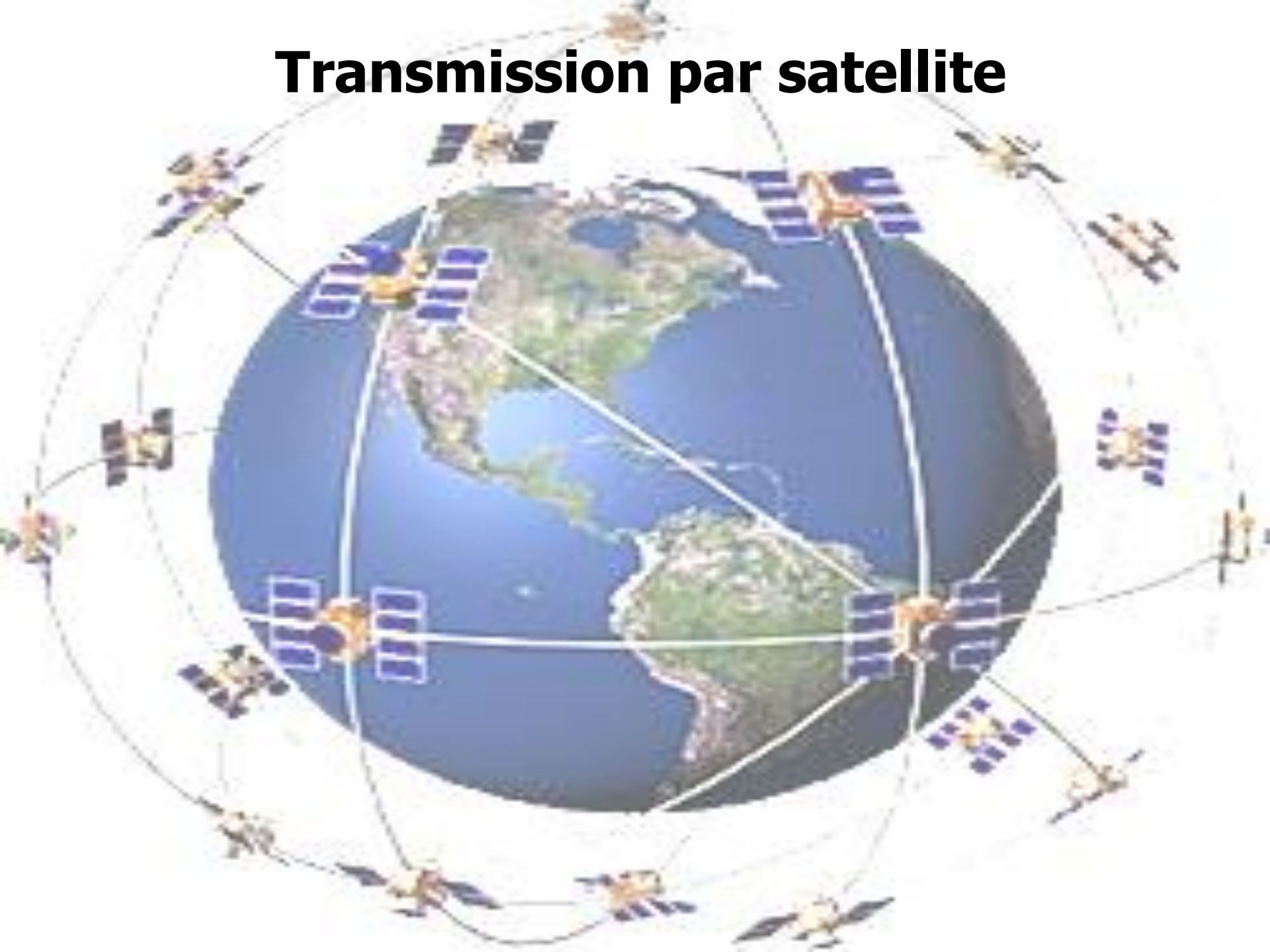
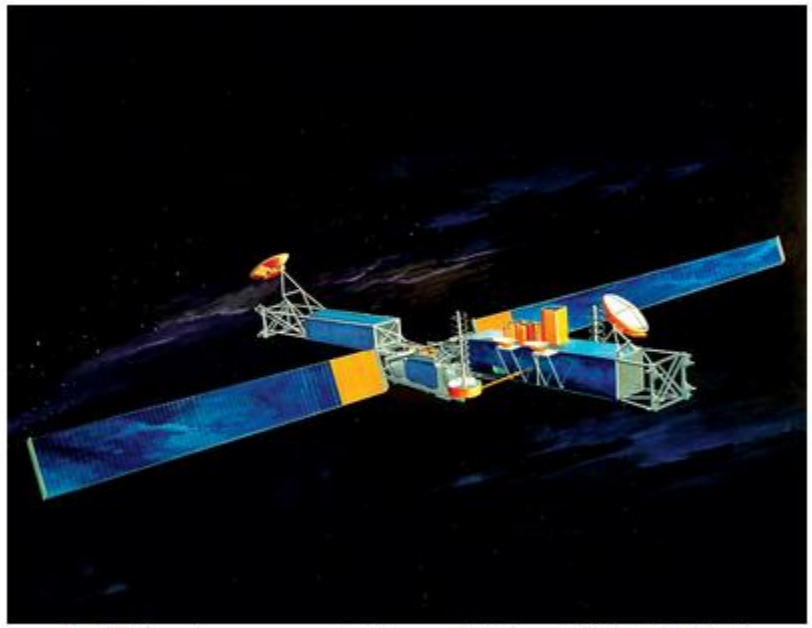
Transmission par satellite



❑ La communication par satellite GEO a été imaginée par l'écrivain/chercheur Arthur C. Clarke en 1945. Il expliqua dans un article scientifique comment un satellite apparaissant comme un point fixe dans le ciel pourrait permettre à l'homme de communiquer grâce à des ondes radios parcourant plusieurs milliers de kilomètres. Vingt ans plus tard commençait aux Etats-Unis le début de l'ère satellitaire. D'utilité militaire au départ, cette technologie commence dès les années 80 à être utilisée commercialement pour le transport de la vidéo, de la voix et plus tard pour permettre l'accès à l'Internet.



Satellite de communication militaire MILSTAR (USA)

- Satellite de télécommunication = sorte de relais hertzien.
  - Rôle : régénérer le signal qu'il a reçu et de le retransmettre amplifié en fréquence à la station réceptrice.
  - offre également une capacité de diffusion.
  - Fonctionne comme un 'miroir' avec amplification

Les systèmes de radionavigation par satellites occupent une place de plus en plus importante dans le monde des télécommunications à cause de leur déploiement rapide, leur couverture globale. En plus ils offrent des liaisons large bande à un grand nombre d'utilisateurs

LES ÉLÉMENTS DU PROCESSUS DE LOCALISATION

Le positionnement est un procédé qui permet à une cible d'obtenir sa position. Il existe différentes méthodes de positionnement, qui diffèrent les unes des autres par un certain nombre de paramètres tels que la qualité, le coût de réalisation, les coûts de déploiement et d'exploitation (. . .). Deux manières de localisation existent en fonction de l'application souhaitée :

1. la localisation **exogène** et localisation **endogène**. Dans la localisation **exogène,** la position du mobile est déterminée par une autre infrastructure. Cette catégorie regroupe également les systèmes qui sont utilisés dans les applications RADAR.

2. Dans la catégorie de localisation **endogène**, c'est l'objet qui se localise lui-même à partir des informations émanant de diverses sources . Les systèmes de positionnement sont plus utilisés dans le domaine militaire, dans les applications de sécurité publique et dans les systèmes satellitaires

Principe du positionnement exogène.

Principe du positionnement endogène.

Atténuations dans la propagation des ondes radios

Une liaison radioélectrique entre le sol et un satellite traverse l'atmosphère terrestre. Celle-ci comporte deux régions susceptibles d'influencer la propagation des ondes : la troposphère et l'ionosphère.

L'atmosphére st divisé en quatre zones principales :

1. La troposphère est la couche qui est en contact avec le sol ; elle s'étend jusqu'à 10 km d'altitude et est le siège des phénomènes climatiques: nuages, vents , brouillard. Elle a une influence notable sur la propagation Terre-espace. En règle générale, cette influence tend à augmenter avec la fréquence de l'onde.
2. La stratosphère s'étend de 10km à 40km d'altitude; elle intervient peu dans la propagation des ondes.
3. L'ionosphère s'étend de 40km à 1000km d'altitude; elle est exposée au rayonnement solaire ainsi qu'aux rayons cosmiques et aux météorites qui provoquent l'ionisation des molécules, c'est-à-dire l'arrachement des électrons des couches extérieures de la molécule. Les particules chargées négativement (électrons) et positivement (ions) ont tendance à se regrouper en couches ionisées qui vont jouer un rôle très important dans la propagation des ondes, principalement des ondes HF.
4. L'exosphère est la dernière couche de l'atmosphère. La première barrière s'étend de 500 à 3500 km alors que la deuxième barrière s'étend de 12000 à 50000km, elles sont constituées principalement d'électrons et de protons venant du soleil et piégés par le champ magnétique terrestre. Elle joue peu de rôle dans la propagation des ondes.

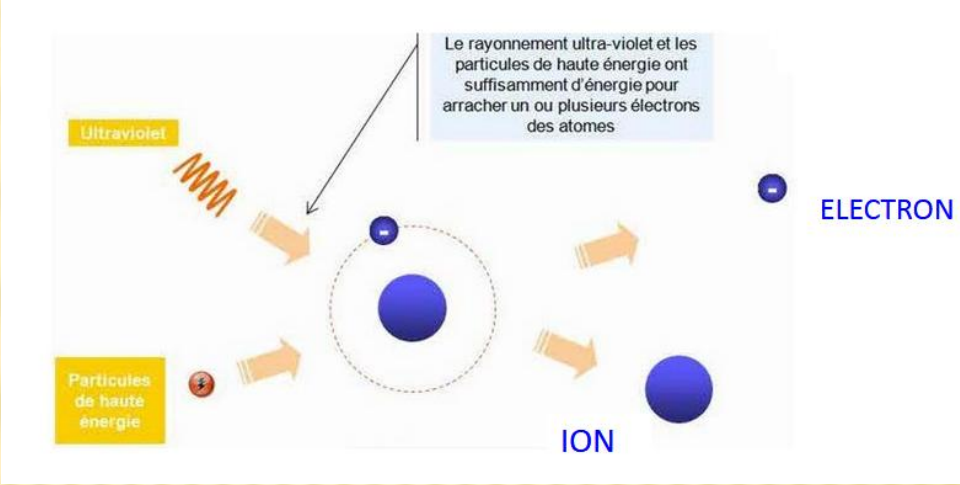
- Pour les systèmes de navigation par satellite, on ne retient que les effets de propagation dans la stratosphère et la troposphère, dits « effets troposphériques ». En effet, l'essentiel de la masse de l'atmosphère se trouvant dans les altitudes inférieures à 40 km, on considère que les effets troposphériques sont négligeables au-delà de cette altitude.

- les molécules sont soumises aux rayonnements en provenance de l'espace, en particulier aux rayonnements ultraviolets du Soleil. Les effets de ces rayonnements conduisent certaines molécules et atomes à se dissocier, libérant des électrons dits libres. Ce phénomène est appelé *ionisation,* et l'on parle d'ionosphère pour les régions de l'espace comprises entre environ 80 et 800 km d'altitude.

- L'activité solaire varie de façon cyclique, avec une période d'environ 11 ans, mais aussi de façon aléatoire. Les parasites d'origine solaire peuvent donc être considérablement plus grands en période d'activité solaire intense que pendant les périodes calmes. On reçoit aussi de la Terre des ondes provenant de la galaxie et de tout l'univers. Ce bruit extraterrestre est le bruit naturel dominant au-delà de 20MHz, en dessous de cette fréquence le bruit extraterrestre est arrêté par l'ionosphère.

❑ L'ionosphère est la partie de l'atmosphère qui contient un gaz ionisé et qui affecte la propagation des ondes radio. Elle est située à des altitudes entre 80 to 800 km.

❑Le processus d'ionisation est initié par des rayonnements solaires UV et des rayons X. Ces photons sont suffisamment énergétiques pour faire s'échapper les électrons des atomes des gaz atmosphériques. Simultanément, ces électrons libres sont capturés par des ions positifs. Ce processus s'appelle la recombinaison.



La vitesse de propagation de l'onde dans l'ionosphère est alors plus lente que ce qu'elle serait dans le vide. Ce qui provoque un temps de propagation plus long et, en conséquence, un calcul de la distance satellite-GPS surestimé.

L’atténuation due à la pluie est l’effet d’atténuation dominant pour les communications par satellite opérant dans la bande de fréquence de 10 à 50 GHz. Cette atténuation augmente avec la quantité d’eau précipitant et peut être déterminée à partir de l’intensité de la précipitation (exprimée en mm/h).

❑ Le fait que cette couche ne soit pas neutre entraîne une perturbation de la vitesse de toute onde électromagnétique traversant ce milieu. L'amplitude de cette perturbation est liée à la longueur d'onde et à la densité de particules chargées dans le milieu traversé.

L'ionosphère est divisée en couches:

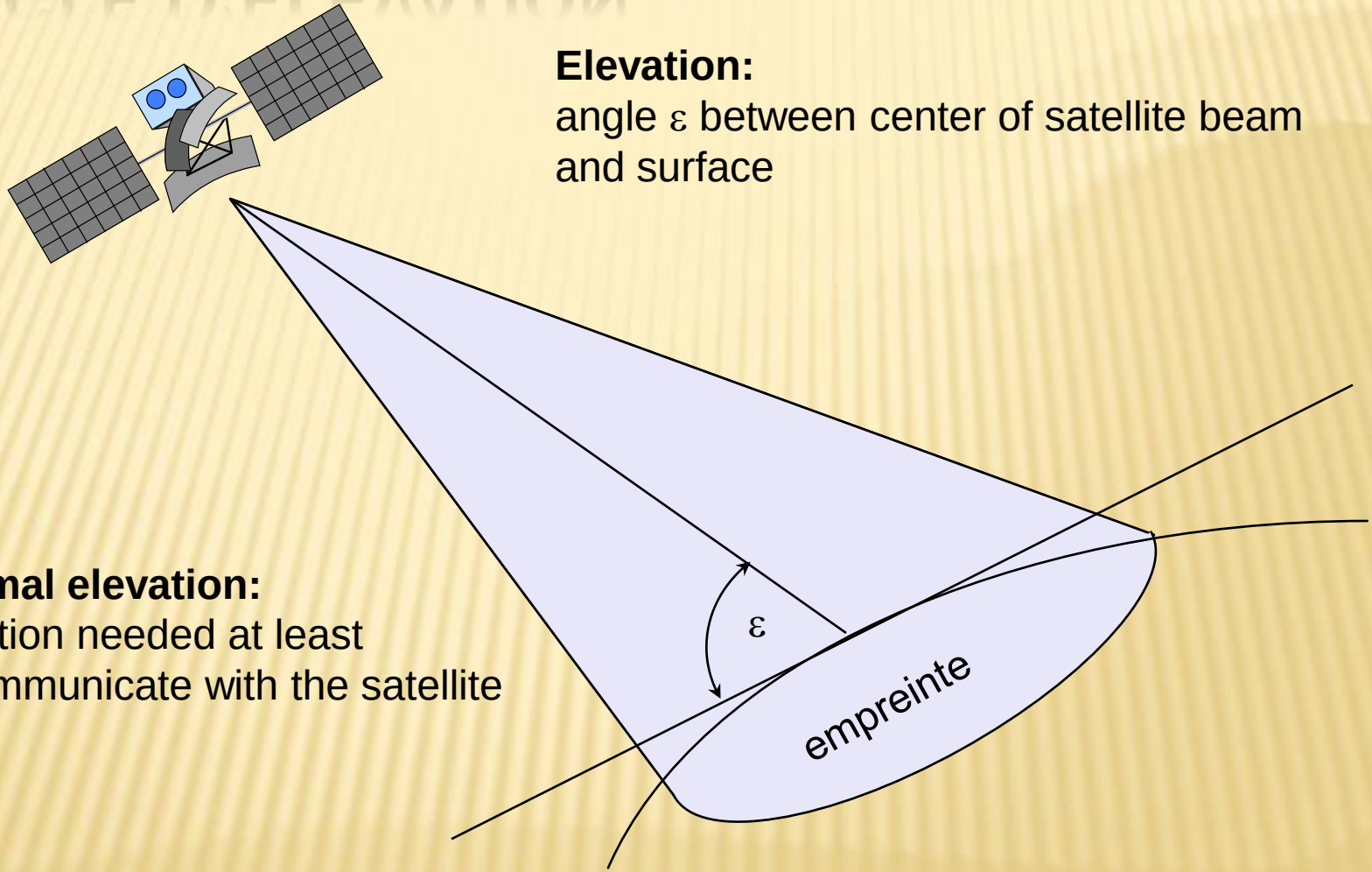
❑ Couche D : Elle est la plus proche de la surface de la Terre. Son altitude est entre 50 km et 90 km. Du fait de la forte densité des gaz, le processus de recombinaison est très actif. **Elle ne reflète pas les ondes HF mais elle les absorbe, principalement à basses fréquences**. En conséquence, l'absorption est plus faible durant la nuit. La couche D disparaît la nuit et peut être perturbée par des événements solaires provoquant des émissions de protons et de rayons X.

❑ Couche E : Elle est à des altitudes plus élevées, entre 90 km et 120 km. **Elle réfléchit principalement des ondes de fréquences relativement faible, moins de 10 MHz environ et absorbe partiellement les fréquences plus élevées**. La couche E cause de perturbations du magnétisme terrestre.

❑Couche F : Elle s'étale de 120 km à 400 km d'altitude. **Elle est très importante pour la propagation des ondes courtes. La couche F est la plus ionisée**. Elle est fortement corrélée à l’activité solaire.

ANGLE D'ÉLÉVATION

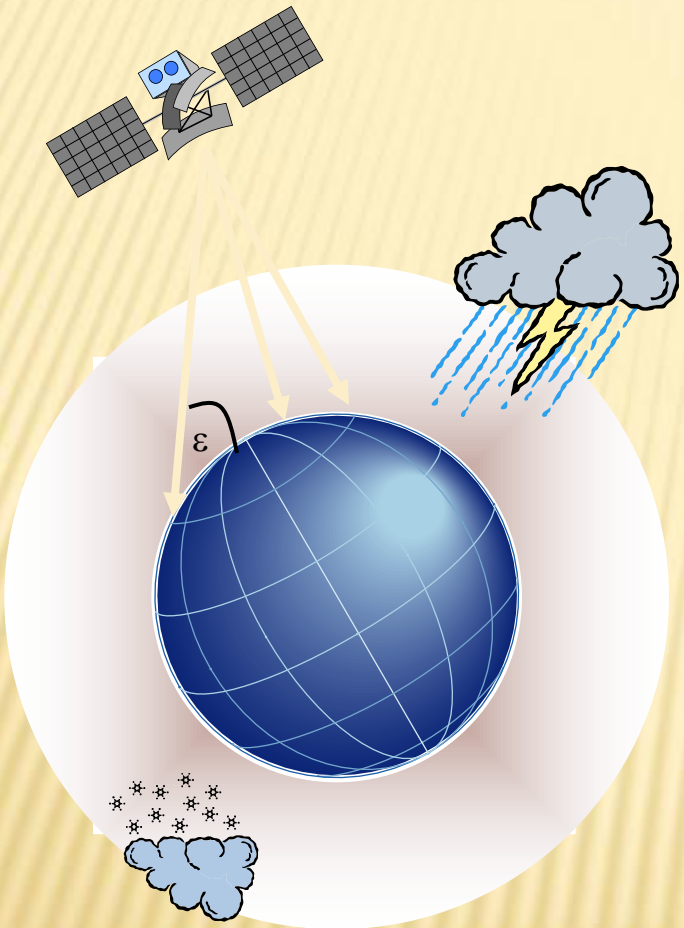
Elevation:
angle ε between center of satellite beam and surface

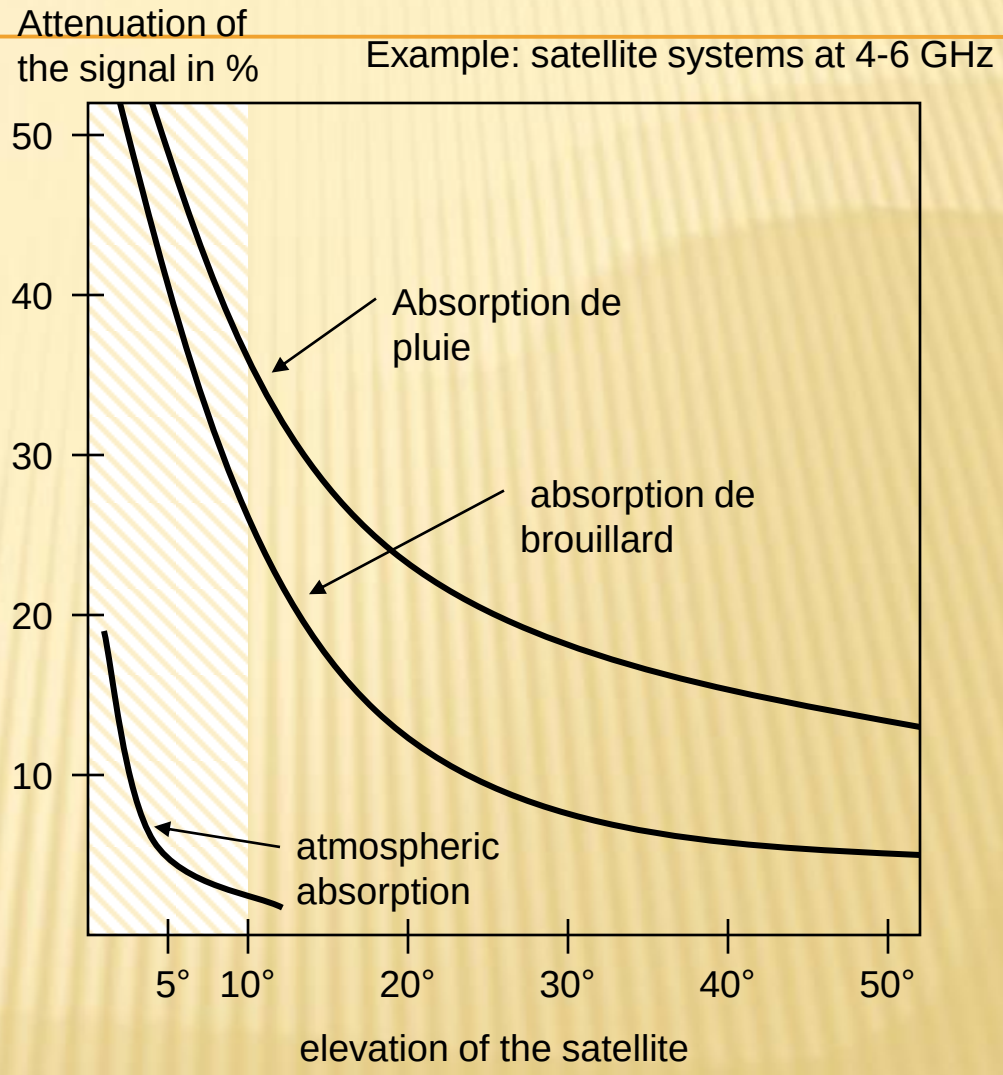


minimal elevation:
elevation needed at least to communicate with the satellite

C'est l'angle au-dessus duquel le lien satellite-terre peut-être opérationnel.

ATMOSPHERIC ATTENUATION



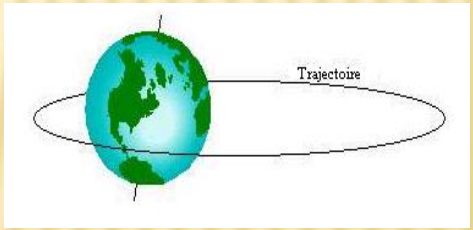


Les orbites

On distingue trois types d'orbites différentes : ***elliptiques, circulaires*** *et* ***géostationnaire***, chacune ayant des caractéristiques différentes des autres.

1/ Orbites elliptiques

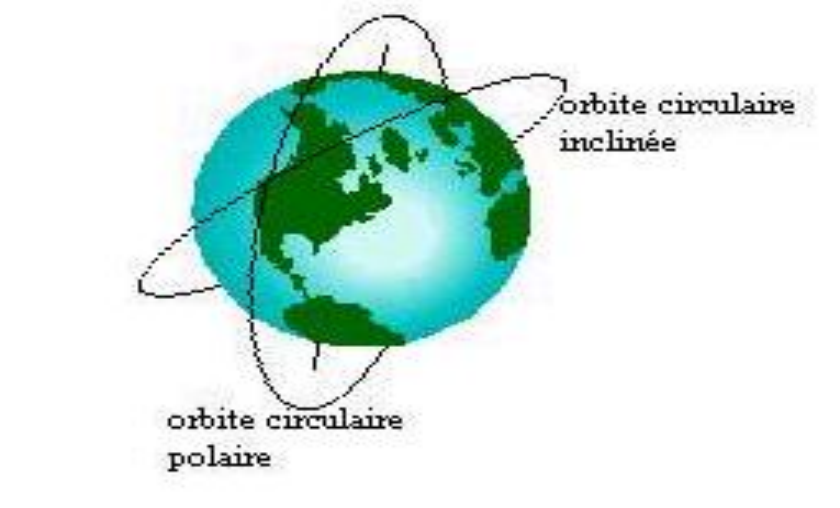
Ce type d'orbite est caractérisé par la grande variation en vitesse que subissent les satellites. Les orbites elliptiques présentent des avantages, comme la couverture des zones éloignées de l'équateur, mais également des inconvénients tels que les aspects qualitatif et financier des équipements mobiles sur Terre.



2/ Orbites circulaires

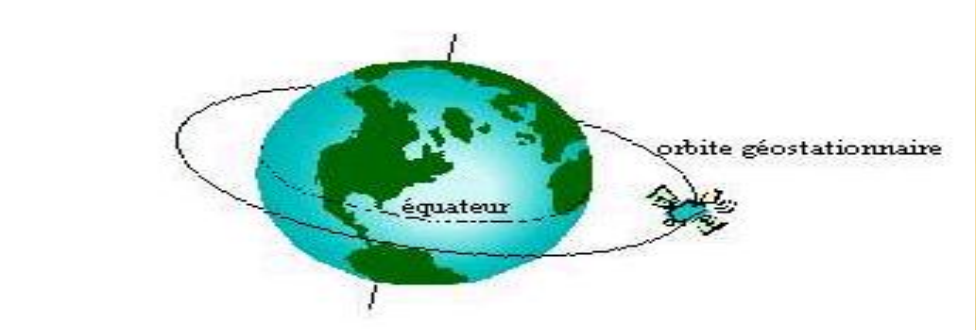
Il existe une infinité d'orbites circulaires, chacune correspondant à une inclinaison par rapport au plan orbital, mais on peut en distinguer : l'orbite circulaire *polaire* et l'orbite circulaire *inclinée* . L'orbite polaire est une orbite circulaire qui passe par-dessus les deux pôles de la Terre. Ce type d'orbites présente un **inconvénient** principal, pour les est la lenteur de leur couverture, mais cette faible vitesse permet tout de même au satellite de couvrir une grande partie de la surface du globe.

Cependant, cette inclinaison présente un inconvénient majeur : ces satellites ne peuvent pas couvrir la totalité de la surface du globe. Par contre, cette orbite possède un **avantage** : selon l'altitude du satellite, il est possible de cibler les zones du globe, c'est à dire que l'on peut desservir les parties intéressantes d'un point de vue économique, militaire ou autres applications…



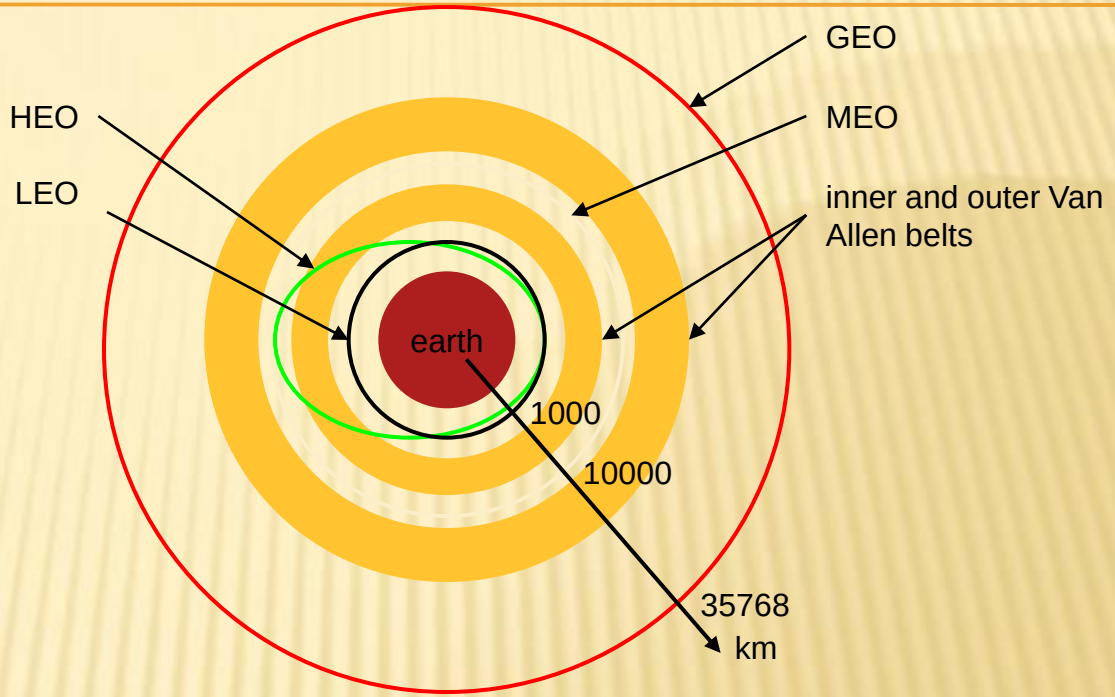
3/ Orbite géostationnaire

ces orbites sont circulaire et ont une période égale à celle de la rotation de la terre. Et tournent dans le même sens que celui de la terre et de posséder une orbite placée dans le plan équatorial. Pour un observateur terrestre, un satellite placée en orbite géostationnaire a une apparence immobile dans le ciel. **l'avantage** majeur est la possibilité d'employer sur Terre des antennes fixes. De plus, la position de cette trajectoire permet aux satellites d'avoir une grande couverture, avec trois satellites géostationnaires on peut assurer une couverture globale de la terre, en excluant les régions polaires. Ce type d'orbites présente un **inconvénient** est que le nombre de satellites en devenant de plus en plus grand au fil des années, cette trajectoire commence à être très chargée. Les scientifiques prévoient aussi un danger pour les satellites en état de marche car les satellites dits " poubelles " qui n'ont plus d'énergie pour être opérationnels dérivent sans contrôler leur vitesse et peuvent alors détériorer les autres.



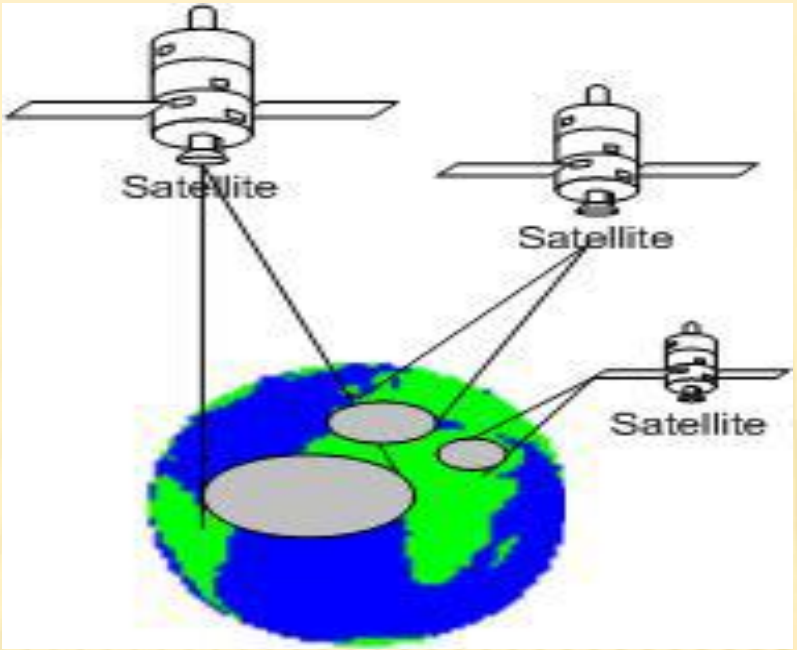
Le délai d'un système par satellite GEO est d'environ 270 millisecondes : c'est le temps que prend un signal pour parcourir 35 800 Km dans l'espace et revenir. En ajoutant à cette durée le temps requis pour le traitement des signaux par le matériel du satellite et de la bande de base, on obtient un délai total de près de 320 millisecondes.

ORBITS



Van-Allen-Belts:
ionized particles
2000 - 6000 km and
15000 - 30000 km
above earth surface

La couverture



- L'orbite d'un satellite de par sa forme et son rayon définit la zone de couverture et la portée du satellite.

- Plus le satellite est éloigné de la terre et plus sa couverture est étendue.

- Plusieurs systèmes de satellites peuvent couvrir la même superficie mais chacun se distinguera par un ensemble de caractéristiques particulières.

- la couverture d'un satellite GEO peut être atteinte par une constellation de satellites à plus basse altitude. Pour rendre ce réseau homogène sur l'ensemble de la zone : deux solutions existent soit les satellites communiquent entre eux soit un relais terrestres permet de les synchroniser.

Constellation de Satellites Géostationnaires (*GEO*)

- les satellites GEO tournent sur un orbite circulaire autour de la terre dans un plan proche de l'équateur avec une vitesse angulaire égale à celle de la rotation de la terre sur elle-même.

- C'est pour cette raison que ces satellites GEO apparaissent comme sensiblement immobiles pour un terminal terrestre.

- L'orbite d'un satellite GEO se situe à 36000 km de la terre, ce qui induit un délai de propagation aller-retour de l'ordre de 0.27 sec.

- Cette altitude permet à 3 satellites, à 120° sur l'orbite GEO de couvrir le terre en entier.

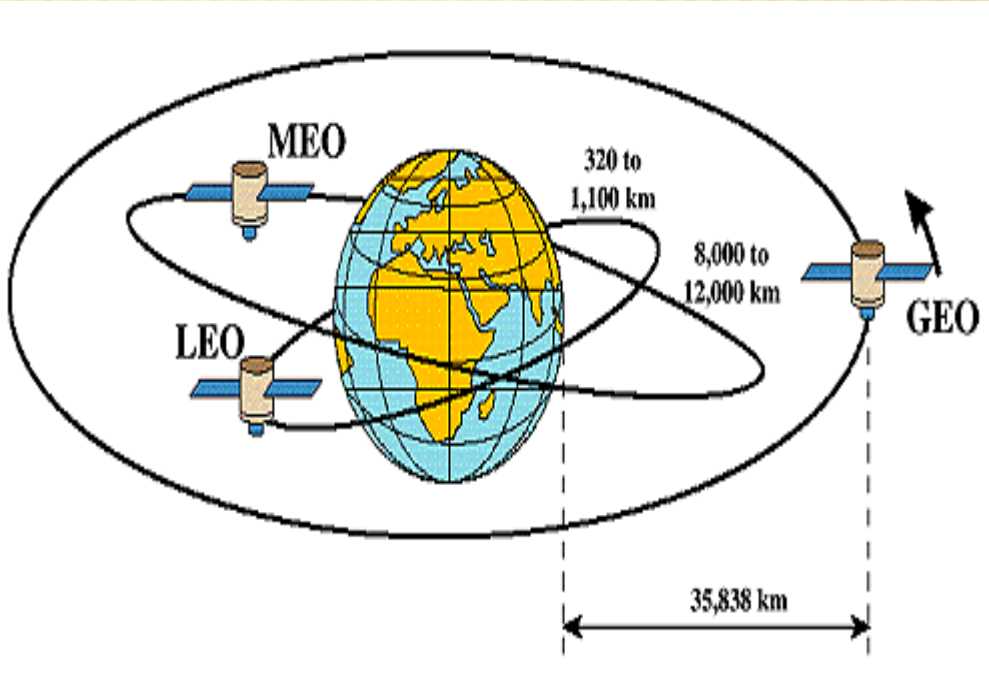
- Les bandes de fréquence utilisées pour la transmission par satellite se situent dans les bandes 4/6 GHz, 11/14 GHz et 20/30 GHz. Les bandes passantes vont de 500MHz jusqu'à 3500MHz.

Constellation de Satellites LEO/MEO

❑ Les constellations LEO/MEO se basent sur des satellites défilants sur des orbites non stationnaires.

❑Les constellations à orbite basse (*LEO*) renoncent à la synchronisation des satellites et la rotation de la terre afin de réduire la distance entre ces satellites et la terre pour réduire le délai de propagation.

❑Au moins un satellite doit toujours être visible par les deux bouts d'une connexion. Pour cette raison, les systèmes LEO doivent déployer un nombre considérable de satellites pour assurer une couverture globale et continue.



SYSTÈMES DE LOCALISATION

Un **système de positionnement par satellites** également désigné sous le sigle **GNSS** (*Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites*) qui repose sur une constellation de satellites artificiels permettant de fournir à un utilisateur par l'intermédiaire d'un récepteur portable sa position 3D, sa vitesse 3D et l'heure.

Les systèmes satellitaires ont été précédés par **les systèmes terrestres de radionavigation**, qui utilisaient des émetteurs terrestres et non des satellites. Ces systèmes sont opérationnels particulièrement en aéronautique en raison de leur fiabilité et de leur précision locale, comme le VOR (VHF Omnidirectional Range), le DME, le TACAN (TACtical Air Navigation), l'ILS Tous ces systèmes reposent sur un réseau de stations terrestres qui émettent un signal radio.

LES SYSTÈMES DE POSITIONNEMENT PAR SATELLITE

On appelle GNSS (Global Navigation Satellite System) les systèmes de positionnement basés sur des signaux émis par des satellites en orbite autour de la Terre et fournissant une couverture mondiale.

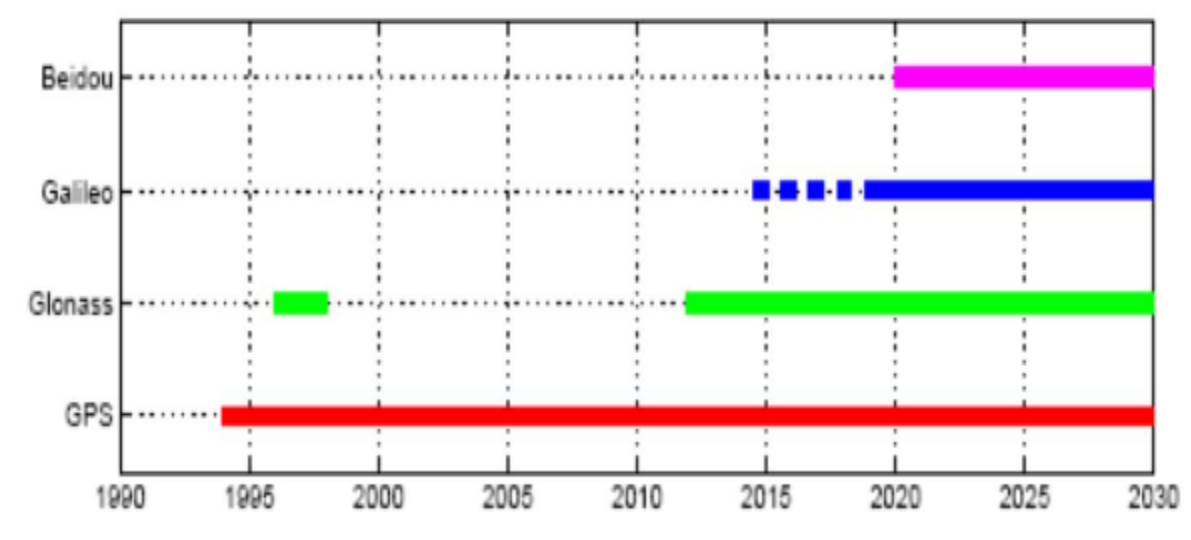
Objectif : fournir à un récepteur sa position, sa vitesse de déplacement et l'heure. Ce positionnement est réalisé de manière rapide, avec une précision d'une dizaine de mètres, n'importe quand, n'importe où sur la Terre, quelle que soit la météo et à faible coût.

Il existe actuellement trois services mondiaux de positionnement par satellite:

1. *Le GPS* (Global Positioning System ou système de positionnement par satellite), dispositif américain mis en service depuis 1978 et graduellement amélioré.

2. *GLONASS*, dispositif militaire russe mis en service en 1982

3. *GALILEO*, dispositif civil européen mis en service en 2011, et devant être 100% opérationnel en 2019.

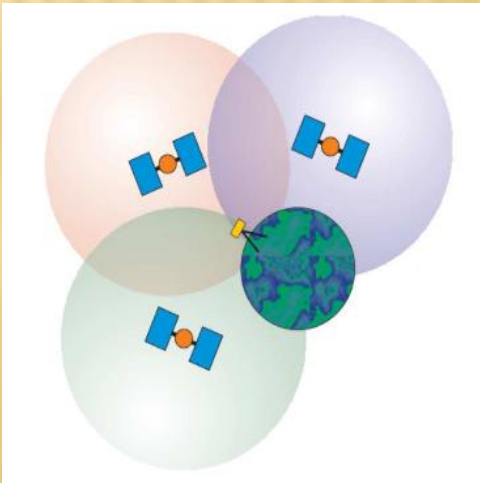


- Le fonctionnement des GNSS repose sur la mesure du temps de propagation du signal électromagnétique émis par un satellite pour arriver au récepteur. La mesure du temps de propagation du signal provenant de plusieurs satellites permet par intersection de déterminer la position du récepteur.
- On peut calculer la distance d qui sépare le satellite du récepteur en connaissant la durée de propagation de l'onde Δt que l'onde a mis pour parcourir le trajet ($d = c \cdot \Delta t$).
- La mesure précise de Δt est primordiale. Une erreur de 10^{-6} s engendre une erreur de 300 m.
- En théorie 3 satellites avec des horloges parfaitement synchronisées entre elles et avec le récepteur suffisent pour un positionnement GNSS. C'est ce que l'on appelle la Trilatération.

➢ Sur les satellites : horloges atomiques (précision > 10^{-10} s)
➢ Sur les récepteurs : horloges à quartz (précision ~ 10^{-6} s)

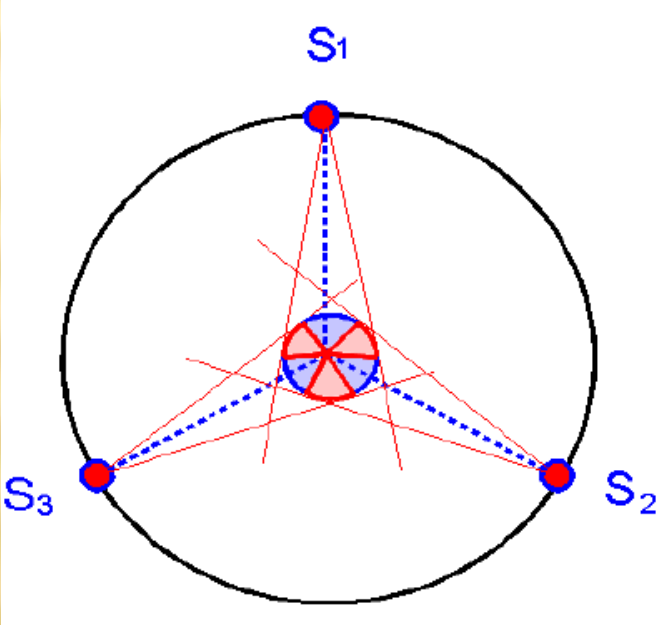
En pratique, il existe donc une désynchronisation entre satellites et récepteurs noté δt. Dans ce cas on ne parle plus de distance mais de pseudo-distance.

➢ Au final, pour un positionnement absolu par GNSS, il faut au minimum 4 satellites pour permettre de déterminer les 4 inconnues : 3 inconnues de position (X, Y, Z) 1 inconnue de temps liée à la désynchronisation du récepteur (δt)



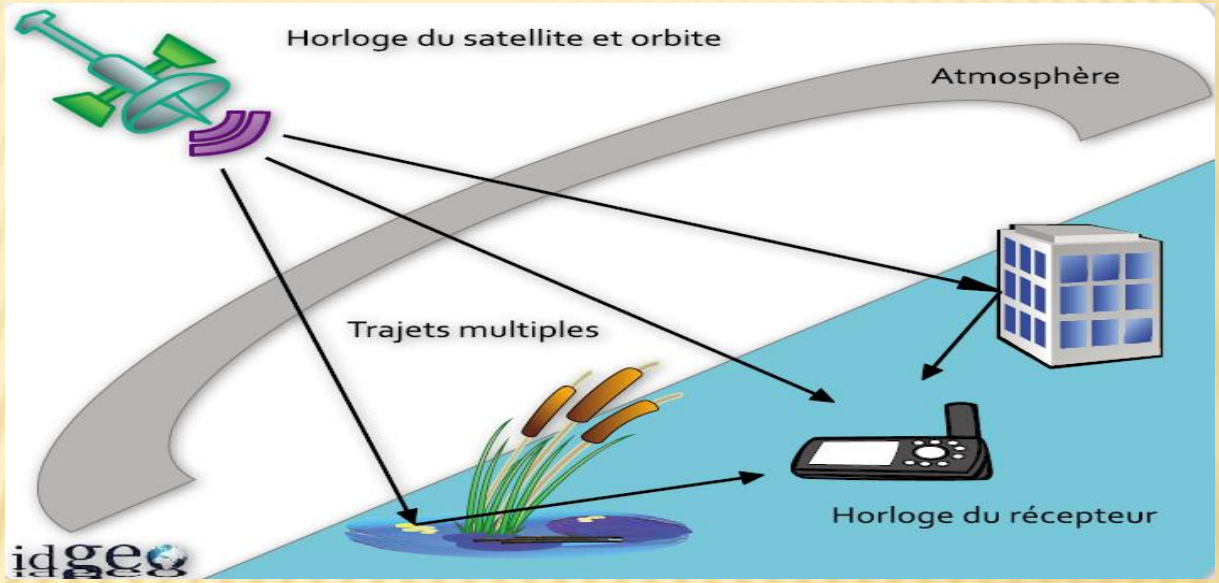
Comment fonctionne la géolocalisation ?

la méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la position d'un point à la surface du globe repose sur le principe de la triangulation. La triangulation permet par exemple de localiser un objet en connaissant la distance qui le sépare de 3 points de référence. En 3D il est nécessaire de rajouter une quatrième distance reliant l'objet à un autre point de référence pour connaître l'altitude. Les coordonnées du point d'intersection des sphères représentant les signaux émis par les différents satellites seront d'autant plus précises que le nombre de satellites captés sera important.



SOURCES D'ERREUR

- nombreuses erreurs peuvent venir entacher le calcul de la géolocalisation. Certaines de ces erreurs pourront être corrigées par des modèles et algorithmes et d'autres pourront être évitées par des bonnes pratiques.

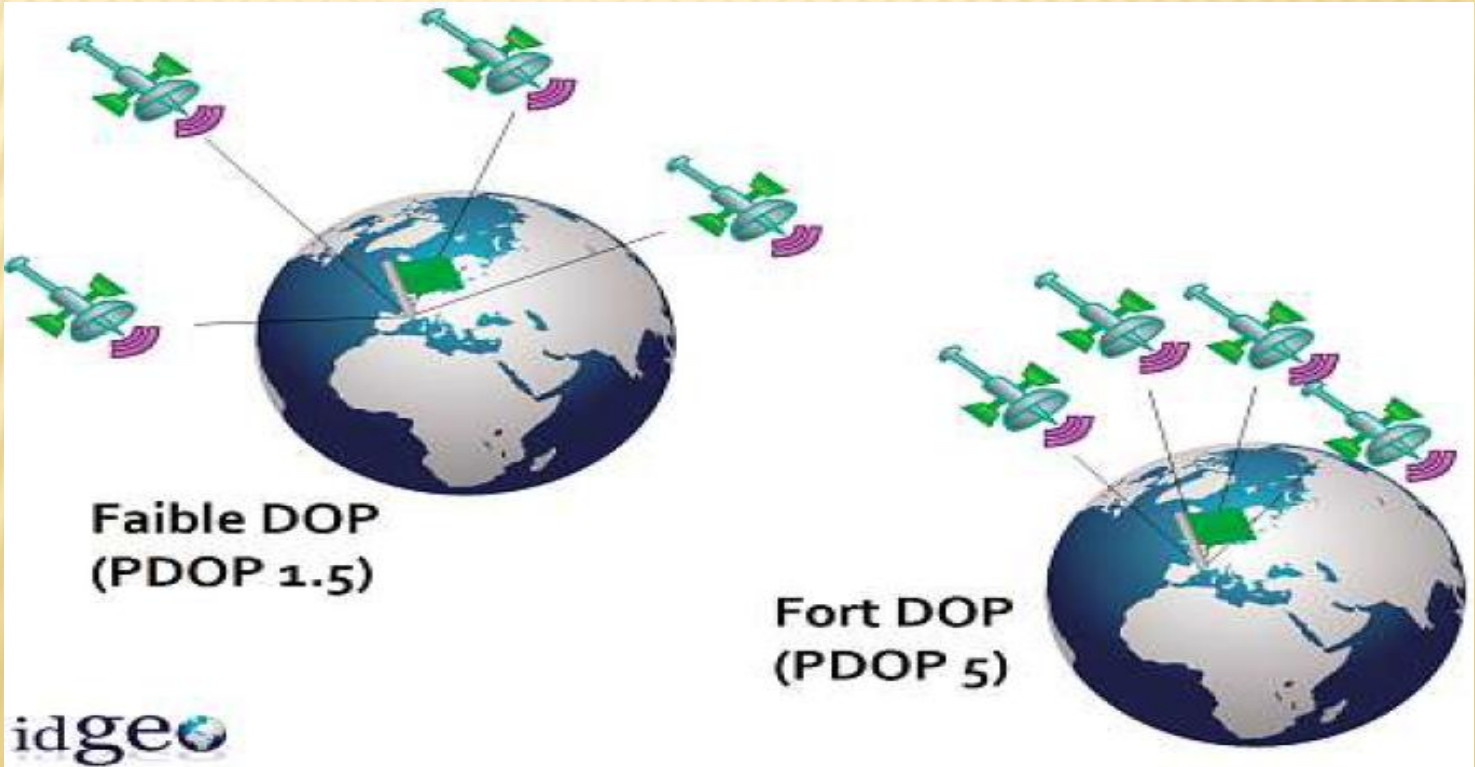


Synchronisation des horloges

Bien que les horloges embarquées à bord des satellites soient extrêmement précises et que les stations de contrôle surveillent leur synchronisation. L'horloge du récepteur a rarement la même précision que celle des satellites (1 ns = 30 cm). Ce problème est résolu s'il y a suffisamment d'émetteurs (quatre satellites au minimum).

- **Troposphère et ionosphère**
- Les ondes ont des vitesses variables selon le milieu qu'elles traversent. Émises des satellites les ondes auront à traverser des couches de l'atmosphère plus ou moins humides, plus ou moins ionisées. Certains récepteurs intègrent des modèles de correction.
- Une autre couche traversée par les signaux : l'ionosphère. Cette couche ionisée par le rayonnement solaire va modifier la vitesse de propagation du signal. La plupart des récepteurs intègrent là aussi des modèles de correction,
- mais en période de forte activité solaire cette correction n'est pas assez précise. Pour corriger plus finement cet effet, certains récepteurs bi-fréquences utilisent les deux fréquences L1 et L2 qui ne sont pas affectées de la même manière pour recalculer plus précisément la position.

- **Géométrie de la distribution des satellites dans l'espace : dilution de la précision (DOP)**
- Si les satellites visibles sont très proches dans l'espace, la précision sera moins bonne que s'ils sont répartis régulièrement sur une large étendue au-dessus de l'utilisateur afin d'échantillonner au mieux l'espace au-dessus du récepteur. Les effets de la géométrie du système peuvent être appréciés par un paramètre : le DOP (dilution of precision- duminution de précision). La précision attendue est d'autant plus importante que le DOP est petit.



Cryptage

- Le GPS étant conçu par et pour les militaires américains, un certain nombre de moyens ont été mis en place pour empêcher l'utilisation du système par un ennemi. Ce but est atteint par deux brouillages :

1. La dégradation volontaire de la précision du positionnement et le cryptage du code P. Ce cryptage rend impossible la mesure directe des pseudo-distances basée sur ce code.
2. L'accès sélectif ou « selective availability » (SA) est une dégradation de la précision des horloges embarquées à bord des satellites.

Réflexion et perte des signaux : trajets multiples

La topographie du milieu et sa structuration peuvent influer sur la qualité de la géolocalisation. Le relief ou des bâtiments peuvent cacher des satellites et influer directement sur la précision du positionnement. Ce phénomène se rencontre particulièrement en zone urbaine et en zone montagneuse. Les signaux de satellites peuvent également être réfléchis par des surfaces d'eau voire même des murs : c'est le problème des multi-trajets.

Les systèmes de radionavigation terrestres

- Aujourd'hui, de nombreux réseaux cellulaires ou sans fil existent. Le premier système de ce type est le système LORAN C dans les années 1960. Ensuite les réseaux comme le GSM et l'UMTS sont apparus.

- Pour les réseaux terrestres de télécommunication (GSM, UMTS), le réseau est construit de manière à ce que les cellules se juxtaposent les unes à côté des autres en évitant autant que possible les recouvrements entre cellules (optimisation des réseaux cellulaires) afin de couvrir le plus grand territoire avec le minimum de stations terrestres.

- Comme pour le système GPS, un certain nombre d'informations provenant de plusieurs stations terrestres est nécessaire pour localiser un équipement mobile. La portée de chacune des stations de base est limitée à une zone bien précise, plus ou moins grande suivant l'environnement, et la disponibilité de plusieurs stations de base pour une position n'est pas garantie (très grand éloignement entre les stations de base).

Le système LORAN

❑Le LORAN (LOng RAnge Navigation) est le premier réseau terrestre utilisé pour la localisation.

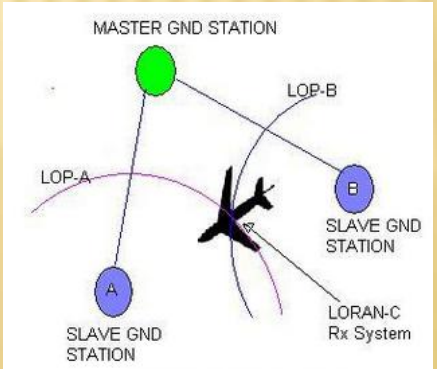
❑Ce système de navigation a été développé pour fournir un service de radio navigation aux gardes côtes Américains, le long de leur littoral.

❑Loran C est basé sur la mesure de la différence de temps d'arrivée des ondes provenant de deux stations terrestres différentes.

❑Le LORAN détermine la position en mesurant la différence de temps de propagation entre deux émetteurs (au minimum), quatre émetteurs ou plus sont nécessaires.

❑Le LORAN-C fonctionne à 100 kHz. Les stations LORAN d'une groupe émettent des impulsions de quelques millisecondes à phase et synchronisés.

❑La mesure de différence de leur temps d'arrivée au récepteur depuis deux stations d'une chaîne définit une hyperbole de position, une autre mesure avec une autre paire d'émetteurs donne un point d'intersection.



Le système LORAN

- On emploie une station pilote A reliée par fils à deux stations asservies B et C.
- A envoie à intervalles réguliers des impulsions brèves dans toutes les directions par radio et les mêmes impulsions par fil à B et C.
- B et C reçoivent ces impulsions et les envoient à leur tour dans l'espace.
- L'avion reçoit les signaux émis par A, B et C avec le récepteur genre radar.
- le temps écoulé entre l'arrivée des signaux émis par A et ceux émis par B ou C. correspond à la différence de durée de transmission du premier signal émis par A suivant les différents trajets (signal émis directement par radio par A, signal passant par AB, émis par B ; signal transmis par AC et émis par C).
- Puisque la vitesse des ondes électromagnétiques est exactement connue et que la distance des points A,B,C est fixe, on peut en déduire la différence des distances de l'avion à chacun de ces trois points.
- Géométriquement, on peut dire que l'avion se trouve sur une certaine hyperbole de foyers A et B. De même, la différence des distances avion-point A et avion-point C situe l'avion sur une deuxième hyperbole. L'intersection de ces deux hyperboles donne exactement la position de l'avion avec une très bonne précision.

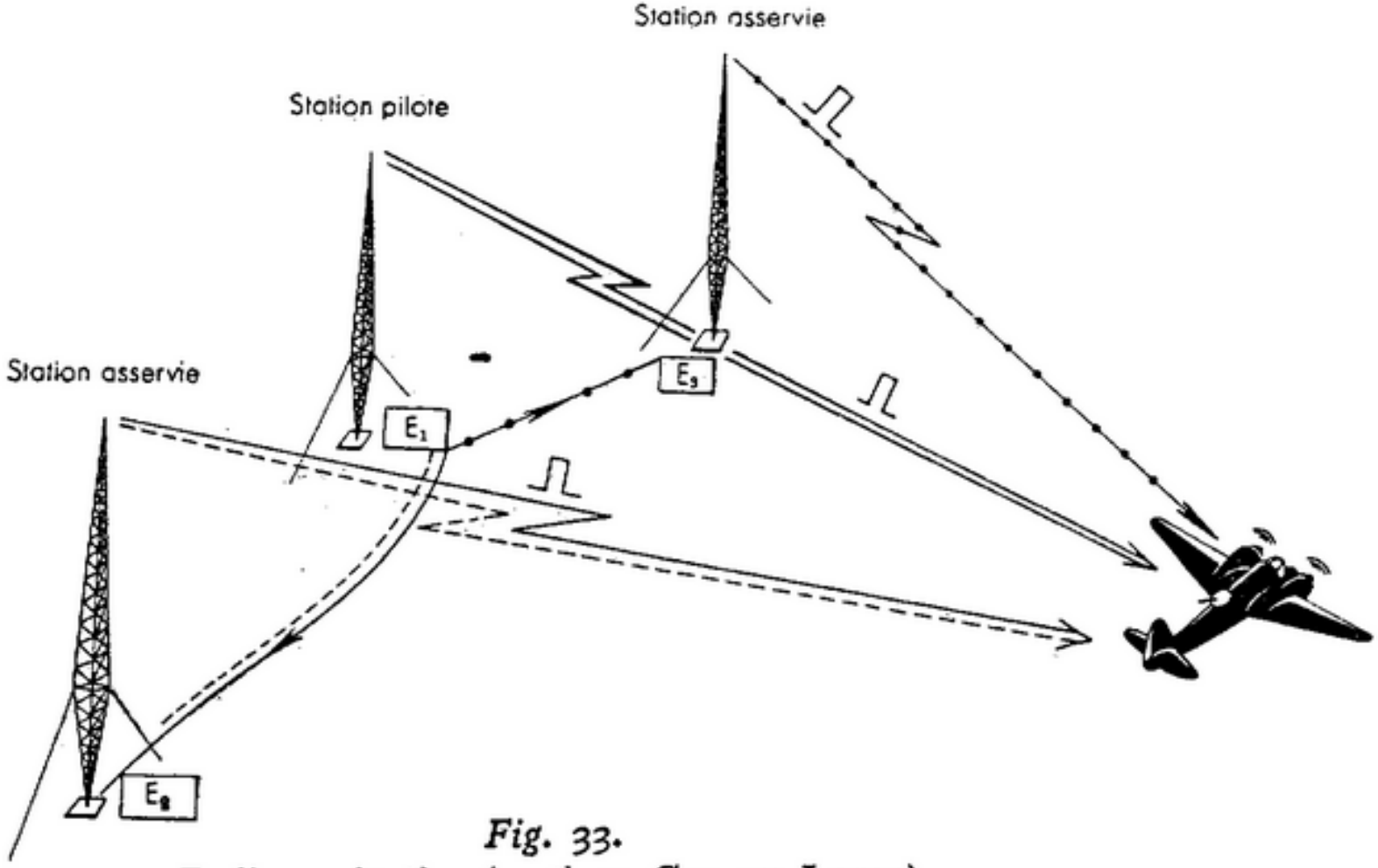
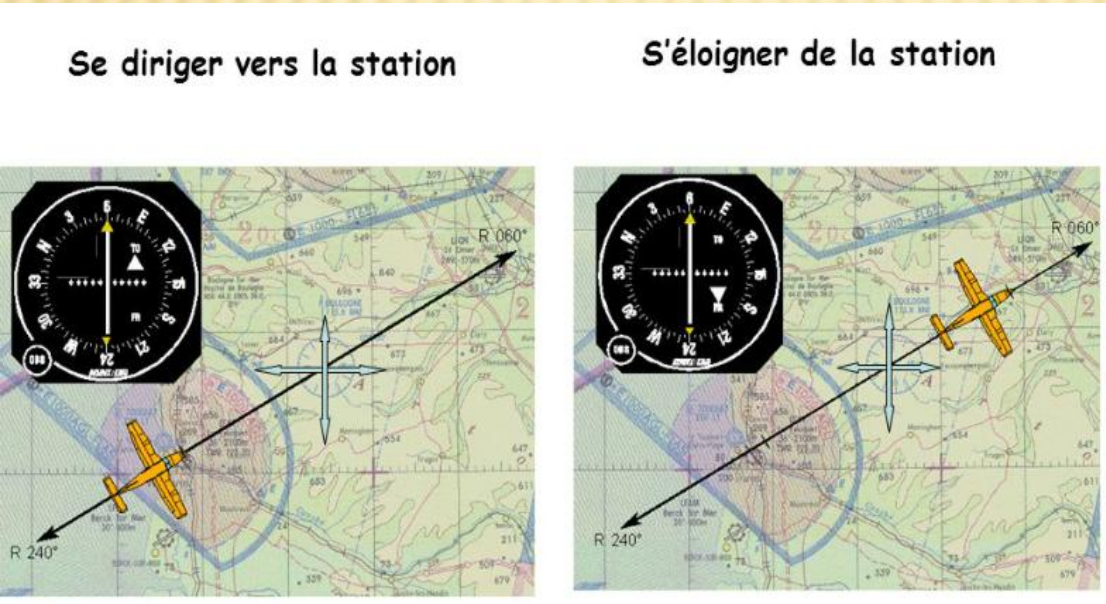
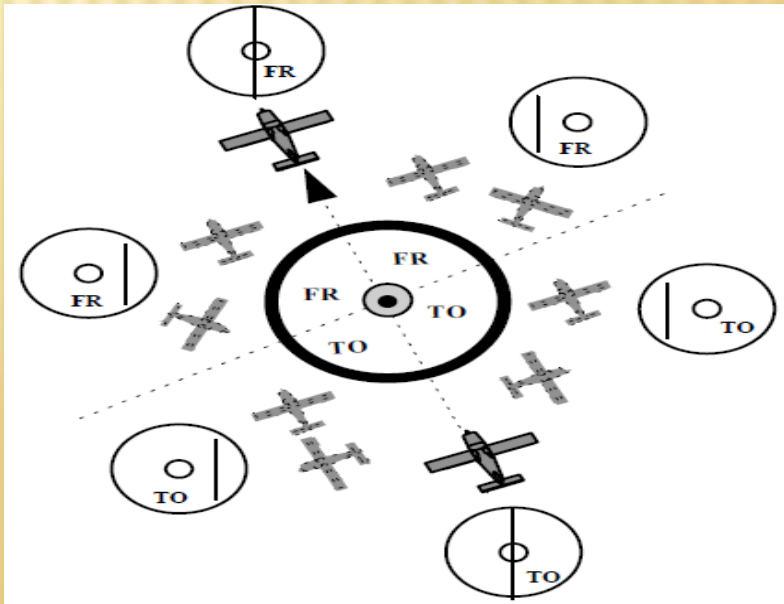


Fig. 33.
Radio-navigation (système Gee ou Loran).

Le système VOR

- Le VOR (*VHF Omnidirectional Range*) est un système de positionnement radioélectrique utilisé en navigation aérienne et fonctionnant avec les fréquences VHF 108 Mhz à 117.95 Mhz (ou UHF pour les militaires).
- L'émetteur VOR est constitué d'une antenne omnidirectionnelle entourée de 4 antennes (parfois plus) émettant un signal directionnel rotatif.
- Un récepteur VOR sur l' avion permet de déterminer un relèvement magnétique par rapport à une station au sol (balise émetteur VOR dont la position est connue), et donc le radial sur lequel l'avion est situé.
- Le VOR va permettre de sélectionner une route radioélectrique par rapport à une installation au sol. Sélectionner une route sur l'indicateur VOR détermine un axe radioélectrique. Mais choisir une route et l'afficher détermine également un autre axe imaginaire coupant perpendiculairement le premier à la verticale de la station. Cet axe va déterminer les secteurs TO et FROM.





Le système DME

❑ Un **DME** (*Distance Measuring Equipment*) est un transpondeur au sol qui permet, en répondant aux interrogations d'un émetteur-récepteur embarqué, de calculer avec précision la distance séparant les deux équipements radio et de mesurer la ligne oblique directe séparant l'appareil de la station au sol.

❑Le DME utilise une portion de bande UHF comprise entre 962 MHz et 1.213 GHz.

❑L'interrogateur (émetteur avion) transmet une paire d'impulsions espacées de 12 µs (ou 36 µs). En réponse, le transpondeur au sol transmet, avec un retard constant de 50 µs et sur une fréquence de réception offset ± 63 MHz de la fréquence d'émission, une paire d'impulsion dont l'espacement est de 12 µs ou 30 µs.

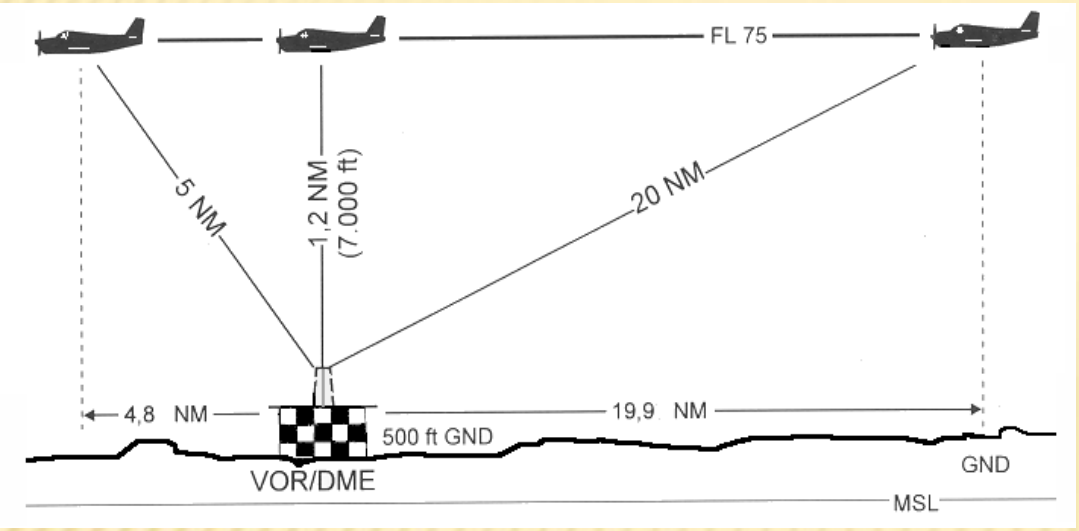
❑En retour, le récepteur dans l'avion mesure le temps pris par le signal pour parcourir l'aller-retour et de là, calculer la distance.

❑Le DME ne peut être utilisé simultanément que par un nombre limité d'aéronefs (environ une centaine). Sinon cela sature la station au sol.

❑Pour que ça fonctionne, chaque émetteur embarqué interroge la station à un rythme fort (mode de recherche) ou faible (mode de suivi), avec des écarts aléatoires entre paires et ceci afin d'éviter les collisions avec les signaux des autres avions.

❑Les avions les plus éloignés sont ainsi ignorés en cas de saturation.

Le DME mesure **la ligne oblique directe** séparant l'appareil de la station au sol. Un **DME** donne donc une indication de distance par rapport à une balise.



Le **DME** est majoritairement associé à un **VOR,** ou à un **ILS** (Glide path), dont il est souvent complémentaire. Sur les cartes du SIA (service d'Information Aéronautique), lorsqu'il est associé à un **VOR**, un symbole spécifique est utilisé. Dans tous les autres cas, la présence du **DME** est indiquée sur ces cartes par un carré avec un point au centre.

*Symbole d'un **DME** sur une carte SIA*

*Symbole d'un **VOR/DME** sur une carte SIA*

Le système ILS

❑ L'Instrument Landing System (ILS) ou Système d'atterrissage aux instruments est le moyen de radio-navigation le plus précis utilisé pour l'atterrissage.Il existe aussi un autre système, le MLS (Microwave Landing System), fonctionnant en hyper-fréquences, plus précis que l'ILS mais peu utilisé.

❑L'ILS comprend 3 éléments:

1. un localizer qui fournit l'écart de l'avion par rapport à l'axe de la piste; est constitué par un ensemble d'antennes situées après le bout de la piste qui émettent une porteuse VHF entre 108 et 112 MHz.
2. un glide path qui fournit l'écart de l'avion par rapport à la pente nominale d'approche(le plus souvent 3 degrés ou 5,2%). est constitué par un ensemble d'antennes situées généralement entre 120 m et150 m sur le coté de la piste, près du seuil, qui émettent une porteuse UHF entre 328,65 et 335,40 MHz.
3. Un Outer Marker qui donne une distance par rapport au seuil de piste. Les markers sont des radiobalises à émission verticale placées sur la trajectoire finale des avions qui émettent à 75 MHz.

Le système MLS

❑Le MLS (Microwave Landing System) est un système d'aide à l'approche et à l'atterrissage aux instruments. Il a été développé comme un système permettant de pallier aux inconvénients de l'ILS (*Instrument Landing System*).

❑Le MLS offre une couverture beaucoup plus large en surface et en volume que l'ILS. De plus, le système est, par conception, très peu sensible aux perturbations radioélectriques.

❑En 1991, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) choisissait le MLS comme moyen de remplacement de l'ILS. Ces dernières années, une hausse d'intérêt pour le MLS de la part de compagnies aériennes. Le MLS, induit un gain de capacité de plus de 30% par rapport à l'ILS.

Le système TACAN

❑Le TACAN (TACtical Air Navigation) désigne un système de navigation aérienne militaire.

❑C'est un système regroupant les fonctions utilisées dans le domaine civil par l'association DME et VOR .

❑Le TACAN travaille dans la bande UHF, sur la plage de fréquences 960-1215 MHz. Ses caractéristiques permettent d'utiliser des émetteurs plus simples et de taille moindre que ceux du système VOR.

❑Le TACAN permet de se situer par rapport à une balise, en distance et en direction. Des signaux radio sont échangés entre l'avion (interrogation) et la balise (réponse).

❑La balise est généralement au sol, mais elle peut aussi être embarquée par un avion ou un bateau (porte-avions). Elle est capable de répondre à 100 interrogations simultanées.

Longitude: Distance angulaire, généralement exprimée en degrés (*Un degré correspond à 1/360 ème de cercle)*, minutes (*Une minute correspond à 1/60 ème de degré)* et secondes, de l'emplacement d'un point à la surface de la Terre, à l'est ou à l'ouest d'un méridien (Cercles sur le globe terrestre passant par les pôles) défini arbitrairement (habituellement le méridien principal 0° de Greenwich). Toutes les lignes de longitude sont de grands cercles qui intersectent l'équateur et passent par les pôles Nord et Sud.

La *latitude* *géographique* d'un point est l'angle que fait la normale à l'ellipsoïde de référence en ce point avec le plan équatorial. C'est la latitude de la plupart des cartes.

L'altitude est aussi une grandeur qui exprime un écart entre un point donné et un niveau de référence ; par convention, sur Terre ce niveau est le plus souvent le niveau de la mer (ou « niveau zéro »).

Présentation du système GPS

❑Le système G.P.S est un système de radio-localisation par satellite qui permet le positionnement de tout objet (point isolé, ensemble de points) ou mobile (véhicule, avion, satellite), au voisinage de la surface terrestre.

❑ Le GPS fait son apparition aux États-Unis au courant des années 1970. Bien que le projet officiellement opérationnel qu'en 1995.

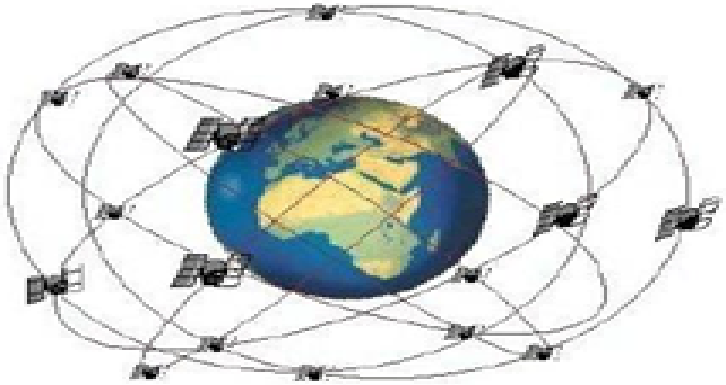
❑Contrairement aux systèmes de navigation précédents, le GPS permet d'obtenir une position en trois dimensions (3D - i.e. que l'altitude d'un utilisateur peut être aussi déterminée) à partir de plusieurs satellites en simultanée.

❑Le GPS peut aussi fonctionner pour des dynamiques élevées, telles qu'à bord des autos, des avions et des engins spatiaux.

❑De plus, tous les satellites transmettent leurs signaux de façon simultanée sur les mêmes bandes de fréquence via une technique de modulation appelée CDMA *(Code Division Multiple Access)*.

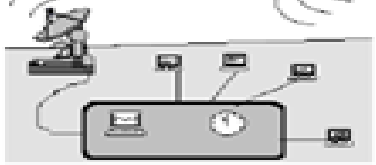
❑Le système GPS est séparé en trois segments principaux : le segment spatial, le segment de contrôle et le segment utilisateur.

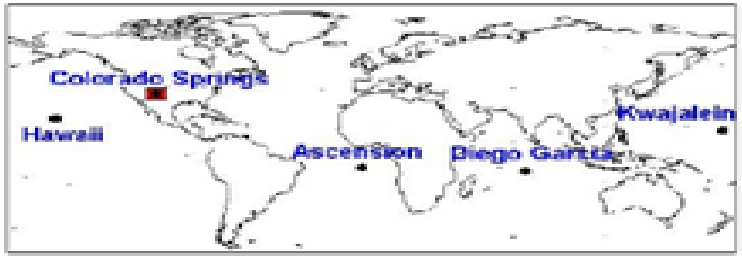
Segment spatial



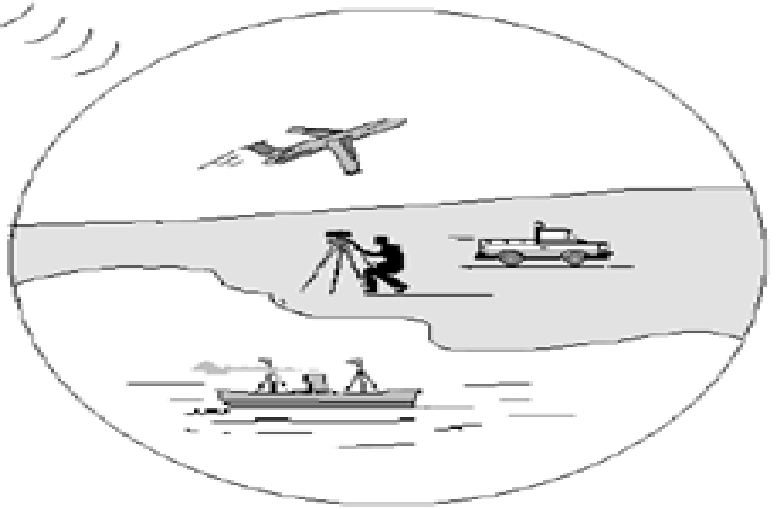
- 32 satellites
- Emission de signaux GPS

Segment de contrôle





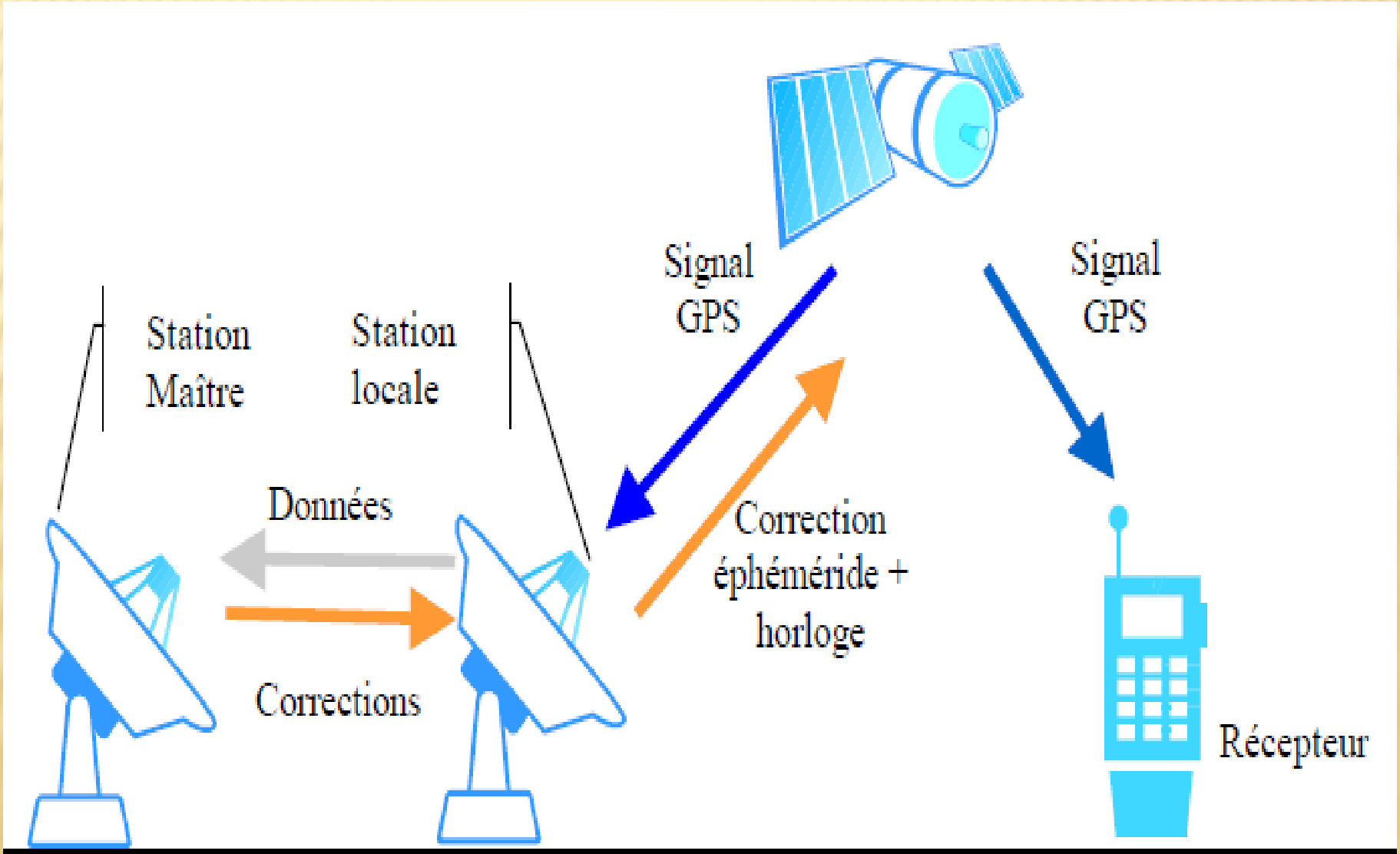
Segment utilisateurs



- ✓ Réception des signaux
  - ✓ Mode d'obs.: statique et cinématique
  - ✓ Obs. en pseudo distance, phase
  - ⇨ Navigation, Géodésie, Géodynamique, Guidage de robot et machines…

- ✓ Gestion et surveillance des satellites.
- ✓ Correction de l'horloge des satellites.
- ✓ Estimation et calcul des éphémérides des satellites.

Le système GPS.


Station
Maître
Station
locale
Signal
GPS
Signal
GPS
Données
Corrections
Correction
éphéméride +
horloge
Récepteur

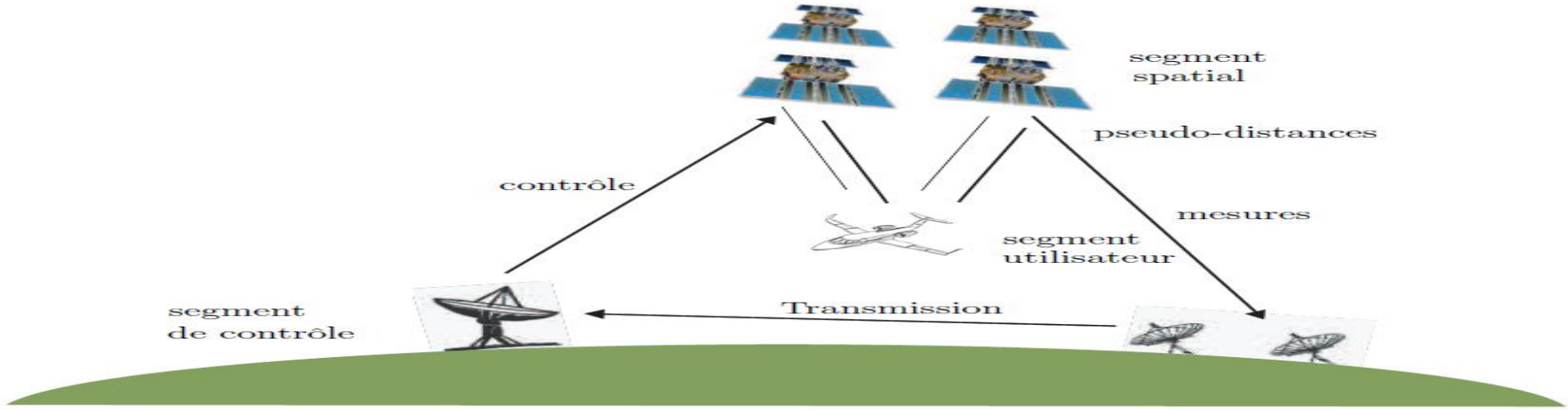
le segment spatial

Le segment spatial d'un système de navigation par satellite est composé d'un ensemble de satellites appelé *constellation*. Avec le déploiement des nouveaux systèmes de navigation par satellite, il sera à l'avenir constitué des constellations GPS, Galileo, GLONASS, COMPASS

Chaque constellation possède un certain nombre de satellites opérationnels auxquels s'ajoutent des satellites de remplacement. Le tableau 1.2 regroupe les caractéristiques principales des constellations GPS, Galileo, COMPASS et GLONASS. Il est à noter que les informations indiquées pour le système Galileo et COMPASS

Constellation	GPS	Galileo	GLONASS	COMPASS
Nombre de satellites opérationnels	24	27	24	35
Rayon orbital moyen	26600 km	29600 km	27500 km	27840 km
Durée de révolution	12h	14h	11h15	12h45
Inclinaison	55 °	56 °	64, 8 °	55 °
Nombre de plans orbitaux	6	3	3	3

Paramètres orbitaux des différentes constellations.



❑Le segment spatial consiste quant à lui en une constellation de 24 satellites GPS opérationnels répartis sur 6 orbites circulaires différentes et inclinées à 55° par rapport au plan équatorial. Les satellites sont situés sur des orbites moyennes (MEO - *Médium Earth Orbit)* à une altitude de 20180 km faisant en sorte que chaque satellite retrouve la même position dans le ciel au bout de 23 h 56 min. Bien que la constellation complète soit théoriquement constituée de 4 satellites opérationnels et 1 satellite de secours par orbite, pour un maximum de 30 satellites. Chaque satellite transmet continuellement en radiodiffusion deux fréquences porteuses sur la bande L: L1 = 1575.42 Mhz. L2 = 1227.60 Mhz.

Bande	f [MHz]	λ [cm]
L1	$154\ f_0 = 1575.42$	~ 19
L2	$120\ f_0 = 1227.60$	~ 24

- le segment de contrôle

Le segment de contrôle assure la surveillance de la constellation et la mise à jour des informations relatives aux satellites. Chaque système de navigation par satellite possède son propre segment de contrôle, constitué de stations de mesure réparties sur le globe terrestre et de stations de contrôle.

Actuellement, dix-sept stations de mesure collectent les signaux émis par les satellites de la constellation GPS. Les informations sont ensuite envoyées à la station de contrôle principale du système GPS, située dans le Colorado (Etats-Unis). Cette station de contrôle traite alors l'ensemble de ces données et définit les corrections d'horloge et les paramètres d'orbite qui sont téléchargés à chaque satellite au moins une fois par jour. De plus, le segment de contrôle a pour objet de détecter un dysfonctionnement éventuel sur les satellites GPS.

Le segment de contrôle du système Galileo sera composé de différentes stations de contrôle, de mesure et de transmission qui seront réparties dans le monde entier. De la même manière, le système GLONASS possède ses propres stations de contrôle qui vérifient la validité des informations relatives aux satellites de la constellation GLONASS. Il en sera de même pour le système COMPASS lorsqu'il sera complètement opérationnel.

❑ Le segment de contrôle de GPS, qui est constitué d'une station maîtresse de **Colorado Springs** (USA), contrôlée par l'US. Air Force, et de quatre autres stations de commande et de poursuite situées à **Hawaii** (Pacifique), **Ascension** (Atlantique), **Diego Garcia** (Océan Indien) et **Kwajalein** (Pacifique).

Chacune de ces stations est équipée d'un récepteur GPS et d'un ensemble d'antennes. Elles poursuivent, continuellement, toute la constellation GPS, afin de contrôler, calculer, prédire et injecter les informations nécessaires aux satellites.

Le rôle principal du segment de contrôle est de surveiller et de maintenir opérationnel le segment spatial. Les stations sol surveillent les orbites des satellites et les caractéristiques des signaux émis, les transmettent à la station maître (Master Control Station) qui calcule les annuaires, transmises dans le message de navigation, et les corrections d'horloge.

Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

Segment utilisateur

Constitué par l'ensemble des récepteurs susceptibles de décoder les signaux de navigation transmis par les satellites et d'en déduire par calcul les solutions de position, de vitesse et/ou de temps. Un récepteur doit être capable de :

- Sélectionner plusieurs satellites parmi ceux qui sont visibles et acquérir les signaux GPS correspondants.
- Poursuivre les satellites sélectionnés (tracking).
- Extraire le message de navigation et calculer les solutions de position/temps.

Il y a actuellement deux types de service à disposition des utilisateurs :

SPS – Standard Positioning Service. C'est le service accessible par chacun basé sur l'exploitation du code C/A (Coarse Acquisition) transmis par la porteuse L1.

PPS – Precise Positioning Service. Présente le meilleur degré de précision dynamique et d'intégrité des données. Accessible uniquement par les personnes autorisées (armée US…). Basé sur l'exploitation des deux bandes de fréquence L1 et L2 ainsi que des code P (Precise et/ou Protected) et Y(P).

Présentation du récepteur GPS

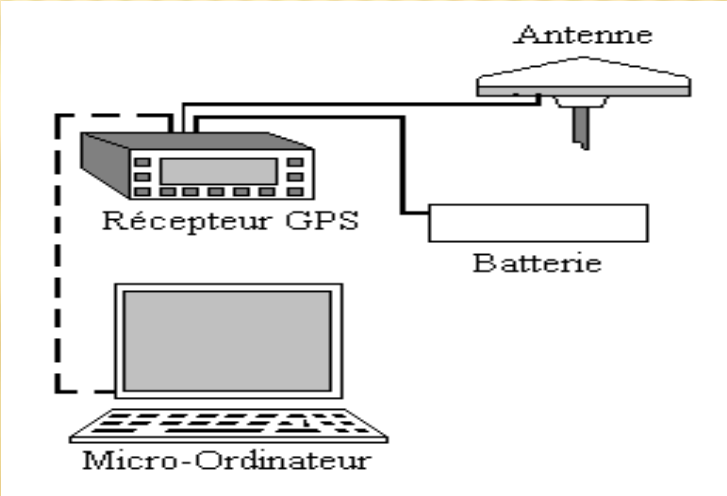
le segment utilisateur : représente essentiellement les récepteurs de navigation employés pour obtenir une position à partir des satellites GPS.

- Le récepteur GPS est l'unité de réception, de traitement interne, de navigation, et si nécessaire de sauvegarde des mesures GPS en vue du post-traitement.

- Un récepteur GPS se constitue de cinq parties principales : l'antenne, le récepteur, le processeur, l'interface utilisateur, et la source d'´energie.

- L'antenne capte le signal GPS et l'envoie au récepteur qui le déchiffre. Le processeur contrôle l'acquisition et la sauvegarde des données, et calcule les positions de navigation.

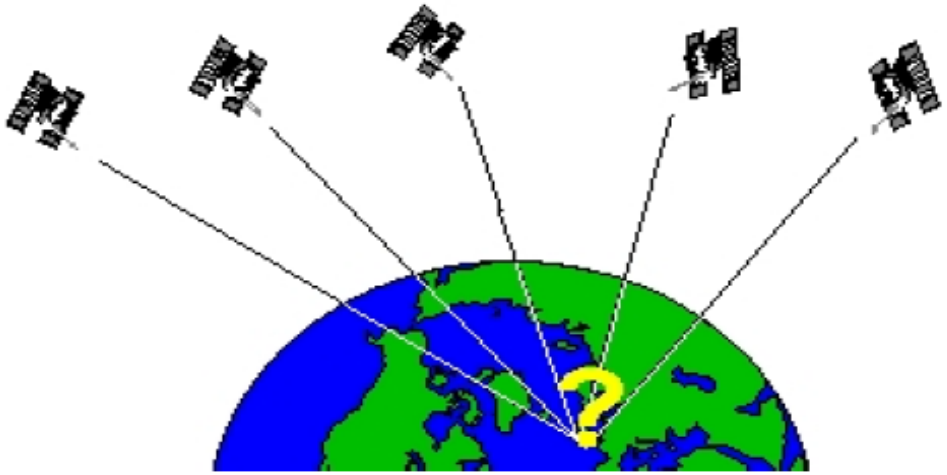
- Le choix du récepteur et des antennes dépend de l'utilisation à laquelle il est destiné.



Calcul du point

Principe de base

La position est déterminée par l'intersection des "droites" reliant le récepteur aux satellites. Cette technique est appelée traditionnellement trilatération.

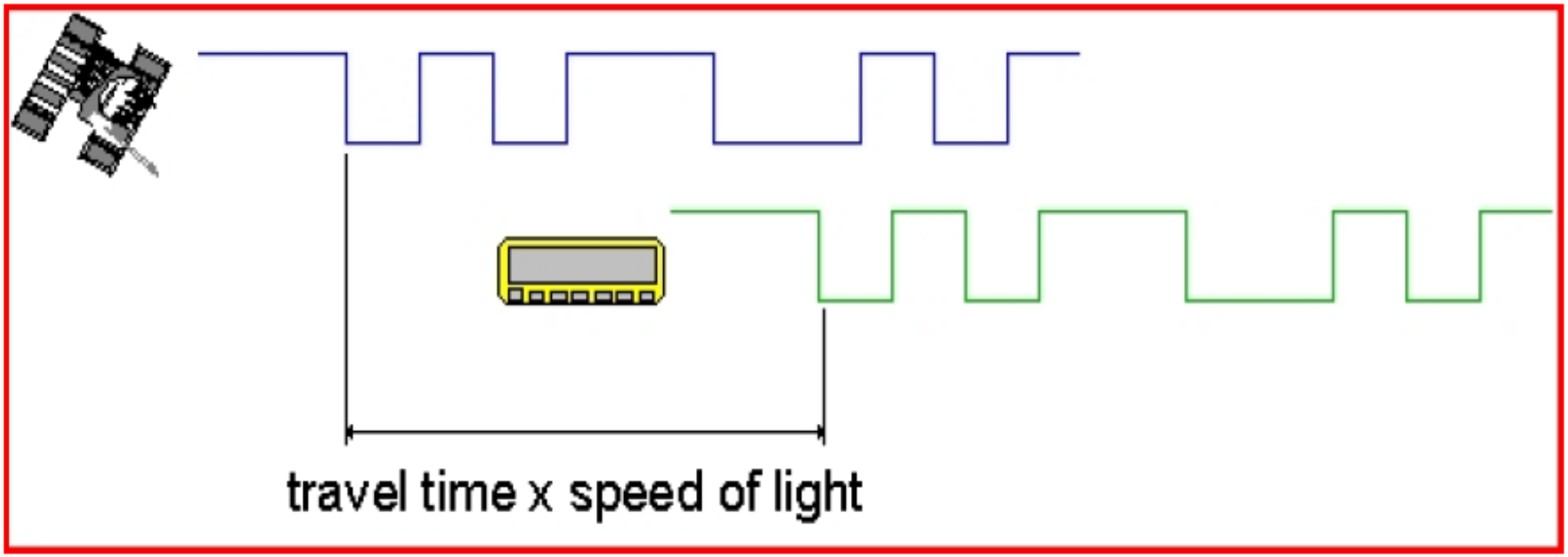


Les distances ne sont pas mesurées directement. Connaissant la vitesse de propagation (~ vitesse de la lumière) et la position des satellites (éphémérides), on peut calculer la distance entre le récepteur et le satellite capté en mesurant le temps mis par le signal pour effectuer le trajet. C'est la technique dite du TOA (Time Of Arrival). Il y a bien entendu tout une série de paramètres dont il faut tenir compte pour obtenir un résultat avec une précision suffisante (perturbations atmosphériques, incertitudes sur la position réelle des satellites, géométrie de la constellation, effet doppler…).

Mesure des pseudo-distances

La mesure des pseudo-distances constitue le principe de base du système GPS (et de tout autre système de navigation par satellites).

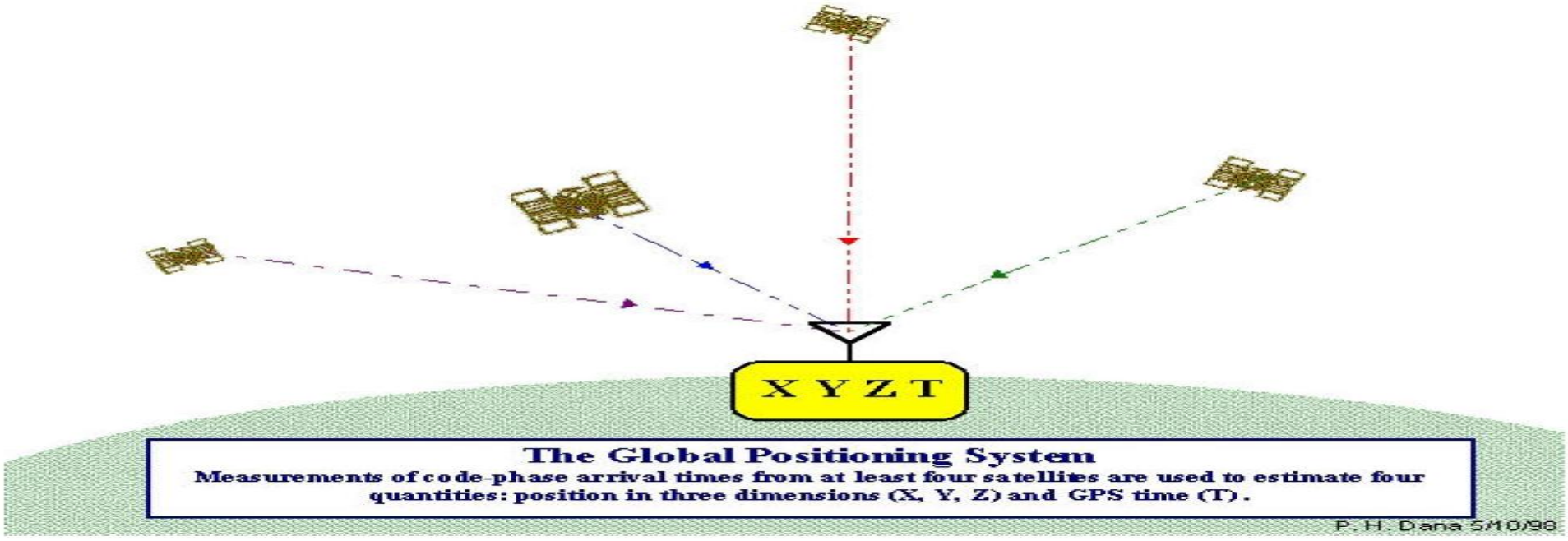
Le processus de mesure détermine le temps mis par le signal (code) pour parcourir la distance séparant le satellite du récepteur. Ce temps multiplié par la vitesse de la lumière est ainsi converti en une distance.



D'une manière très simplifiée, cela fonctionne à peu près comme ceci… A un certain moment, le code (C/A ou P) est généré puis transmis par le satellite pour être reçu par le récepteur quelques instants plus tard. Le récepteur compare l'état du code reçu avec celui de sa propre réplique – la différence est le temps de parcours. Le satellite transmettant sa position et l'heure d'envoi du message, le récepteur est à même de calculer sa propre position relative.

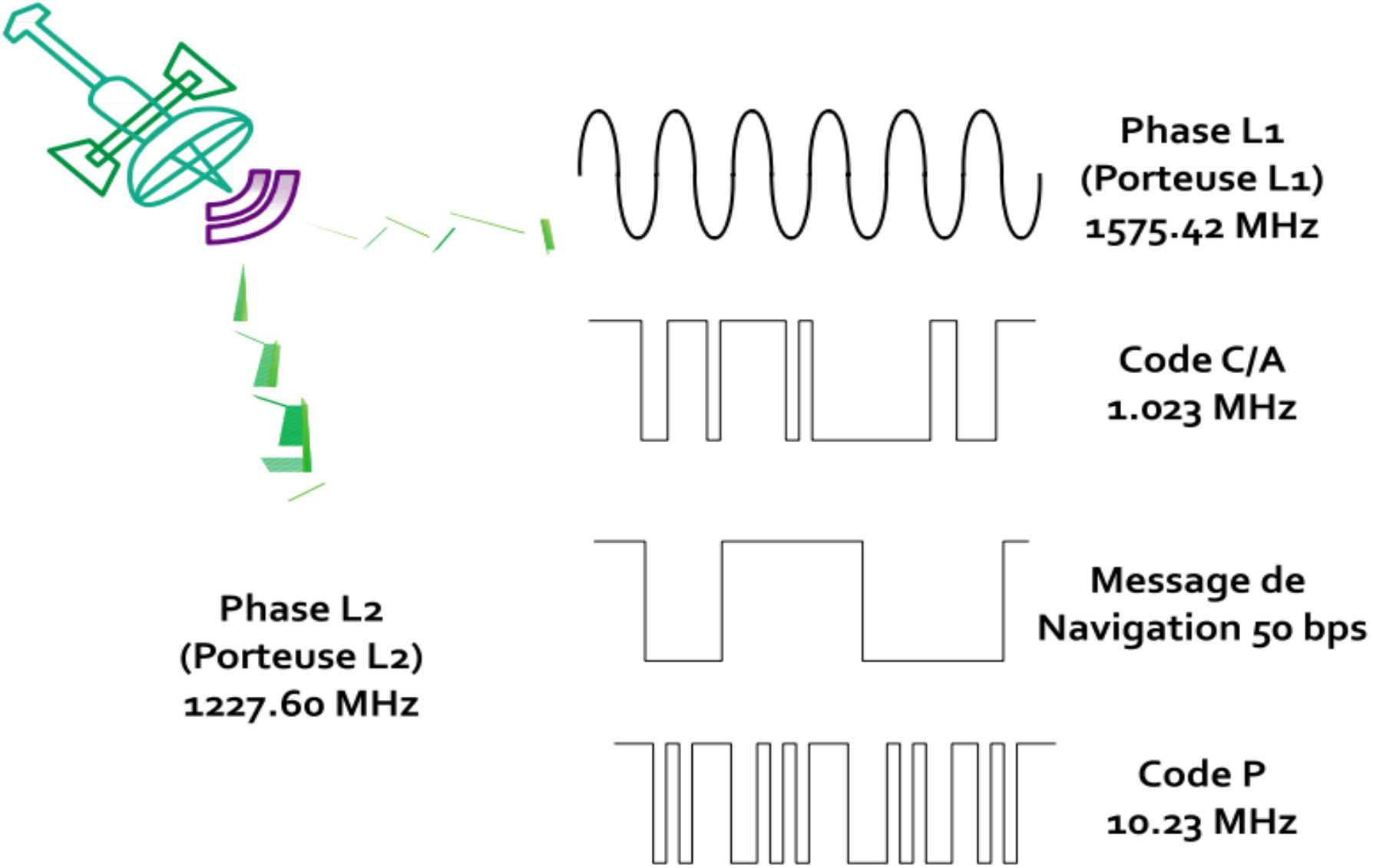
Les satellites "fabriquent" leur base de temps grâce à des horloges atomiques (césium) embarquées et dont les dérives sont surveillées et corrigées si nécessaire par le segment terrestre, tandis que les récepteur doivent se contenter d'un simple oscillateur (un récepteur équipé d'une horloge atomique serait passablement encombrant et surtout hors de prix !). L'horloge du récepteur n'est donc à priori pas synchronisée avec le temps GPS. Il y a de ce fait un offset de temps qui conduit à une erreur dans la mesure d'où le terme de **pseudo**-distance. Cependant, cette erreur peut facilement être calculée et compensée car toutes les pseudo-distances aux différents satellites ont le même offset au même moment.

On est en présence d'une système à quatre inconnues (latitude, longitude, altitude et temps) et il faut quatre équations pour pouvoir le résoudre. C'est pourquoi au moins quatre satellites sont nécessaires pour déterminer une position.



- Chaque satellite émet 2 types de pseudo distances :

1. un code précis "P" qui permet un positionnement à environ 10 mètres près et
2. un code non précis "C/A" à seulement 100 mètres près environ.



Le signal GPS

❑ Le système GPS a une fréquence de base f0=10,23 MHz (générée dans les horloges des satellites).

❑Les satellites émettent ainsi sur 2 fréquences porteuses L1 = 1575.42 MHz = 154.f0 et L2 = 1227.60 MHz = 120.f0.

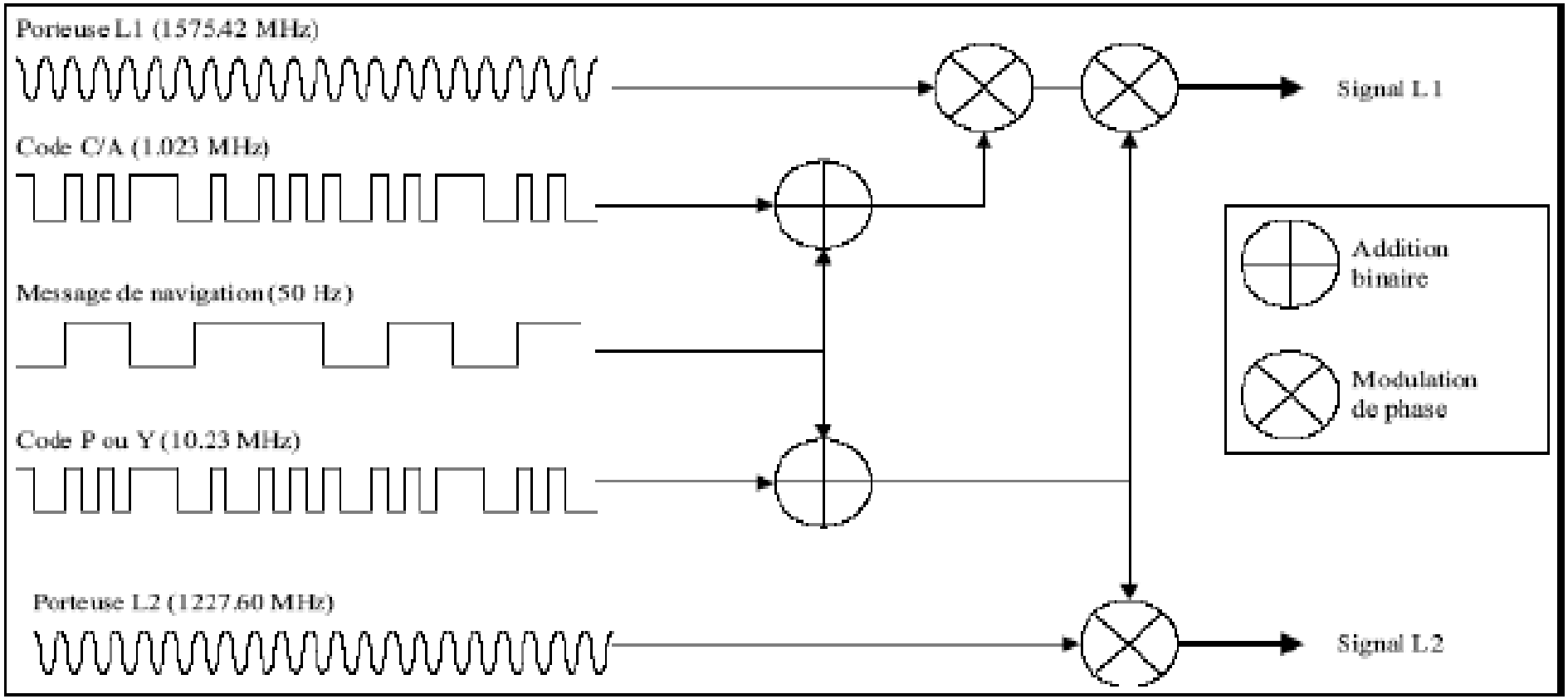
❑ Sur ces 2 fréquences porteuses est modulé le message de navigation et 2 codes pseudo-aléatoires : le code C/A (Coarse/Acquisition, acquisition brute) et le code P (Precise),

❑Ces deux codes servent pour transmettre les données de navigation.

	C/A	P(Y)
Rythme chip	1.023 MHz	10.23 MHz
Longueur de code	1023	$2.3547 \cdot 10^{14}$
Période de répétition	1 ms	1 semaine
Crypté	Non	Oui
Disponible pour	Tous	Utilisateurs autorisés par le DOD
Porteuses	L1	L1 & L2

Caractéristiques des signaux GPS

DOD: Department of defense



- Chaque satellite émet un message codé contenant un certain nombre d'informations, dont sa propre position et l'instant exact de l'émission du signal.

- Un simple récepteur suffit alors pour mesurer le temps écoulé entre émission et réception, et par là en déduire la distance qui le sépare du satellite.

- Le récepteur reconnaît le satellite dont il reçoit le signal (chaque satellite possède une signature, donnée par le code C/A) et génère une réplique du code présent dans ce signal.

Calcul des pseudo-distances satellites-récepteur

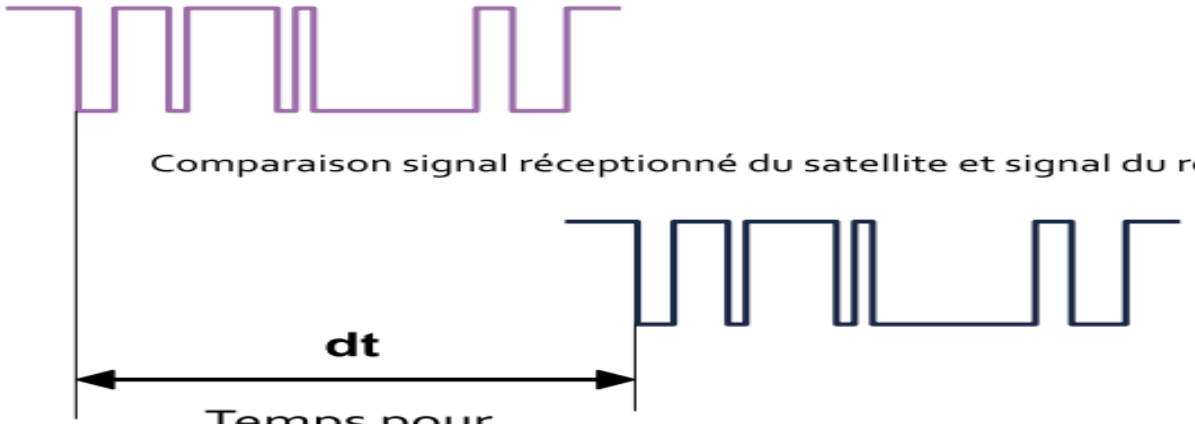
- Le principe du calcul des distances séparant le récepteur d'au moins quatre satellites repose sur le temps que mettent les signaux du code C/A pour parcourir la distance séparant l'opérateur des satellites.

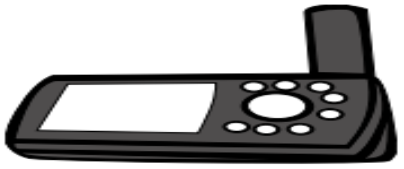
- Le temps est multiplié par la vitesse de propagation du signal (vitesse de la lumière) pour obtenir la distance satellite -opérateur.

- Le calcul des quatre distances permettra de définir les coordonnées X, Y et Z de l'opérateur.

Calcul de la distance satellite – Récepteur :
= dt * vitesse de la lumière

Résolution du système de 4 équations à 4 inconnues : Coordonnées X et Y, Altitude, dt





- Le système est pourvu de capacité de diminution de la précision. Cet objectif est atteint en dégradant artificiellement la précision d'un certain nombre des informations émises par les satellites.

- Les informations concernées sont d'une part les horloges des satellites qui donnent l'instant d'émission du signal, et d'autre part les orbites des satellites qui donnent la position du point d'émission du signal.

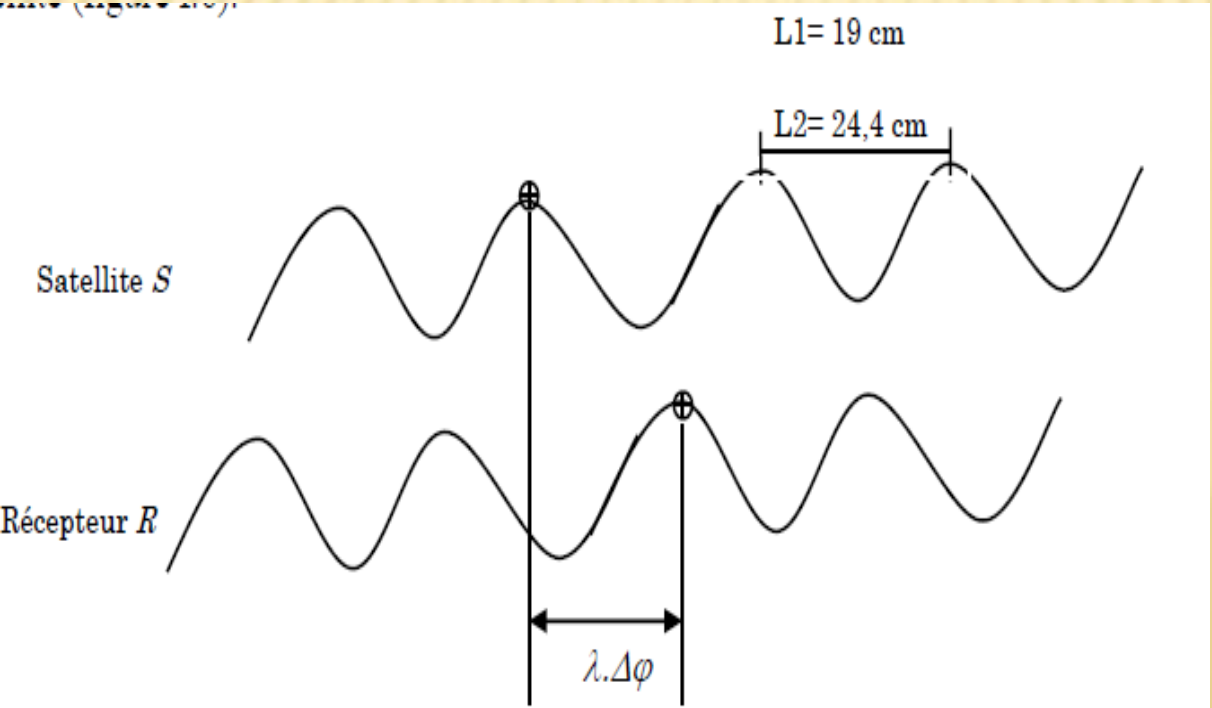
- En pratique, il est possible de contourner cette difficulté en ayant recours au GPS différentiel. Cette technique consiste à disposer d'une station fixe dont la position est connue à l'avance avec une grande précision. A chaque instant, la différence entre position mesurée et position vraie est alors réémise par radio comme une correction valable dans toute la zone de la station fixe.

Mesure de la phase

❑ Un autre type de mesure existe : la mesure de phase sur les ondes porteuses L1 et L2. Son principe est basé sur la mesure de la différence de phase entre le signal reçu du satellite et sa réplique générée par le récepteur.

❑La mesure de la phase se fait sur les ondes porteuses L1 et L2 de longueur d'ondes 19.0 cm et 24.4 cm.

❑Cette mesure consiste donc à la comparaison de la phase du signal reçu par le récepteur avec la phase du signal généré par le récepteur et qui est une réplique du signal satellite.



Comparaison entre le signal reçu et le signal du récepteur sur la porteuse.

Utilisation des phases

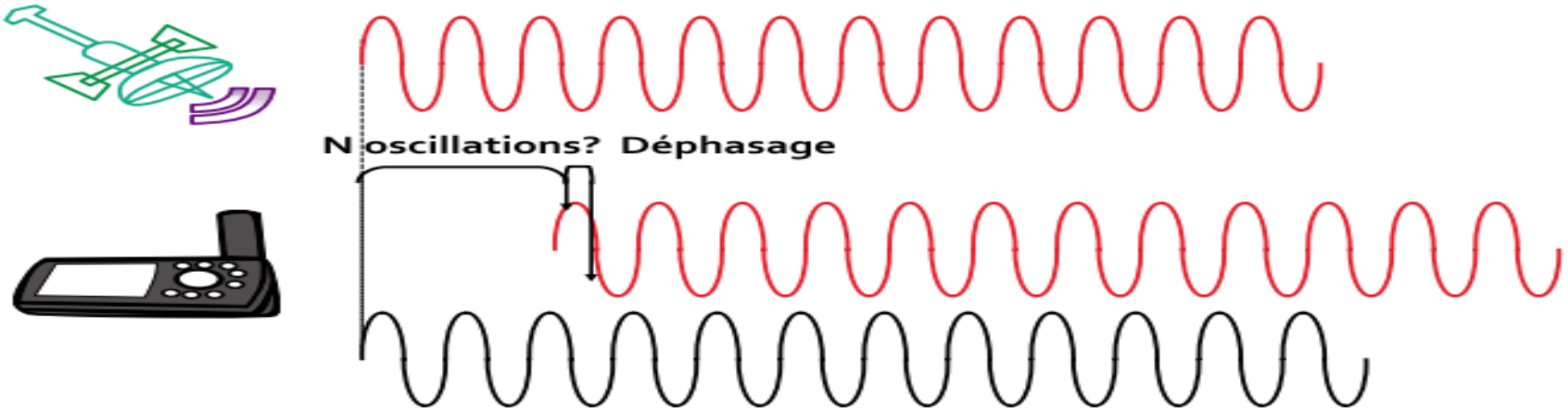
- Le calcul de la position se base ici sur la phase de la porteuse L1 (ou L2) et non sur le code C/A comme vu précédemment.

- En comparant le signal émis et le signal réceptionné le récepteur peut mesurer le décalage de phase, une mesure que permet de calculer la distance séparant l'opérateur du satellite.

- La difficulté de cette méthode est liée à l'inconnue, dite « ambiguïté », du nombre d'oscillations qu'il ya eu entre l'émission et la réception du signal.

Calcul de la distance satellite – Récepteur :
= longueur d'onde x (Déphasage + nombre d'oscillation)

Déphasage : mesure possible
Nombre d'oscillations ? Ambiguïtés



Code C/A

Le code C/A (Coarse Acquisition) est un code binaire pseudo-aléatoire (PRN code) constitué de 1'023 éléments (chips) qui se répète avec une période de 1ms.

Du fait de la périodicité du code C/A, il en résulte une ambiguïté au niveau du récepteur. En effet la durée du code (1ms) se propageant à la vitesse de la lumière (env. $3 \cdot 10^8$m/s) correspond à une distance d'environ 300km. Le code se répète lui-même tout les 300km.

La transmission des données GPS se fait selon le principe CDMA (Code Division Multiple Access), c'est à dire que chaque satellite de la constellation émet sur une seule et même porteuse un code C/A qui lui est propre. Les codes C/A de chaque satellite étant parfaitement connus

Message de navigation

Il constitue la base du fonctionnement pour le récepteur car il contient toutes les informations nécessaires pour :

- Synchroniser l'horloge interne du récepteur.
- Calculer le point (position),
  - *corrections de temps*
  - *éphémérides du satellites (position, données orbitales…)*
  - *modèle de correction ionosphérique*
- Accrocher les autres satellites

Le code C/A (Coarse/Acquisition) est un code pseudo aléatoire, de période 1ms. Chaque satellite émet son propre code unique, lequel permet donc l'identification du satellite et la mesure des pseudo-distances.Il permet par rapport au code P une localisation plus rapide mais moins précise. Il est de plus accessible à tous.

Le code P(Y) (Précision) est un code militaire dont l'encodage en code Y n'est pas rendu public. Sa période de 38 semaines est coupée à 1 semaine et répétée hebdomadairement. Le code de 38 semaines est divisé en 37 codes P utilisés par les différents satellites.

Quelques récepteurs pour des applications de haute précision, mettent en œuvre des techniques permettant d'utiliser le code P (malgré son cryptage).

Le message de navigation D, émis à 50 Hz, contient les données calendriers, les corrections d'horloge, l'âge des données, le n° et l'état de santé du satellite.

Principe de la mesure GPS

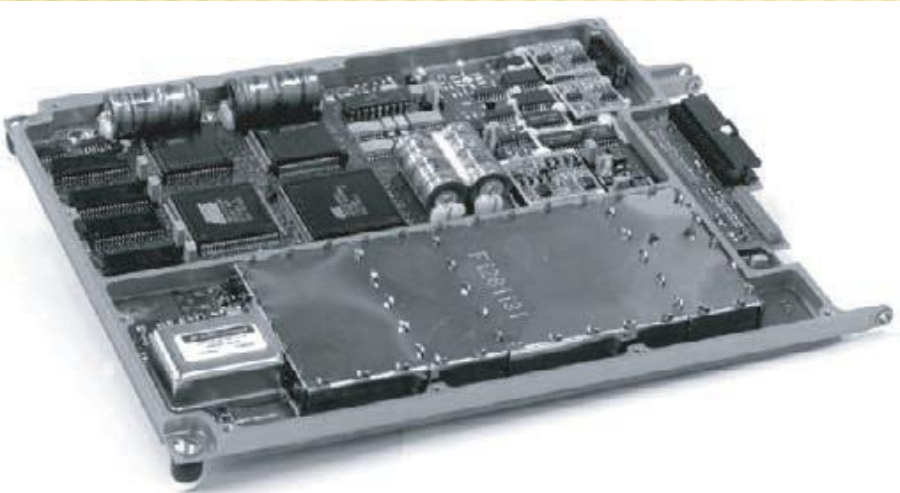
- Le code C/A est porté uniquement par la porteuse L1.
- Ce code à lui rythmé à 1,023 MHz.
- Ce code permet une localisation plus rapide, mais moins précise ; il est de plus accessible à tous.
- Ce code était volontairement dégradé par l'armée américaine (altération des horloges et des calendriers) pour éviter son utilisation par des forces ennemies en cas de conflit. Cette dégradation est appelée SA (Selective Availability).
- Le code P est porté par L1 et L2, il est 10 fois plus précis que le code C/A.
- Un dispositif de dégradation nommé (Anti-Spoofing, ou AS) est actif sur le code P depuis 1994.
- Le code P, rythmé à 10,23 MHz, est un code militaire dont l'encodage n'a pas été rendu public.
- Le code P a une période libre de 266 jours (soit 38 semaines).

Récepteurs GPS militaires

- À l'origine, le système GPS a été conçu pour répondre au besoin des armées américaines de disposer d'un positionnement de l'ensemble des équipements, troupes ou armes déployées sur des terrains d'opération.

- Sur le champ de bataille moderne, la navigation par satellite a pour but de déterminer rapidement et avec précision les coordonnées, la position, de diriger le mouvement des troupes et des missiles télécommandés. Elle est également utilisée pour la navigation des drones.

- Il existe une grande variété de récepteurs GPS développés pour de tels besoins et contraintes spécifiques des applications militaires.



Intérieur d'un récepteur GPS militaire PPS Topstar 100-2 utilisé sur avion Transall et hélicoptère Tigre (source Thales Avionics)

- Ces récepteurs doivent opérer dans des environnements extrêmement ennemis, qui induisent des caractéristiques spécifiques, notamment les suivantes :
- Ces équipements faisant partie du système d'arme, leur accès doit être contrôlé.

- Les systèmes GPS et bientôt Galileo disposent de signaux réservés pour ces applications, auxquels l'accès n'est possible que par le biais d'un code de décryptage.

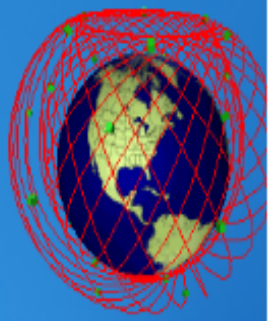
- Ces récepteurs sont extrêmement résistants au brouillage et aux mauvaises conditions de réception.

- Les récepteurs embarqués sur des systèmes d'armes, comme les missiles, sont soumis à des accélérations et à des vitesses très importantes.

- Afin d'assurer une continuité précise du positionnement en cas de masquage ou de brouillage, les récepteurs peuvent être « aidés », c'est-à-dire couplés à d'autres équipements de navigation leur permettant de réacquérir très rapidement les signaux de satellites perdus.
- une plus grande précision des paramètres déterminés décrivant la position et le temps,

LE G.P.S.

Avantages

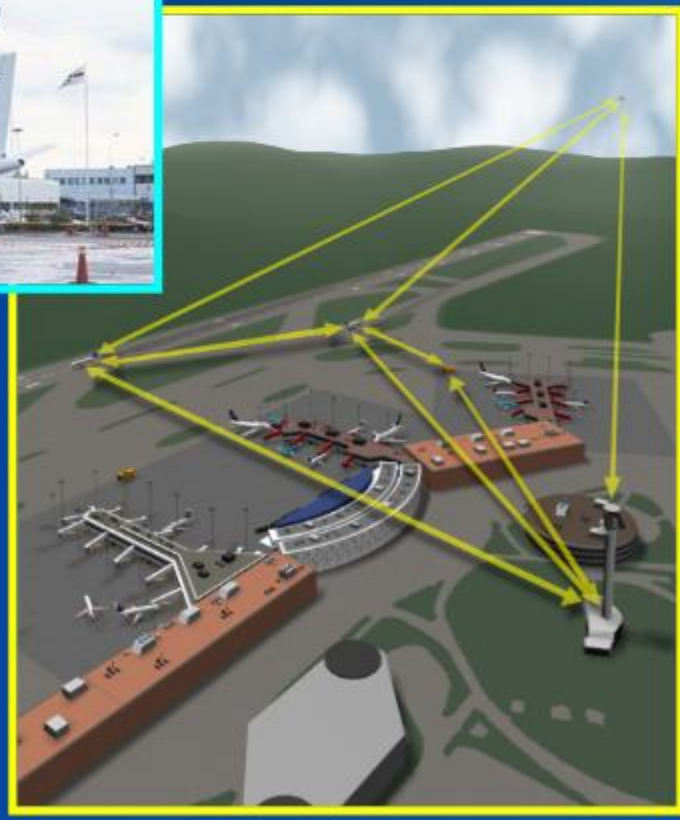


Portée	Quasiment infinie Pas de problème optique.
Précision	De 10 à 200 ft maxi.
Évolutif	De plus en plus de systèmes auxiliaires.
Prix et poids	Imbattables.

LE G.P.S.

ÉVOLUTION DU SYSTÈME GPS

Au sol, les erreurs de localisation des mobiles sont quotidiennes les confusions des équipages entre piste et taxiway sont fréquentes et les incursions de piste ne sont pas rares.



Un système de localisation et d'information en cabine et au sol est en phase d'études, de développement et de validation

L'A.N.L.E. (Airport Network Location Equipement)

Les sources d'erreur sur les mesures GNSS

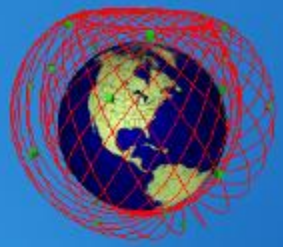
Problèmes d'alimentation

- les GPS sont assez couteux en énergie, et leur autonomie tourne entre 5 et 25 heures selon les modèles. Choisir de préférence un GPS peu couteux en énergie.

- Erreurs liées aux satellites (orbite et horloges des satellites)
- Erreurs liées à la propagation du signal dans l'ionosphère et la troposphère
- Erreurs liées à la station (le trajet multiple, les masques, horloges des récepteurs)

- Le trajet multiple : tout objet réflecteur placé au voisinage de l'antenne du récepteur peut renvoyer une partie du signal provenant du satellite sur cette antenne. Ce sont les phénomènes les plus difficiles à appréhender, le sol lui-même étant un réflecteur potentiel. Peut entrainer des erreurs de plusieurs centimètres.
- Les masques : des éléments de l'environnement de la station peuvent former des obstacles qui représentent des masques pour les signaux GPS, empêchant la réception du signal. Il n'existe aucun moyen de corriger l'effet des masques. La seule solution est de choisir judicieusement la situation de la station.

LE G.P.S.



INTÉGRITÉ DU SYSTÈME GPS

DÉFINITION : CAPACITÉ DU SYSTÈME À FOURNIR UNE ALARME AU PILOTE LORSQUE LE DISPOSITIF DE NAVIGATION GPS N'ASSURE PLUS SA FONCTION DANS LES PLAGES DE PERFORMANCE REQUISE
(Dégradation des signaux, Panne de l'appareillage, incertitude du positionnement).

LE CONCEPT GPS
N'A PAS INTÉGRÉ CE CRITÈRE
LORS DE SA CONCEPTION

Sans intégrité Pas de confiance

LE G.P.S.

INTÉGRITÉ DU SYSTÈME GPS

DES ADAPTATIONS TECHNIQUES ONT ÉTÉ DÉVELOPPÉES POUR L'AVIATION

- **L'INSTRUMENTATION EMBARQUÉE**

  Ajout de la fonction R.A.I.M. (Receiver Autonomous Intégrity Monitoring) intégrée au récepteur GPS de bord.

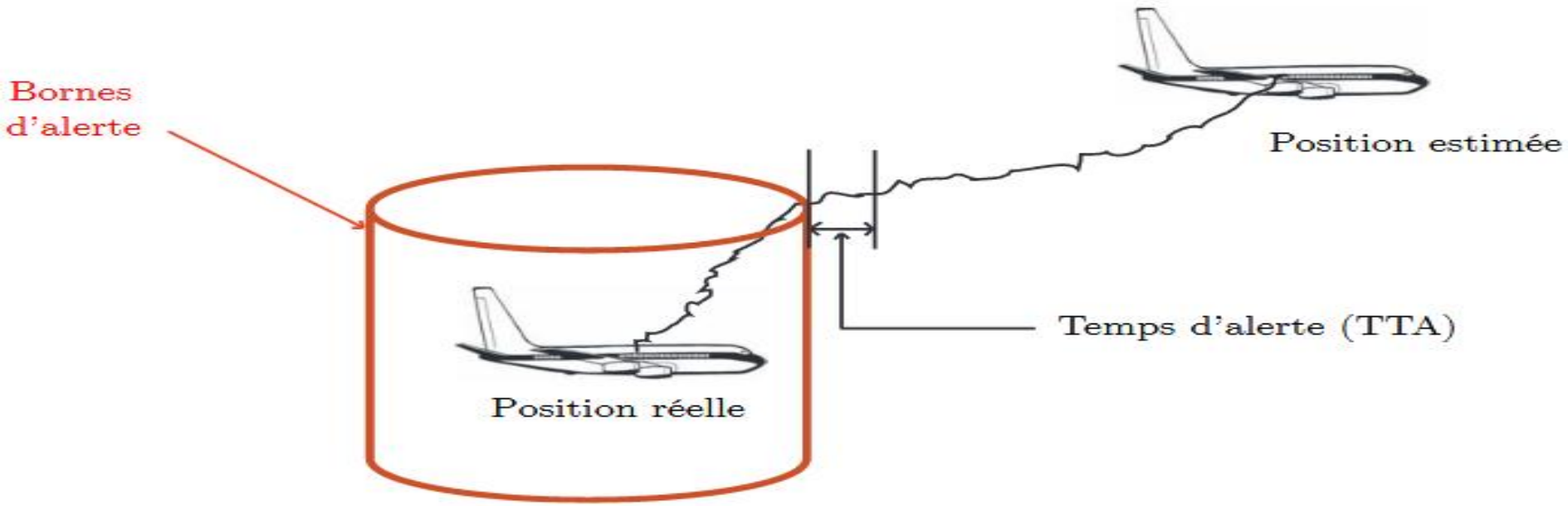
  Un logiciel intervient dans deux domaines :

  - L'identification F.D.I. (Fault, Détection, Identification) qui informe l'utilisateur sur la validité de son positionnement. Cette fonction requiert au moins cinq satellites en « vue ».
  - L'exclusion F.D.E. (Fault, Détection, Exclusion) qui élimine un satellite déficient dans le calcul de la position Six satellites « en vue » sont nécessaires pour réaliser cette fonction (pas toujours réalisable).

L'intégrité

L'intégrité est une mesure de confiance qui traduit la capacité d'un système à fournir en un temps maximum prédéfini des alertes réelles de fonctionnement lorsque le système ne satisfait plus aux exigences de l'OACI pour le type d'opération en cours. L'intégrité est définie par les bornes d'alerte, le temps d'alerte et le risque d'intégrité.

- Les **bornes d'alertes** désignent les erreurs de position maximales que le système peut commettre en respectant les contraintes d'intégrité. Ces bornes sont définies pour l'erreur de position horizontale et verticale. Ainsi, ces bornes sont nommées respectivement HAL (pour Horizontal Alert Limit en anglais) et VAL (pour Vertical Alert Limit en anglais).
- Le **temps d'alerte** TTA (pour Time-To-Alert en anglais) est l'intervalle de temps maximum autorisé entre l'instant où le système ne satisfait plus aux exigences opérationnelles du type d'opération et l'instant où le système indique une alerte de navigation.
- Le **risque d'intégrité** désigne la probabilité qu'une erreur de position soit supérieure aux bornes d'alertes et non détectée par le système dans un temps d'alerte donné. Elle est exprimée par unité de temps ou par approche selon le type d'opération.



Les concepts du brouillage et du leurrage

Le brouillage est un concept qui implique des perturbations sur un signal. Il existe plusieurs types de perturbation liées aux techniques de brouillage :

- La transmission d'un signal plus puissant dans la même bande de fréquences que le GPS afin de perturber les signaux GPS
- La transmission de signaux identiques aux signaux transmis par les satellites GPS, une approche connue sous le nom de leurrage ou « spoofing ». Cette dernière technique permet d'émettre des signaux GPS afin de transmettre de fausses informations de localisation.

Bien qu'illégal aux Etat-Unis et dans l'Union Européenne, il est étonnamment assez facile de se procurer un dispositif de brouillage permettant de bloquer les signaux de navigation GPS (et/ou signaux téléphoniques) et ce, pour un coût relativement raisonnable. La capacité de ce type de matériel est généralement restreinte et sa portée varie de 5m à 15m (parfois plus). La plus part sont utilisés pour contourner l'utilisation de dispositifs de traçage GPS. Les dispositifs militaires permettent quant à eux de faire peser une menace bien plus lourde et de brouiller, voir même d'interrompre les signaux GPS sur plusieurs centaines de kilomètres à la ronde.

« Le brouillage est devenu particulièrement problématique en raison de la prédominance croissante des brouilleurs GPS à bas prix pouvant être achetés en ligne pour seulement 30 $ », a expliqué la compagnie "**Les conducteurs utilisent ces brouilleurs afin d'empêcher les voitures d'enregistrer leurs déplacements**. Le rayon d'impact de ces appareils peut atteindre des centaines de mètres et entraver potentiellement les communications critiques et les systèmes d'infrastructure",

« En outre, certaines personnes utilisant des brouilleurs sont des voleurs de camions de marchandises qui emploient les dispositifs pour faire disparaître leurs camions cibles de la grille des systèmes informatiques de gestion de flotte »,

Pour rappel, la veille du déclenchement de l'opération *Iraqi Freedom* en 2003, la société Russe Aviaconversiya avait été pointée du doigt pour avoir fourni des dispositifs de brouillage GPS aux forces armées Irakiennes. Ces émetteurs portatifs de 8kg (voir photo ci-dessus) étaient assez puissant pour brouiller les signaux GPS jusqu'à une distance de 200km. Facile à repérer lorsqu'ils sont en fonctionnement, les sites ont pu être identifiés autour de Bagdad et ont été rapidement neutralisés par des frappes de la coalition.

Parmi ces événements, il faut différencier les interférences intentionnelles et non intentionnelles. Une antenne d'émission de télévision mal réglée peut par exemple être une source d'interférences non intentionnelle. Une interférence intentionnelle provient quant à elle d'un dispositif ayant pour vocation à brouiller les signaux GNSS. En novembre 2017, un cadre commercial a été condamné à 2000€ d'amende pour avoir omis d'éteindre un brouilleur GPS localisé dans son véhicule, garé à l'aéroport de Nantes. Son fonctionnement a sérieusement perturbé le fonctionnement de l'aéroport contraignant l'Agence Nationale des Fréquences (ANF) à intervenir pour détecter et désactiver le brouilleur.

Le nombre d'interférences intentionnelles des signaux GNSS ne cesse de croître depuis plusieurs années. Prisé des criminels, les dispositifs de brouillage GPS sont régulièrement employés dans les vols de véhicules haut de gamme. Dépourvu de sécurité, le signal commercial d'un GNSS est particulièrement vulnérable au brouillage, il reste malgré tout très largement utilisé dans les domaines des transports (aérien, maritimes et routiers) aujourd'hui. Lorsque certains gouvernements s'inquiètent de l'impact qu'auraient de telles attaques sur leur infrastructures de transports, d'autres sont déjà victimes de ce type d'attaque. Le gouvernement sud-coréen a reporté d'importantes activités de brouillage provenant de la Corée du Nord en mars 2016. Environ 1000 avions civils ainsi que 700 bateaux auraient été affectés par ces manœuvres de brouillage sur plusieurs périodes.

Le cas du leurrage (ou « spoofing »)

Si le brouillage par interférence peut être non intentionnel, le leurrage ou « spoofing » est une technique de brouillage sophistiquée impliquant la plus part du temps des moyens techniques et logistiques plus importants, souvent difficiles à acquérir sans un soutien étatique. Le remplacement de signaux GNSS par de faux signaux peut gravement perturber et confondre les capacités de géolocalisation des utilisateurs. Il s'agit là de mesures offensives pouvant avoir de lourdes de conséquences dans les domaines du transport maritime et du transport aérien.

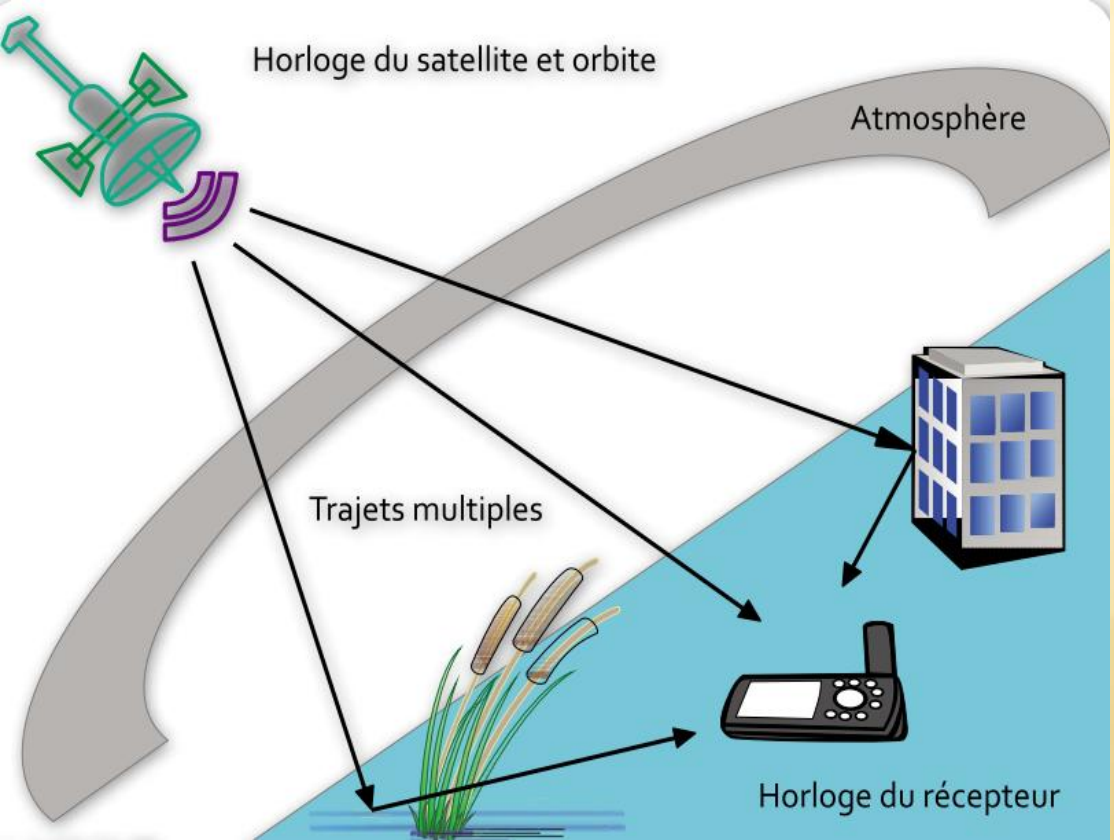
En 2016, des citoyens russes ont observé des erreurs de localisation sur leurs périphériques GPS sur certaines zones du centre de Moscou. Ces erreurs étaient de l'ordre d'une trentaine de kilomètres et ont impacté les services de l'entreprise Uber, dont l'application utilise massivement la géolocalisation pour fonctionner. L'affaire a duré suffisamment longtemps pour attirer l'attention des médias sur la question. Ils ont pu constater un brouillage par usurpation sur leurs smartphones en direct . Si les autorités Russes ne se sont pas clairement exprimées sur le sujet, certains experts invoquent des expérimentations pour interdire le survol de drones dans certaines zones de la capitale russe.

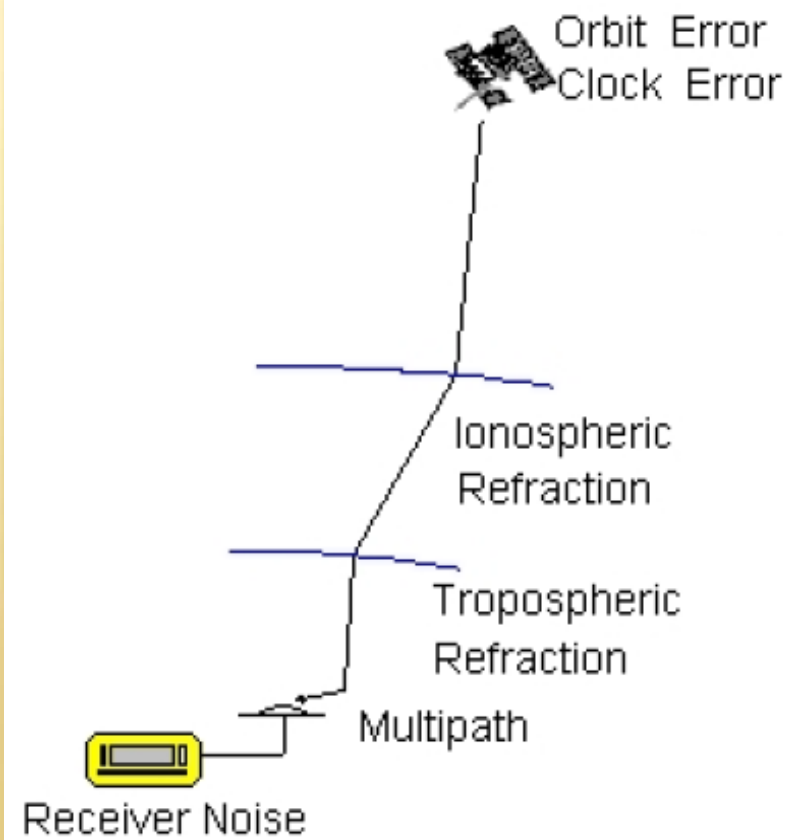
Jusqu'à présent, les cas avérés de leurrage sont assez rares et n'ont touché que des récepteurs civils utilisant les signaux les plus vulnérables du GPS, les signaux commerciaux. Les signaux utilisés par les militaires sont quant à eux chiffrés et authentifiés, rendant presque impossible pour une force adverse de générer des signaux militaires valides.

❑La précision de la géolocalisation d'un récepteur est en théorie métrique si on utilise les pseudo-distances (code C/A) et millimétrique si la phase est utilisée (porteuse L1 ou L2).

❑En pratique les précisions observées sont généralement comprises entre 3 et 50 mètres et quelques centimètres, respectivement.

❑De nombreuses erreurs peuvent venir entacher le calcul de la géolocalisation. Certaines de ces erreurs pourront être corrigées par des modèles et algorithmes et d'autres pourront être évitées par des bonnes pratiques.





Synchronisation des horloges

❑ Bien que les horloges embarquées à bord des satellites soient extrêmement précises et que les stations de contrôle surveillent leur synchronisation, elles peuvent être sujettes à de légères dérives et entraîner des erreurs affectant la précision de la position (1 ns = 30 cm).

❑L'horloge du récepteur a rarement la même précision que celle des satellites. Seules les différences de temps entre satellites sont donc précises. Ce problème est résolu s'il y a suffisamment d'émetteurs (quatre satellites au minimum).

Troposphère et ionosphère

❑ Les ondes ont des vitesses variables selon le milieu qu'elles traversent. Émises des satellites les ondes auront à traverser des couches de l'atmosphère plus ou moins humides, plus ou moins ionisées.

❑La présence d'humidité et les modifications de pression de la troposphère modifient la vitesse et la direction de propagation des ondes radios.

❑Une autre couche traversée par les signaux : l'ionosphère. Cette couche ionisée par le rayonnement solaire va modifier la vitesse de propagation du signal.

❑La plupart des récepteurs intègrent des modèles de correction, mais en période de forte activité solaire cette correction n'est pas assez précise.

Bruit du récepteur

Les erreurs causées par le processus de mesure utilisé dans le récepteur sont communément groupées sous la désignation de *bruit du récepteur*. Ce dernier dépend de la conception de l'antenne (bruit du préamplificateur…), de la méthode de conversion analogique-numérique, du procédé de corrélation, des boucles de poursuite des satellites et des bande passantes.

Erreurs du segment spatial

Les erreurs non intentionnelles introduites par les satellites résultent principalement des incertitudes relatives aux offsets d'horloge et aux trajectoires orbitales. La cause de ces erreurs réside notamment dans la manière dont ces paramètres sont contrôlés par le segment terrestre. Les données de chaque satellite observable sont collectées par les stations de contrôle autour de la Terre puis acheminées à la station principale de Colorado Springs qui en déduit les paramètres futurs. Ces prévisions sont ensuite retournées aux différentes stations pour être transmises aux satellites.

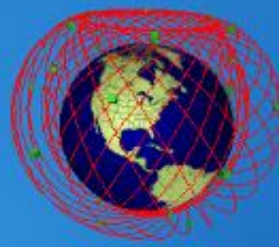
Erreurs atmosphériques

Les signaux envoyés par les satellites traversent les différentes couches de l'atmosphère terrestre ce qui n'est pas sans conséquence. Deux couches sont généralement considérées quant à l'analyse des perturbations; la *ionosphère* (altitude 70..1'000km) et la *troposphère* (altitude 0..16km).

La ionosphère retarde la propagation du signal (la vitesse de la lumière est légèrement diminuée) et introduit une erreur dans la mesure de la pseudo-distance. La valeur du retard dépend de la latitude géomagnétique du récepteur, de l'heure du jour et de l'élévation du satellite. Des délais significativement plus long sont observés lorsque le satellite présente une faible élévation (plus grande largeur d'atmosphère à traverser pour parvenir au récepteur), durant la journée (radiation solaire), ou encore dans des régions proches de l'équateur géomagnétique ou des pôles.

Le retard ionosphérique dépend de la longueur d'onde du signal, aussi est-il possible d'en atténuer efficacement l'erreur par l'utilisation de récepteurs bi fréquences (L1+L2).

LE G.P.S.



AMÉLIORATION DE LA PRÉCISION DU GPS

- **Le GPS DIFFÉRENTIEL**

  L'utilisation de stations fixes au sol, donc de références connues, permet de limiter les imprécisions du système classique.

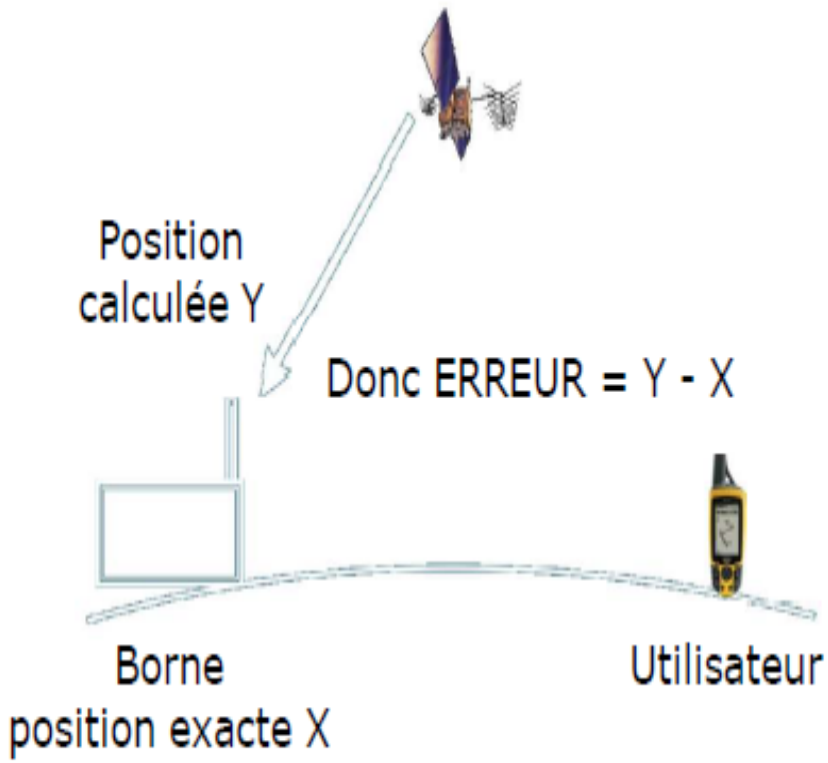
  L e système comprend :
  - Des satellites GPS classiques
  - Un émetteur de balise DGPS et un récepteur GPS au sol
  - Un récepteur de balise DGPS embarqué et un GPS compatible embarqué.

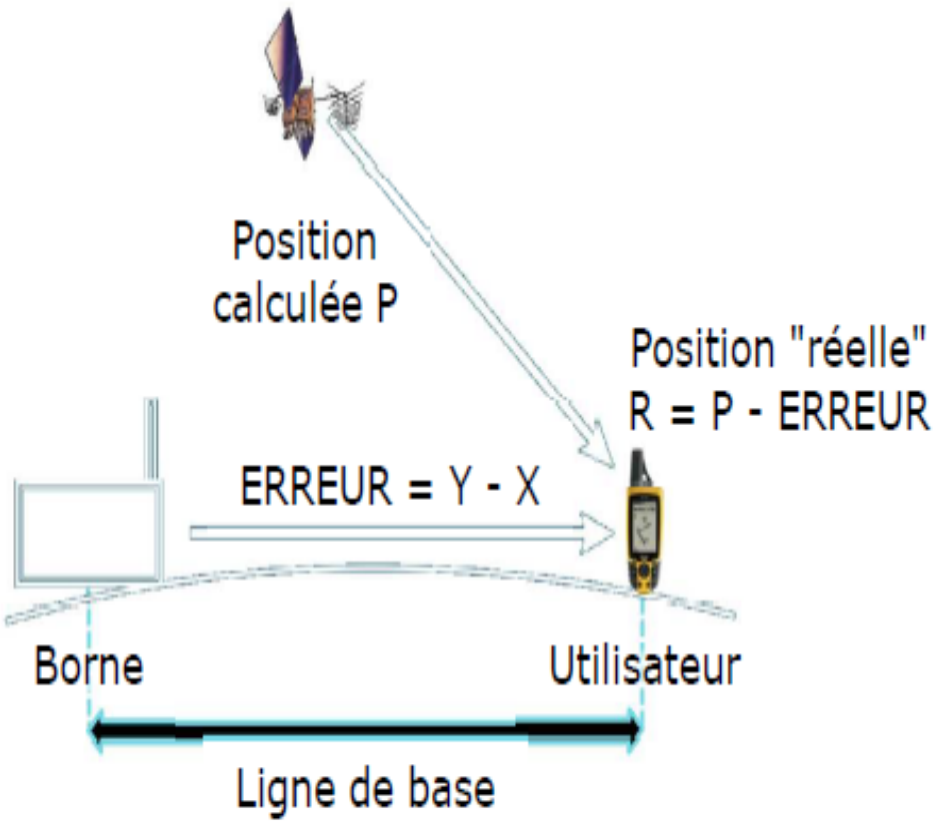
  Ce système en constante évolution permet une précision de :

2003	en mode SPS	10 M
	en mode PSP	6 M (estimation)
2005	en mode SPS	5 M
	en mode PSP	3 M (estimation)
2010	en mode SPS	2 M
	en mode PSP	< 1 M (estimation)

GPS différentiel

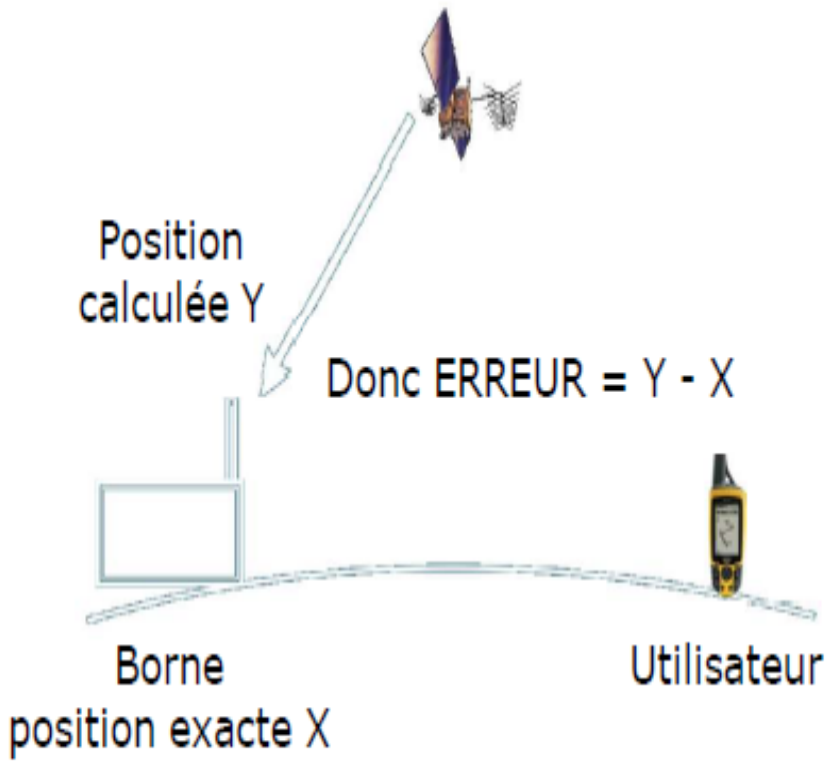
- On parle de mode différentiel parce qu'on travaille par différence sur deux récepteurs (utilisateur/station) placés sur 2 points distincts et observant au même instant les mêmes satellites. L'utilisateur est munis d'un dispositif lui permettant de recevoir des informations provenant de la station dont la position est connue, et ainsi d'appliquer les corrections nécessaires pour calculer sa position.

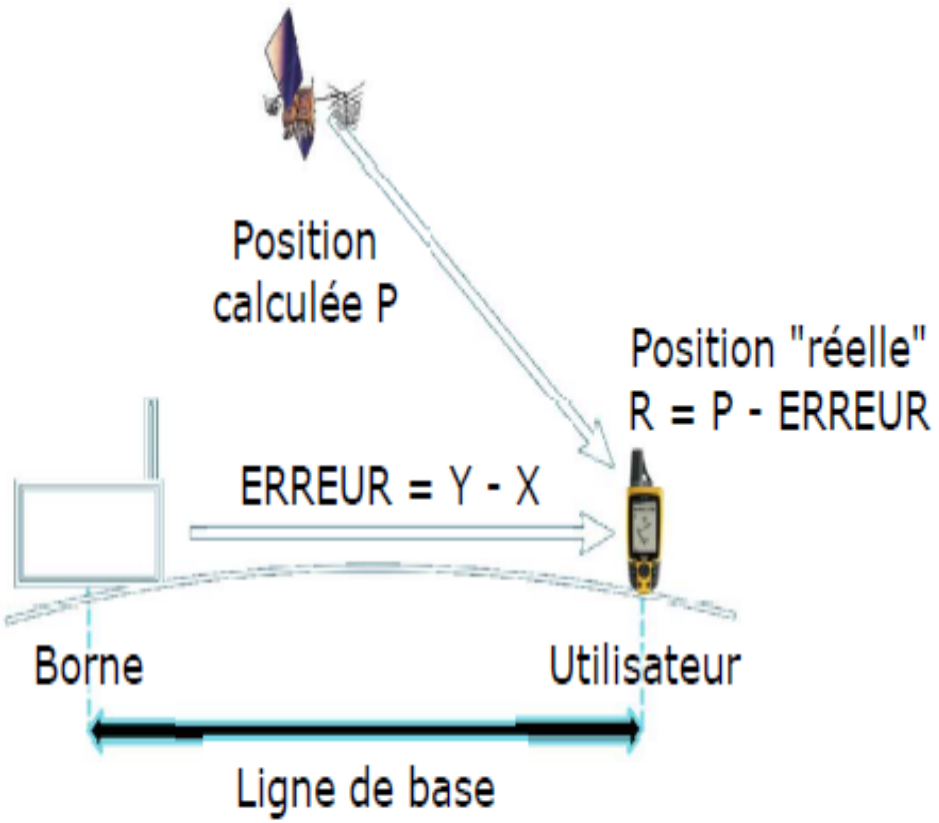




GPS différentiel

- On parle de mode différentiel parce qu'on travaille par différence sur deux récepteurs (utilisateur/station) placés sur 2 points distincts et observant au même instant les mêmes satellites. L'utilisateur est munis d'un dispositif lui permettant de recevoir des informations provenant de la station dont la position est connue, et ainsi d'appliquer les corrections nécessaires pour calculer sa position.

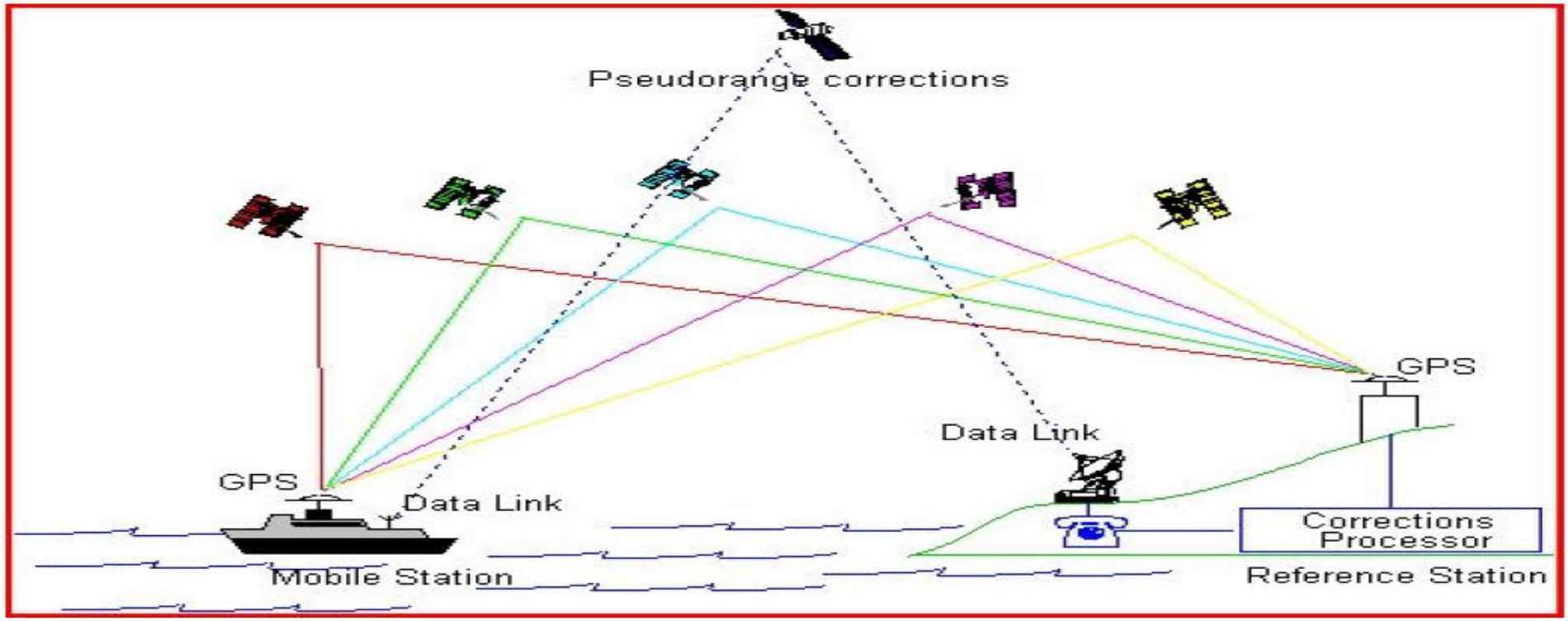




GPS différentiel

Le GPS différentiel (DGPS) part du principe que l'erreur de positionnement instantanée dans une zone délimitée est identique pour chaque point de la zone. En mesurant la position fournie par le GPS à un endroit fixe (station de référence) dont les coordonnées sont parfaitement connues, on peut calculer l'erreur et transmettre par ondes hertziennes les paramètres de correction à d'autres stations situées dans la même zone.

Le DGPS nécessite une infrastructure adéquate composée de la **station de référence**, d'un "**data link**" (satellite géostationnaire, émetteur terrestre…) et de la/des **station(s) mobile(s)** adaptée(s) au fonctionnement en DGSP.



La continuité du service

La continuité du service est la capacité du système à fournir en continu une information de navigation en respectant les contraintes de précision et d'intégrité imposées par le type d'opération. La continuité du service est exprimée en terme de probabilité que le service soit interrompu, appelée *risque de continuité*. En d'autres termes, la continuité du service correspond à la période où le système est capable de détecter mais également de corriger une défaillance de positionnement en respectant les performances imposées par le type d'opération.

Le contrôle d'intégrité

Comme évoqué précédemment, les mesures satellitaires peuvent présenter des défaillances en plus du bruit de mesure nominal. Ces dernières peuvent engendrer des erreurs importantes sur les informations de position fournies à l'utilisateur. Dans des applications comme l'aviation où la fiabilité des informations de position est cruciale, ces défaillances doivent impérativement être gérées. Ce processus, appelé *contrôle d'intégrité*, doit non seulement être capable de détecter une ou plusieurs défaillances parmi les pseudo-distances, mais également permettre l'identification des mesures satellitaires défaillantes dans le but de les exclure.

Les pseudolites

Parmi les pistes envisagées, l'*US Army* semble se tourner vers l'utilisation de pseudolites (comprendre pseudo satellite), qui fonctionneraient comme les émetteurs de satellites de positionnement via un réseau d'antennes terrestres afin de recréer un système positionnement local (par local entendre régional) alternatif au système GPS (qui est un système global). Ce type de système aurait l'avantage de pouvoir s'adapter plus facilement dans un environnement brouillé en permettant la modulation de la puissance des signaux émis en réponse à un éventuel brouillage adverse.

Avec l'invention de véhicules très spéciaux, comme les fusées et les capsules spatiales, les sous-marins ou plus classiquement les avions, sans parler des besoins spécifiques des militaires, il s'est imposé à l'homme la nécessité de mettre au point des systèmes de navigation.

QUE DEMANDE-T-ON À UN NAVIGATEUR CLASSIQUE?

- De connaître pour ce qui concerne la trajectoire, la position, la vitesse, l'accélération
- De connaître l'attitude(orientation spatiale) du véhicule et les vitesses angulaires instantanées autour d'axes liés au véhicule.
- Est-ce un problème de précision?. Non, essentiellement une question de sécurité pour les applications civiles et de mesure pour les militaires.

QUE DEMANDE-T-ON À UN NAVIGATEUR MODERNE?

- Essentiellement de fournir les informations précédentes sans références externes ou du moins le minimum possible.

En effet :

- Une capsule spatiale peut très bien se trouver derrière la lune et ne plus voir la terre ou se trouver en alignement avec la Terre et le Soleil et donc être dans l'impossibilité de communiquer avec la terre.
- Un avion doit pouvoir voler sans visibilité.
- Un avion militaire doit pouvoir pénétrer en territoire ennemi sans se faire repérer et donc sans émettre ou recevoir quoi que ce soit.
- Un sous marin est censé rester sous l'eau jusqu'à un mois, sans refaire surface et sans se faire repérer. Etc...
- Un navigateur moderne doit donc pouvoir travailler en autonomie complète, sans références extérieures. Ceci n'exclut nullement la présence de systèmes annexes utilisant des références externes, pour des recalages, des confirmations et une sécurité redondante.

Système Galileo

Le système Galileo est en quelque sorte le "GPS européen". Les principes techniques de base sont identiques, à savoir l'émission de signaux par une constellation de satellites et la mesure des délais de propagation jusqu'aux récepteurs.

Les travaux préliminaires ont été véritablement lancés en 1998. Bien que depuis fin 2000 la plupart des concepts techniques soient largement définis, que la faisabilité du système ne fasse aucun doute et que des sommes importantes aient déjà été investies, la décision définitive de mener le projet à terme a été plusieurs fois repoussée pour des raisons politiques. Elle a enfin été prise en mars 2002.

Dans les très grandes lignes, les "propriétés" de Galileo sont/seront les suivantes :

- Système **civil**, **ouvert** et **global**, **indépendant du GPS** mais totalement compatible avec celui-ci.
- Développé sur la base d'un partenariat "public-privé" au niveau européen.
- Deux services principaux offerts : *grand public* (gratuit) et *sécurisé* (à accès contrôlé).
- Performances globalement meilleures que le GPS actuel (on bénéficie de toute l'expérience acquise par le GPS).
- …

Le système européen Galileo prévoit cinq types de services :

- l'OS (pour Open Service en anglais) qui sera accessible à tout utilisateur et fournit des informations de positionnement avec une précision de 15 et 35 m en positionnement horizontal et vertical en mono-fréquence ou de 4 et 8 m en bifréquence.
- le CS (pour Commercial Service en anglais) qui est réservé à des utilisateurs payant une cotisation à l'opérateur Galileo. La précision de positionnement sera inférieure à 1 m et l'intégrité et la continuité du service seront garanties contractuellement.
- le SoL (pour Safety of Life service en anglais) qui fournira des informations de positionnement fiables pour des applications cruciales où la sécurité de biens ou de personnes est mise en jeu.
- le PRS (pour Public Regulated Service en anglais) qui sera réservé aux utilisateurs effectuant une mission de service public, il sera notamment très robuste au brouillage.
- le SAR (pour Search And Rescue service en anglais) qui permettra de positionner un ensemble de radiobalises de localisation des sinistres indiquant la nécessité d'une intervention comme par exemple lors d'un accident maritime.

Le système GLONASS proposera un service à usage civil ainsi qu'un service réservé aux applications militaires. Ces deux services fonctionneront en bifréquence. Pour l'usage civil, la précision horizontale et verticale est de 5 m et 9 m, respectivement . Le système COMPASS devrait fournir un service libre avec une précision de positionnement inférieure à 10 m ainsi que deux services régionaux, disponibles uniquement sur le sol chinois, avec une précision inférieure à 1 m .

- L’ex-URSS a créé son propre système, GLONASS, dont la constellation a été un temps fortement réduite faute de priorité financière. Ce système retrouve actuellement sa pleine capacité.

- Compte tenu de l’importance stratégique de l’information de localisation et de datation, l’Europe a décidé de mettre en place son propre système de radionavigation par satellites : Galileo. Il proposera aussi un service sécurisé réservé aux usages gouvernementaux. Des applications à des fins de défense et de sécurité sont également incluses.

- La Chine, quant à elle, n’est pas en reste avec le système BEIDOU, également prévu pour 2020. Compass Aussi connu sous le nom de Beidou-2, Compass est le projet chinois de GNSS indépendant. A l’instar de ces homologues, ce système utiliserait des satellites (30) en orbite terrestre moyenne (MEO), mais inclurait également cinq satellites géostationnaires (GEO). La transmission du message de navigation se ferait, comme dans le cas du GPS ou de Galileo, à l’aide de CDMA.

- Galileo C'est le futur GNSS européen qui sera sous contrôle strictement civil, contrairement aux autres systèmes existants.
- Le système Galileo sera composé de 4 segments : le segment spatial (composé de trente satellites placés sur trois orbites circulaires de rayon orbital moyen 29600 kilomètres), le segment sol de contrôle (chargé du contrôle des satellites), le segment sol de mission (chargé de créer le message de navigation diffusé par les satellites et de gérer l'intégrité du système) et le segment de test des utilisateurs (chargé de valider les performances des récepteurs en environnement réel).
- Les satellites Galileo émettront sur trois différentes bandes de fréquence et permettront donc de proposer cinq différents services : le service ouvert (gratuit et accessible à tous), le service commercial (payant mais accessible à tous), le service de sûreté de la vie (sécurisé, intègre et certifiable, réservé aux applications critiques sur le plan de la sécurité de la vie), le service public réglementé (système antibrouillage, réservé aux missions de service public dépendantes de la précision) et le service de recherche et secours (localisation des balises).

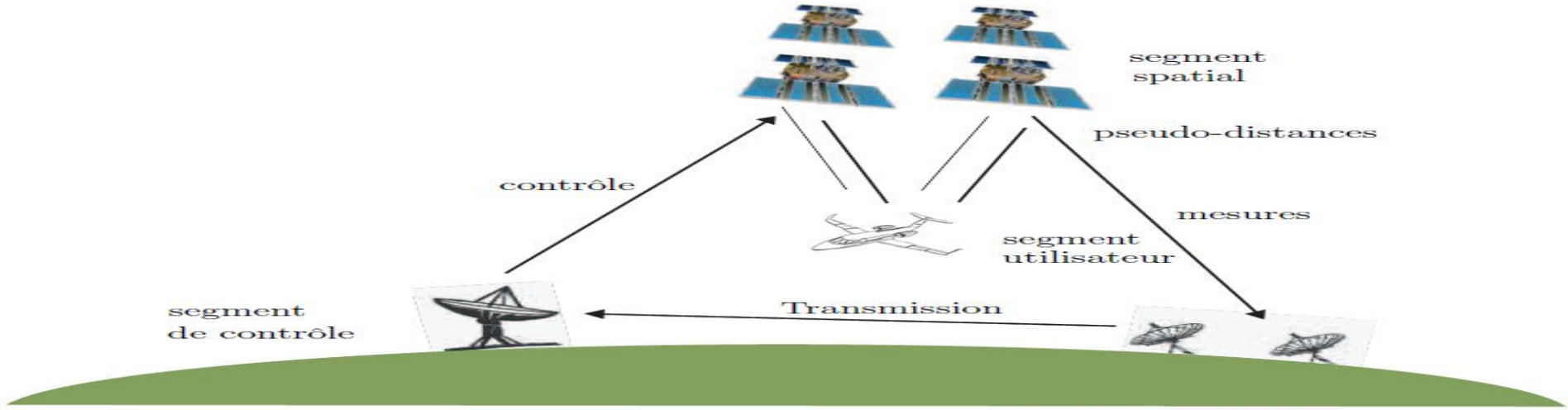
le segment spatial

Le segment spatial d'un système de navigation par satellite est composé d'un ensemble de satellites appelé *constellation*. Avec le déploiement des nouveaux systèmes de navigation par satellite, il sera à l'avenir constitué des constellations GPS, Galileo, GLONASS, COMPASS

Chaque constellation possède un certain nombre de satellites opérationnels auxquels s'ajoutent des satellites de remplacement. Le tableau 1.2 regroupe les caractéristiques principales des constellations GPS, Galileo, COMPASS et GLONASS. Il est à noter que les informations indiquées pour le système Galileo et COMPASS

Constellation	GPS	Galileo	GLONASS	COMPASS
Nombre de satellites opérationnels	24	27	24	35
Rayon orbital moyen	26600 km	29600 km	27500 km	27840 km
Durée de révolution	12h	14h	11h15	12h45
Inclinaison	55 °	56 °	64, 8 °	55 °
Nombre de plans orbitaux	6	3	3	3

Paramètres orbitaux des différentes constellations.



❑ Pour corriger plus finement cet effet, certains récepteurs bi-fréquences utilisent les deux fréquences L1 et L2 qui ne sont pas affectées de la même manière pour recalculer plus précisément la position.

Cryptage

❑ Le GPS étant conçu par et pour les militaires américains, un certain nombre de moyens ont été mis en place pour empêcher l'utilisation du système par un ennemi. Ce but est atteint par deux brouillages : la dégradation volontaire de la précision du positionnement et le cryptage du code P . Le code P est en fait modulé par un signal secret accessible seulement aux utilisateurs autorisés (c'est l'anti-spoofing AS). L'accès sélectif ou « selective availability » (SA) est une dégradation de la précision des horloges embarquées à bord des satellites pour les utilisateurs non militaires. Cette dernière limitation a été supprimée par l'administration Clinton et le sénat américain en mai 2000

Réflexion et perte des signaux

❑ La topographie du milieu et sa structuration peuvent influer sur la qualité de la géolocalisation.

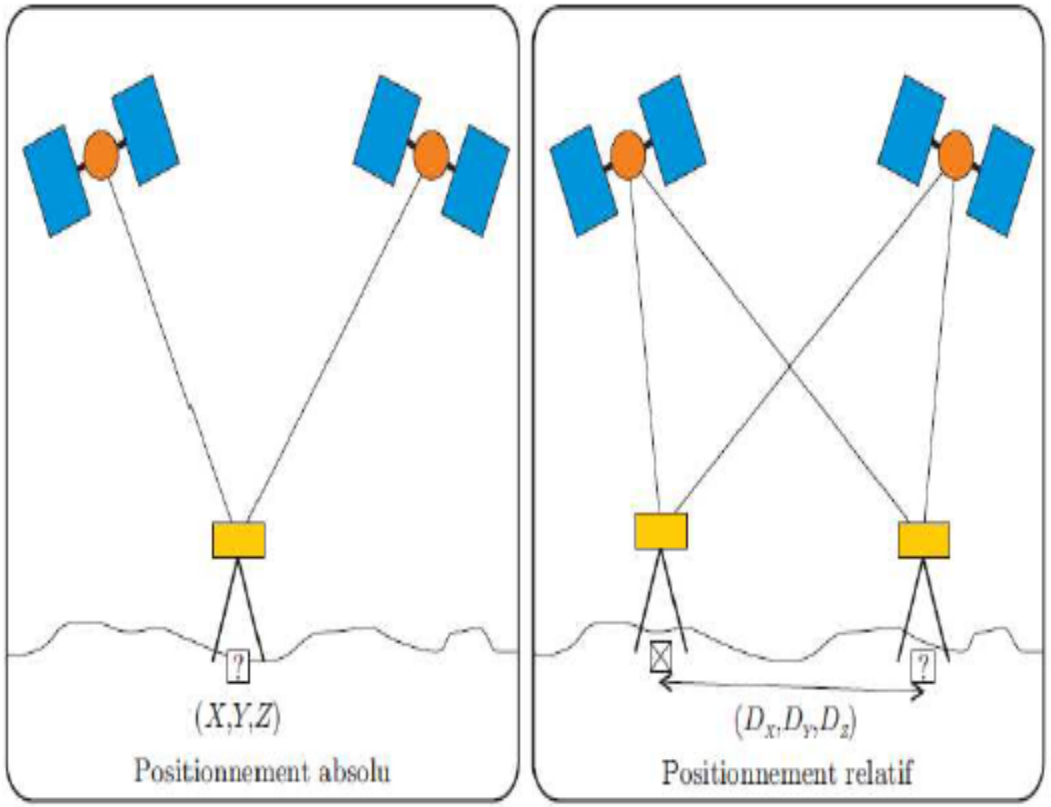
❑ Le relief ou des bâtiments peuvent cacher des satellites et influer directement sur la précision du positionnement. Ce phénomène se rencontre particulièrement en zone urbaine et en zone montagneuse.

❑ Les signaux de satellites peuvent également être réfléchis par des surfaces d'eau voire même des murs : c'est le problème des multi-trajets.

Positionnement par GPS

On distingue 2 modes de positionnement

- ✓ Positionnement absolu ou ponctuel : la position du récepteur est déterminée de manière directe à partir des observations et de la position des satellites
- ✓ Positionnement relatif ou différentiel : la position du récepteur est déterminée par mesure du vecteur (**ligne de base**) séparant le récepteur et une ou plusieurs stations de référence est estimé.



LE G.P.S.

LES ERREURS DU SYSTÈME

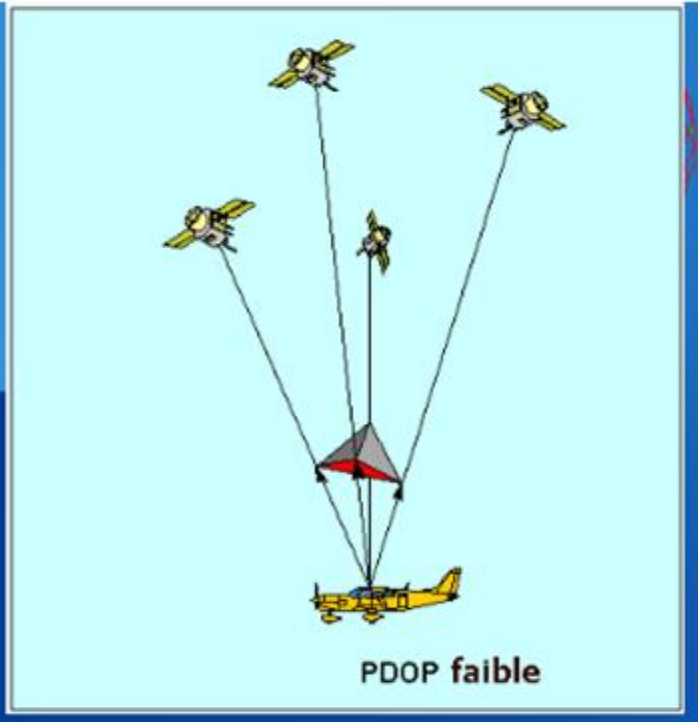
Le GDOP (Geometrical Dilution Of Precision) ou PDOP (Position Dilution Of Precision) Cœfficient de Précision

Un autre facteur de positionnement précis dépend de la constellation de satellites utilisés avec le récepteur.

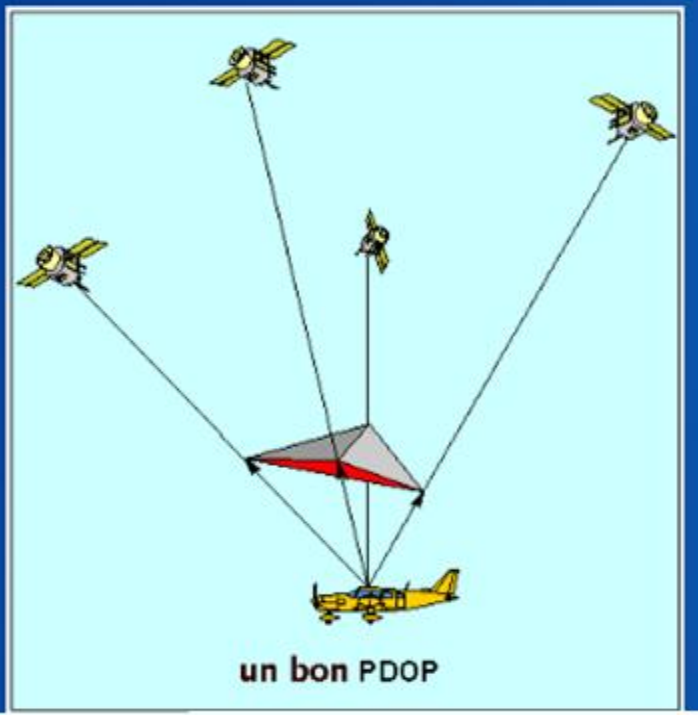
Ce facteur est appelé DOP.
Plus petit est le DOP, meilleure est la constellation de satellites utilisées.

Si le DOP indiqué est supérieur à 6, la position GPS ne peut pas être utilisée pour la navigation.

Quand le DOP est dans une valeur raisonnable (DOP< 6), l'erreur de position du GPS devrait être inférieure à 150 ft ou 50 m.



PDOP faible



un bon PDOP

Utilisation du GPS avec d'autres senseurs

Le couplage du système GPS avec d'autres senseurs a pour but d'aider le récepteur à améliorer ses performances. Ceci est surtout nécessaire lorsque l'environnement est défavorable (brouillage, pertes de signal, fortes dynamiques…).

Le GPS peut être aidé de différentes façons :

- En temps grâce à une horloge précise.
- En altitude grâce à un baro-altimètre.
- en position et vitesse grâce à un odomètre, une centrale à inertie, un accéléromètre...
- …

L'information fournie au récepteur apporte une ou plusieurs équations supplémentaires pour le calcul du point.

Un exemple d'application civile de plus en plus répandu est donné par les systèmes de navigation qui équipent les véhicules automobiles. Certains systèmes utilisent en effet – outre le GPS lui-même différents capteurs de mouvement qui permettent d'extrapoler dans une certaine mesure la position dynamique, notamment en zone urbaine où la navigation trouve tout son intérêt mais où la réception GPS est fortement perturbée (masquage de la visibilité, tunnel…).

Un **altimètre** est un instrument de mesure permettant de déterminer la distance verticale entre un point et une surface de référence. Il renseigne l'altitude si la mesure est effectuée par rapport au niveau de la mer.
Un odomètre, ou dans un langage plus courant un compteur kilométrique, est un instrument de mesure, permettant de connaître la distance parcourue par un véhicule.

Les systèmes de navigation inertielle

Principe

L'avantage des systèmes de navigation inertielle par rapport aux systèmes de navigation par satellite est qu'ils fonctionnent de manière totalement autonome et sont donc insensibles à d'éventuelles perturbations extérieures. La navigation inertielle a été développée pendant la seconde guerre mondiale. Elle est aujourd'hui utilisée aussi bien en aviation militaire que civile.

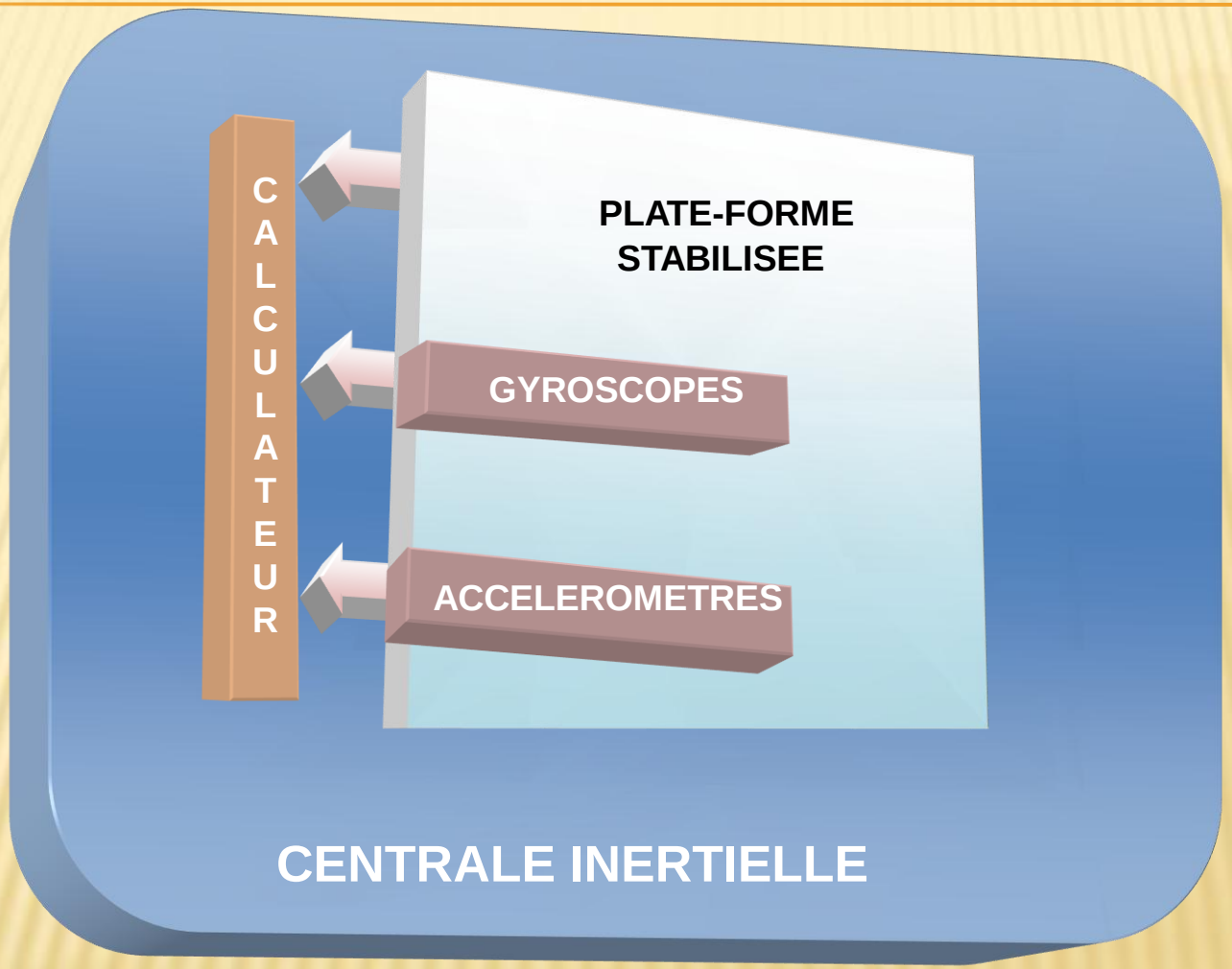
Les systèmes de navigation inertielle sont embarqués à bord du véhicule et sont composés de différents capteurs inertiels qui mesurent le mouvement du mobile à chaque instant. En règle générale, les

Les systèmes de navigation inertielle reposent sur des mesures de capteurs embarqués dans le véhicule dont le fonctionnement autonome les rend insensibles aux perturbations de l'environnement de navigation. De plus, les informations cinématiques sont très précises mais uniquement à court terme [7]. En effet, du fait des intégrations successives, les erreurs d'initialisation ou de calibration des capteurs entraînent une dérive de l'erreur d'estimation au cours du temps. De ce fait, les centrales inertielles ne peuvent généralement pas être utilisées seules et nécessitent une recalibration ou une compensation des erreurs commises à chaque instant. Ainsi, les données inertielles sont classiquement hybridées avec les données satellitaires.

Les systèmes de navigation inertielle sont embarqués à bord du véhicule et sont composés de différents capteurs inertiels qui mesurent le mouvement du mobile à chaque instant. En règle générale, les capteurs en question sont trois accéléromètres ainsi que trois gyromètres disposés selon trois axes orthogonaux définissant un trièdre direct. Les accéléromètres mesurent l'accélération non-gravitationnelle du mobile. Par deux intégrations successives, il est alors possible d'obtenir la position du véhicule. Néanmoins, les systèmes de navigation inertielle font intervenir différents repères de référence. Ainsi, les gyromètres, qui fournissent des informations sur l'attitude du mobile, permettent d'effectuer les changements de repère adéquats pour exprimer le mouvement dans un repère utile au pilote.

2. LA CENTRALE INERTIELLE

Constituants d'une centrale inertielle



Les systèmes de navigation inertielle comportent deux parties distinctes :

- une plateforme de capteurs,
- un calculateur qui traite les sorties capteurs pour en extraire les données de navigation.

❑ La **navigation inertielle** est une technique utilisant des capteurs d'accélération et de rotation afin de déterminer le mouvement absolu d'un véhicule (avion, missile, sous-marin …). Elle a l'avantage d'être totalement autonome.

❑La navigation inertielle présente de nombreux avantages qui expliquent son développement et sa généralisation depuis environ 30 ans, autant dans les domaines aéronautiques militaire et civil, que dans le domaine spatial ou celui des sous-marins.

❑ Le principe classique des centrales inertielles (qui calculent les informations de navigation en intégrant les rotations et accélérations mesurées par des gyromètres et accéléromètres) répond en effet parfaitement aux principaux besoins de navigation et de pilotage, qui sont la précision, la disponibilité en toutes conditions et l'intégrité (c'est-à-dire la capacité à signaler une pane du système).

❑Aujourd'hui le GPS, loin de détrôner l'inertie, s'est parfaitement marié avec elle au sein de systèmes inertie/GPS.

❑Grâce à leur performance et leur coût réduit, ces systèmes de nouvelle génération ont notamment permis de répondre aux besoins toujours plus difficiles de la navigation aéronautique militaire et civile : précision de la navigation et de l'approche, navigation tous temps, navigation à basse altitude.

❑ Ce type de guidage est principalement utilisé avec les missiles à longue portée (missiles balistiques et missiles de croisière), ou de navires de guerre, puisque leurs cibles (immeubles, bunkers, etc.) sont fixes.

❑L'ensemble des avions de lignes modernes sont dotés d'un guidage inertiel sous la forme d'une IRS (Inertial Reference System), permettant de connaître la position et toutes les données liées, couplé à un système de navigation pour le guidage de type FMC (Flight Management Computer).

❑Les systèmes de positionnement par satellites, ainsi que les systèmes de radionavigation au sol ne sont utilisés que dans un but de repousser sa position du fait de la dérive inertielle du système.

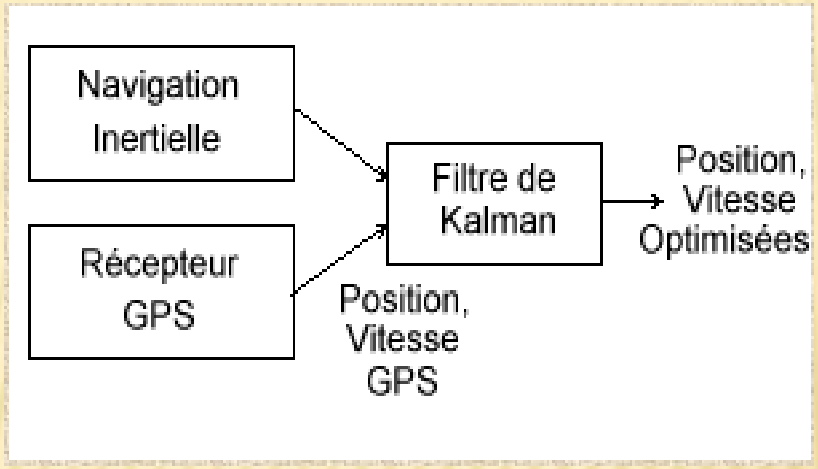
❑Il est également employé avec certaines armes à longue portée comme les missiles anti-navires ou air-air, de manière à leur permettre de se rendre sur la localisation générale d'une cible sans être détectés, le système de guidage actif étant activé en fin de course. Les sous-marins ne pouvant capter les ondes des systèmes de positionnement par satellites sous l'eau, disposent également de guidage inertiel.

- Une **centrale à inertie** ou **centrale inertielle** est un instrument utilisé en navigation, capable d'intégrer les mouvements d'un mobile (accélération et vitesse angulaire) pour estimer son orientation, sa vitesse linéaire afin d'en calculer sa position. L'estimation de position est relative au point de départ ou au dernier point de recalage. Pour ce faire, elle est composée de trois accéléromètres et de trois gyromètres permettant de mesurer l'accélération et la vitesse angulaire
- Des centrales à inertie sont installées à bord de véhicules terrestres, de navires, de sous-marins, d'avions, d'hélicoptères, de missiles et de véhicules spatiaux. Elles sont même parfois transportées par des piétons pour des applications de localisation de précision en génie civil quand le GPS n'est pas utilisable (forage de tunnels).
- Le gyromètre est un capteur de mouvement et de position angulaire. Il fournit une information de vitesse angulaire par rapport à un référentiel inertiel (c'est-à-dire fixe vis-à-vis des étoiles).
- Un **gyromètre** est un instrument qui mesure la rotation ou la vitesse angulaire. Il est utilisé principalement dans les véhicules (les avions, les bateaux, les sous marins…) pour mesurer une vitesse angulaire.

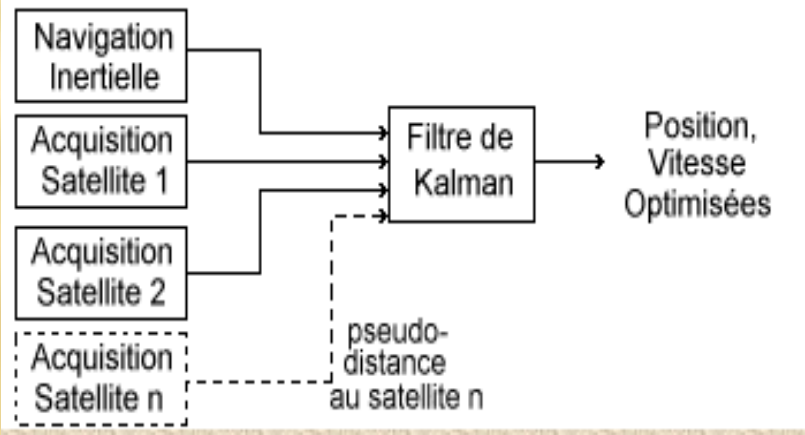
- Un **accéléromètre** est un capteur qui, fixé à un mobile ou tout autre objet, permet de mesurer l'accélération linéaire de ce dernier. .
- Les gyromètres (ou gyroscopes) sont utilisés :
  - pour la stabilisation d'une direction ou d'un référentiel mécanique, par exemple pour la stabilisation d'une caméra, d'une antenne ou d'un viseur infrarouge d'un autodirecteur de missile,
  - dans les systèmes de guidage des missiles ou fusées,
  - dans les système de pilotage automatique des aéronefs
  - en association avec des accéléromètres, pour déterminer la position, la vitesse et l'attitude d'un véhicule (avion, char, bateau, sous-marin, etc.). Dans ce cas, il s'agit d'un équipement appelé centrale à inertie.
  - Ces équipements peuvent être complémentaires avec un GPS sauf dans les applications où celui-ci n'est pas utilisable (sous-marins)

L'inertie fournissant les informations en continu, mais étant moins précise que le GPS, le meilleur moyen de les coupler est d'utiliser les informations GPS afin de recaler la navigation inertielle. Classiquement, ce recalage est réalisé au moyen d'un filtre de Kalman, qui optimise la performance de navigation, en estimant les erreurs respectives du GPS et des capteurs inertiels (gyromètres et accéléromètres).

- Si l'utilisation d'un filtre de Kalman pour coupler l'inertie s'est largement répandue, il existe néanmoins deux techniques de mise en œuvre de ce couplage :
- **Le couplage lâche** : dans ce cas le filtre de Kalman utilise en entrée les positions et vitesses fournies par le récepteur GPS.



Le couplage serré : dans ce cas le filtre de Kalman utilise en entrée les distances brutes entre le porteur et chaque satellite GPS.



Principe et motivations de la navigation intégrée

Les systèmes de navigation par satellite et les systèmes de navigation inertielle sont fondés sur des techniques de positionnement différentes offrant chacune des avantages et inconvénients. L'intérêt de les hybrider est de compenser les défauts de chaque système afin d'obtenir un système global plus performant. Le tableau 1.3 résume les différents points forts et points faibles de chaque système et permet de mettre en évidence leur complémentarité.

	Systèmes de navigation par satellite	Systèmes de navigation inertielle
Robustesse	- Sensibilité aux interférences - Continuité de service non garantie	- Autonomie - Fiabilité
Précision	- Peu précis à court terme - Erreur bornée dans le temps	- Précis à court terme - Dérive au cours du temps
Fréquence des mesures	- Basse fréquence (1 Hz)	- Haute fréquence (> 20 Hz)
Type de données	- Position et ses dérivées - Recalage temporel (biais d'horloge)	- Position et ses dérivées - Attitude (orientation dans l'espace)

Tableau 1.3 – Comparaison des systèmes de navigation par satellite et des systèmes de navigation inertielle.

Intégration du concept CNS à bord des avions modernes

- Les échanges sol-bord s'effectuent via des radiocommunications et que les positions des aéronefs sont détectées par des radars implantés au sol. Pour suivre l'augmentation de trafic tout en répondant aux exigences de sécurité définies règlementairement, une nouvelle génération d'outils de transmission des données est implémentée à l'échelle mondiale.
- L'avènement du satellite offre de nombreuses possibilités en matière de transmission des données. Des projets de part et d'autre du globe convergent tous vers la mise en oeuvre d'un système technique qui se veut uniforme à l'échelle mondiale.
- CNS (Communications, Navigation, Surveillance) Les systèmes de communications, de navigation et de surveillance sont les trois domaines techniques majeurs des services du contrôle aérien.
- En Europe, dans le cadre du « ciel unique européen », ces évolutions technologiques s'articulent autour du programme CNS/ATM (« *Communication, Navigation, Surveillance for Air Traffic Management* ») *pour le développement du système Eurocat (pour l'Europe).*

Intégration du concept CNS à bord des avions modernes

1. **Communication** : dans le cadre de la transmission des messages de la circulation aérienne, l'idée consiste à remplacer tout ou partie des transmissions radiotéléphoniques actuellement utilisées pour les échanges entre pilotes et contrôleurs par des échanges informatiques de données (Data Link) pour les instructions de contrôle : il s'agit de l'application CPDLC (*Controller/Pilot Data Link Communication).*

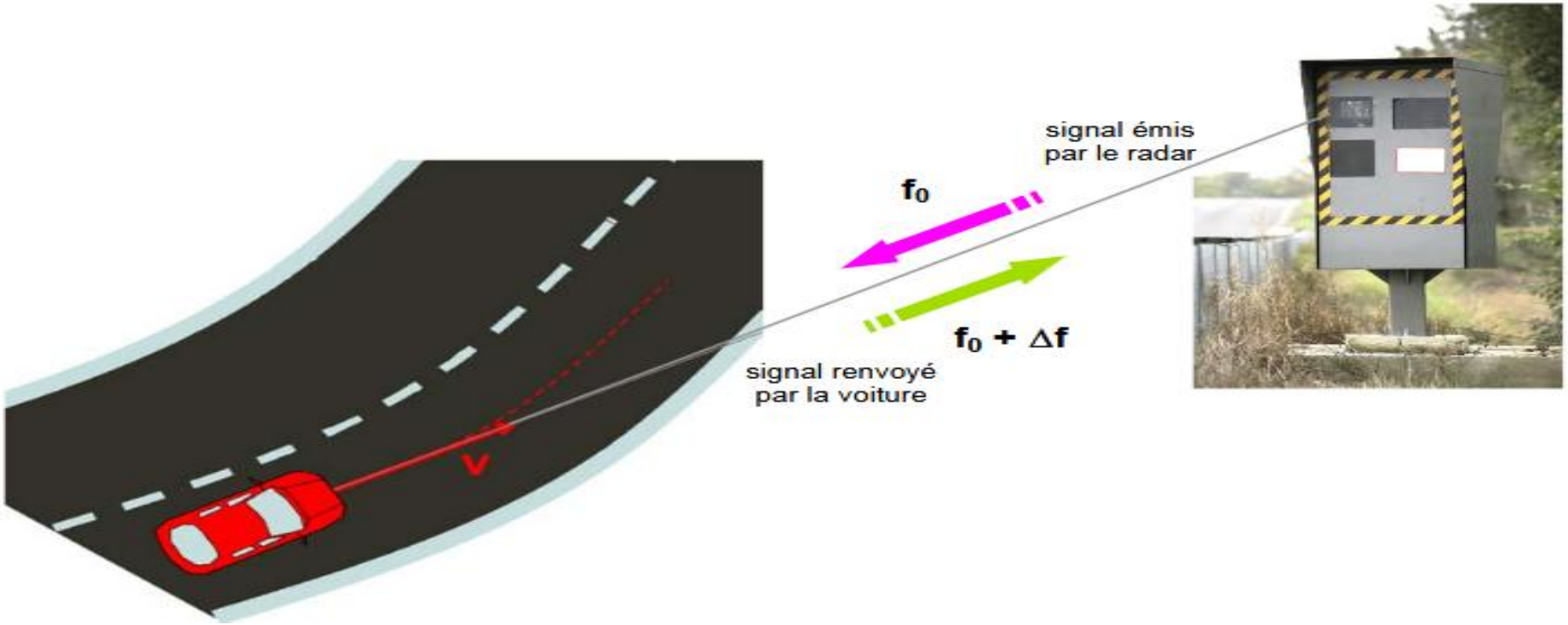
2. **Navigation** : au niveau des moyens de navigation, nous avons évoqué plus haut qu'un système GNSS de navigation par satellite permet désormais aux pilotes non plus de se repérer via des infrastructures au sol (radiobalises – qui ne sont pas implantées sur tout le globe) mais via les coordonnées transmises par satellite.

3. **Surveillance** : un des enjeux pour assurer le contrôle des aéronefs est de pouvoir identifier ces aéronefs et de les positionner dans l'espace aérien de façon suffisamment précise pour pouvoir anticiper et organiser leurs séparations. Or dans certaines régions, la détection des aéronefs n'est pas possible et la localisation de l'aéronef se fait uniquement au travers des reports de positions transmis par les pilotes. L'idée consiste alors à utiliser les transmissions satellitaires pour repérer l'avion dans l'espace. Pour cela, les avions doivent être équipés de l'avionique FANS (*Futur Air Navigation System) qui dispose d'une application ADS (Automatic Dependance Surveillance) qui permet, sans intervention du pilote, l'envoi au* contrôleur d'un certain nombre de données relatives à la position des aéronefs donc permet de décharger les pilotes de l'envoi, par radiotéléphonie, des reports de position, et d'autre part, il permet une plus grande précision dans la détection de la position des aéronefs

L'effet Doppler

On se propose de mettre en évidence quelques applications concrètes du phénomène physique découvert par le physicien Christian Andreas Doppler (1803-1853) qu'on appelle : **effet Doppler**.

Cet effet se manifeste lorsqu'on envoie une onde sinusoïdale de fréquence f_0 sur une cible en mouvement animée d'une vitesse v dans l'axe de l'émission :



L'onde se réfléchit alors sur la cible et revient vers l'émetteur avec une fréquence f légèrement différente de f_0 :

- $f = f_0 + \Delta f$ si la cible se rapproche de l'émetteur
- $f = f_0 - \Delta f$ si la cible s'éloigne de l'émetteur

} avec $\Delta f = 2.v.fo/c$

Conclusion : l'effet Doppler est lié à la vitesse v de la cible sur laquelle se réfléchit l'onde.

CAPTEURS DE DÉPLACEMENT

- Un **odomètre**, ou dans un langage plus courant un **compteur kilométrique**, est un instrument de mesure, permettant de connaître la distance parcourue par un véhicule. Ce dispositif peut être électronique ou mécanique.
- Le **loch** est un instrument de navigation maritime qui permet d'estimer la vitesse de déplacement d'un navire sur l'eau, soit sa vitesse relative en surface par rapport à la masse d'eau où il évolue.
  - **Un anémomètre** est un appareil qui permet de mesurer la vitesse du vent (du grec anemos = vent).

- Un **sonar** (acronyme de **so**und **n**avigation **a**nd **r**anging) est un appareil utilisant les propriétés particulières de la propagation du son dans l'eau pour détecter et situer les objets sous l'eau. Son invention découle des travaux des français Paul Langevin et Constantin Chilowski au cours de la Première Guerre mondiale. Il est utilisé :
- 1. par les marines de guerre pour la détection de sous-marins
- 2. pour la pêche, pour la détection des bancs de poissons
- 3. pour la navigation maritime et fluviale, afin de mesurer la profondeur
- Les sonars peuvent être actifs (émission d'un son et écoute de son de réflexion) ou passifs (écoute des bruits).
- L'écho-sondeur ou "sondeur", est un appareil électronique de détection subaquatique. Il "lit" les fonds, mesure la profondeur et détecte la présence d'obstacles ou de poissons à la verticale du bateau.
  Ces informations sont généralement transmises sous la forme d'une image défilant sur un écran.

CAMÉRA THERMIQUE (IR)

- Une **caméra thermique** enregistre les différents rayonnements infrarouge (ondes de chaleur) émis par les corps et qui varient en fonction de leur température. Contrairement à l'imaginaire populaire, une caméra thermique ne permet pas de voir derrière une paroi ou un obstacle. Elle reproduit la chaleur emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière.
- Les vitres ainsi que les parties métalliques polies reflètent l'image thermique telles un miroir. Cette image, bien que moins nette, peut cependant induire un observateur en erreur.
- Les caméras infrarouges de vidéo surveillance sont nécessaires pour filmer dans les conditions de lumière insuffisantes (le soir, la nuit). Beaucoup de modèles peuvent fonctionner même dans le noir total. La distance de vision nocturne dépend de la quantité de leds infrarouges et de la qualité d'optique utilisée.

CAPTEUR STELLAIRE

- Il s'agit d'une caméra (le plus souvent à base d'un capteur CCD qui prend des images d'une zone du ciel. En analysant le champ d'étoile imagé et à l'aide d'un catalogue d'étoiles embarqué, la position d'un engin spatial peut-être déterminée. Il peut aussi être utilisé plus simplement pour suivre le déplacement des étoiles dans le champ afin de déterminer la variation de l'attitude : ce mode de fonctionnement est généralement utilisé pour stopper la rotation du véhicule spatial relativement à un référentiel inertiel (en fait lié aux étoiles) ; ces capteurs permettent d'obtenir la meilleure précision dans les mesures d'attitude.

CAPTURE MAGNÉTIQUE

- La boussole mécanique, inventée en Chine il y a 4500 ans, est le premier capteur magnétique utilisé par l'homme. Basée sur l'orientation d'une aiguille dans le champ magnétique terrestre, elle est de moins en moins utilisée de nos jours, surtout depuis la généralisation des systèmes GPS. La boussole donne une mesure de la direction du champ magnétique et non de son intensité. Les boussoles actuelles (électroniques) se trouvent associées à un GPS, ce qui permet
- d'orienter les cartes du GPS dans la bonne position dans le cas d'un système embarqué dans un véhicule, par exemple. Le contrôle du positionnement dans l'espace, en se servant du champ magnétique terrestre comme axe de référence, se développe aussi pour les applications de robotique, de jeux et d'enregistrement de mouvement. Une boussole électronique contient maintenant deux ou trois capteurs magnétiques axiaux (sensibles à une direction du champ) couplés à des mesures d'inclinaison.

❑ Le modèle sur lequel se base ATM (**Asynchronus Transfert Mode)** est différent du modèle de l'ISO.

❑ ATM a été élaboré pour véhiculer tout type d'information : **voix**, **vidéo**, **données**. Bref " être un réseau **multimédia** » et d'exploiter les liens à haut débit.

❑Ce modèle est composé de 4 couches: la couche physique, la couche ATM proprement dite la couche réalisant l'adaptation à ATM des couches superieures (couche AAL) et enfin les couches superieures qui sont les applications ATM.

1. La couche ATM:

Cette couche a pour rôle d'acheminer les données, d'effectuer un contrôle du flux. Et d'assurer le multiplexage/démultiplexage.

2. La couche AAL (ATM Adaptation Layer):

Cette couche est chargée de segmenter les informations provenant des applications en cellules ATM (Les cellules ATM sont des segments de données de taille fixe de 53 octets), et parallèlement de réassembler les cellules ATM arrivant en flux d'information compréhensible.

ATM a été conçu pour pouvoir transporter des flux de données très variés, que ce soit de la vidéo, de la voix ou encore des données.

Modèle d'ATM sur Satellite

Actuellement, les fonctions de contrôle sont mises dans le HUB ; mais si on les mettait à bord du satellite, celui-ci deviendrait de plus en plus intelligent et ça réduirait les délais de propagation.

Applications
TCP
IP
AAL
ATM
MAC / LLC
Physique

Pile des protocoles du terminal d'utilisateur dans le cas d'ATM sur satellite

ATM
MAC
Physique

Piles des protocoles du satellite dans le cas d'ATM sur satellite

La grandeur intéressante pour l'évaluation de ces performances est le rapport signal à bruit S/N. Le bruit thermique fourni par une résistance s'écrit, dans le cas où la fréquence obéit à :

$$N = kTB \quad (W)$$

$$N_0 = kT \qquad (\mathrm{W/Hz})$$

Avec : *k* la constante de Boltzmann : $k = 1{,}38.10^{-23}$ JK^{1} et T température de bruit en Kelvin.

Le rapport signal à bruit s'exprime par:

$$SNR = \frac{P_R}{N} = \frac{EIRP\, G_R}{NL}$$

ou encore

Sensibilité du récepteur

$$\frac{P_R}{N} = \frac{EIRP\, G_R}{BN_0L} = \frac{EIRP\, G_R/T}{BkL_{TOT}}$$

$$\frac{P_R}{N_0} = \frac{EIRP\, G_R/T}{kL_{TOT}}$$

Avec L_{TOT} qui représente l'ensemble des pertes

Dans les coordonnées polaires, le gain dans la direction (θ,ϕ) peut être exprimé comme suit :

$$G(\theta,\phi)=\frac{w(\theta,\phi)}{P_t/4\pi} \quad (1)$$

Avec, $w(\theta,\phi)$ et P_t représentent respectivement la densité du flux de la puissance dans la direction (θ,ϕ) et la puissance transmise. Le gain d'une antenne parabolique qui est généralement utilisée dans les systèmes de communication par satellite est égal à :

$$G=\eta\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

Où, D est le diamètre de l'antenne, λ est la longueur d'onde et η est le rendement de l'ouverture de l'antenne (normalement, elle varie entre 50% et 70%).

Exemple

Le gain d'une antenne parabolique de diamètre 100 cm, ayant un rendement d'ouverture de 60% et opérant à 1.5 GHz est égal à : $G=0.6\times\left(\frac{\pi\times 1.500\times 10^9}{3\times 10^8}\right)^2=148.0$

La puissance reçue P_r peut être exprimée selon l'équation de Friis:

$$P_r = P_t G_t \frac{A_r}{4\pi d^2} = P_t G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

$$L_f = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2}$$

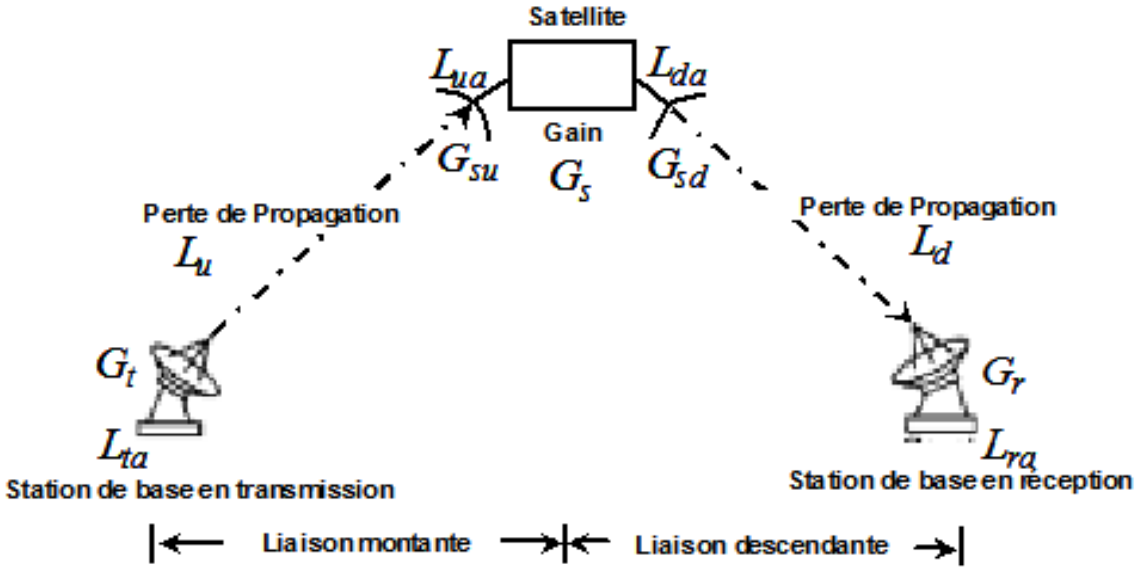
$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_f} = \frac{EIRP \times G_r}{L_f}$$

$$EIRP = G_t P_t \quad (Watts)$$

Exemple

Les pertes de propagation dans l'espace libre à 1.5 GHz d'un lien entre un satellite et une station de base séparés par une distance égale à 36500 km sont égales à :

$$L_f = \left(\frac{4\pi \times 36500 \times 10^3}{\frac{3\times 10^8}{1.5\times 10^9}} \right)^2 = \left(7.3\pi \times 10^8\right)^2 = 187.2 \quad dB$$



$$P_r = P_t + G_t - L_{ta} + G_{su} - L_u - L_{ua} + G_s + G_{sd} - L_{da} - L_d + G_r - L_{ra}$$

G_t et G_r	gain de l'antenne de la BTS de transmission et de réception.
L_{ta} et L_{ra}	perte du guide d'onde d'alimentation (*feeder*), perte d'une désadaptation de la polarisation de l'antenne de la BTS de transmission et de réception.
L_u et L_d	perte de propagation de la liaison montante et descendante incluant les pertes dans l'espace libre, l'absorption atmosphérique et l'atténuation par la pluie.
G_{su} et G_{sd}	gain de l'antenne de réception et de transmission du satellite.
L_{ua}	perte du guide d'onde d'alimentation, perte d'une désadaptation de la polarisation de l'antenne de réception du satellite.
G_s	gain d'amplification du satellite.
L_{da}	perte du guide d'onde d'alimentation, perte d'une désadaptation de la polarisation de l'antenne de transmission du satellite.

TEMPÉRATURE DE BRUIT

La puissance du bruit thermique par unité de largeur de bande, N_o, peut être exprimée par kT avec k désigne la constante de Boltzmann (k=1.38×10^{-23} J/K). La température T qui correspond à ce bruit thermique est appelée température de bruit (*noise température*). Il est souvent recommandé d'exprimer N_o en décibel selon l'équation suivante :

$$[N_o]_{dB} = 10*\log(k) + 10*\log(T) = -228.6 + 10*\log(T) \quad dB/Hz$$

Exemple

La densité de puissance du bruit généré par une résistance à une température de 27°C est calculée par l'équation 7 comme :

$$N_o = -228.6 + 10\log(273+27) = -203.8 \quad dB/Hz$$

BRUITS DANS UN LIEN DE COMMUNICATION PAR SATELLITE

Bruit 1 : c'est le bruit thermique généré par le modulateur, le mélangeur et l'amplificateur de puissance.

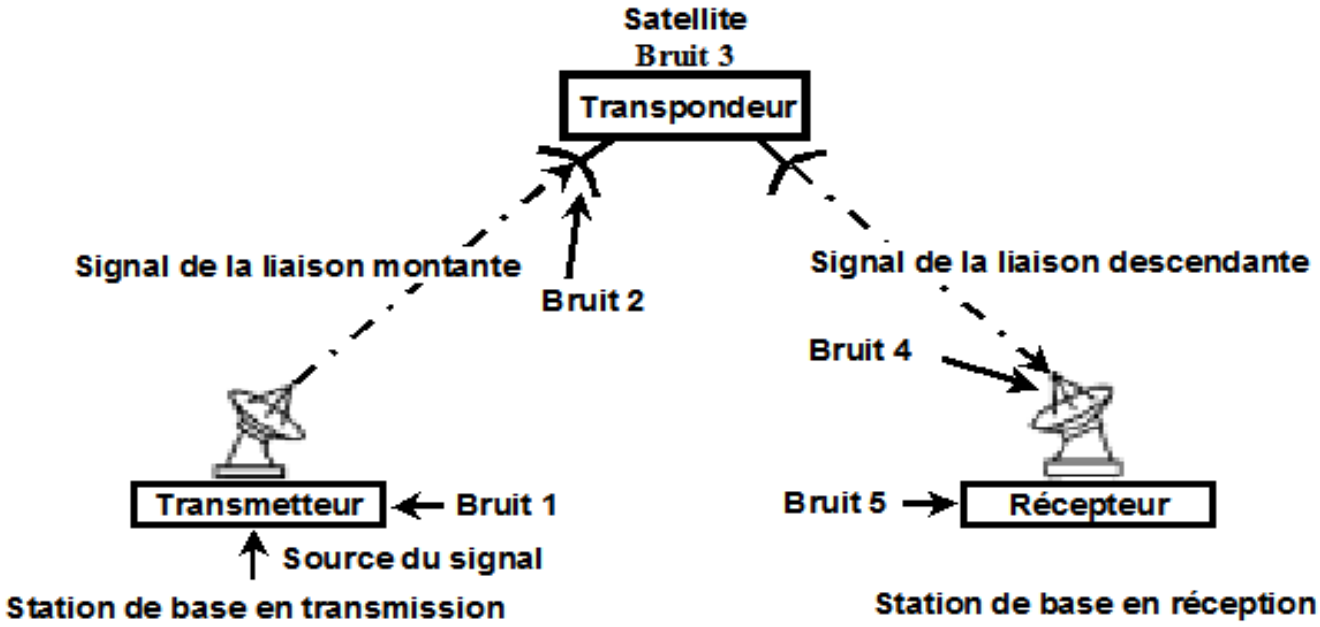
Bruit 2 : c'est le bruit thermique issu de la terre et reçu par l'antenne du satellite (généralement à 300K).

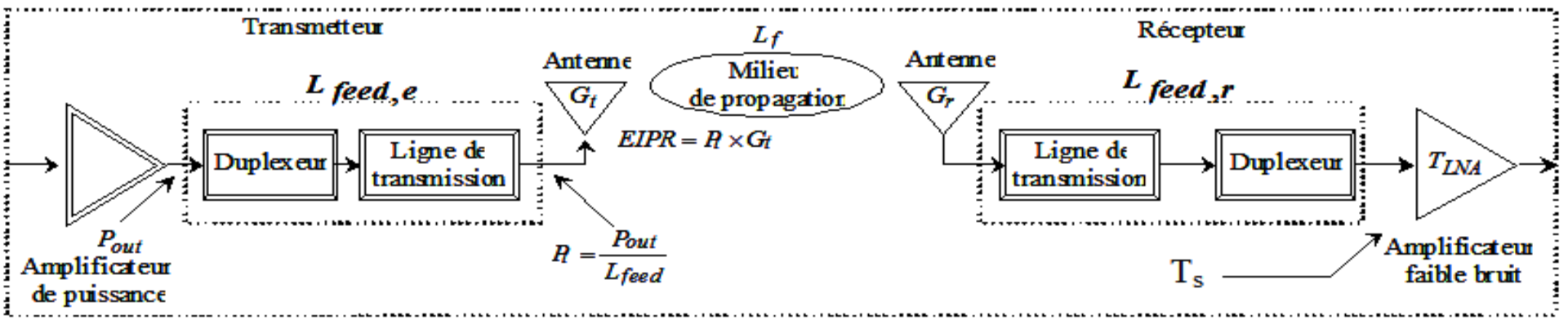
Bruit 3 : bruit thermique généré par le transpondeur du satellite.

Bruit 4 : bruit reçu par l'antenne de la BTS en plus du signal issu du satellite incluant le bruit du ciel (bruit de fond galactique), le bruit thermique atmosphérique et le bruit thermique terrestre.

Bruit 5 : bruit thermique généré par le récepteur de la station BTS.

En plus de ces sources de bruit, un lien de communication par satellites est soumis à des interférences introduites par d'autres systèmes de communication par satellite.





Bloc diagramme simplifié d'une liaison radiofréquence

Le rapport de la puissance du signal C sur la puissance du bruit N, **au niveau de l'entrée de l'amplificateur faible bruit**, d'une liaison représentée par peut être écrit comme :

$$\frac{C}{N} = \frac{\left(\frac{P_{out}}{L_{feed,e}} G_t\right) G_r / L_{feed,r}}{\frac{L_f}{kT_S B}} = \frac{\frac{(P_t G_t) G_r / L_{feed,r}}{L_f}}{kT_S B}$$

$$= \frac{\frac{EIRP \cdot G_r / L_{feed,r}}{L_f}}{kT_S B} = \frac{EIRP}{L_f}\left(\frac{G_r / L_{feed,r}}{T_S}\right)\frac{1}{kB}$$

Où B exprime la largeur de bande de fréquence du système en Hz.

Si on considère le rapport C/N_o, l'équation précédente peut être réécrite comme :

$$\frac{C}{N_o} = \frac{\left(\frac{P_{out}}{L_{feed,e}} G_t\right) G_r / L_{feed,r}}{L_f} = \frac{(P_t G_t) G_r / L_{feed,r}}{L_f}$$

$$= \frac{\frac{EIRP \cdot G_r / L_{feed,r}}{L_f}}{kT_s} = \frac{EIRP}{L_f} \left(\frac{G_r / L_{feed,r}}{T_s}\right) \frac{1}{k}$$

Cette équation peut être réécrite en dB sous la forme de :

$$C/N_o = P_{out} - L_{feed,e} + G_t - L_f + G_r - L_{feed,r} - T_s - k$$

$$= EIRP - L_f + G_r - L_{feed,r} - T_s + 228.6 \quad dBHz$$

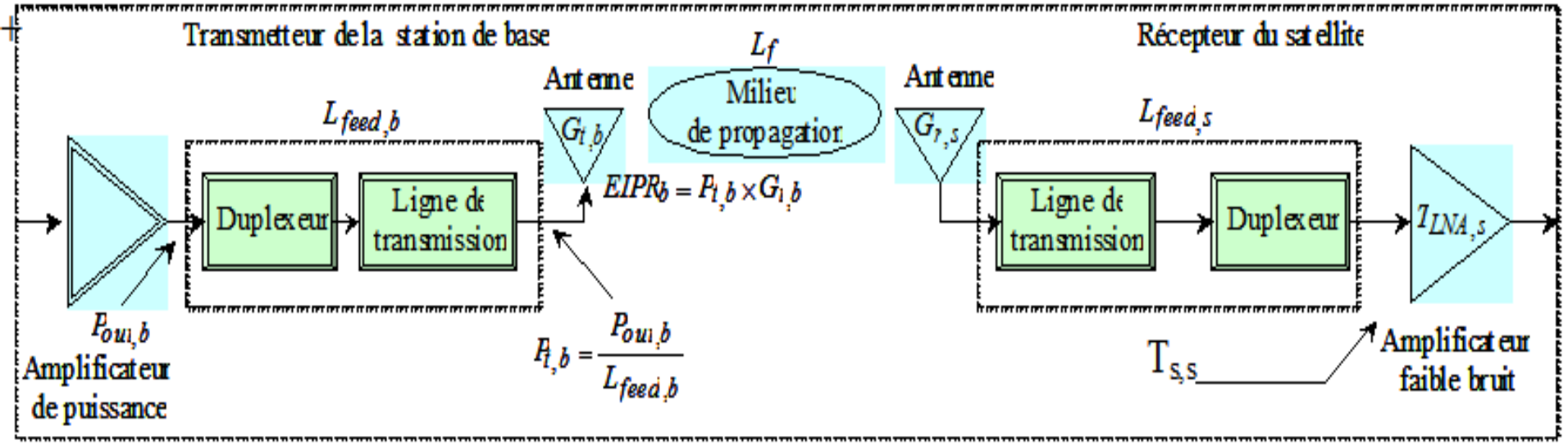
Exemple

Un satellite géostationnaire transmet un signal à 1500 MHz à une station mobile sur l'équateur juste en dessous. Les paramètres de la liaison sont les suivants:

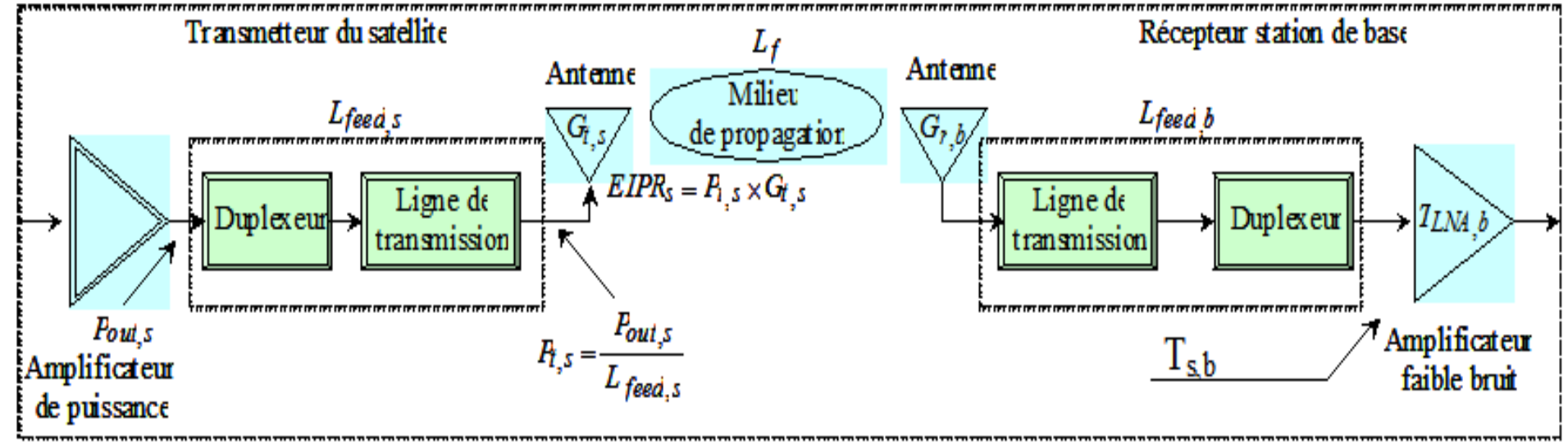
Puissance transmise par le satellite	1 Watt (0 dBW)
Gain de l'antenne du satellite (diamètre 100 cm)	21.7 dBi
Pertes de propagation dans l'espace (d=36000 km)	187.2 dB
Gain de l'antenne de la station (Diamètre 40 cm, η=80%)	15.0 dBi
Température de bruit du système de la station de base	24.8 dBk (300K)
Pertes d'alimentation $L_{feed,r}$	3 dB

Selon l'équation 26, le rapport C/N_0 de cette liaison descendante est égal à :

$$C/N_0 = 0 + 21.7 - 187.2 + 15 - 24.8 - 3 + 228.6 = 50.3 \quad dBHz$$



a) Liaison montante



b) Liaison descendante

Bloc diagramme d'un lien satellite

Les équations précédentes sont les équations de base qui caractérisent la qualité de réception d'un signal, issu d'un transmetteur quelconque vers un récepteur. Dans la suite, nous déduisons les équations qui correspondent respectivement à une liaison satellite montante, où le transmetteur est la station de base et le récepteur est le satellite, et à une liaison descendante, où le transmetteur est le satellite et le récepteur est la station de base.

- Liaison montante (figure 10-a) :

$$\left(\frac{C}{N}\right)_U = \frac{\left(\frac{P_{out,b}}{L_{feed,b}} G_{t,b}\right) G_{r,s} / L_{feed,s}}{L_f} = \frac{\left(P_{t,b} G_{t,b}\right) G_{r,s} / L_{feed,s}}{L_f}$$

$$= \frac{\frac{EIRP_b \cdot G_{r,s} / L_{feed,s}}{L_f}}{kT_{s,s}B} = \frac{EIRP_b}{L_f} \left(\frac{G_{r,s} / L_{feed,s}}{T_{s,s}}\right) \frac{1}{kB}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U = \frac{\left(\frac{P_{out,b}}{L_{feed,b}} G_{t,b}\right) G_{r,s} / L_{feed,s}}{L_f} = \frac{\left(P_{t,b} G_{t,b}\right) G_{r,s} / L_{feed,s}}{L_f}$$

$$= \frac{\frac{EIRP_b \cdot G_{r,s} / L_{feed,s}}{L_f}}{kT_{s,s}} = \frac{EIRP_b}{L_f}\left(\frac{G_{r,s} / L_{feed,s}}{T_{s,s}}\right)\frac{1}{k}$$

Si les paramètres sont exprimés en dB, l'équation 28 aura une forme plus simple :

$$\left(C/N_o\right)_U = P_{out,b} - L_{feed,b} + G_{t,b} - L_f + G_{r,s} - L_{feed,s} - T_{s,s} - k$$

$$= EIRP_b - L_f + G_{r,s} - T_{s,s} - L_{feed,s} - 228.6 \quad dBHz$$

- Liaison descendante (figure 1-b) :

$$\left(\frac{C}{N}\right)_D = \frac{\left(\frac{P_{out,s}}{L_{feed,s}} G_{t,s}\right) G_{r,b} / L_{feed,b}}{\frac{L_f}{kT_{s,b}B}} = \frac{\left(P_{t,s} G_{t,s}\right) G_{r,b} / L_{feed,b}}{\frac{L_f}{kT_{s,b}B}}$$

$$= \frac{\frac{EIRP_S \cdot G_{r,b} / L_{feed,b}}{L_f}}{kT_{s,b}B} = \frac{EIRP_S}{L_f}\left(\frac{G_{r,b} / L_{feed,b}}{T_{s,b}}\right)\frac{1}{kB}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_D = \frac{\left(\frac{P_{out,s}}{L_{feed,s}} G_{t,s}\right) G_{r,b} / L_{feed,b}}{\frac{L_f}{kT_{s,b}}} = \frac{\left(P_{t,s} G_{t,s}\right) G_{r,b} / L_{feed,b}}{\frac{L_f}{kT_{s,b}}}$$

$$= \frac{\frac{EIRP_S \cdot G_{r,b} / L_{feed,b}}{L_f}}{kT_{s,b}} = \frac{EIRP_S}{L_f}\left(\frac{G_{r,b} / L_{feed,b}}{T_{s,b}}\right)\frac{1}{k}$$

$$\begin{aligned}(C/N_o)_D &= P_{out,s} - L_{feed,s} + G_{t,s} - L_f + G_{r,b} - L_{feed,b} - T_{s,b} - k \\ &= EIRP_S - L_f + G_{r,b} - L_{feed,b} - T_{s,b} + 228.6 \quad dBHz\end{aligned}$$

Jusqu'à maintenant nous n'avons considéré que la qualité de la liaison descendante et de la liaison montante séparément. Pour calculer le rapport C/N_o total, en plus de combiner les bruits thermiques de la liaison montante et de la liaison descendante, nous ajoutons le bruit d'interférences généré par les autres systèmes. Le rapport C/N_o total est donné par l'équation suivante :

$$\left(C/N_o\right)_T = \frac{C}{(N_o)_U + (N_o)_D + I_o} = \left[\frac{1}{\left(C/N_o\right)_U} + \frac{1}{\left(C/N_o\right)_D} + \frac{1}{\left(C/I_o\right)}\right]^{-1}$$

Comme le rapport C/N_o total d'une liaison est déterminé en séparant la liaison en deux, liaison montante et liaison descendante, on calcule le rapport C/N_o de chacune et enfin on les combine.

Ici les indices T, U et D indiquent respectivement liaison totale, liaison montante et liaison descendante. I_o est la densité de puissance du bruit d'interférences.

Exemple

Considérons le cas d'une expérience d'une communication par satellite aéronautique. Le rapport C/N_o de la liaison directe à partir de la station de base GES à Kashima à une station terrestre d'avion AES à Anchorage via le satellite peut être calculé selon l'équation 27. On ne considère pas ici le bruit d'interférence. Les fréquences 6 GHz et 1.5 GHz sont utilisées pour la communication respectivement entre la station de base et le satellite et entre le satellite et l'avion. Les paramètres de la liaison GES au satellite (liaison montante) sont :

$EIRP_b$ du GES	60.7 dB
Pertes de propagation (6 GHz, d=37270 km)	199.4 dB
Gain de l'antenne du satellite	21.7 dBi
Pertes de l'alimentation $L_{feed,s}$	3.0 dB
Température de bruit équivalente à l'entrée de l'amplificateur faible bruit du satellite	300 K

Ainsi $C = EIRP_b - L_f + G_{r,s} - L_{feed,s} = 60.7 - 199.4 + 21.7 - 3 = -120.0 \quad dB$

Et $N_o = 10\log(k) + 10\log(T_{s,s}) = -228.6 + 10\log(300) = -203.8 \quad dB/Hz$

$(C/N_o)_U = -120.0 + 203.8 = 83.8 \quad dBHz$

Les paramètres de la liaison du satellite au AES (liaison descendante) sont :

EIRP du satellite	30.5 dB
Pertes de propagation (1.5 GHz, d=41.097 km)	199.4 dB
Gain de l'antenne du AES	14.0 dBi
Pertes de l'alimentation $L_{feed,b}$	3.0 dB
Température de bruit équivalente à l'entrée de l'amplificateur faible bruit de la station de base	300 K

Ainsi $C = EIRP_b - L_f + G_{r,b} - L_{feed,b} = 30.5 - 188.5 + 14.0 - 3 = -148.0 \quad dB$

Et $\boldsymbol{N_o} = 10\mathbf{log}(\boldsymbol{k}) + 10\mathbf{log}(\boldsymbol{T_{s,b}}) = -228.6 + 10\mathbf{log}(300) = -203.8 \quad \boldsymbol{dB/Hz}$

$(C/N_o)_D = -148.0 + 203.8 = 55.8 \quad dBHz$, Par conséquent, le rapport $(C/N_o)_T$ est égal à :

$$(C/N_o)_T = \left[\frac{1}{(C/N_o)_U} + \frac{1}{(C/N_o)_D}\right]^{-1} = \left[\frac{1}{10^{\frac{83.8}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{55.8}{10}}}\right]^{-1} = 379587.790 = 55.7 \quad dBHz$$

Rapport $[C/N_o]_S$: (rapport calculé théoriquement pour garantir une qualité de communication bien déterminée).

Le rapport signal sur bruit C/N_o qu'on a étudié dans les sections précédentes est utilisé pour la mesure de la qualité de la partie analogique d'un lien de communication. Cependant, dans le cas d'un lien de communication numérique, on introduit une nouvelle notion : le taux d'erreur binaire (TEB); BER (Bite Error Rate). Le BER est défini comme le nombre de bits erronés sur le nombre total de bits reçus. Le rapport BER est fonction de la quantité E_b/N_o avec E_b est l'énergie par bit et N_o est la densité de bruit du signal. La relation entre le BER et E_b/N_o dépend de la modulation utilisée qui doit être choisie de manière attentive en fonction du type du canal de transmission. Il existe une relation entre le signal à bruit $\frac{C}{N_0}$ spécifique à la portion analogique (passe bande) du lien et le rapport $\frac{E_b}{N_0}$ de la portion numérique (bande de base) :

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} \times R_b$$

Avec R_b est le taux de transmission en bit/sec.