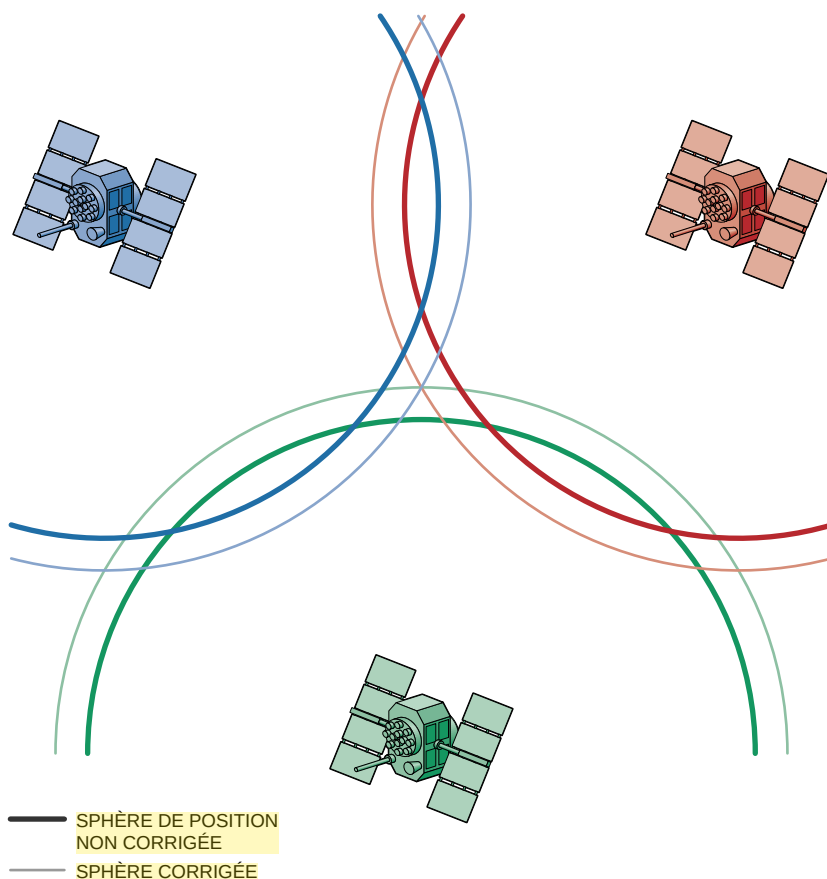
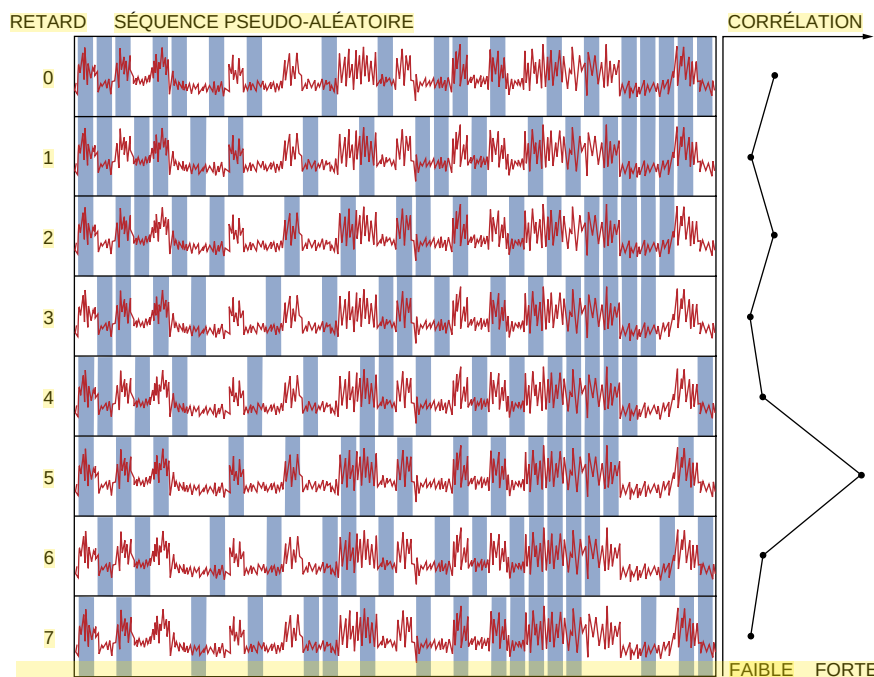




2. LES ERREURS DE SYNCHRONISATION entre l'horloge d'un récepteur et celles des satellites du GPS sont à l'origine d'erreurs sur les distances mesurées. Les sphères des positions possibles (*lignes épaisses*) ne se croisent pas en un point. Une légère avance ou un léger retard de l'horloge du récepteur 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

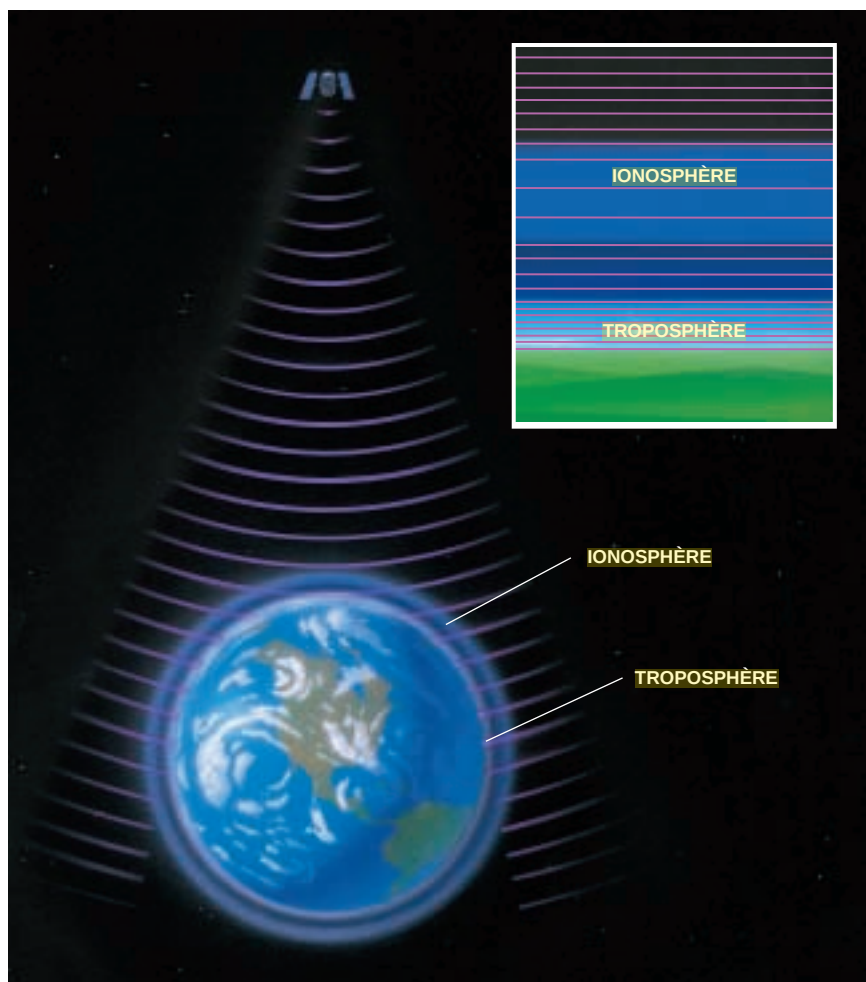
les années 1950 par les astronomes qui étudient les planètes en envoyant des signaux radar à partir de télescopes géants. Ces signaux sont émis à des moments qui semblent aléatoires, mais qui suivent en fait une séquence soigneusement codée. Les astronomes mesurent la durée de l'aller-retour des ondes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