

# 4 Terre et environnement

---

4.1	Quelle précision en temps est nécessaire au GPS? . . .	66
4.2	Un tireur d'élite doit-il se soucier de la rotation de la Terre? . . . . .	71
4.3	Quel est l'âge de la Terre? . . . . .	77
4.4	Quel est le rayon de la Terre? . . . . .	82
4.5	Quelle est la hauteur de l'atmosphère? . . . . .	86
4.6	Les extraterrestres sont-ils muets? . . . . .	90

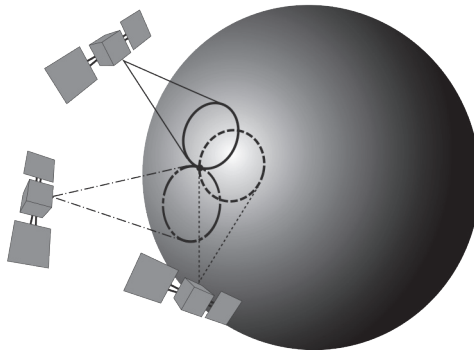
---

---

## 4.1 Quelle précision en temps est nécessaire au GPS ?

---

Le GPS, acronyme anglais de *Global Positioning System*, est un système de géolocalisation faisant désormais partie de notre vie quotidienne. Celui-ci est fondé sur la mesure du temps de vol d'un signal radio voyageant d'un satellite, orbitant à environ 20 000 km de la Terre, vers le récepteur à localiser. La vitesse de propagation du signal étant connue, il est possible de déduire la distance séparant le satellite du récepteur GPS. Le système reposant sur une mesure de temps, voyons quelle est la précision de mesure nécessaire à son fonctionnement.



Le GPS repose sur le principe de la trilatération, dans lequel la position recherchée est contrainte par la connaissance de trois distances (permettant de tracer trois cercles dont on cherche l'intersection), là où la triangulation repose sur deux angles et une distance (permettant de tracer deux droites dont on cherche l'intersection).

### Quelques indices

- Quelle est la précision recherchée en terme de distance ?
- Le signal GPS voyage à la vitesse de la lumière.

**Principe du GPS** Un satellite GPS émet un signal contenant l'heure à laquelle il a été envoyé. Au sol, le boîtier de réception reçoit l'heure d'envoi et enregistre l'heure d'arrivée. Le boîtier de réception peut donc déduire le temps de vol du signal. Sachant qu'un signal radio voyage à la vitesse de la lumière, soit près de 300 000 km/s, le récepteur GPS peut déduire la distance qui le sépare du satellite :

$$d = c \times t$$

où  $d$  est la distance,  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide et  $t$  le temps de vol du signal.

L'ensemble des points qui sont séparés par une certaine distance du satellite forme un cercle au sol, auquel appartient le récepteur. En répétant avec le signal d'un deuxième satellite, on trouve un deuxième cercle. Le récepteur se trouve donc à l'intersection des deux cercles, qui a lieu en deux points. Ajouter le signal d'un troisième satellite, et par-là un troisième cercle, permet de distinguer sans ambiguïté l'endroit où se trouve le récepteur<sup>1</sup>. En effet, seul un point se trouve simultanément à la bonne distance des trois satellites. Cette méthode de repérage, appelée *trilatération*, fait un peu penser à la triangulation qui pour sa part nécessite — comme son nom l'indique — la mesure d'angles.

**Incertitudes** Dans la pratique, la mesure de distance est entachée d'incertitudes, issues notamment de la mesure du temps<sup>2</sup>. En effet, si les heures d'envoi et de réception sont mal connues, alors le temps de vol et la distance sont mal estimées. Si une distance parfaitement connue se traduit par un cercle au sol, une

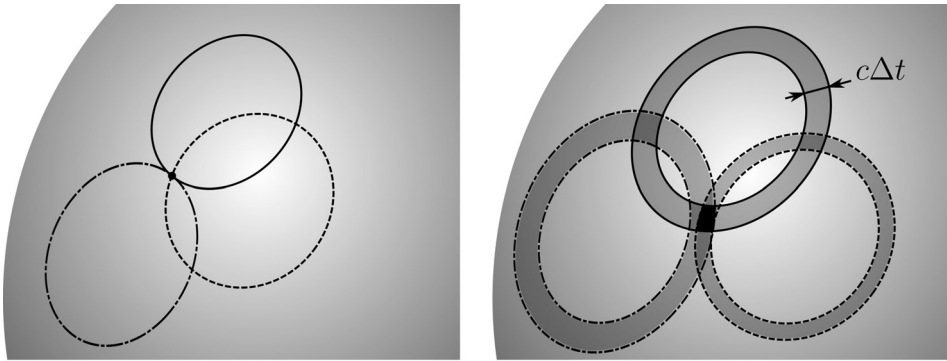
---

1. Dans la pratique, le récepteur GPS disponible à tout un chacun ne possède pas l'horloge de haute précision que l'on trouve dans les satellites GPS. Afin de contourner ce problème, le récepteur utilise donc le signal d'un quatrième satellite GPS afin de déterminer précisément l'heure d'arrivée des autres signaux.

2. Le niveau de précision actuel nécessite de prendre en compte d'autres sources d'incertitudes comme l'influence de l'atmosphère sur la propagation du signal radio ou encore la possibilité de capter un signal antérieur, réfléchi par des obstacles environnants.

distance entachée d'incertitude se traduit par un anneau. En effet, une distance entachée d'incertitude correspond à un intervalle de distances possibles entre une distance minimale et une distance maximale. À la distance minimale correspond un cercle, à la distance maximale un cercle de plus grand diamètre. Ce sont ces deux cercles concentriques qui délimitent l'anneau :

$$d_{\min} = c \times t_{\min} \quad \text{et} \quad d_{\max} = c \times t_{\max}$$



Si le temps de vol des signaux est parfaitement connu, alors on cherche l'intersection de trois cercles, c'est-à-dire un point (à gauche). Si ce temps de vol est entaché d'incertitudes, alors on cherche l'intersection de trois anneaux, qui est une zone dont la taille est du même ordre de grandeur que l'épaisseur d'un anneau (à droite).

On peut alors en déduire l'incertitude en distance résultant de l'incertitude dans la mesure du temps :

$$\Delta d = d_{\max} - d_{\min} = c \times \Delta t \quad \text{où} \quad \Delta t = t_{\max} - t_{\min}$$

où  $\Delta d$  est l'incertitude en distance et  $\Delta t$  l'incertitude dans la mesure du temps de vol.

#### 4.1 Quelle précision en temps est nécessaire au GPS ?

L'épaisseur de l'anneau au sol est du même ordre de grandeur que  $\Delta d$ . Le lieu où se trouve le récepteur est donc l'intersection de trois anneaux, qui n'est donc plus un point mais une zone. La taille de cette zone est également du même ordre de grandeur que  $\Delta d$ .

**Résultat** Dans le cas d'un GPS pour la navigation à pied ou en voiture, la précision recherchée est typiquement  $\Delta d \sim 10$  m. On peut alors en déduire la précision nécessaire dans la mesure du temps :

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{c} = \frac{10 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 30 \text{ ns}$$

La précision recherchée est donc de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes (milliardièmes de seconde). Pour mieux se représenter une si petite durée, on peut la rapporter à l'échelle d'une vie humaine : une nanoseconde est à une seconde ce qu'une seconde est à une trentaine d'années.

#### Pour aller plus loin : la mesure précise du temps

L'horloge est un instrument de mesure du temps ayant permis l'organisation efficace du temps dans les sociétés. Fondamentalement, une horloge est constituée d'un processus régulier délimitant une durée élémentaire, et d'un moyen de compter ces durées élémentaires pour indiquer le temps qui passe.

Vers 3500 ans av. J.-C. les Égyptiens utilisaient déjà les obélisques comme la tige — ou *gnomon* — de ce qui allait devenir le cadran solaire. La direction et la longueur de l'ombre de l'obélisque permettait de diviser grossièrement la journée en matin et après-midi.

Vers 1500 ans av. J.-C., toujours en Égypte, vinrent ensuite les cadrans solaires à proprement parler ainsi que les clepsydres, sortes de sabliers à eau constitués d'un bol percé duquel s'écoulait l'eau. Il faudra attendre la fin du xvi<sup>e</sup> siècle et le xvii<sup>e</sup> siècle pour voir émerger un nouveau concept d'horloge mécanique, reposant sur l'oscillation régulière d'un pendule. Ce concept a connu de nombreux perfectionnements jusqu'à être détrôné par l'horloge à quartz, inventée dans les années 1920.

Le fonctionnement de l'horloge à quartz repose sur la capacité du quartz à se déformer sous l'effet d'une tension électrique, et à produire une tension électrique lorsqu'on le déforme. À l'aide d'un circuit électronique adapté, il est possible de faire vibrer le cristal de quartz, qui en retour va produire un signal électrique de fréquence stable. Ce signal régulier, obtenu sans avoir recours à des engrenages, permet de marquer le temps. En raison de leur performance, atteinte pour un faible coût, les horloges à quartz sont omniprésentes dans les appareils électroniques.

Les satellites GPS, nécessitant une très grande précision, emportent avec eux des horloges atomiques. Ces horloges reposent sur les résonances atomiques, c'est-à-dire la propriété de chaque élément chimique d'absorber et d'émettre la lumière uniquement à certaines fréquences. Les atomes font donc des pendules à la stabilité remarquable, les horloges atomiques actuelles ne varient d'une seconde qu'après plusieurs centaines de millions d'années.

## 4.2 Un tireur d'élite doit-il se soucier de la rotation de la Terre?

---

Les tireurs d'élite remplissent des missions d'observation et de neutralisation à longue distance. Discrets et travaillant au sein d'une petite équipe, leurs tirs visent des cibles à une distance pouvant dépasser le kilomètre. À une telle distance, le sang-froid ne suffit plus et plusieurs paramètres météorologiques sont à prendre en compte : vent, température et humidité notamment. Un autre paramètre, appelé déviation de Coriolis et dû à la rotation de la Terre, affecte la précision du tir. Voyons quelle peut être son influence.



Gaspard-Gustave de Coriolis (1792-1843)

**La déviation de Coriolis** La déviation de Coriolis, du nom de l'ingénieur l'ayant décrite au XIX<sup>e</sup> siècle, est due à la rotation de la Terre sur elle-même, d'Est en Ouest. Cette rotation a pour effet de dévier les corps vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans l'hémisphère Sud. Le mouvement d'un objet vers le Nord ou vers le Sud permet de comprendre la raison de cette déviation.

La Terre tourne sur elle-même d'Ouest en Est, accomplissant une rotation complète en un jour. Elle tourne d'un bloc, c'est-à-dire sans se déformer. Ce constat banal signifie qu'une ville située à l'équateur parcourt une plus grande distance en un jour — et va donc plus vite vers l'Est — qu'une ville située à une autre latitude, et à plus forte raison que les pôles qui demeurent immobiles<sup>3</sup>.

En l'absence de frottement ou d'autres forces, un objet conserve sa vitesse s'il n'est pas lié au sol. Imaginons qu'il s'agit d'un objet lancé depuis l'équateur vers un pôle. À mesure qu'il progresse vers le Nord ou le Sud, l'objet change de latitude. Sa vitesse vers l'Est, c'est-à-dire celle de la latitude depuis laquelle il a été lancé, n'est plus celle du sol qui défile sous lui.

Lancé depuis l'équateur (où la vitesse vers l'Est est maximale) vers un pôle, l'objet ira donc plus vite vers l'Est que le sol sous lui. Vu depuis le sol, l'objet aura donc une trajectoire comme déviée vers l'Est sous l'influence d'une force. Cette déviation est vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans l'hémisphère Sud.

---

3. Tous ces mouvements s'entendent dans un cadre d'observation lié à la Terre mais qui ne tourne pas avec : le référentiel géocentrique