

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.

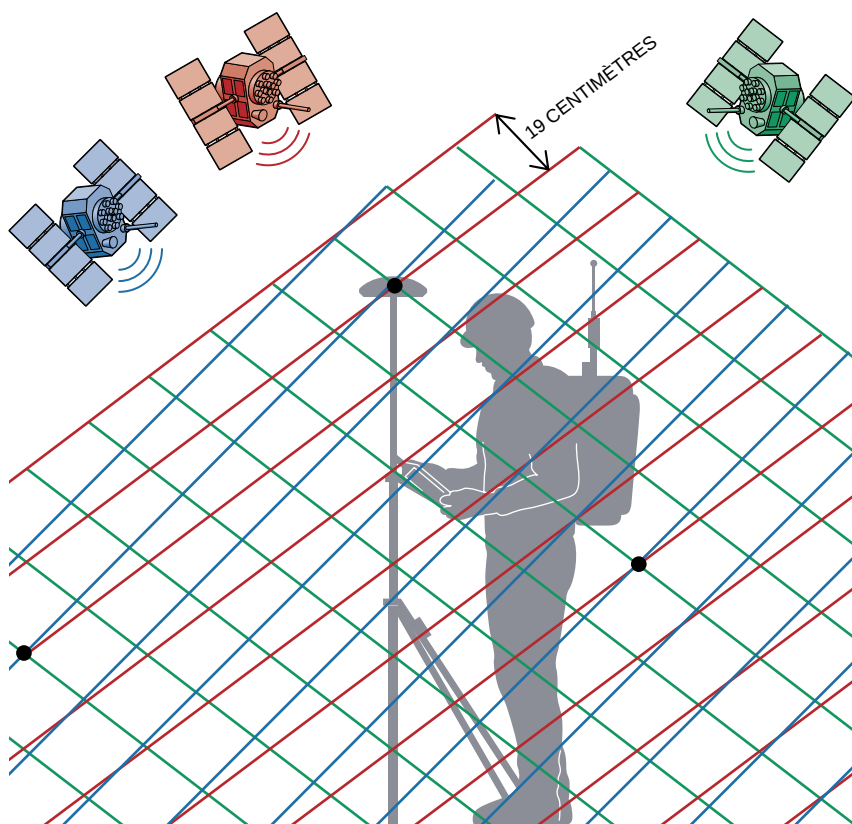
Aujourd'hui, des stations fixes calculent les décalages des horloges des satellites et transmettent les corrections par radio aux récepteurs GPS des environs (voir la figure 5). Cette utilisation du GPS en positionnement relatif offre aux utilisateurs civils des précisions inférieures au mètre, à partir 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

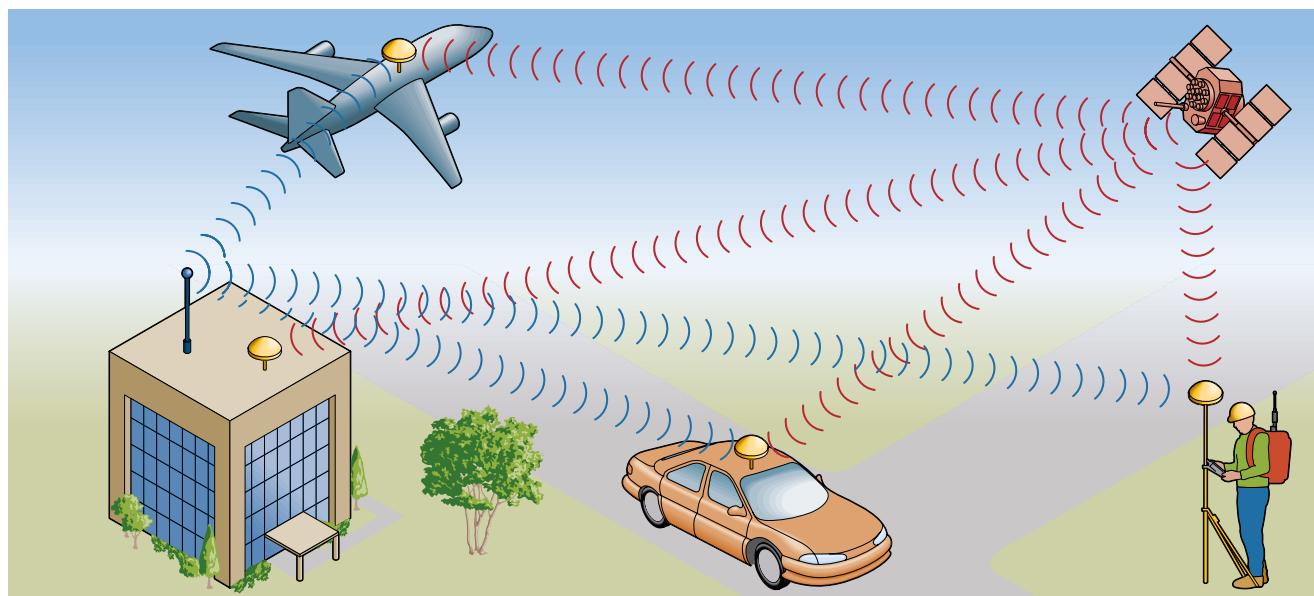
Les géophysiciens utilisent le GPS depuis le milieu des années 1980 pour surveiller les déformations, lentes mais continues, du sol dans les régions d'activité sismique. Pour détecter ces signes avant-coureurs des tremblements de terre, le maximum de précision du GPS est recherché : on utilise la technique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