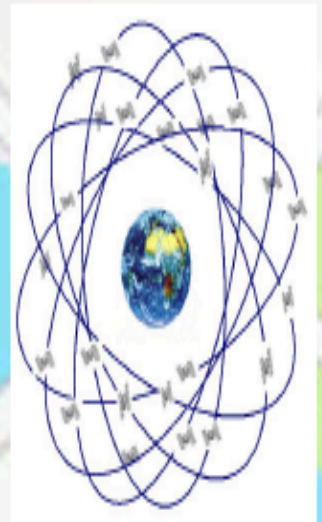


GEOREFERENCEMENT

LE G.P.S.



**LAMEYNARDIE J-Louis
MARTINIQUE (France)**

Préambule

Les coordonnées géographiques

Latitude et longitude

L'Équateur est le cercle imaginaire autour de la Terre situé à égale distance des deux pôles.

Un parallèle est un cercle imaginaire parallèle à l'Équateur.

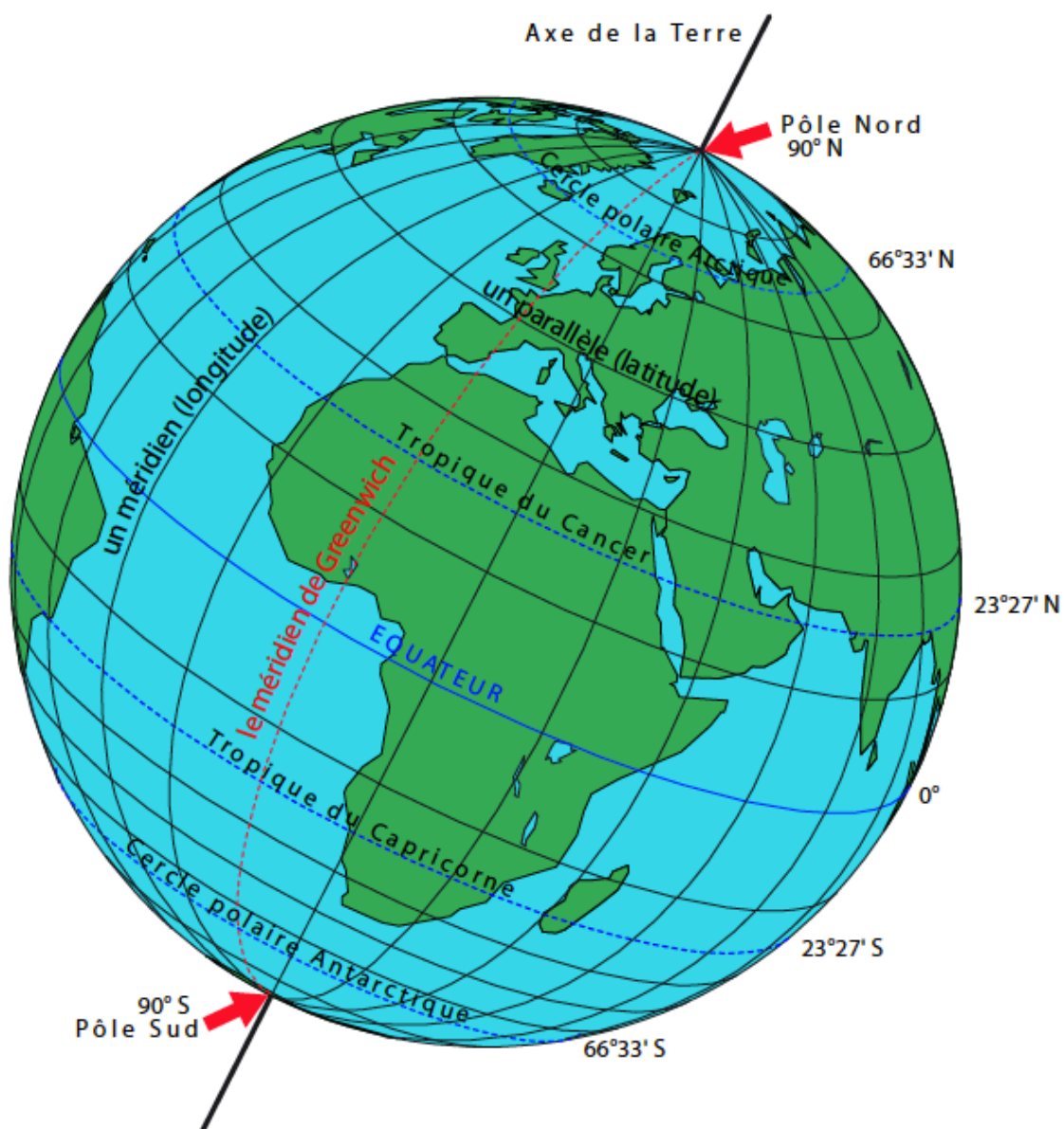
Un méridien est un demi-cercle qui joint les deux pôles.

Le méridien de Greenwich est le méridien qui passe par l'Observatoire de Greenwich, près de Londres.

La latitude est la mesure de l'angle en degrés qui sépare un parallèle de l'Équateur.

La longitude est la mesure de l'angle en degrés qui sépare un méridien, du méridien de Greenwich.

LES LIGNES IMPORTANTES DE LA TERRE (GLOBE)



En plus de l'axe de la Terre passant par le pôle Nord et le pôle Sud, ayant une inclinaison de $23^{\circ}27'$, les géographes ont tracé deux types de cercle imaginaire sur le globe terrestre. Ce sont les parallèles et les méridiens.

Les parallèles sont tracés de l'Equateur ($\pm 40\,000$ km) aux pôles Nord et Sud (0 km).

Les parallèles nous donnent les latitudes en degrés, minutes et secondes. Celles-ci vont de 0° à 90° N et de 0° à 90° S.

Les méridiens font le tour de la Terre en passant par les deux pôles et mesurent $\pm 40\,000$ km. Ils ont tous la même longueur.

Les méridiens nous donnent les longitudes en degrés, minutes et secondes. Ceux-ci vont de 0° à 180° O et de 0° à 180° E

En prenant une latitude et une longitude sur le globe terrestre, nous obtenons grâce à ces coordonnées un point précis sur celui-ci. L'application concrète à ce système est le GPS.

LES LATITUDES PARTICULIERES (PARALLELES)

Le pôle Nord : latitude 90° N (ce n'est qu'un point)

Le cercle polaire Arctique : latitude $66^{\circ}33'$ N

Le Tropique du Cancer : latitude $23^{\circ}27'$ N

L'Equateur : latitude 0°

Le tropique du Capricorne : latitude $23^{\circ}27'$ S

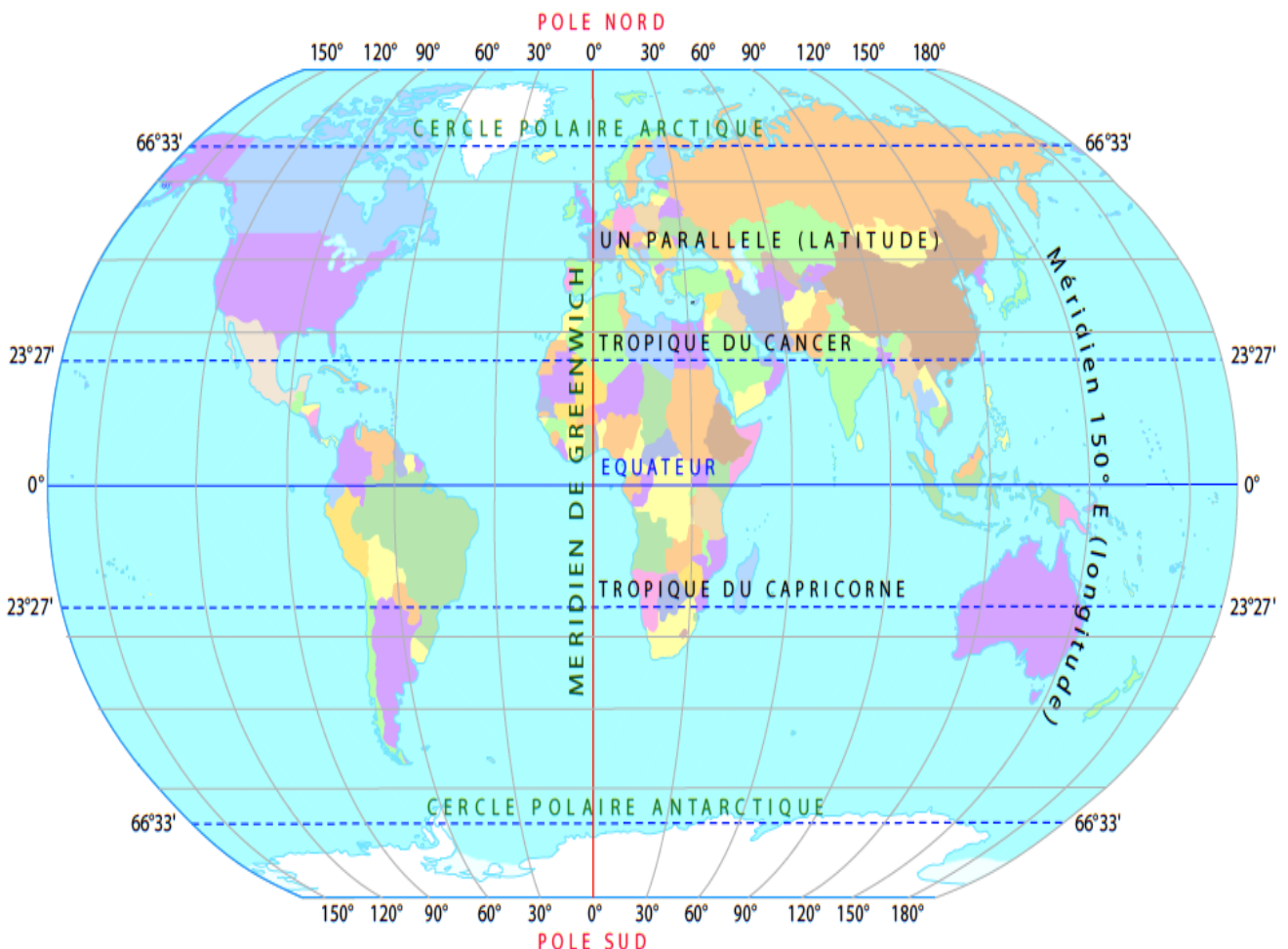
Le cercle polaire Antarctique : latitude $66^{\circ}33'$ S

Le pôle Sud : latitude 90° S (ce n'est qu'un point)

LA LONGITUDE PARTICULIERE (MERIDIEN)

Le méridien de Greenwich ou de Paris : longitude 0° ou 180° O ou E.

LES LIGNES IMPORTANTES DE LA TERRE (PLANISPHERE)



Les parallèles et les méridiens de la Terre sont aussi représentés sur le planisphère. L'on constate que les parallèles sont de plus en plus étirés en partant de l'Equateur vers les pôles. Les pôles d'ailleurs ne sont plus représentés par un point.

Nous constatons que les latitudes varient entre 0° à l'Equateur et 90° aux pôles (90° N ou 90° S) tandis que les méridiens varient de 0° (méridien de Greenwich ou de Paris) à 180° O ou 180° E.

Les latitudes et les longitudes nous permettront de localiser avec précision n'importe quel lieu situé sur le planisphère.

Les lignes importantes sont : le pôle Nord, le cercle polaire Arctique, le tropique du Cancer, l'Equateur, le tropique du Capricorne, le cercle polaire Antarctique, le pôle Sud et le méridien de Greenwich ou de Paris.

Depuis longtemps les hommes ont regardé vers le ciel pour se diriger mais aujourd'hui les infos venant des étoiles ont atteint une précision inégalée grâce aux satellites.

Mais savez vous comment cela fonctionne-t-il?

Cette technologie qui s'appelle le G.P.S pour Global Positioning System vous en avez peut-être un dans votre véhicule, dans votre poche ou lorsque vous faites vos courses ou même du sport. Mais savez vous comment fonctionne le système industriel et financier qui soutient cette technologie?

Connaissez vous l'ampleur de la rivalité entre américains et européens pour ce système

Au départ Fin des années 1960, aux États-Unis d'Amérique, le Pentagone (D.O.D) lance le programme NAVSTAR GPS un nouveau système de géolocalisation à des fins militaires et place des satellites pour que les forces militaires, la marine américaine et les forces terrestres puissent avoir des positionnements identiques et coordonnées évoluer dans le même sens dont le but était mais Suite au crash du vol Korean Airlines 007, le président Nixon décide de rendre l'usage du système GPS possible pour le grand public.

Communiquer, savoir où l'on se trouve est une chose essentielle lorsque l'on fait la guerre ou des manœuvres mais depuis une quinzaine d'années le GPS est devenu un objet usuel et presque indispensable pour certains mais à quoi il sert et comment il fonctionne ??

Les composantes du système GPS

Le GPS comporte trois parties appelées segments : l'espace, le contrôle et l'utilisateur.

1 LA PARTIE SPATIALE OU SEGMENT SPATIAL



La partie spatiale comprend les satellites et les fusées Delta, qui lancent les satellites à partir de Cap Canaveral en Floride.

Les satellites GPS décrivent des orbites circulaires d'une durée de 12 heures, à 17 440 km d'altitude. Les orbites sont inclinées de 55° par rapport à l'équateur pour assurer une couverture des régions polaires. Les satellites s'orientent continuellement pour pointer les panneaux solaires qui les alimentent vers le Soleil et les antennes vers la Terre.

Décolage d'une fusée Delta

Chaque satellite est équipé de quatre horloges atomiques.

2 LA PARTIE DE CONTROLE OU SEGMENT

CONTROLE

- Elle comprend la station maîtresse de contrôle, située à la base Falcon de l'armée de l'air, à Colorado Springs, dans le Colorado.
- Elle comprend également des stations de surveillance installées à Falcon AFB (Hawaii), sur l'île de l'Ascension dans l'Atlantique, à Diego Garcia dans l'océan Indien, et sur l'île Kwajalein dans le Pacifique sud.
- Le système de contrôle utilise les mesures collectées par les stations de surveillance pour prédire le comportement de chaque orbite et horloge de satellite.
- Les données de prédiction sont transférées aux satellites pour transmission aux utilisateurs.
- Le système de contrôle veille aussi à ce que les orbites des satellites GPS restent dans leurs limites et que les horloges ne s'écartent pas trop de leurs caractéristiques propres.

3 LA PARTIE UTILISATEUR OU SEGMENT UTILISATEUR



C'est le plus connu puisqu'il s'agit de l'ensemble des récepteurs GPS utilisés à travers le monde. Un GPS fournit :

- une position
- une vitesse
- un temps

La position est fournie soit en données angulaires (latitude / longitude), soit en données métriques (grille UTM)

LE PRINCIPE DU GPS

Pour expliquer comment marche un GPS, nous allons en imaginer une version avec des pigeons ! Supposons que vous rentriez tranquillement chez vous après une visite chez un ami qui habite à 500 km de chez vous. Vous êtes en vélo, alors ça prend du temps !

Soudain un pigeon voyageur vous arrive, envoyé par votre ami. Le pigeon vous apporte le message suivant : « A l'heure où j'écris ces lignes, il est 10h ». Or vous regardez votre montre et constatez qu'il est actuellement 18h. Le pigeon est donc parti il y a 8 heures. Comme vous savez qu'un pigeon voyageur vole à environ 50km/h, vous pouvez en déduire que vous vous trouvez à 400km de chez votre ami, et donc à 100 km de chez vous.



Cet exemple simpliste illustre le principe du GPS : si on reçoit un message dont on sait d'où et quand il est parti, on peut en déduire où on se trouve, à condition de connaître sa vitesse de transmission.

LA TRIANGULATION

Dans mon exemple précédent, pour calculer la position j'ai supposé que l'on était resté sur la ligne droite qui sépare les deux villes. Mais si on dérive, alors un seul pigeon ne suffit plus !

Imaginons qu'au même moment vous receviez en plus du message précédent un autre pigeon expédié de votre ville de destination, et dont le message affirme « Ici il est 14h ». Puisqu'il est actuellement 18h vous en déduisez que vous êtes à 200 km de l'arrivée.

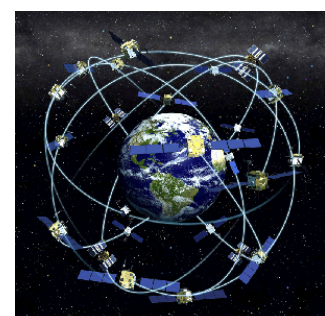
Vous êtes donc précisément à 400km de départ et 200km de l'arrivée. **Pour trouver votre position exacte, il suffit de tracer des cercles centrés sur les villes comme l'illustre le schéma ci-contre.** C'est le principe de la **triangulation**.

Comme vous le voyez sur le dessin, il existe deux endroits possibles, et pour savoir lequel des deux est le bon, il faudrait utiliser un troisième pigeon partant d'une troisième ville. D'ailleurs dans mon exemple, j'ai utilisé comme ville de base des pigeons le départ et l'arrivée, mais ça n'est absolument pas nécessaire. Tant qu'on sait d'où partent les pigeons, si on connaît leur distance parcourue on peut trianguler notre position.

LE VRAI GPS

Laissons maintenant de côté les pigeons, et intéressons nous au véritable GPS. Celui-ci est constitué d'une **flotte de 24 satellites qui orbitent autour de la Terre à une altitude d'environ 20000 km.**

Ils effectuent exactement 2 tours par jour au-dessus de nos têtes. Où vous que vous soyez sur le globe, vous êtes en vue directe d'au moins 4 de ces satellites, et généralement plutôt d'une dizaine.



Chaque satellite contient une horloge atomique, et émet en permanence des messages sous formes d'ondes. Si on imagine que comme pour le pigeon, ces messages contiennent leur heure d'émission, alors connaissant la vitesse de transmission des ondes (qui est celle de la lumière), on peut trianguler notre position et se situer par rapport aux satellites. C'est ce que fait votre petit boîtier de GPS !

4 Le positionnement des satellites

Tout cela semble donc être parfait et nous permet d'obtenir un positionnement exact, cependant un autre détail est à régler : la position des satellites. Effectivement, pour calculer précisément la distance séparant un satellite du point à déterminer, il faut que ce dernier connaisse parfaitement sa position dans l'espace. c'est le rôle des stations de contrôle : Le satellite renvoie sa position théorique à la station de contrôle, qui calcule alors l'erreur de position commise par ce dernier afin de lui renvoyer la valeur de cette erreur. Le satellite peut donc informer le récepteur de l'erreur qu'il doit prendre en compte dans ses calculs.

LE PROBLEME DE LA PRECISION

Je vous l'ai dit, chaque satellite contient une horloge atomique ultra-précise, comme celle représentée ci-contre. Ces horloges sont difficiles à fabriquer, alors on peut se demander pourquoi on a besoin d'une telle précision pour notre GPS ! Eh bien faisons le calcul.

Revenons un instant au pigeon. Quand vous recevez un message « Il est 10h » et qu'il est 18h, vous savez que vous êtes à 400 km du point d'émission. Imaginez que le message que vous receviez soit « Euh...là c'est le matin ». C'est beaucoup moins précis ! Si vous vous dites qu'il était entre 8h et 12h quand le pigeon est parti, cela signifie que vous êtes quelque part entre 300 et 500km du départ. La précision de votre positionnement dépend directement de celle du timing du message !



Faisons le même calcul à l'envers pour le GPS : le signal se propage à la vitesse de la lumière, soit 300 000 km/s, et avec un GPS on aimerait pouvoir se situer à 10 mètres près. Cette distance de 10 mètres est parcourue en 30 milliardièmes de secondes par le signal : l'horloge doit donc être précise à 30 nanosecondes ! Et pour atteindre cette précision dans l'horloge interne du satellite, nous avons besoin d'Einstein !

LES CORRECTIONS RELATIVISTES

Pour fabriquer des horloges atomiques précises à 30 nanosecondes, il faut comprendre exactement comment le temps s'écoule. Or avec ses théories de la relativité restreinte et générale, Einstein a découvert que l'écoulement du temps cache quelques subtilités.

Premier élément à prendre en compte : le temps est ralenti pour les objets en mouvement. Cet effet a été prédit par Einstein à partir de sa théorie de la relativité restreinte publiée en 1905. Nos satellites se déplacent à 14000 km/h sur leur orbite, et on peut calculer qu'ils subissent un ralentissement du temps de 7 microsecondes par jour par rapport à nous.

Le deuxième effet est une conséquence de la théorie de la relativité générale publiée par Einstein en 1915 : le temps s'écoule plus lentement dans un champ gravitationnel plus intense. Or nos satellites sont en altitude, et l'attraction gravitationnelle qu'ils subissent est environ 20 fois plus faible que la nôtre. Cet effet fait que leur temps est accéléré de 45 microsecondes par jour par rapport au nôtre.

Si on fait la somme nette de ces deux corrections, le temps qui s'écoule à bord des satellites est accéléré d'environ 38 microsecondes chaque jour. En multipliant par la vitesse de la lumière, on voit que si on ne prenait pas en compte cet effet, l'indication du GPS se décalerait d'environ 10km

par jour. Une autre manière de le dire, c'est que le système GPS aurait fonctionné avec la précision requise pendant environ seulement 2 minutes après sa mise en route. Pas terrible pour un équipement à 10 milliards de dollars !

En conclusion, sans les travaux ultra-théoriques et fondamentaux d'Einstein au début du 20ème siècle, et sans la relativité générale, ses trous noirs et son big-bang, on n'aurait jamais pu fabriquer le GPS !

LES UTILISATIONS ACTUELLES DU GPS

L'utilisation de terminaux s'est généralisée pour répondre aux besoins des professionnels et grands publics (militaire, navigation, topographie et synchronisation du temps).

Les terminaux permettent souvent d'exploiter les signaux de plusieurs systèmes notamment GLONASS et GPS.

Ces systèmes passifs peuvent être complétés par des émetteurs de radiolocalisation pour des applications de suivi logistique (**APRS**), de sauvetage (**SAR**), de surveillance de trafic maritime (**AIS**), d'étude océanographique, de biologie (**radiotracking**).

- Militaire d'ailleurs selon les bruits leur gps possèdent une précision de l'ordre du cm cela veut dire qu'avec un retour du signal ils peuvent savoir ce que nous avons dans notre poche
- Guidage des drones
- services d'urgence (pompiers, police...)
- Systèmes embarqués anti vol ou guidages,
- Permet de sauver des vies (assistance dans les véhicules)
- Suivi d'avions, camions, bateaux
- Réseaux sociaux,
- Agriculture ou animaux de compagnie (permet de comptabiliser et localiser les animaux égarés). Aujourd'hui certains mettent des puces GPS sur leur enfants et certains chefs d'Etat et diplomates en ont une.
- Malheureusement utilisé par les services publiques comme les impôts

AUTRES SYSTEMES

- L'URSS à la suite des États-Unis développe GLONASS entré en fonction en 1996 et qui, après une période d'éclipse liée à l'éclatement de l'Union soviétique, est redevenu opérationnel en 2010.
- la Chine avec le système Beidou-2 (COMPASS) développent leur propre système qui devrait être complètement opérationnel en 2020.
- Le Japon (QZSS)
- l'Inde avec l'IRNSS développent de leur côté un système assurant une couverture uniquement régionale dont la Chine dispose également avec Beidou-1.
- L'Union européenne avec le système Galileo

Les sources d'erreurs

En dehors de la dégradation volontaire du signal par les militaires américains, il existe des facteurs dits "naturels" qui limitent la précision du GPS. Nous pouvons citer dans l'ordre de leur influence sur la perte de précision: la réfraction dans l'ionosphère, la réfraction dans la troposphère, la précision du positionnement des satellites GPS et les phénomènes de multitrajets.

5 la réfraction dans l'ionosphère

L'ionosphère est une enveloppe constituée de particules chargées (des ions) qui entourent la Terre à près de 20 km d'altitude. L'onde porteuse du signal GPS doit pénétrer dans cette couche sur son trajet. Le fait que cette couche ne soit pas neutre, au niveau de sa charge, entraîne une perturbation de la vitesse de l'onde électromagnétique qui se propage. L'amplitude de cette imprécision est liée à la longueur d'onde et à la densité de particules chargées dans le milieu traversé, laquelle densité est évidemment inconnue et variable dans le temps et dans l'espace. Le temps mis par l'onde GPS est modifié d'une durée inconnue, nommée délai ionosphérique. L'évaluation de la distance entre le satellite et la station sera faussée, la précision est donc diminuée par ce premier phénomène. Dans le cas d'une ionosphère très agitée, lors d'une tempête solaire par exemple, l'évaluation du délai ionosphérique ne sera qu'approximative et la mesure de la position imprécise.

6 La réfraction dans la troposphère

De la même façon, le temps de propagation de l'onde GPS est affecté par la teneur en vapeur d'eau de la couche basse de l'atmosphère (de 0 à 10 km d'altitude) : la troposphère. Il est nécessaire de connaître cette teneur avec précision tout le long du trajet de l'onde. En pratique cela se révèle très difficile, sinon impossible. En effet, le retard provoqué est plus compliqué qu'un simple rapport de proportionnalité avec le pourcentage de vapeur d'eau. Ce problème est d'autant plus important que les conditions météorologiques et les épaisseurs troposphériques diffèrent entre deux stations. Cette erreur de position se retrouvera plus particulièrement sur la composante verticale, les erreurs horizontales se compensant plus ou moins du fait que les satellites couvrent à peu près toutes les directions l'horizon. Il existe une recherche portant sur des instruments permettant de mesurer directement la teneur en vapeur d'eau le long du trajet suivi par l'onde GPS ; mais ils sont en phase expérimentale.

7 la précision des orbites des satellites GPS

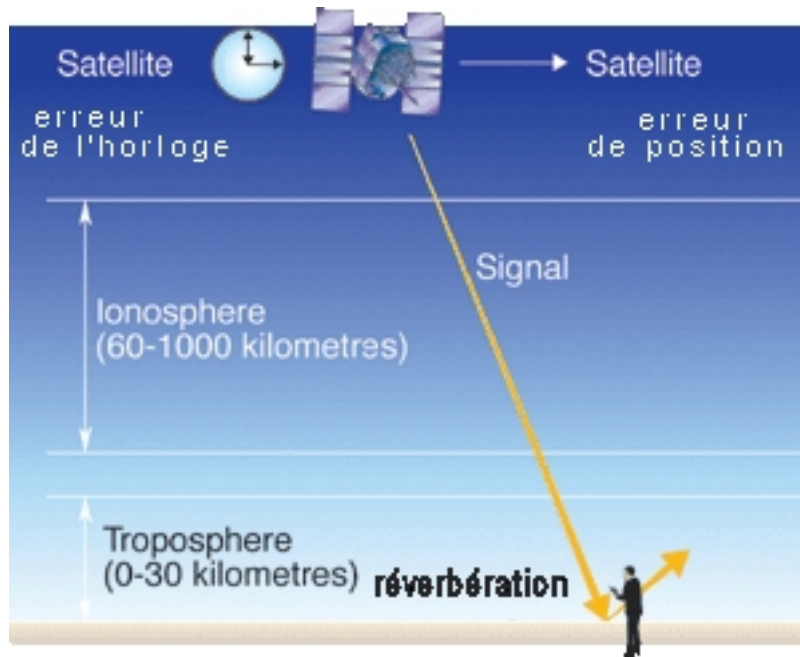
Il est évident que si il y a une erreur sur la position du satellite émetteur, cette erreur va se répercuter directement sur la position affichée par le récepteur. La distance entre deux stations (ligne de base). L'orbite des satellites GPS peut être calculée très précisément, mais elle est rendue publique par les militaires américains avec une précision de l'ordre de 200 m. Sur 20000 km cela donne une erreur de 10 cm sur une ligne de base de 10 km ! Cette erreur est handicapante pour les domaines réclamant une grande précision, notamment dans le domaine de la surveillance de plaques tectoniques.

8 les multitrajets

Ces phénomènes sont parmi les plus difficiles à appréhender. Il est clair que tout objet réflecteur placé dans le voisinage de l'antenne de la station GPS, peut renvoyer une partie du signal provenant du satellite sur cette antenne. Tout comme un miroir crée une image de soi même lorsque l'on se regarde dedans, le réflecteur crée une image de l'antenne GPS. C'est la position de cette antenne virtuelle que l'on risque alors de mesurer en lieu et place de la véritable antenne. Qui plus est, au fur et à mesure que le satellite se déplace sur son orbite, l'angle d'incidence sur le réflecteur change, et l'image se déplace d'autant. C'est donc finalement la position d'une antenne virtuelle mobile que l'on mesure ! Compte tenu de la complexité des calculs correctifs qu'il faudrait effectuer, il n'y a pas vraiment de remèdes aux problèmes des multitrajets. Un "blindage" des antennes contre les réflexions parasites est toujours possible, mais celui-ci ne peut être que partiel puisqu'il faut bien que

le vrai signal parvienne à l'antenne. La seule solution consiste donc à essayer d'éviter les multitrajets (c'est à dire les objets parasites) autant que faire ce peut, ce qui n'est pas si facile quand on considère que le sol lui même est un réflecteur potentiel !

Nous pouvons résumer toutes ces sources d'erreurs sous la forme du schéma suivant:



Le système Galileo vs le GPS

<https://www.youtube.com/watch?v=YiDBAGl3YLA>

