

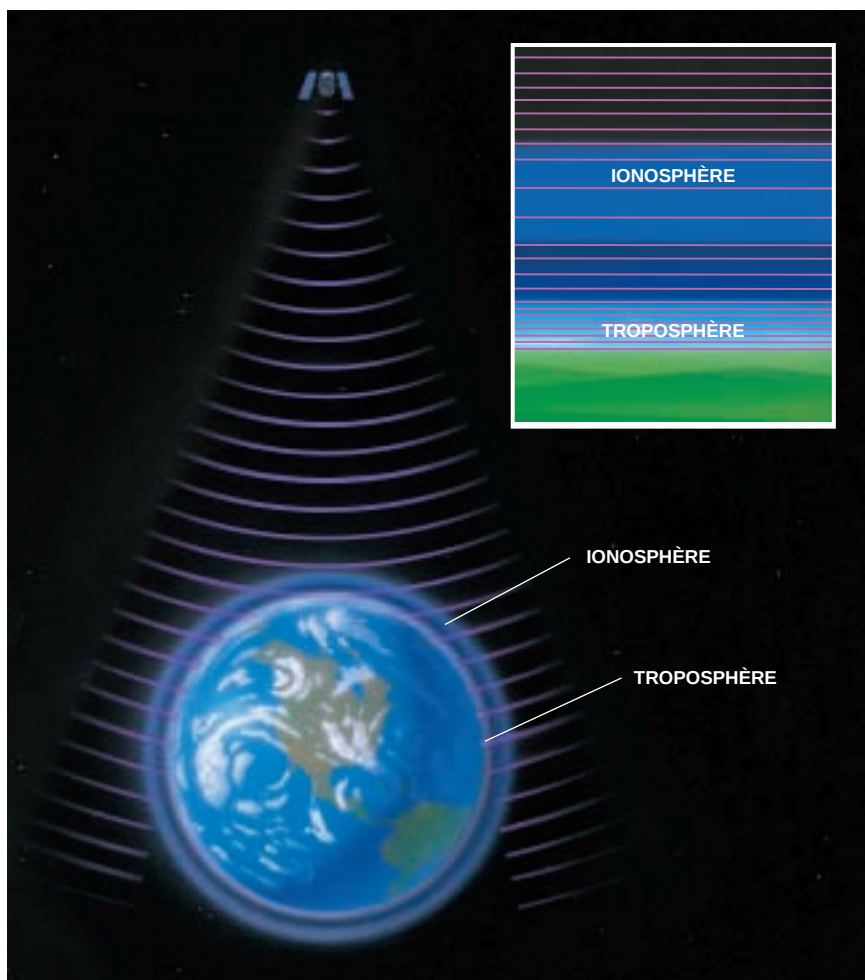
les années 1950 par les astronomes qui étudient les planètes en envoyant des signaux radar à partir de télescopes géants. Ces signaux sont émis à des moments qui semblent aléatoires, mais qui suivent en fait une séquence soigneusement codée. Les astronomes mesurent la durée de l'aller-retour des ondes 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.

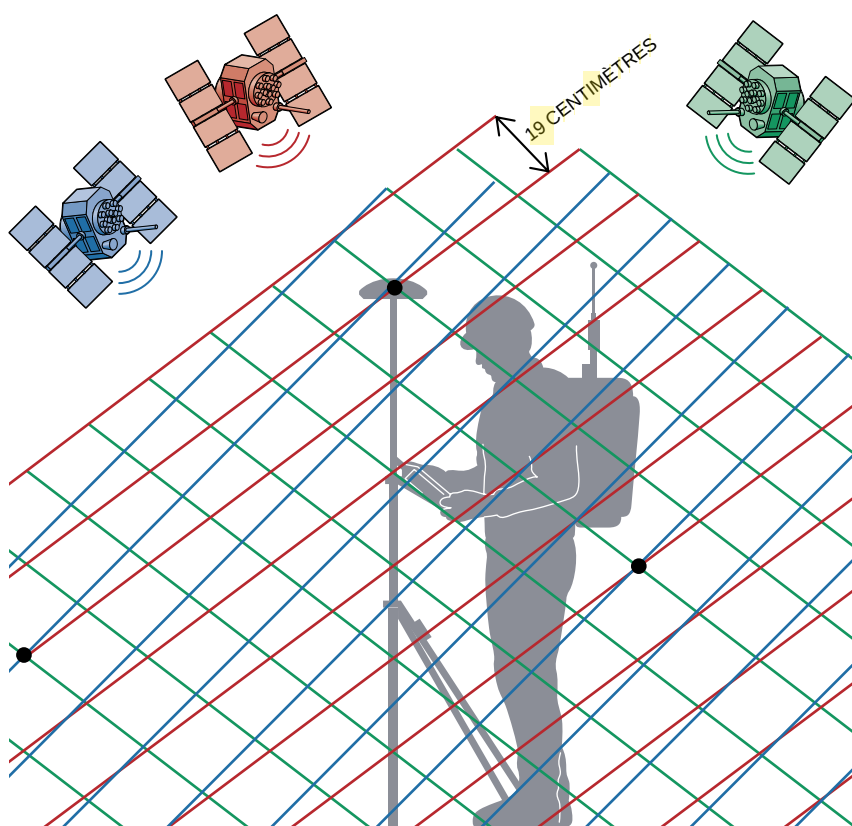
Aujourd'hui, des stations fixes calculent les décalages des horloges des satellites et transmettent les corrections par radio aux récepteurs GPS des environs (voir la figure 5). Cette utilisation du GPS en positionnement relatif offre aux utilisateurs civils des précisions inférieures au mètre, à partir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