec un satellite. Le pilote a rapidement repris les commandes et a remis les gaz pour éviter l'écrasement.

Cet incident s'est produit lors d'un atterrissage d'essai, organisé en octobre 1994 par une équipe de l'Université Stanford qui élabore un dispositif de guidage des avions par GPS. La cause en était une erreur dans le programme du satellite GPS. Celle-ci n'avait pas été détectée plus tôt, car personne n'avait jamais demandé au GPS une précision inférieure à 100 mètres (la longueur d'un terrain de football) : il y a quelques années, personne n'imaginait que le GPS serait assez précis pour guider l'atterrissage d'un avion. En Europe, cet exercice reste interdit, même pour des essais. Pourtant beaucoup d'astuce et de travail ont permis d'augmenter les performances du réseau bien au-delà de celles qui avaient été prévues lors de la mise au point, il y a plus de 20 ans.

Le Département américain de la Défense a commencé la mise en place de ce système de localisation au milieu des années 1970, afin de guider ses navires, ses avions et ses véhicules terrestres, n'importe où dans le monde. Puis les civils ont eu accès au réseau, mais avec une précision réduite : si un ennemi avait profité des mêmes informations, l'avantage militaire aurait été nul. Des ingénieurs civils ont

toutefois contourné ces limitations : aujourd'hui n'importe qui peut obtenir une précision nettement supérieure à celle que les concepteurs du système voulaient donner.

Grâce à des récepteurs GPS portables, des plaisanciers se dirigent dans des ports embrumés et des automobilistes trouvent leur chemin dans des régions qu'ils ne connaissent pas. Le système est même utilisé pour suivre les déplacements de conteneurs dans les zones de stockage du port de Singapour, et il permet aux géologues d'enregistrer des déformations de la croûte terrestre de quelques millimètres seulement, afin de prévoir les séismes.

Dès le premier satellite

Comment obtient-on des informations aussi précises ? Examinons d'abord la brève histoire de la localisation terrestre par satellite et les principes du GPS. Peu après le lancement du satellite *Spoutnik* par l'URSS, en 1957, des ingénieurs ont imaginé de calculer la position d'un récepteur terrestre à partir des émissions radio d'un satellite de position connue. Ils envisagèrent d'abord d'utiliser le décalage Doppler engendré par le passage du satellite au-dessus du récepteur : la fréquence des signaux radio reçus augmente quand le satellite approche du récepteur, et diminue quand le satellite s'éloigne, tout comme varie la tonalité de la sirène d'une ambulance qui s'approche puis s'éloigne.

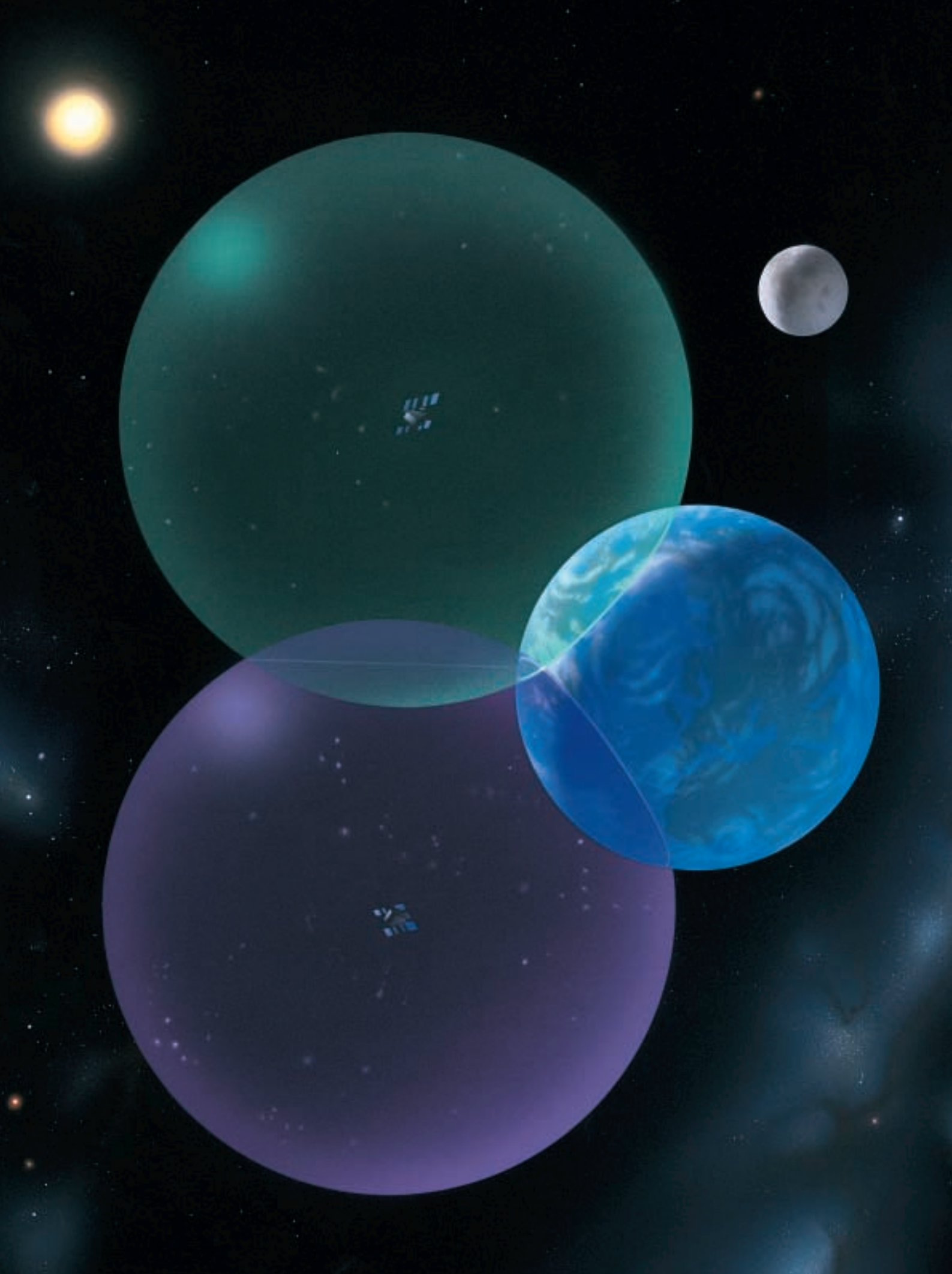
Sur ce principe, la marine américaine a mis au point le système *Transit* de localisation par satellite, dans les années 1960. Toutefois la méthode était complexe, car elle nécessitait de cou-

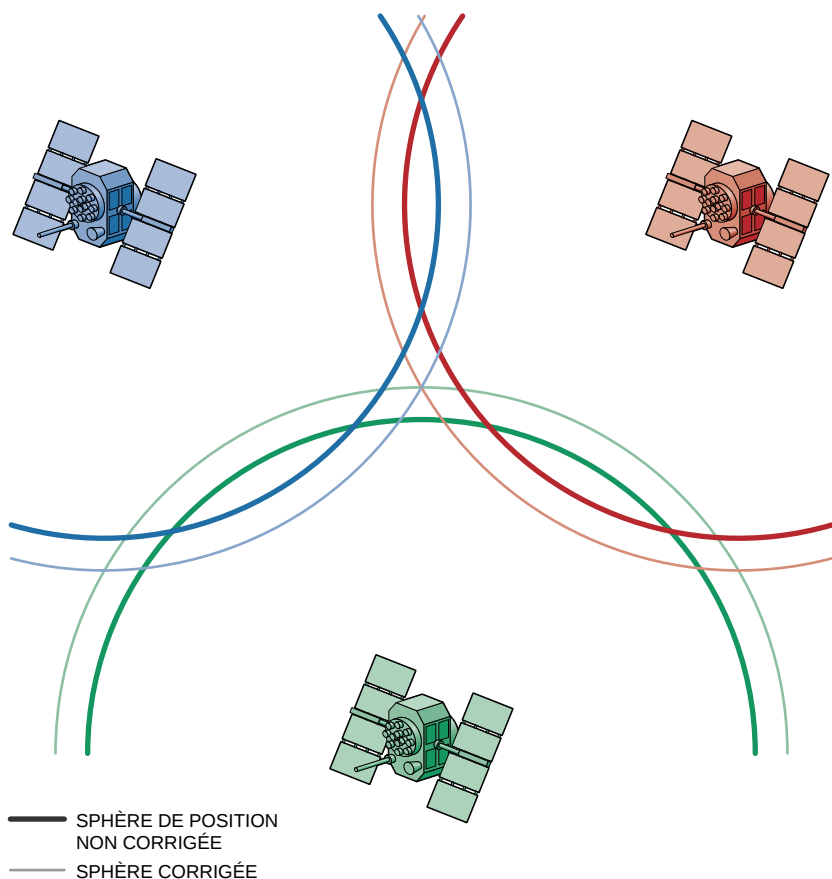
teux équipements électroniques afin d'enregistrer deux passages du satellite au-dessus du récepteur : la localisation n'était obtenue qu'après plus d'une heure et demie d'attente et, dans les cas les plus favorables, même après plusieurs jours de mesures, la précision n'atteignait pas le mètre. Les applications semblaient limitées.

Avant même que le premier satellite du système *Transit* ne soit lancé, le Département américain de la Défense étudiait un système plus précis, qui permettrait à un pilote de chasse de connaître instantanément sa position exacte. Au lieu d'utiliser l'effet Doppler, les ingénieurs militaires envisageaient de se fonder sur des mesures de distances effectuées par plusieurs satellites.

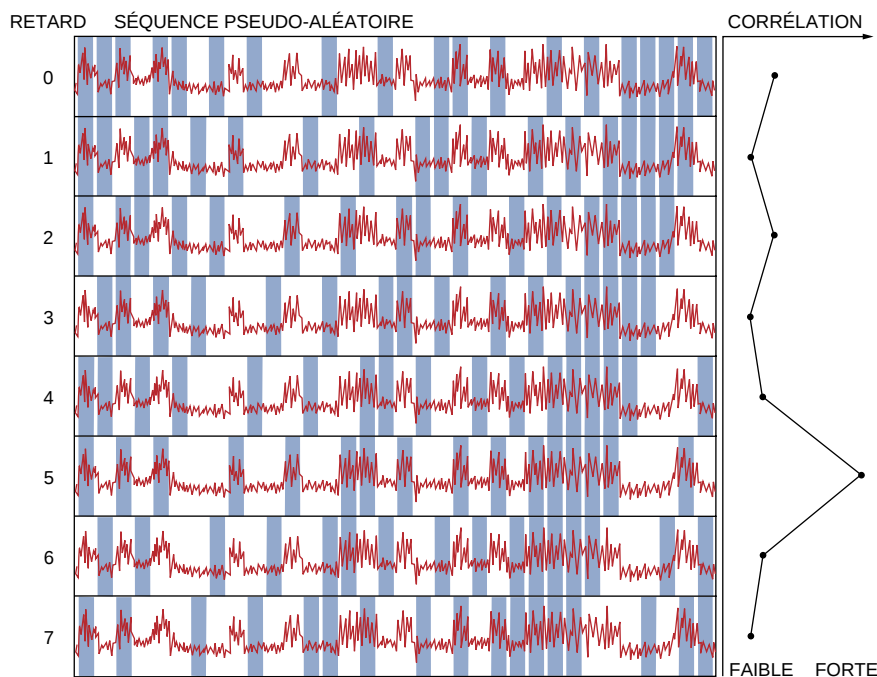
Théoriquement, cette méthode permet un calcul immédiat de la position. Si nous mesurons qu'un satellite est à 20 000 kilomètres de nous, par exemple, nous savons que nous sommes alors sur une sphère de 20 000 kilomètres de rayon, centrée sur le satellite. Nous pouvons calculer précisément la position de cette sphère, car les mouvements du satellite sur son orbite sont connus et stables. Si nous mesurons simultanément la distance d'un deuxième satellite, nous déterminons une deuxième sphère de positions possibles (voir la figure 1). La mesure de la distance d'un troisième satellite permet d'en connaître une troisième. Or trois sphères n'ont que deux points communs. Comme l'un de ces points n'est généralement pas une position possible (il est situé dans les profondeurs de la Terre ou dans l'espace), la mesure des distances qui nous séparent de trois satellites indiquent notre position exacte.

1. DES SATELLITES dont on connaît la position précise permettent un repérage au millimètre près, à la surface du Globe. En recevant des émissions codées de ces satellites, on détermine à quelle distance se trouvent les satellites du système. À chaque distance correspond une sphère de positions possibles, centrée sur le satellite émetteur du signal (en violet et en vert). L'intersection de trois sphères donne, en principe, une position exacte.





2. LES ERREURS DE SYNCHRONISATION entre l'horloge d'un récepteur et celles des satellites du GPS sont à l'origine d'erreurs sur les distances mesurées. Les sphères des positions possibles (*lignes épaisses*) ne se croisent pas en un point. Une légère avance ou un léger retard de l'horloge du récepteur corrige les distances et permet aux sphères de se rencontrer en un point (*lignes fines*). Dans cette figure à deux dimensions, trois satellites permettent de déterminer la position d'un point, mais, dans l'espace tridimensionnel, il faut quatre satellites.



3. LES SATELLITES DU GPS émettent, à des instants connus, des signaux codés selon des séquences pseudo-aléatoires. Le temps de propagation du signal jusqu'au récepteur (donc la distance parcourue par l'onde) correspond au décalage temporel de la séquence d'émission (*en bleu*) qui produit la corrélation la plus grande avec le signal reçu (*en rouge*) : ici sur la ligne numéro 5.

Comment mesurer la distance entre un point du Globe et un satellite? Avec un radar installé au sol, on mesurerait le temps que met une onde électromagnétique pour aller jusqu'à un satellite et en revenir après réflexion ; on calculerait alors la distance parcourue, en connaissant la vitesse de propagation des ondes. Toutefois cette méthode nécessiterait l'émission d'ondes radar, facilement détectables par un ennemi. L'armée américaine choisit donc plutôt d'utiliser des signaux radio émis par les satellites du GPS. Elle décida de faire émettre ces impulsions radio à des instants connus, de sorte que, en mesurant les temps d'arrivée des signaux, un récepteur calcule les distances qui le séparent des satellites. Cette procédure exige que l'horloge de la station de réception soit rigoureusement synchronisée avec celle du satellite.

Synchronisons nos montres

Comment synchroniser précisément ces horloges? Un écart aussi faible qu'un millionième de seconde provoque une erreur de 300 mètres. Les satellites du système GPS emportent chacun une horloge atomique de haute précision, mais, pour des raisons de coût et de complexité, on ne peut pas en équiper chaque récepteur. Cette difficulté a été contournée : pour obtenir une bonne précision sur la distance, on cherche plutôt à connaître le décalage entre l'horloge du récepteur et une référence.

Plus exactement, la procédure est la suivante : comme le temps donné par l'horloge du récepteur est légèrement décalé, les mesures des distances de quatre satellites du système sont un peu fausses. Ainsi quatre sphères de positions possibles, centrées sur quatre satellites, ne se coupent pas en un point : elles sont un peu trop grandes si l'horloge du récepteur avance, ou un peu trop petites si l'horloge retarde, mais il existe une valeur du décalage de l'horloge pour laquelle les quatre sphères n'ont qu'un point d'intersection, la position du récepteur (voir la figure 2). On se fonde sur cette observation pour calculer les corrections nécessaires et synchroniser l'horloge à quartz du récepteur avec les horloges atomiques des satellites.

Pour la transmission des informations des satellites vers les récepteurs au sol, les concepteurs du système ont choisi une technique utilisée depuis

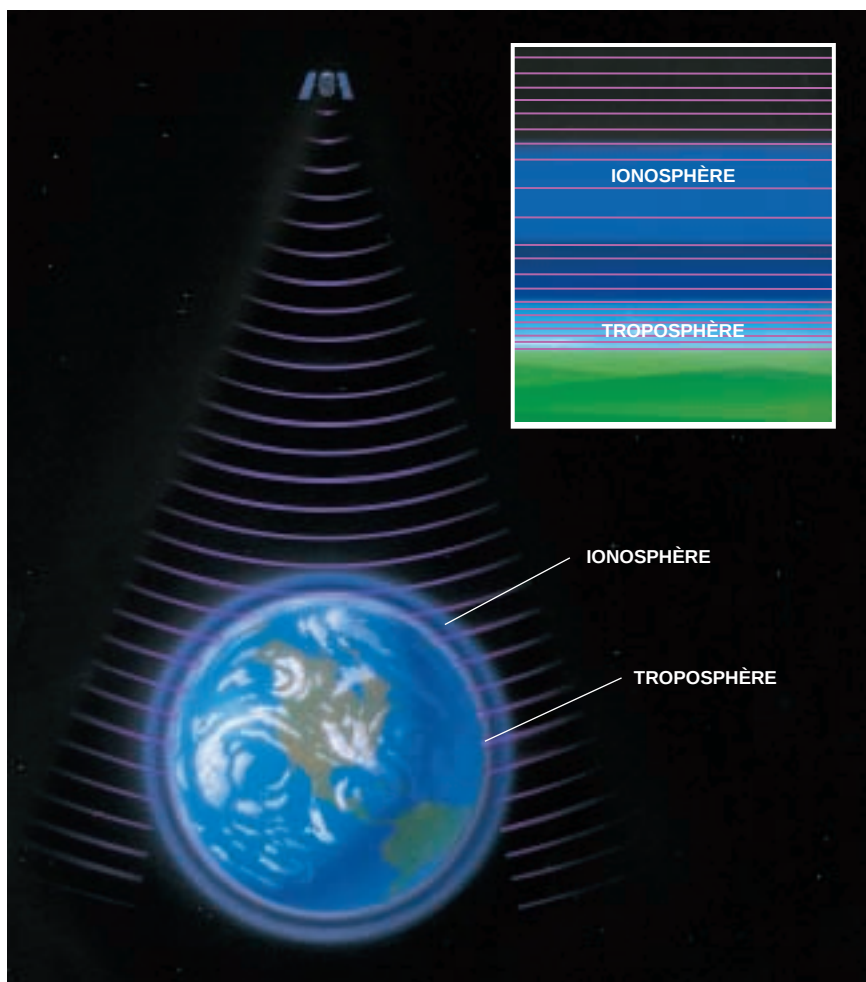
les années 1950 par les astronomes qui étudient les planètes en envoyant des signaux radar à partir de télescopes géants. Ces signaux sont émis à des moments qui semblent aléatoires, mais qui suivent en fait une séquence soigneusement codée. Les astronomes mesurent la durée de l'aller-retour des ondes radar, réfléchies par les surfaces des planètes, en déterminant le décalage pour lequel le signal émis et le signal réfléchi sont parfaitement en phase (voir la figure 3). De même, les ingénieurs du projet GPS proposèrent de déterminer la distance des satellites par la recherche de corrélations entre les émissions pseudo-aléatoires et les signaux réfléchis.

L'émission de séquences pseudo-aléatoires d'ondes radio par les satellites GPS permet aux satellites d'émettre tous sur la même fréquence sans interférences. Comme chaque satellite GPS émet un code spécifique, un récepteur monofréquence suffit à séparer les différents signaux. Les récepteurs GPS sont donc peu coûteux, ce qu'apprécient les navigateurs et les randonneurs.

Sur quelles orbites placer les satellites? La quasi-totalité des satellites artificiels sont sur des orbites proches de la Terre ou sur des orbites géostationnaires, à 36 000 kilomètres d'altitude. Les orbites basses sont moins coûteuses à atteindre et ne demandent ensuite qu'une faible puissance d'émission, car les distances aux récepteurs sont plus courtes. Toutefois, une couverture permanente de la surface du Globe à partir de ce type d'orbites nécessiterait le déploiement de plusieurs centaines de satellites. Sur des orbites géostationnaires, en revanche, moins de satellites seraient nécessaires, mais chacun d'entre eux doit être équipé d'émetteurs puissants, et la couverture des régions polaires est mal assurée. Les concepteurs du GPS ont choisi une solution intermédiaire ; les satellites, au nombre de 24, ont été placés à une altitude de 20 000 kilomètres environ, de sorte que chaque point de la surface de la Terre reçoive en permanence les émissions d'au moins quatre d'entre eux. Trois des satellites sont en réserve.

Entre l'ennemi et le civil

Afin d'éviter qu'un ennemi n'utilise le GPS pour se localiser aussi bien que l'armée des États-Unis, les ingénieurs militaires ont voulu coder les émissions des satellites. Toutefois, le Départe-



4. LES COUCHES ATMOSPHÉRIQUES perturbent les signaux du système GPS et peuvent introduire des erreurs. Les perturbations les plus importantes se produisent lorsque les ondes radio traversent l'ionosphère, chargée électriquement, et la troposphère, humide : dans les deux milieux, l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde, et les signaux sont déformés. Alors que l'ionosphère écarte les fronts d'onde des émissions radio, la troposphère les resserre (encart à droite). Comme ces perturbations du signal sont mesurables par un récepteur GPS fixe, les météorologues utilisent le système GPS pour déterminer le contenu de la troposphère en vapeur d'eau.



5. LES AVEUGLES POURRAIENT utiliser le GPS pour se diriger, tout comme les bateaux qui naviguent dans le brouillard. Cette utilisation et d'autres seraient plus faciles sans le brouillage imposé par les militaires.

ment de la Défense souhaitait aussi que les civils profitent du GPS. Pour limiter la précision accessible aux civils, les ingénieurs ont préféré limiter l'accès aux informations sur les instants où les satellites émettent leurs signaux. Ils ont dégradé la synchronisation du système en décalant les horloges atomiques avec un code spécifique. Le signal dégradé permet une localisation avec une précision de 100 mètres. Les récepteurs militaires, équipés pour déchiffrer les signaux codés, fournissent une position plus précise en corrigeant les décalages des horloges.

C'était compter sans l'astuce des ingénieurs et chercheurs civils : peu de temps après le lancement du premier groupe de satellites, des ingénieurs civils ont réduit les erreurs de locali-

sation du système à quelques millimètres, atteignant une précision plusieurs milliers de fois supérieure à celle qui avait été imaginée initialement par les militaires. Pour corriger les décalages des horloges atomiques des satellites, ils mesurent les signaux de plusieurs satellites en un point fixe de position connue. Connaissant la position du récepteur et celles des satellites sur leurs orbites, ils comparent les pseudo-distances (mesurées par le GPS) avec les véritables distances (qu'ils ont calculées). Les différences indiquent la combinaison des erreurs introduites volontairement dans les horloges des satellites et du décalage de l'horloge du récepteur au sol. L'examen des résultats obtenus simultanément avec différents satellites permet de connaître

le décalage de l'horloge au sol : les décalages des horloges atomiques sont donc calculables à leur tour.

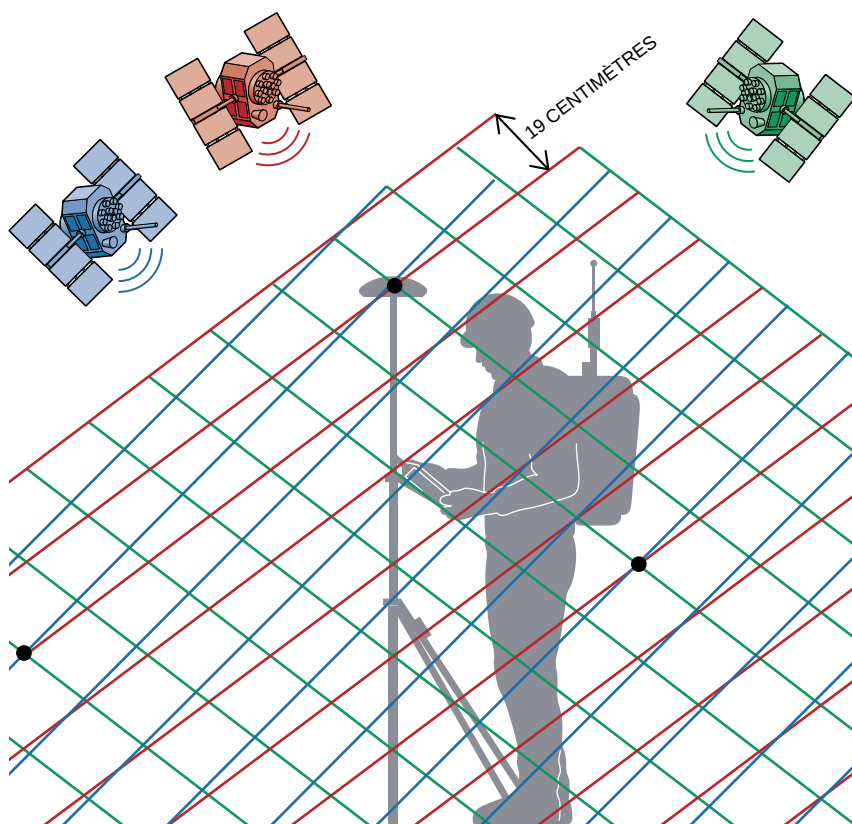
Aujourd'hui, des stations fixes calculent les décalages des horloges des satellites et transmettent les corrections par radio aux récepteurs GPS des environs (voir la figure 5). Cette utilisation du GPS en positionnement relatif offre aux utilisateurs civils des précisions inférieures au mètre, à partir de récepteurs peu onéreux. Des récepteurs perfectionnés donnent même des précisions centimétriques. De nombreux fournisseurs proposent aujourd'hui ce service, parmi lesquels on trouve même le gouvernement américain. L'administration fédérale de l'aviation propose ses services pour la navigation aérienne, et les garde-

À la poursuite des ondes

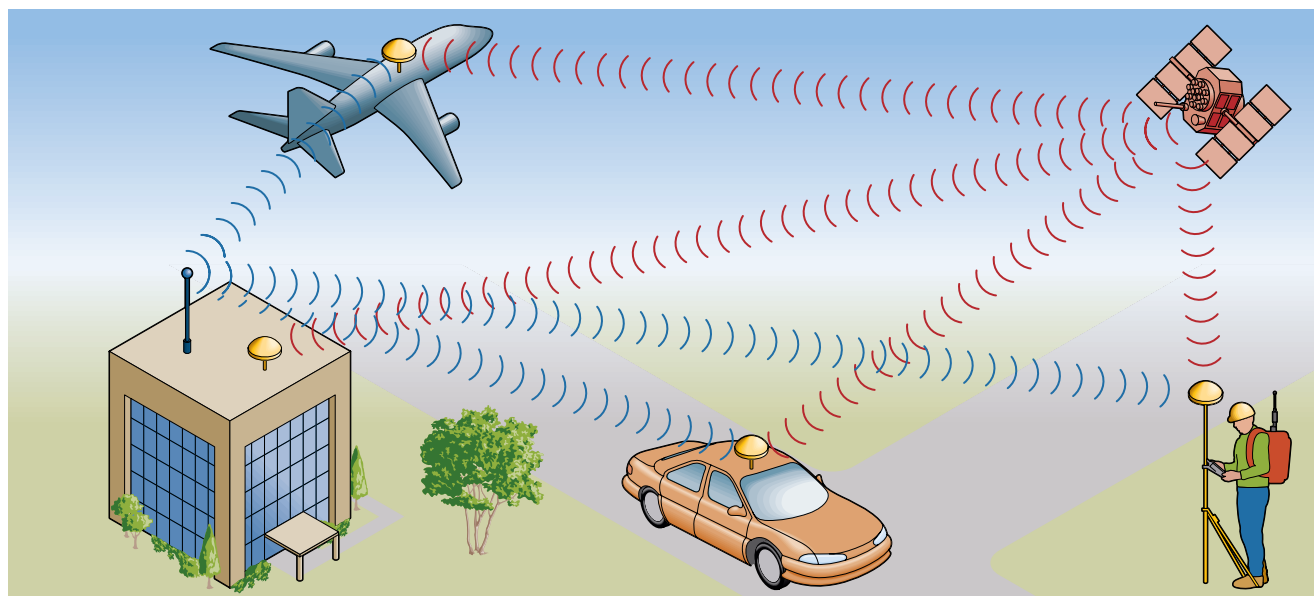
Les géophysiciens utilisent le GPS depuis le milieu des années 1980 pour surveiller les déformations, lentes mais continues, du sol dans les régions d'activité sismique. Pour détecter ces signes avant-coureurs des tremblements de terre, le maximum de précision du GPS est recherché : on utilise la technique d'analyse de phase des fréquences porteuses, qui permet d'obtenir une précision de quelques millimètres.

Les satellites émettent des signaux GPS en modulant une fréquence porteuse. L'analyse de phase détermine quelle partie du signal radio atteint le foyer de l'antenne à un instant donné (la phase de l'émission). Comme un nageur dans l'océan voit s'il est au sommet d'une vague, dans le creux ou quelque part entre les deux, la détection de la phase du signal permet de mesurer la position du foyer de l'antenne dans les 19 centimètres de la longueur d'onde de l'onde porteuse du signal GPS.

Cette méthode permet d'obtenir des précisions de l'ordre d'une petite fraction de la longueur d'onde. La principale difficulté consiste à bien distinguer les ondes que reçoit l'antenne. Le moyen le plus simple consiste à détecter simultanément les phases des fréquences porteuses de plusieurs satellites. Si l'on observe, par exemple, que le foyer de l'antenne réceptrice correspond simultanément à la phase nulle pour trois satellites différents, on déduit que le récepteur se trouve en des points particuliers (*points noirs du diagramme*). En utilisant de telles informations pour un nombre suffisant de satellites, on trouvera des points espacés de plus d'un mètre. Ainsi, à partir de la connaissance de la position approximative de l'antenne (en utilisant le GPS en localisation différentielle), on détermine lequel des points obtenus par la méthode d'analyse des phases représente la véritable position.



La mise en œuvre de cette méthode est toutefois difficile, car on doit simultanément tenir compte du trajet des ondes et du mouvement des satellites. Certaines applications de la méthode de recherche de phase, telle l'aide à l'atterrissage des avions, nécessitent des calculateurs spéciaux pour tester la validité de la navigation. Une des limitations de sécurité introduites par le Département américain de la Défense complique le problème : le système « anti-copie ». Comme les décalages codés des horloges, le système « anti-copie » rend plus complexes et plus coûteuses les applications civiles de haute précision. La mise en service de systèmes russe et européen résoudra en partie cette difficulté.



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 Plin 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