

## Atténuations dans la propagation des ondes radios

### 1.1 Introduction

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. La troposphère désigne les couches basses de l'atmosphère où se produisent les phénomènes météorologiques. Ceux-ci ont une influence notable sur la propagation Terre-espace. En règle générale, cette influence tend à augmenter avec la fréquence de l'onde. L'ionosphère est une région de la haute atmosphère où les composants sont partiellement ionisés par le rayonnement solaire. Cette ionisation exerce également une influence sur la propagation des ondes. À l'inverse de la troposphère, les effets ionosphériques sont prépondérants aux basses fréquences, en dessous de 1 GHz, et diminuent avec la fréquence.

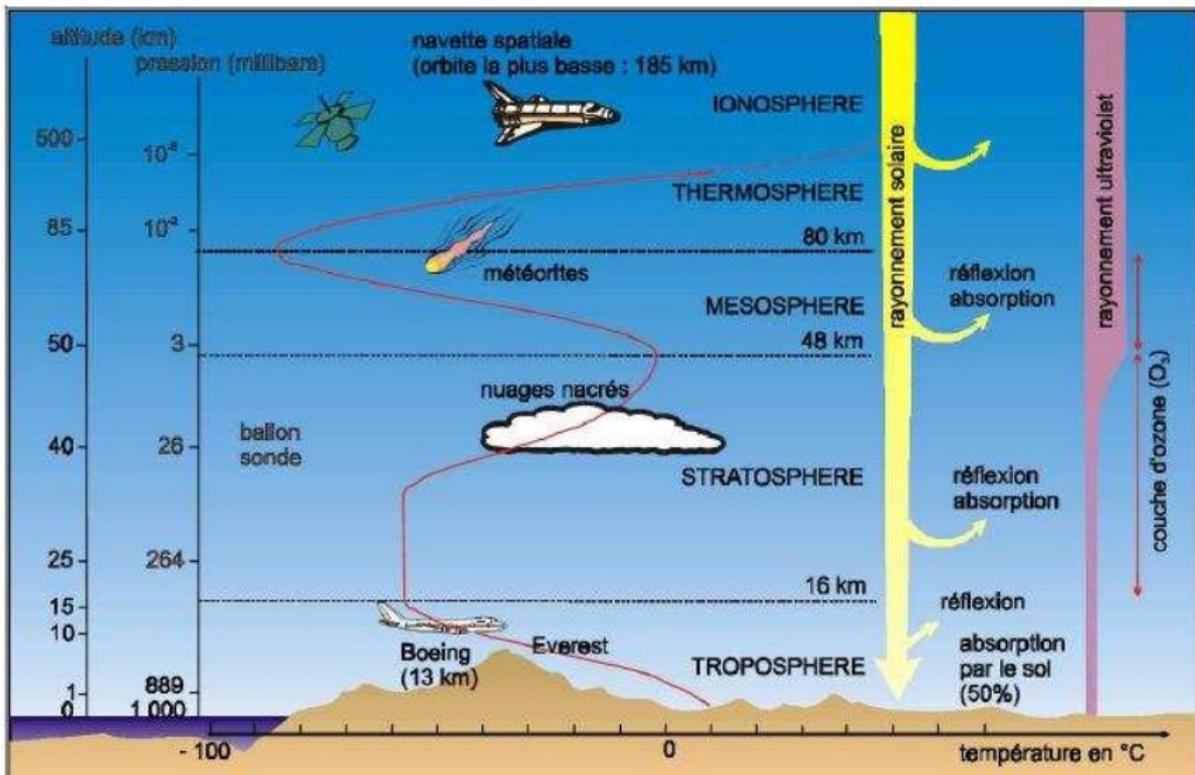
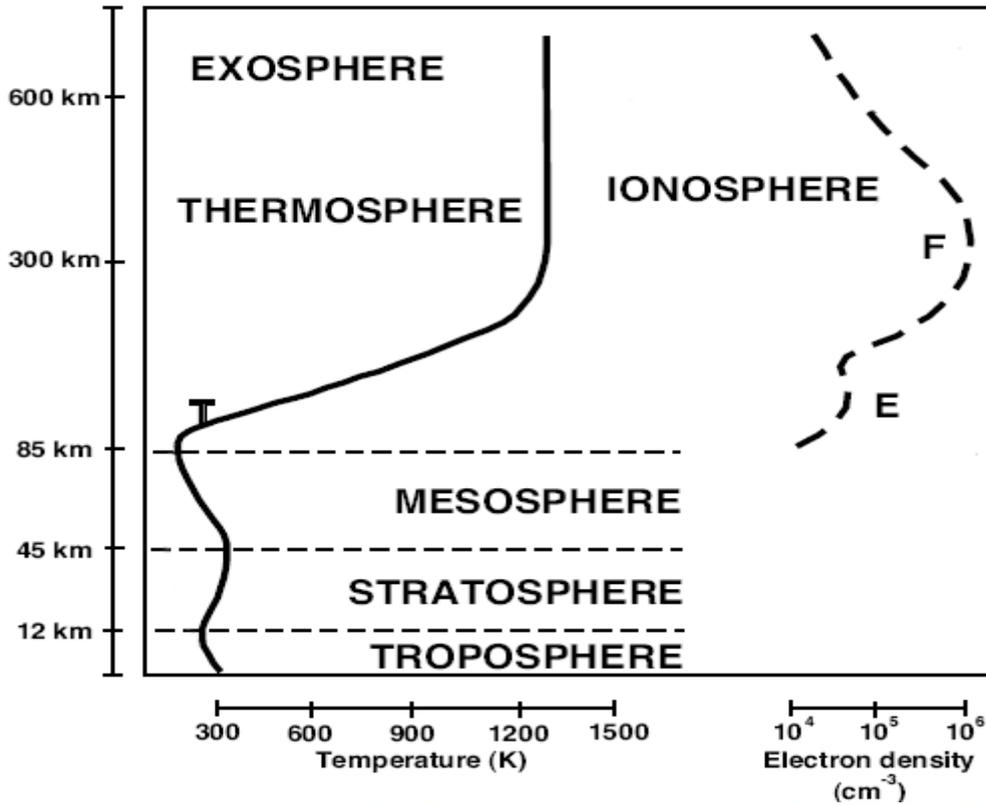
L'atténuation est un effet qui se traduit par une perte du signal reçu en raison d'un phénomène d'absorption dû à la présence de particules gazeuses ou d'hydrométéores le long de la liaison. Aux fréquences comprises entre 1 et 1 000 GHz, les constituants gazeux qui interviennent sont l'air sec (essentiellement l'oxygène moléculaire) et la vapeur d'eau. Les hydrométéores qui atténuent les signaux reçus sont principalement les nuages et les précipitations (pluie, neige).

### 1.2 Les pertes atmosphériques

L'atmosphère est divisée 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.
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 couche ultime 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. On connaît mal les propriétés de cette couche . Elle joue peu de rôle dans la propagation des ondes.

## La navigation radioélectrique – généralités



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. L'atmosphère possède d'autres propriétés susceptibles de varier en fonction de l'altitude, notamment la composition

## La navigation radioélectrique – généralités

de l'air. Plus on s'élève, plus la densité de l'air diminue, c'est-à-dire que le nombre d'atomes et de molécules dans un volume donné baisse. Par ailleurs, 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 50 et 1 500 km d'altitude.

Aux fréquences inférieures à 1 000 GHz, l'atténuation due à l'air clair est essentiellement provoquée par l'oxygène moléculaire présent dans l'atmosphère. Le spectre de l'oxygène moléculaire se caractérise par un spectre de raies d'absorption à différentes fréquences dont une série de raies rapprochées entre 50 et 70 GHz qui forment un continuum de raies d'absorption aux faibles latitudes (pour des valeurs élevées de la pression atmosphérique). D'autres raies isolées sont également présentes, notamment à 118,7 GHz ainsi qu'à des fréquences supérieures à 300 GHz. La forme de ces raies d'absorption dépend de deux paramètres météorologiques : la pression et la température moyenne annuelle.

Les nuages et les brouillards sont constitués de gouttes d'eau en suspension qui peuvent être considérées comme de taille négligeable par rapport à la longueur d'onde pour des fréquences inférieures à 300 GHz. L'approximation de Rayleigh de la théorie de la diffusion de Mie peut alors être utilisée pour calculer l'atténuation due aux nuages en fonction de deux paramètres météorologiques : le contenu en eau liquide des nuages et la température dans le nuage.

Le bruit atmosphérique provient principalement des décharges atmosphériques dans l'atmosphère (éclairs); ces décharges émettent des parasites dans une large bande de fréquences. Ces bruits sont particulièrement importants au dessous de 30 MHz, au delà, ils sont plus faibles car les éclairs émettent peu d'énergie à ces fréquences. De plus, comme la propagation se fait par onde directe pour les fréquences élevées, seuls les orages proches sont gênants.

Le soleil émet des ondes électromagnétiques dans une large bande de fréquences. 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( sources intenses mais localisées) 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. Ci-dessous sont répertoriées les différentes sources de bruit:

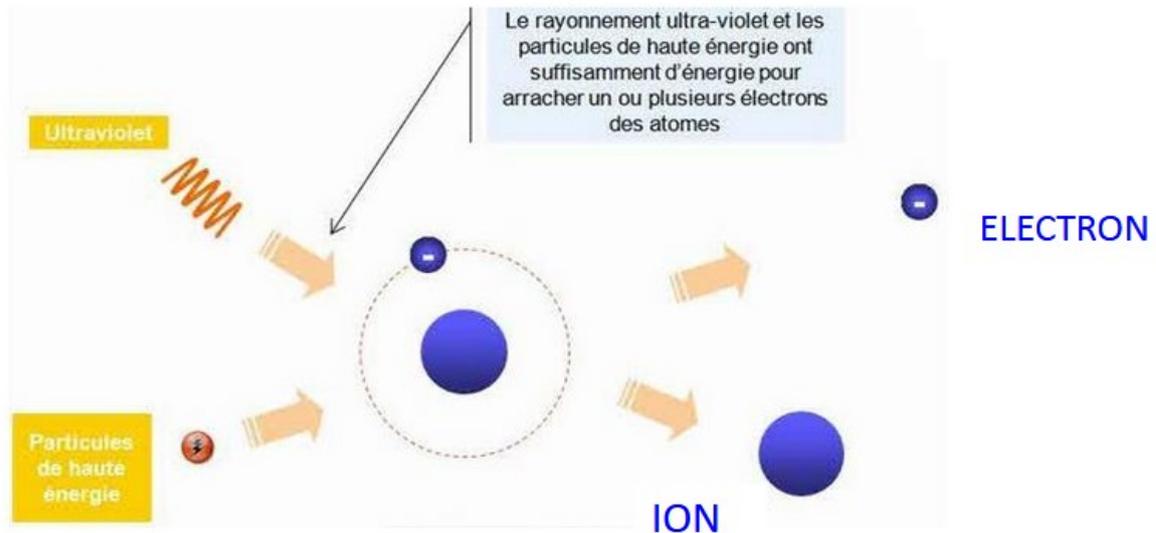
Les sources sont diverses, elles sont liées à l'activité industrielle (moteurs, lignes haute tension, dispositifs de commutation, etc..) ou domestique ( éclairage fluorescent, gradateur de lumière, etc..) ainsi qu'aux transports : allumage des voitures, avions...). Selon la source, le bruit est continu ou impulsionnel. Ces bruits sont plus importants que les bruits naturels, principalement dans les villes. Par conséquent, lorsque c'est possible, on a tout intérêt à placer les antennes devant capter des très petits signaux loin des villes.

### **1.3 Les effets de l'ionosphère**

L'ionosphère est la partie de l'atmosphère qui contient un gaz ionisé, appelé plasma, et qui affecte la propagation des ondes radio. Elle est située à des altitudes entre 80 to 800 km. A ces altitudes, la pression est si faible que des électrons libres peuvent exister. 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 compétition entre ces processus d'ionisation et de

## La navigation radioélectrique – généralités

recombinaison détermine la densité globale en électrons de l'ionosphère. Cette quantité dépend de plusieurs facteurs, comme la pression (le phénomène de recombinaison est plus prononcé à des altitudes basses) et la quantité de rayonnement reçu de l'espace (du Soleil principalement, mais aussi des bursts de rayons gamma GRB). En conséquence, l'ionosphère présente des modifications diurnes (jour/nuit), des modifications saisonnières (été/hiver) et est fortement perturbée par l'activité solaire (cycle de 11 ans, éruptions solaires, ...).



**Figure 3 :** La photo ionisation

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'effet sur la distance mesurée par GPS peut varier de 150 mètres (à midi, pendant les périodes de grande activité solaire, avec un satellite proche de l'horizon) jusqu'à moins de 5 mètres (la nuit, pendant une période d'activité solaire faible, avec un satellite au zénith). Les coefficients de corrections transmis par les satellites GPS ne peuvent éliminer que 50% du retard ionosphérique aux latitudes moyennes [26]. Le caractère dispersif de l'ionosphère permet avec une combinaison adéquate des deux fréquences, d'éliminer la partie principale de l'effet ionosphérique. Les nouvelles recherches menées actuellement à travers le monde sont basées sur l'utilisation des réseaux GPS pour l'estimation de l'effet ionosphérique.

Les effets ionosphériques prennent la forme d'électrons libres qui perturbent la propagation des signaux GPS et Galileo. Ces phénomènes d'ionisation sont en fait extrêmement variables suivant la région du globe considérée, le champ magnétique terrestre et les variations de l'activité et du rayonnement solaires. L'un des effets les plus surprenants de l'ionosphère sur la propagation des signaux GPS ou Galileo est que l'onde porteuse et sa modulation (le code) voyagent à des vitesses différentes. La vitesse de propagation du code ralentit et devient légèrement plus faible que la vitesse de la lumière. En se souvenant de notre exemple de train roulant à une vitesse réelle plus faible que celle que l'on pensait, nous comprenons que la mesure de la distance apparaisse supérieure à ce qu'elle est dans la réalité. La cause de ce décalage est appelée *décalage ionosphérique*. Le décalage ionosphérique dépend essentiellement de deux paramètres : la fréquence du signal et la densité d'électrons libres dans l'ionosphère.

L'ionosphère a été 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

## La navigation radioélectrique – généralités

actif. La densité électronique est très faible. Cette couche est surtout présente durant la journée, mais le rayonnement cosmique maintient une ionisation résiduelle durant la nuit. 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, ce qui explique la meilleure propagation des stations AM 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 permet la circulation de courants électriques, 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. Durant la journée, elle se divise en deux couches, appelées F1 et F2. La couche F est la plus ionisée. Elle est fortement corrélée à l'activité solaire liée au cycle un décennal des taches (densité moyenne proportionnelle au sunspot). La couche F subsiste la nuit grâce à la magnétosphère. Elle peut être perturbée par des événements solaires concernant la chromosphère et la couronne.

L'ionosphère a les propriétés du plasma concernant le rayonnement électromagnétique. Le vent solaire provoque la luminescence de la basse ionosphère dans les régions polaires (aurores polaires).

La couche D a une importance capitale car elle est influencée par les éruptions solaires et les GRBs les plus puissants. La surveillance de la puissance de réception d'un émetteur VLF distant permet de repérer les perturbations ionosphériques engendrées par les éruptions solaires. Durant la journée, les ondes VLF ont des longueurs d'ondes si importantes qu'elles se propagent dans un guide d'onde formé de la surface terrestre et de la couche D. La propagation est extrêmement stable, et des variations inhabituelles traduisent la présence d'une perturbation ionosphérique. Durant la nuit, la couche D disparaît et les ondes VLF sont reflétées par les couches supérieures. Le coefficient de réflexion est plus important, si bien que le signal reçu est plus important durant la nuit que durant le journée. Cependant, la propagation fortement perturbée par les caractéristiques de l'ionosphère et des variations rapides et importantes ne permet pas de surveiller les SID durant la nuit. Le signal présente des variations caractéristiques au lever et au coucher du soleil. Elles correspondent à la transition entre la propagation du signal nocturne réfléchi à haute altitude et la propagation du signal diurne dans un guide d'ondes.

Une perturbation à début brusque de l'ionosphère (SID, Sudden Ionospheric Disturbance en anglais) résulte de l'accroissement de la densité électronique de la couche D suite à une éruption solaire. La partie de la Terre éclairée par le Soleil est alors soumise à un bombardement de rayons X et de radiation UV. Ces rayonnements pénètrent jusqu'à la couche D et accroissent le processus d'ionisation et la densité électronique.

Cela accroît l'absorption des ondes radio principalement dans le haut de la bande MF (300 kHz - 3 MHz) et le bas de la bande HF (3 MHz - 30 MHz), causant des interruptions de transmissions (radio blackouts). Pour les VLF (3 kHz - 30 kHz), le coefficient de réflexion s'accroît, entraînant une onde réfléchie plus importante. Du fait des interférences avec l'onde de sol (propagation directe), le signal reçu peut être plus important ou moins important qu'en l'absence de perturbation. Dès que le rayonnement ionisant cesse, le SID se termine et la

## La navigation radioélectrique – généralités

propagation radio redevient normale, dès lors que les électrons disparaissent par le processus de recombinaison. Les processus d'ionisation et de recombinaison ne sont pas instantanés. Ainsi la perturbation sera détectée avec un léger retard sur l'arrivée des rayons X (mesurée par des satellites tels que les GOES) et se poursuivra après la fin de l'éruption. Un grand nombre de facteurs conditionnent les valeurs de ces décalages : l'intensité et le profil du rayonnement X, le niveau d'ionisation précédant la perturbation, etc. Néanmoins, le retard est généralement de 1 à 5 minutes sur le début de l'éruption. L'effet quant à lui peut se poursuivre durant 1 heure ou plus après la fin de l'éruption.

L'ionosphère est le plus grand perturbateur du signal GNSS (Global Navigation Satellite System). La plus grande cause de perte de précision dans les calculs de position des GPS est l'effet de l'ionosphère. En effet, les ondes émises par les satellites sont perturbées en traversant ce nuage de particules chargées. 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. Sur ce site internet, il est expliqué en détail les effets de l'ionosphère sur les GPS ainsi que les manières de corriger ces erreurs.

En résumé, lorsqu'une éruption solaire se produit, la propagation des ondes VLF est perturbée. Il est ainsi possible de détecter ces perturbations en surveillant l'évolution de la puissance du signal d'un émetteur VLF distant.

### **1.4 L'atténuation due à la pluie**

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. L'atténuation linéique due à la pluie augmente avec la quantité d'eau précipitant et peut être déterminée à partir de l'intensité de la précipitation (exprimée en mm/h) comme indiqué sur la figure 9. Aux fréquences inférieures à 15 GHz, ce paramètre est suffisant pour calculer l'atténuation linéique due à la pluie car les gouttes de pluie sont alors de dimension faible devant la longueur d'onde. Aux fréquences supérieures à 20 GHz, la distribution du diamètre des gouttes de pluie influence l'atténuation due à la pluie, deux distributions de gouttes différentes pouvant donner lieu à deux valeurs différentes d'atténuation pour une même intensité de précipitation. Comme la pluie présente une variabilité importante à la fois dans l'espace et dans le temps, l'intensité de précipitation dépend de la probabilité d'occurrence ou, en d'autres termes, du pourcentage du temps, ainsi que des caractéristiques climatiques. Des modèles statistiques doivent donc être utilisés pour caractériser l'intensité de précipitation. La distribution de l'intensité de précipitation peut être prédite en tout point de la planète. Par ailleurs, la variabilité spatiale des précipitations présente un fort impact sur l'atténuation due à la pluie subie par une liaison. Deux grandes catégories de précipitations peuvent être identifiées : d'une part, les précipitations stratiformes qui sont des précipitations d'intensité modérée s'étendant sur des distances très importantes (quelques centaines de kilomètres) et survenant principalement en hiver et au printemps et, d'autre part, les précipitations convectives qui sont des précipitations intenses relativement confinées à l'intérieur de cellules de pluie (quelques kilomètres) et survenant principalement à la fin du printemps, en été et à l'automne pour les latitudes tempérées. Les dimensions du volume de pluie et l'intensité des précipitations dépendent du type de pluie ; la hauteur de pluie est un autre paramètre important qui va conditionner l'importance de l'atténuation sur le trajet considéré.

## 1.5 Communication par satellite

Les systèmes orbitaux d'application sont toujours constitués d'une plate forme comprenant, d'une part, un module de service chargé de fournir l'énergie nécessaire aux équipements et de contrôler l'orbite et l'attitude du véhicule et, d'autre part, la charge utile elle-même. Parmi ces systèmes on distingue les satellites. Pour qu'un satellite puisse effectuer la tâche à laquelle il est destiné, il faut qu'il puisse se maintenir sur orbite, et de garder une trajectoire du mouvement. Ce mouvement peut s'expliquer avec un formalisme simple, initié par Kepler et Newton. Il est basé sur les lois fondamentales de la dynamique. Il s'applique à tous les satellites artificiels lancés depuis 1957, à toutes les sondes spatiales parties vers la Lune ou d'autres planètes, comme il s'applique aux satellites naturels, aux planètes ou aux comètes autour du Soleil : c'est le *mouvement képlérien*. Ce mouvement est défini à l'aide des paramètres dit les paramètres orbitaux, qui permettent de définir et de repérer l'orbite dans l'espace, ainsi que de repérer le satellite sur l'orbite.

Un satellite artificiel est composé d'une charge utile, définie spécifiquement pour la mission qu'il doit remplir, et d'une plate-forme souvent standardisée assurant les fonctions de support comme la fourniture d'énergie, la propulsion, le contrôle thermique, le maintien de l'orientation et les communications.

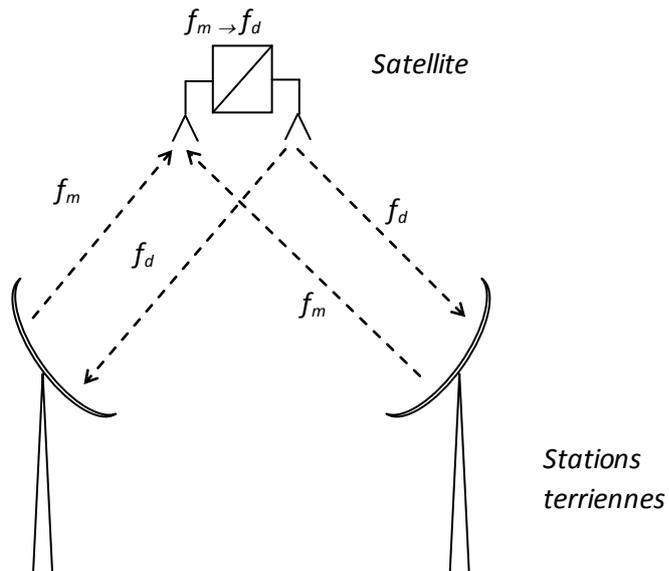


Le satellite est suivi par un centre de contrôle au sol, qui envoie des instructions et recueille les données collectées grâce à un réseau de stations terrestres. Pour remplir sa mission le satellite doit se maintenir sur une orbite de référence en orientant ses instruments de manière précise : des interventions sont nécessaires à intervalles réguliers pour corriger les perturbations naturelles de l'orbite générées, dans le cas d'un satellite terrestre, par les irrégularités du champ de gravité, l'influence du Soleil et de la Lune ainsi que la traînée créée par l'atmosphère qui subsiste en orbite basse.

## La navigation radioélectrique – généralités



La structure d'une liaison par satellite est semblable à celle d'un faisceau hertzien terrestre à deux bords, le satellite jouant le rôle de station relais.



Structure de principe d'une liaison par satellite.

L'information transmise peut être analogique ou numérique, ce qui conduit à différents types de modulation des porteuses :

- transmission analogique : modulation FM ;
- transmission numérique : modulation DPSK, MSK, QAM...

## La navigation radioélectrique – généralités

L'élément principal à l'intérieur de la section du lien montant d'un système satellitaire est l'émetteur de la station terrestre. L'élément principal à l'intérieur de la section du lien descendant d'un système satellitaire est le transmetteur à bord du satellite.

### 1.5.1 Position du satellite

#### 1.5.1.1 Mouvement d'un satellite artificiel

Le mouvement Képlérien est le mouvement d'une masse ponctuelle (élément secondaire) dans un champ central, le centre du champ étant fixe. Nous verrons par la suite que ce champ est le champ gravitationnel, créé par la masse d'un élément primaire supposé immobile.

##### 1.5.1.1.1 Loi de Newton

La loi de l'attraction universelle, énoncée par Newton, indique que deux corps ponctuels, de masse  $M$  (par exemple, la masse de la Terre) et  $m$  (la masse d'un satellite en orbite autour de la Terre), exercent l'un sur l'autre une attraction proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Cette force est exprimée par :

$$\vec{F} = -G \frac{M m}{r^2} \vec{e}_r$$

$G$  : étant la *constante universelle de gravitation* ( $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Kg} \cdot \text{sec}$ ).

$M$  : masse de la Terre égale à  $5,97 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$ .

On définit la *constante d'attraction géocentrique*, donnée par :

$$\mu = G.M$$

Si on remplace  $\mu$  dans la première équation, on obtient :

$$\vec{F} = - \frac{\mu}{r^2} m \vec{e}_r$$

On définit aussi  $\vec{g}$  qui est le *champ de gravitation terrestre* de la force  $\vec{F}$ , par l'équation suivante :

$$\vec{g} = - \frac{\mu}{r^2} \vec{e}_r = - \frac{\mu}{r^3} \vec{r}$$

#### 1.5.1.12 Les lois de Kepler

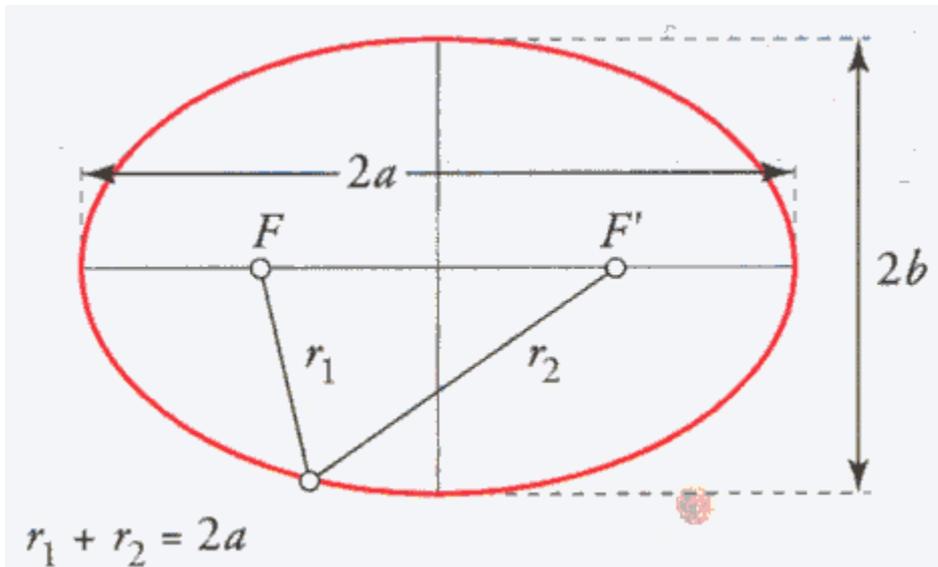
##### 1) 1<sup>ère</sup> loi : la loi des orbites

Dans le référentiel héliocentrique, le centre de chaque planète décrit une trajectoire elliptique dont le Soleil S est l'un des foyers. Mise à part Mercure et Pluton, les planètes du système solaire ont des trajectoires pratiquement

Remarque : qu'est-ce qu'une ellipse au sens mathématiques : Une ellipse est formée par l'ensemble des points dont la somme des distances à deux points fixes ( les foyers F et F' ) est constante :  $MF + MF' = AA' = 2a$  ( $AA'$  est le grand axe) On définit l'excentricité de l'ellipse par :

$$e = \frac{FF'}{AA'}$$

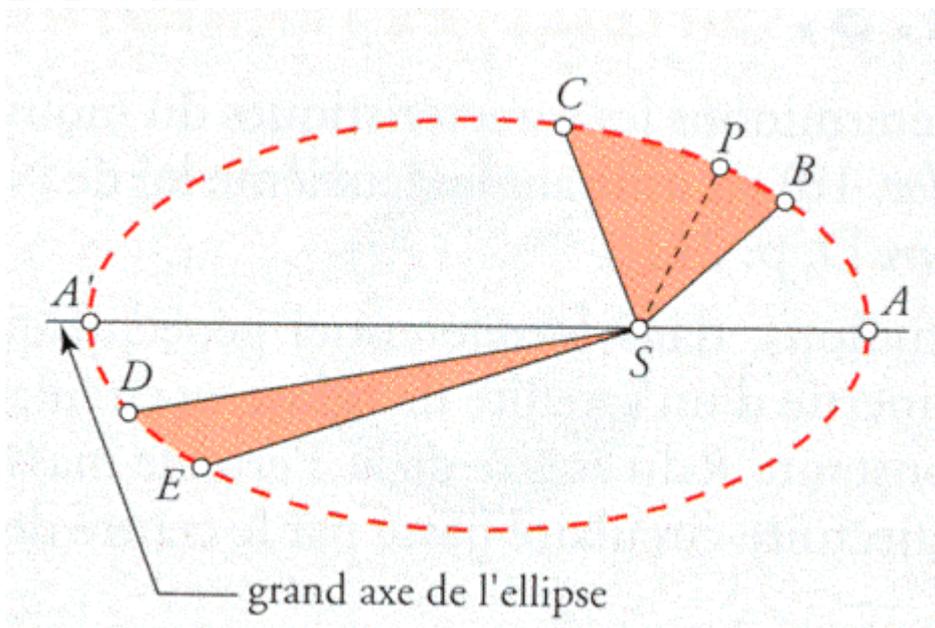
Si  $e = 0$  ( $FF'=0$ ), l'ellipse devient un cercle



**2) 2ème loi : la loi des aires :**

Le rayon vecteur  $SP$  qui relie la planète  $P$  au soleil  $S$  **balaie des aires égales en des temps égaux**. Conséquences :

- ✚ Les aires des triangles  $SBC$  et  $SDE$  sont égales.
- ✚ La portion d'ellipse  $BC$  est parcourue dans le même temps que la portion  $DE$ , ce qui implique que la planète va plus vite quand elle est proche d'un foyer de l'ellipse que quand elle est loin.



**3) 3ème loi : relation entre la période de révolution et le demi grand axe :**

Le rapport entre le carré de la période de révolution  $T$  d'une planète et le cube du demi-grand

axe ( $a = \frac{AA'}{2}$ ) de l'orbite elliptique est constant :  $\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$  La valeur de la constante ne

## La navigation radioélectrique – généralités

dépend que du Soleil (pas de la planète considérée) Pour une trajectoire circulaire : on  $T^2/r^3 = \text{cte}$ .

### 1.5.2 Plan de l'orbite

Un satellite de télécommunications est un relais hertzien en orbite. Le fait d'être en orbite par rapport à un relais terrestre conduit aux conséquences suivantes :

- ✓ un système satellitaire demande peu d'infrastructures terrestres;
- ✓ un système satellitaire peut fonctionner indépendamment des autres systèmes terrestres;
- ✓ un système satellitaire possède une large couverture.

En conséquence un système satellitaire peut être déployé rapidement tout en couvrant une population importante.

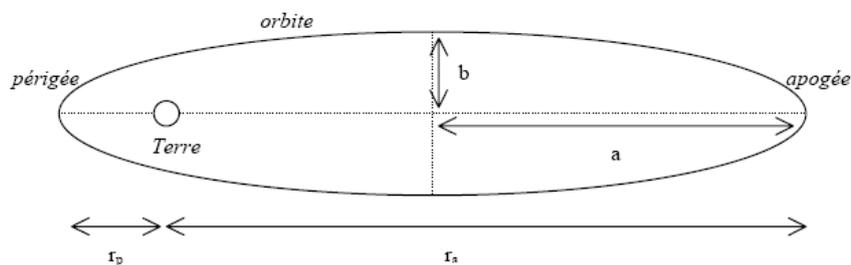
Le satellite en orbite est soumis à des lois de dynamiques célestes. La force principale appliquée au satellite est l'attraction terrestre et les lois de Kepler les plus importantes pour cet exposé sont les suivantes :

Le satellite se mis dans un plan (Fig.4 : plan orbital) et sa trajectoire est une ellipse dont la Terre occupe un foyer.

L'ellipse possède un demi grand axe noté  $a$  et un demi petit axe noté  $b$ . On définit l'excentricité  $e$  de l'ellipse :

$$e^2 = 1 - \frac{a^2}{b^2}$$

Le cas de l'orbite circulaire est celui où  $e = 0$ ,  $a$  et  $b$  sont alors égaux.



Plan orbital

Le vecteur du centre de la Terre au satellite balaye des aires égales en des temps égaux. Le point de l'orbite où le satellite est le plus éloigné de la Terre (apogée) est donc le point où la

## La navigation radioélectrique – généralités

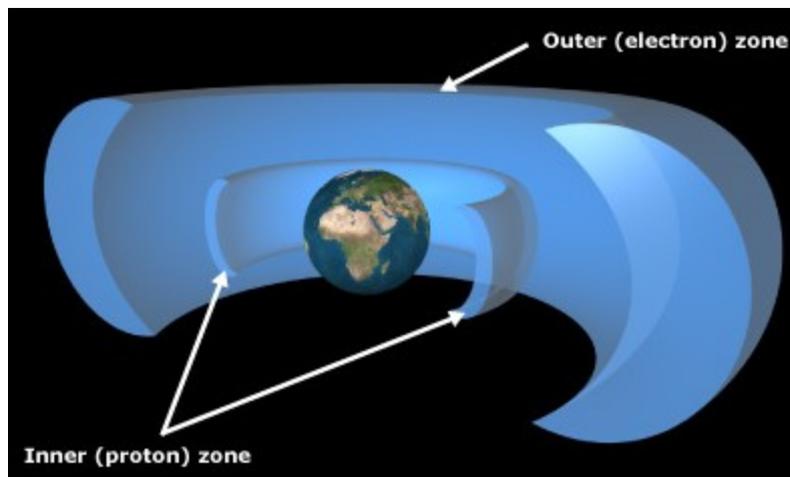
vitesse du satellite est la plus faible. Inversement la vitesse sera maximale au périégée (point où le satellite est le plus près de la Terre). Pour une orbite circulaire la vitesse est constante.

### 1.5.3 Trajectoire du mouvement des satellites et les différents types d'orbites

La Terre contient des champs magnétiques importants, ce qui a des répercussions sur son voisinage. Certaines zones au-delà de la surface terrestre présentent des radiations. Ces radiations détériorent les équipements électroniques des satellites. On distingue deux zones chargées en protons très énergétiques dues aux rayons cosmiques appelés ceintures de Van Allen :

- La ceinture intérieure : située entre 1500 Km et 5000 Km.
- La ceinture extérieure : située entre 13 000 Km et 20 000 Km.

On représente ces deux ceintures sur la figure ci-après :

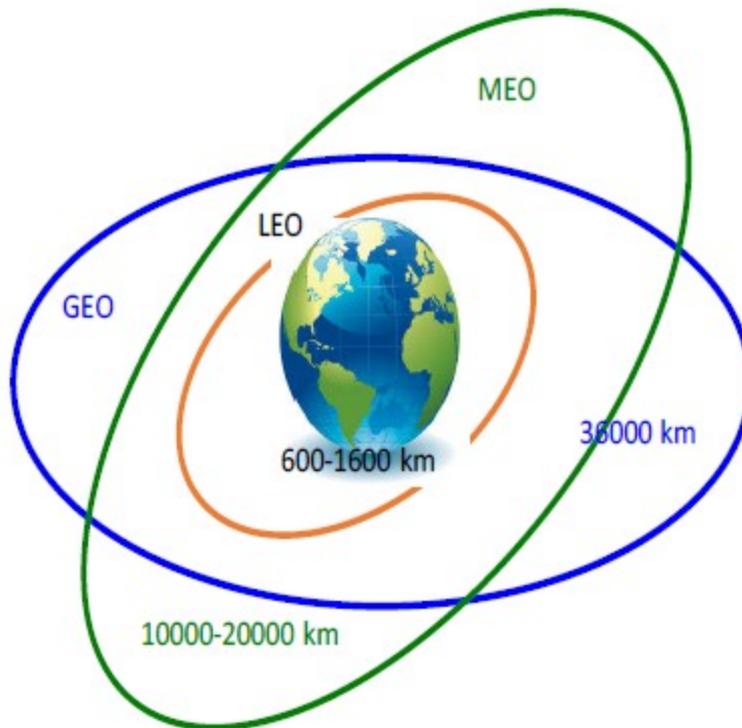


*Les ceintures de Van Allen*

Ces zones définissent 4 régions principales de mise en orbite des satellites, à savoir :

- ✚ **La zone LEO** (Low Earth Orbit) : entre la fin de l'atmosphère et la première ceinture de Van Allen, de 400 Km à 1500 Km d'altitude.
- ✚ **La zone MEO** (Medium Earth Orbit) : entre les deux ceintures de Van Allen, de 5000 Km à 13000 Km d'altitude.
- ✚ **La zone HEO** (High Earth Orbit ou Highly Elliptical Orbit) : dont l'apogée est au delà des ceintures de Van Allen, mais qui dans le cadre des orbites elliptiques, embrasse une ou plusieurs zones précédentes.
- ✚ **La zone GEO** (Geostationary Earth Orbit) : qui pourrait se voir comme un cas particulier de HEO.

## La navigation radioélectrique – généralités



Les principales orbites terrestres.

L'orbite d'un satellite ne sera circulaire que si son injection s'effectue d'une part parallèlement à la Terre, et d'autre part, à la bonne altitude pour une vitesse donnée. On démontre que si ces conditions ne sont pas respectées, l'orbite serait une ellipse. Si la vitesse communiquée au mobile est inférieure à la vitesse parabolique, mais supérieure à la vitesse circulaire, le mobile décrira une orbite elliptique comprise entre la parabole et le cercle. Si la mise en orbite se fait parallèlement à l'horizontale locale terrestre, le point d'injection sera le périhélie de l'orbite (le point de la trajectoire le plus proche du centre de la Terre). Le centre de la Terre sera l'un des foyers de cette ellipse. On notera que si la vitesse communiquée est inférieure à la vitesse circulaire, le mobile parcourt alors une ellipse intérieure au cercle, dont le point d'injection est l'apogée (point de la trajectoire le plus éloigné du centre de la Terre). Le mobile pourra alors rencontrer la Terre dès sa première révolution si sa vitesse est insuffisante.

### **1.5.3.1-Les orbites circulaires**

Le centre de la trajectoire est confondu avec celui de la Terre. Le satellite d'une orbite circulaire est toujours à la même vitesse et à la même distance par rapport à la Terre. Dans ce cas, la notion de périhélie et d'apogée n'existe plus.

### **1.5.3.2 L'orbite géostationnaire GEO**

Un satellite géosynchrone aura une période de révolution égale à la période sidérale de rotation de la Terre, soit  $T = 23 \text{ h } 56 \text{ mn } 4 \text{ s}$ , l'excentricité et l'inclinaison du plan de l'orbite étant quelconques. Un satellite géostationnaire, qui a la propriété de rester fixe par rapport à un observateur terrestre, aura une orbite équatoriale, circulaire et synchrone avec la rotation

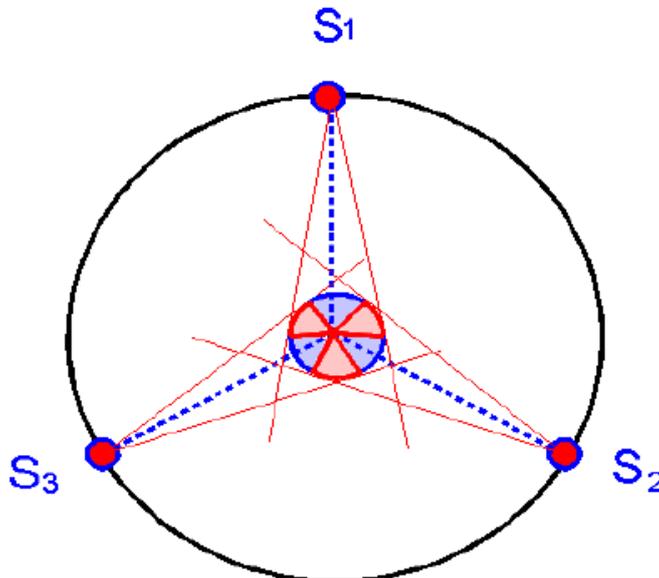
## La navigation radioélectrique – généralités

terrestre. On notera que les autres types de satellites sont appelés « satellite à défilement ». La 3<sup>e</sup> loi de Kepler montre que le rayon de l'orbite circulaire doit alors être de l'ordre de 35800 Km (35786 Km exactement).



*Satellite en orbite GEO*

Un satellite géostationnaire est donc géosynchrone, la réciproque n'est pas toujours vérifiée. Sa position est déterminée par la longitude du point sub-satellite, appelée *longitude de stationnement* du satellite géostationnaire. Il suffit dès lors de trois satellites géostationnaires disposés à 120° pour couvrir quasiment toute la terre, à part une petite zone polaire située aux extrêmes comme le montre la figure suivante.



*En rouge : zones couvertes par deux satellites simultanément.*

*En bleu : zones couvertes par un seul satellite.*

### Couverture quasi-totale de la Terre par trois satellites GEO

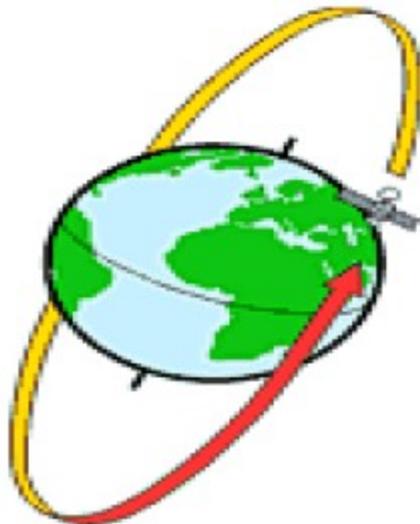
On comprend facilement l'intérêt d'un satellite géostationnaire : il vise toujours les mêmes régions, avec la même géométrie de vue. Pour les satellites de communication et ceux d'observation de la Terre, ces points sont primordiaux. Cette position permet par exemple à un satellite météorologique de faire un cliché, avec une image toutes les 15 minutes, en temps

## La navigation radioélectrique – généralités

réel, de l'évolution des formations nuageuses [6], [7]. L'avantage pour ces satellites, c'est que l'on peut utiliser des antennes fixes au sol. Ils présentent cependant l'inconvénient d'être situés au bas sur l'horizon lorsqu'ils couvrent des zones éloignées se rapprochant des pôles. De ce fait, les signaux à transmettre parcourant une plus grande distance, subissent des atténuations plus importantes, et mettent plus de temps à arriver sur terre (un quart de seconde en plus). Cette orbite est utilisée par des satellites météorologiques et par des satellites de télécommunication. A titre d'exemple, on cite les satellites : METEOSAT (France), GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites, USA), GMS (Japon) et INSAT (Inde). Les inconvénients apparaissent tout aussi clairement : un satellite géostationnaire ne voit pas toute la Terre, ni en longitude (c'est pour cela qu'il faut en placer plusieurs, écartés en longitude), ni en latitude (l'observation des régions situées au-delà de  $55^\circ$  n'est pas réellement exploitable).

### 1.5.3.3 Orbite circulaire polaire

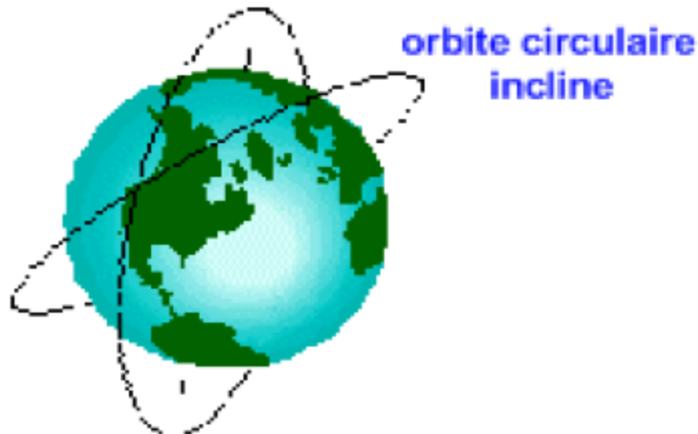
Comme leur nom l'indique, ces satellites passent au-dessus des deux pôles, et peuvent au bout d'un certain temps couvrir toute la surface du globe. Leur domaine d'application se situe surtout dans l'observation ou la communication différée. A titre d'exemple, on cite le satellite d'observation français SPOT, situé à 800 km d'altitude et qui permet de couvrir toute la surface du globe en 21 jours. Une esquisse de l'orbite circulaire polaire est donnée sur la figure ci-après.



*Orbite circulaire polaire*

### 1.5.3.4 Orbite circulaire inclinée

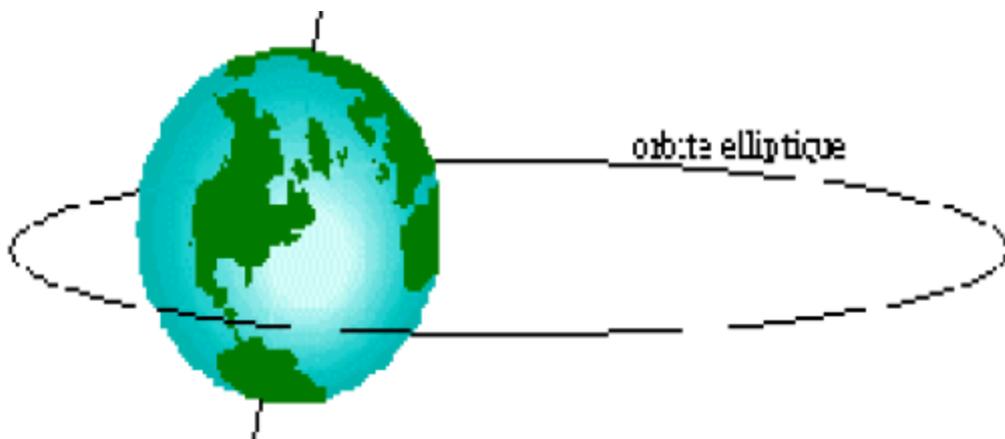
Ce type de satellite ne permet pas de couvrir en totalité toute la surface du globe, puisque la plus haute latitude desservie correspond à l'inclinaison du plan orbital. A titre d'exemple, le projet Global Star, a lancé 48 satellites en orbite basse circulaire inclinée à  $50^\circ$  par rapport à l'équateur, dans le but d'assurer des communications mobiles depuis l'essentiel de la surface terrestre. Cette fois-ci encore, on donne sur la figure suivante, une représentation de ce type d'orbite.



*Orbite circulaire inclinée*

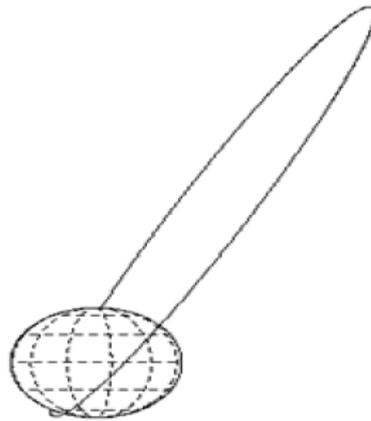
### 1.5.3.5 Orbite elliptique

Les satellites en orbite elliptique ont une vitesse très variable en fonction de l'endroit où ils se placent sur l'ellipse. Ils n'occupent donc pas une position fixe par rapport à la terre, ce qui suppose l'utilisation des antennes terrestres mobiles pour suivre ces satellites, contrairement aux satellites géostationnaires. Par contre, ils possèdent l'avantage de pouvoir desservir plus aisément des zones éloignées de l'équateur sous un angle assez élevé, ce qui implique que les signaux à transmettre traversent une couche atmosphérique plus étroite. Ce type d'orbite est illustré par la figure qui suit.



*Orbite elliptique*

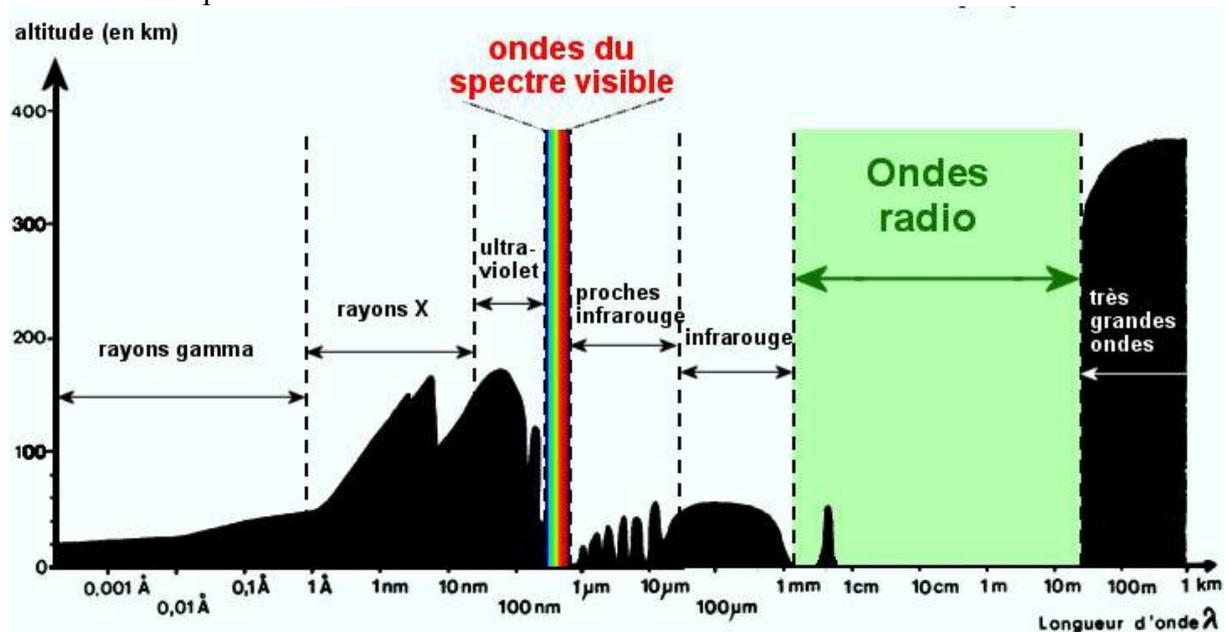
Les satellites de la série MOLNYA (figure I-15), qui assure des télécommunications pour la Sibérie, incarnent parfaitement ce type d'orbite. L'orbite d'un satellite de ce type est inclinée de  $63^\circ$  par rapport au plan équatorial, de telle sorte que sa partie lente, correspondant aux deux tiers de sa période de 12 heures, se situe au quasi vertical du territoire.



*L'orbite Molnya*

### 1.5.4 Les bandes de fréquences

Comme le soleil en émet en permanence, nous sommes capable d'émettre des rayonnements électromagnétiques qui sont des déplacements de photons suivant une certaine vitesse d'oscillation, c'est à dire un ensemble d'ondes électromagnétiques qui ont chacune une certaine fréquence. Ci-dessous nous pouvons voir que seuls les ondes visibles et les ondes radio (utilisées entre autres pour les communications satellites) traversent l'atmosphère de la Terre sans être perturbées.



Plus la longueur d'onde est grande, plus elle va traverser les objets et les murs, comme les basses et infra basses dans le cas d'ondes sonores. Les ondes électromagnétiques et les ondes sonores sont deux types d'ondes complètement différents, les ondes électromagnétiques n'ont pas besoin de matière (air) pour se déplacer, c'est pourquoi elles traversent l'espace, les ondes sonores elles ont besoin de matière tel l'air, l'eau ou un corps solide, c'est pourquoi il n'y a aucun son dans l'espace. Dans le cas des ondes électromagnétiques, plus la fréquence est élevée, cas des ondes radio et plus particulièrement des ondes SHF, plus ces ondes seront absorbées par les matériaux qui s'interposent sur leur chemin.

## La navigation radioélectrique – généralités

On appelle supra-haute fréquence (SHF) la bande de radiofréquences qui s'étend de 3GHz à 30GHz (longueur d'onde de 10 cm à 1 cm). On les appelle aussi hyperfréquences. Et on peut y extraire deux intervalles de fréquences utilisés fréquemment par les satellites.

- La bande Ku (Kurz-unten) est la partie du spectre électromagnétique définie par la bande de fréquence micro-ondes de 10,7 GHz à 12,75 GHz en réception et de 14 à 14,5 en émission. C'est la plus employées de toutes les bandes de fréquences, et la plus répandue en Europe, du fait de la petite taille des paraboles nécessaires à sa réception.
- La bande C est définie entre les fréquences 3,4 à 4,2 GHz en réception et de 5,725 à 7,075GHz en émission. Elle est utilisée particulièrement sur les zones tropicales car ces fréquences sont moins sensibles à la pluie que les fréquences de la bande Ku.
- La bande Ka (Kurtz-above) est une gamme de fréquences, comprise entre la bande K et la bande Q, utilisée notamment pour l'internet par satellite. Pour les télécommunications spatiales, elle s'étend en émission de 27,5 à 31 GHz et en réception, de 17,3 à 21.2 GHz. Les paraboles nécessaires pour recevoir les signaux sont encore plus petites que celles utilisées pour la bande Ku (certaines antennes Ka mesurent 20cm de diamètre) Cette bande de fréquence est utilisé par le satellite KA-SAT, précurseur de l'internet haut débit par satellite. En effet, KA-SAT a pour seul but de proposer une connexion haut débit à Internet aux 11 millions de foyers et entreprises européens victimes de la fracture numérique. Le satellite dispose d'un débit total de 70 Gbit/s. De quoi connecter un million de foyers en haut débit. Cette performance est permise par la technologie multi-faisceaux. Les fréquences allouées au satellite sont du coup réutilisées par chacun des 80 faisceaux. De plus, la zone de couverture de chaque faisceau est limitée à une surface équivalente à la Belgique ou à l'Irlande. Au lieu de couvrir toute l'Europe d'un seul coup comme le font les anciennes technologies.
- La bande L est principalement destinée aux satellites en orbite basse. Les bandes de fréquences de la bande L ont été définies par la conférence mondiale (CAMR) de 1992 pour le service mobile par satellite.
- La bande X est réservée aux applications militaires.

| <b>Bande</b> | <b>Fréquences</b> | <b>Services</b>   |
|--------------|-------------------|---|
| <b>L</b>     | <b>1-2 GHz</b>    | <b>Communications avec les mobiles</b>                      |
| <b>S</b>     | <b>2-3 GHz</b>    | <b>Communications avec les mobiles</b>                      |
| <b>C</b>     | <b>4-6 GHz</b>    | <b>Communications civiles internationales et nationales</b> |
| <b>X</b>     | <b>7-8 GHz</b>    | <b>Communications militaires</b>                            |
| <b>Ku</b>    | <b>11-14 GHz</b>  | <b>Communications civiles internationales et nationales</b> |
| <b>Ka</b>    | <b>20-30 GHz</b>  | <b>Nouveaux systèmes d'accès au réseau large bande</b>      |
| <b>EHF</b>   | <b>21-45 GHz</b>  | <b>Communications militaires</b>                            |

### 1.5.5 Calcul de la vitesse du satellite

On peut facilement obtenir la vitesse du satellite, comme pour une planète :

$$v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}$$

Pour le travail sur les satellites de la terre on va travailler dans le référentiel géocentrique, et cette fois ci l'astre attracteur est la terre (masse :  $M_T$  ; rayon :  $R_T$ ).

On a également la période de révolution du satellite :

$$T = \frac{2\pi(R_T + h)}{v} \Leftrightarrow T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}$$

#### 1.5.5.1 Calcul de l'altitude de l'orbite géostationnaire

Les satellites géostationnaire sont fixes (*stationnaire*) par rapport à la terre (*géo*). Pour que ce soit le cas, il faut que

- ✚ Ils décrivent un mouvement circulaire uniforme dans un plan perpendiculaire à l'axe des pôles terrestres. Ils évoluent donc dans un plan contenant l'équateur.
- ✚ Qu'ils tournent dans le même sens que la terre autour de l'axe des ses pôles.
- ✚ Leur période de révolution soit exactement égale à la période de rotation de la terre autour de l'axe de ces pôles (24H environ).

On peut calculer l'altitude à laquelle le satellite doit se situer pour satis faire cette dernière condition :

- ✚ Utilisons la 3ème loi de Kepler applicable à ce satellite

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM_T} \text{ avec } r = R_T + h$$

- ✚ On calcul

$$r = \sqrt[3]{\frac{GM_T T^2}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{6.67 * 10^{-11} \times 5.976 * 10^{24} * (24 * 3600)^2}{4\pi^2}} = 42.2 * 10^6 \text{ m}$$

- ✚ Donc l'altitude est :  $h = 42.2 * 10^6 - 6.4 * 10^6 = 36 * 10^6 \text{ m} = \underline{\underline{36\,000 \text{ Km}}}$

### 1.6 Température de bruit du récepteur

A la réception, trois sources de bruit principales perturbent le signal :

1. le **bruit thermique**, celui de la résistance d'entrée de l'amplificateur de récepteur, dont la puissance dépend directement de la température ambiante  $T_a$  ;
2. le **bruit propre** du récepteur, exprimé par la température du bruit propre  $\Delta T_{NR}$  ;
3. le **bruit extérieur** capté par l'antenne, dont la contribution en puissance est exprimée par une élévation fictive de la température de bruit de l'antenne  $\Delta T_{NA}$ .

## La navigation radioélectrique – généralités

La puissance totale de bruit  $P_{NRx}$  est donnée par :

$$P_{NRx} = k T_N B$$

Avec :

$$T_N = T_a + \Delta T_{NR} + \Delta T_{NA}$$

### 9. Le bilan de liaison

Lors de la définition d'un système de communications avec un satellite, il est nécessaire de déterminer la taille des antennes d'émission et de réception, la puissance d'émission et le rapport signal à bruit nécessaire pour pouvoir effectuer la transmission avec la qualité requise. Effectuer cet ensemble de déterminations constitue le **Bilan de Liaison**.

Considérons une antenne omnidirectionnelle, dite isotrope (isotropic Antenna) rayonnant  $P_T$  watts. La densité de puissance à une distance  $d$  de l'antenne qui rayonne dans une sphère de surface  $4\pi d^2$  est alors égale à :

$$\frac{P_T}{4\pi d^2} \text{ Watts / m}^2$$

Supposons maintenant que l'antenne est directive est rayonne principalement dans une direction définie par un azimut et une élévation  $(\theta_0, \varphi_0)$  par rapport à l'antenne omnidirectionnelle la densité de puissance dans cette direction sera multipliée par un coefficient  $G_T(\theta_0, \varphi_0)$  qui représente le gain de l'antenne dans cette direction.

Pour simplifier les écritures, supposons que l'on s'intéresse dans la suite à cette direction privilégiée  $(\theta_0, \varphi_0)$  et omettons de le préciser dans l'expression du gain  $G_T$ . La densité de puissance à une distance  $d$  est alors égale à :

$$\frac{G_T P_T}{4\pi d^2} \text{ Watts / m}^2$$

Le produit  $G_T P_T$  est appelé la Puissance Isotrope Rayonnée Effective : PIRE (Effective Isotropic Radiated Power : EIRP). On rappelle que la PIRE est la puissance rayonnée par rapport à une antenne isotrope pour laquelle  $G_T = 1$ .

## La navigation radioélectrique – généralités

Une antenne de réception dirigée dans la direction de rayonnement principal de l'antenne d'émission va recevoir une fraction de la puissance rayonnée. Cette fraction est proportionnelle à la surface de l'antenne de réception et à son orientation par rapport à la direction de propagation de la puissance émise. En supposant les antennes d'émission et de réception parfaitement alignées, la puissance reçue s'écrit :

$$P_R = \frac{P_T G_T A_R}{4\pi d^2}$$

Le terme  $A_R$  est l'aire effective de l'antenne de réception. Pour une antenne parabolique de diamètre  $D$ , on a :

$$A_R = \eta \frac{\pi D^2}{4}$$

Dans cette expression le coefficient  $\eta$  représente l'efficacité de l'antenne. Il varie généralement entre 50% et 70%.

Le gain d'une antenne parabolique de diamètre  $D$  s'exprime quant à lui par l'équation :

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

L'aire effective et le gain sont ainsi reliés par l'équation suivante :

$$A_R = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi}$$

La puissance reçue par l'antenne s'écrit finalement :

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{\left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2}$$

On introduit le facteur  $L_s = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$  qui est appelé la perte en espace libre (free space path loss).

La puissance reçue s'écrit alors :

## La navigation radioélectrique – généralités

$$P_R = P_T G_T G_R L_s$$

En prenant en compte des pertes de propagation atmosphérique sous la forme d'un terme  $L_a$ , la puissance reçue devient :

$$P_R = P_T G_T G_R L_s L_a$$

Prise en dB cette expression devient :

$$(P_R)_{dB} = (P_T)_{dB} + (G_T)_{dB} + (G_R)_{dB} + (L_s)_{dB} + (L_a)_{dB}$$

Pour terminer le bilan de liaison il faut prendre en compte le bruit additif du canal et du récepteur. Le bruit thermique est défini par sa densité monolatérale de puissance :

$$N_0 = kT \quad [\text{W/Hz}]$$

Avec :  $k$  la constante de Boltzmann :  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  et  $T$  température de bruit en Kelvin.

La puissance de bruit  $P_n$  dans une bande de fréquence  $W$  est alors égale à :

$$P_n = N_0 W$$

On introduisant l'énergie par bit  $E_b$  dans la bande de réception et le débit binaire  $R_b$ , il vient:

$$P_R = E_b R_b \quad [\text{J/bit}][\text{bit/s}]$$

Le rapport  $\frac{E_b}{N_0}$  est alors égal à :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{R_b} \frac{P_R}{N_0}$$

Pour obtenir un taux d'erreurs spécifié lors de la démodulation, il est nécessaire d'avoir un rapport  $\frac{E_b}{N_0}$  requis, que l'on note  $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req}$ .

Il faut donc ajuster les puissances d'émission et les tailles des antennes afin que :

$$\frac{P_R}{N_0} = R_b \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req}$$

## La navigation radioélectrique – généralités

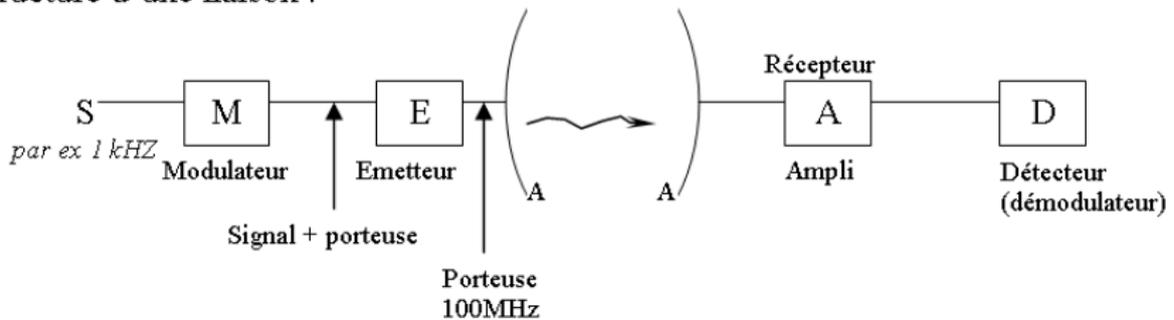
En remplaçant  $P_R$  par sa valeur ainsi que  $N_0$  dans cette expression, on obtient :

$$\frac{P_R}{N_0} = \frac{P_T G_T L_s L_a G_R}{k T}$$

On voit alors faire apparaître le terme  $\frac{G_R}{T}$  qui est une caractéristique très importante pour qualifier la chaîne de réception d'un système satellitaire.

**Remarque :** cet exposé du bilan de liaison a supposé une chaîne de réception parfaite sans dégradation du rapport signal sur bruit. Une chaîne « réelle » sera caractérisée par son facteur de bruit qu'il faudra donc soustraire au rapport signal sur bruit idéal.

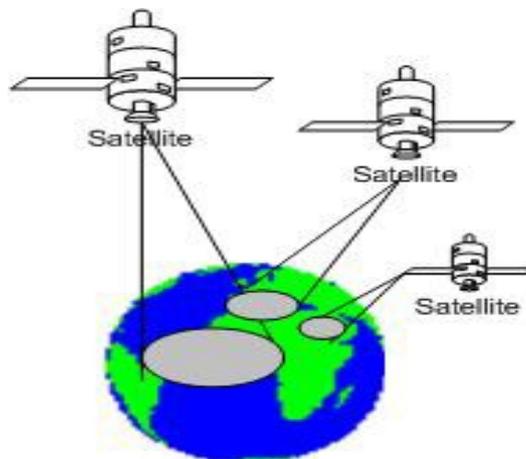
Structure d'une liaison :



### 1.7. Les contraintes des solutions satellites

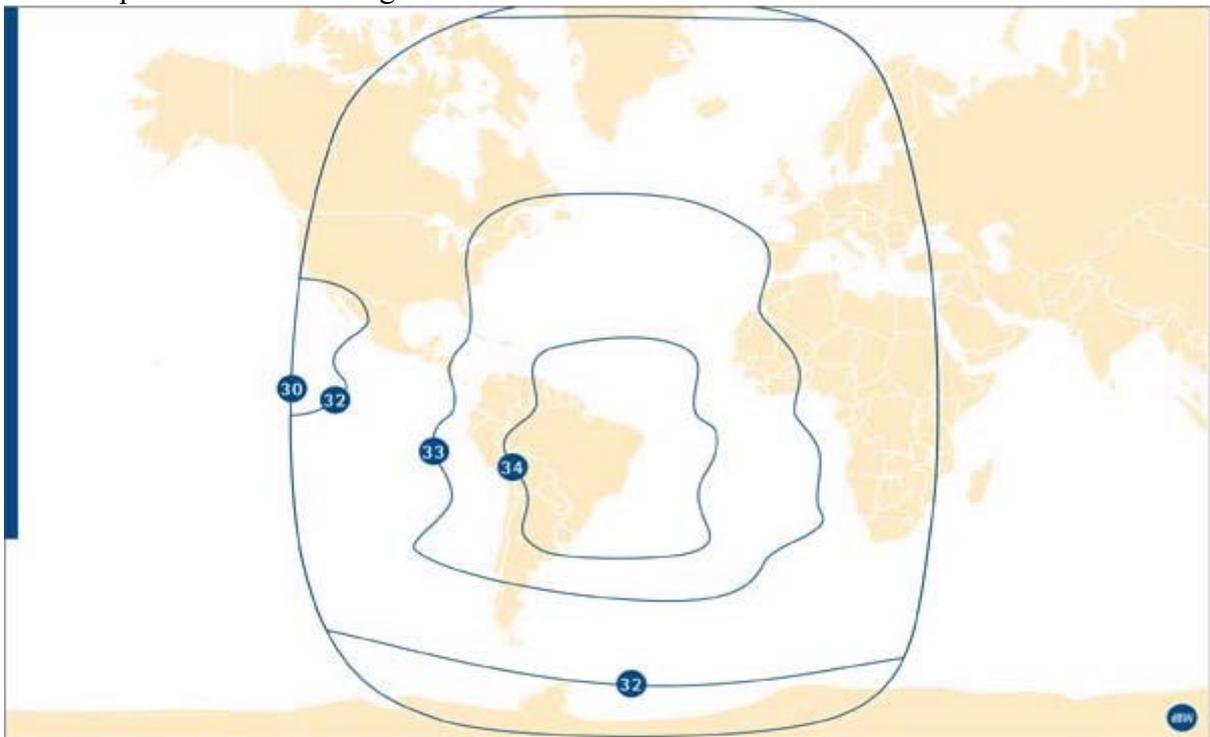
Comme nous l'avons précédemment vu les satellites sont largement définis par leur orbite qui fixe des contraintes particulières (types de matériels, gestion de la position du satellite) pour la gestion des transmissions. Nous allons maintenant nous intéresser à d'autres contraintes qui sont aussi liées aux orbites mais qui peuvent être contournées par l'implantation de gestions ou d'architectures adaptées. Le choix final sera fixé par le rapport entre le coût et le respect des besoins.

#### 1.7.1 La couverture



## La navigation radioélectrique – généralités

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. Bien qu'évident ce critère reste un élément majeur dans le choix et l'élaboration d'une solution satellite. En effet plusieurs systèmes de satellites peuvent couvrir la même superficie mais chacun se distinguera par un ensemble de caractéristiques particulières. Parmi elles, la plus déterminante est le nombre de satellites composant le système et la méthode utilisée pour les gérer. En effet, la couverture d'un satellite géostationnaire peut être atteinte par une constellation de satellites à plus basse altitude mais il faudra alors s'intéresser aux moyens de rendre ce réseau homogène sur l'ensemble de la zone. Pour cela deux solutions existent soit les satellites communiquent entre eux soit un relais terrestres permet de les synchroniser. Ce choix doit aussi tenir compte du nombres de stations terrestres, de leur densité et des évolutions futures. Une société multinationale avec de gros débit aura peut être plus intérêt à investir et privilégié une solution géostationnaire pour une couverture vaste plutôt que de favoriser une zone du monde avec une solution autre. On peut apprécié ici la grande étendue couverte par un seul satellite géostationnaire : Couverture en bande C de PAS-1R.



### **I.7.2 La gestion de la bande passante (hand over)**

Pour diffuser les données, qu'elles soient numériques ou analogiques, les stations terrestres accèdent aux satellites par l'intermédiaire de fréquences spécifiques. En effet l'acquisition d'un support de transmission satellite est en fait la location d'une bande de fréquences qui sera consacrée et partagées par les différentes stations de ce réseau satellite. Sans politique d'accès pour accéder au support, les signaux transmis par une station se confondraient avec d'autres signaux provenant de stations différentes. Les signaux reçus seraient alors incompréhensibles et impossibles à décoder ; cela entraînerait leur perte et il serait nécessaire de les retransmettre. De plus, il n'est pas envisageable d'allouer un canal pour chaque station ; ce système serait beaucoup trop coûteux. La mise en place d'une politique d'accès aux canaux satellites a donc été réalisée pour dans un premier temps, permettre à plusieurs stations d'accéder à un même canal de transmission, et dans un deuxième temps, pour avoir une exploitation maximale des transpondeurs du satellite tout en

## La navigation radioélectrique – généralités

garantissant qu'il y ait le moins de collisions possibles. (Il est à garder à l'esprit qu'une solution satellite demande un fort investissement, ce médium doit donc être optimisé au maximum) Ce partage de la bande passante est aussi soumis à certaines prérogatives liées aux applications, aux particularités intrinsèques des types des satellites et à leur nombre. Le cas le plus simple est celui du satellite géostationnaire seul. En effet le partage de la bande est réalisé ici de façon unique et les calculs pour la répartition des canaux ne tient pas en compte les baisses de puissances dues aux déplacements du satellite par rapport aux stations. En effet une station utilisera toujours le même satellite et son antenne aura une position fixe. A contrario lorsque l'on utilise plusieurs satellites ou lorsque ceux-ci sont mobiles il faut intégrer les positions des stations par rapports aux différents satellites pour attribuer les canaux de manière optimale. Ce basculement de canal intra satellite ou inter satellites s'appelle le hand over, sa gestion est déterminante dans l'utilisation d'une solution satellite. Nous allons présenter brièvement ces concepts.

- Le hand over intra satellite : Il correspond à une réattribution de canal pour une ou plusieurs stations au sein du même satellite. Cela est réalisé pour optimiser les échanges lorsqu'un canal est peu utilisé ou très perturbé par exemple, cette technique peut aussi être utilisée pour la répartition de charge.
- Le hand over inter satellite : Cette situation est directement liée à la mobilité du satellite ou des stations. Le changement de canal pour la ou les stations est effectué dans ce cas lorsqu'une transmission est basculée sur un autre satellite. Pour réaliser ces attributions de canaux on peut distinguer plusieurs approches : Le Soft Hand over : « mou » dans ce cas le basculement d'un premier canal vers un second (sur le même satellite ou non ) passe par un état de transition où la transmission est maintenue sur les deux canaux avant de se fixer sur le nouveau. Le Hard hand over (« dur ») quant à lui fait basculer instantanément la transmission d'un canal à l'autre. Ces techniques dépendent des contraintes de temps et d'intégrité de nos besoins.

### **I.7.3 Le délai**

Le délai d'un système par satellite géostationnaire 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. Certaines applications de par leur nature (les applications temps réel par exemple) ne pourront donc pas être supportées par toutes les structures satellites ou du moins pas avec les mêmes performances. Le délai de propagation ne cause pas de problèmes insurmontables dans la conception et l'exploitation d'un réseau informatique par satellite, sauf dans les cas où l'on se contente de substituer un support de transmission à un autre. D'autant plus que ce délai, même s'il paraît important au vu d'autres technologies, peut être tout à fait acceptable pour certaines applications, pour les transferts de données par exemple qui privilégient la fiabilité et les débits. La réponse aux problèmes occasionnés par le délai au sein des réseaux informatiques par satellite est fournie par l'emploi de protocoles perfectionnés ou de compensateurs de temps de propagation qui envoient un accusé de réception à l'échelle locale avant la transmission des données par satellite, ce qui élimine le retard dans la prise de contact des protocoles. La nouvelle génération des stations terrestres à très petite ouverture d'antenne (VSAT) et certains multiplexeurs comportent des compensateurs de délai et des convertisseurs de protocoles, appelés assembleurs désassembleurs de paquets, qui assurent l'établissement de la liaison à l'échelle locale et modifient les protocoles pour répondre aux exigences du satellite.

## 1.8 Les différentes catégories de localisation

- La localisation descriptive : La localisation descriptive est toujours liée à des objets géographiques naturels comme les territoires, les montagnes, les lacs ( . . . ), ou à des objets géographiques artificiels comme les frontières, les villes, les pays, les routes, les bâtiments ou l'intérieur d'un bâtiment. Ces structures sont référencées par des descriptions, qui peuvent être soit des noms, des identifiants, ou des numéros, d'où le nom de cette catégorie de localisation. Ainsi, la localisation descriptive est un concept fondamental de notre vie quotidienne, qui est utilisée pour des rendez-vous organisés, pour la navigation ou la fourniture de biens et des courriers.
- La localisation basée sur le réseau : La localisation basée sur le réseau, de l'anglais Network location , se réfère à la topologie d'un réseau de communication, par exemple, les systèmes Internet ou cellulaires tels que le Global System for Mobile Communications (GSM) ou l'Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Ces réseaux sont composés de plusieurs réseaux locaux, parfois appelés sous-réseaux, reliés entre eux par une topologie hiérarchique de circuits interurbains. La fourniture de services dans les réseaux suppose que la position de l'utilisateur de l'appareil est connue par rapport à la topologie du réseau. Cette localisation est obtenue à partir des adresses de réseau contenant des informations de routage, en association avec les services d'annuaire, les numéros de cartographie, les identificateurs ou les noms disponibles sur l'adresse réseau. Par exemple avec l'Internet, la position du réseau se rapporte au réseau local. De ce fait, la position est obtenue au moyen de l'adresse IP de l'utilisateur sur le réseau. Dans les réseaux de téléphonie mobile, une localisation réseau est reliée à une station de base à laquelle un terminal mobile est attaché.
- La localisation spatiale : La localisation spatiale cible un unique point dans l'espace euclidien. Un autre terme, plus intuitive pour la localisation spatiale est donc la position. Elle est généralement exprimée au moyen de coordonnées en deux ou trois dimensions, qui sont données par les composantes d'un vecteur, chacune d'elles permettant de fixer la position en une dimension. Contrairement à la localisation descriptive, les positions de la localisation spatiale ne sont pas utilisées dans notre vie quotidienne, parce que la préférence usuelle est de s'orienter par rapport aux objets géographiques en lieu et place des coordonnées. Toutefois, la localisation spatiale est indispensable pour les applications professionnelles comme l'aviation ou l'expédition, qui dépendent de la disponibilité des informations de localisation qui doivent être très précises et exactes. La localisation spatiale est basée sur des systèmes de référence bien définis qui subdivisent une zone géographique, en des unités de même dimension (même forme et même taille). Un élément important d'un système de référence spatiale est le repère qui permet de représenter une certaine position spatiale par les coordonnées d'un vecteur, lesquelles coordonnées se réfèrent à la position de l'objet mesurée soit par une distance ou soit par un angle. Cette mesure peut s'effectuer par rapport à deux ou trois axes, selon que la position est fixée sur un plan ou dans l'espace. En géométrie, un repère appartient à la classe des repères cartésien ou ellipsoïdal. Un repère est caractérisé de manière unique par son origine, son échelle, et son orientation. De tout ce qui précède, il s'avère donc nécessaire de bien définir au préalable un repère pour une interprétation cohérente des informations de localisation.

## 1.9 Le support de transmission

L'élément fondamental dans tout système de localisation est le type de signal utilisé pour se localiser. Plusieurs technologies sont utilisées par les systèmes de localisation. Parmi ces technologies, il y a les technologies basées sur l'infrarouge, le signal optique, le signal ultrasonore et le signal radio fréquentiel (Radio Frequency (RF)). Parmi toutes ces technologies, la plus répandue est celle qui utilise le signal RF. Elle traverse non seulement les obstacles mais permet également de couvrir une grande zone contrairement aux trois autres. Ce sont quelques unes de ces caractéristiques qui font que le système que nous proposons est basé sur cette technologie.

## 1.10 Les éléments du processus de localisation

Une notion qu'on rencontre souvent dans la littérature pour parler aussi de localisation est le positionnement (en anglais "positioning"). 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 : la localisation exogène et localisation endogène. La première catégorie de systèmes sont les systèmes de localisation basés sur le principe des systèmes en réseau (Network-based systems) dans lequel la position du mobile est déterminée par une autre infrastructure. Cette catégorie regroupe également les systèmes qui sont utilisés dans les applications RADAR.



Principe du positionnement exogène.

Dans la catégorie de localisation endogène (positionnement), c'est l'objet qui se localise lui-même à partir des informations émanant de diverses sources (voir figure 1.2). Les systèmes de positionnement sont plus utilisés dans le domaine militaire, dans les applications de sécurité publique par les sapeurs pompiers et dans les systèmes satellitaires (GPS).

## La navigation radioélectrique – généralités



Principe du positionnement endogène.

### **I.11 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.

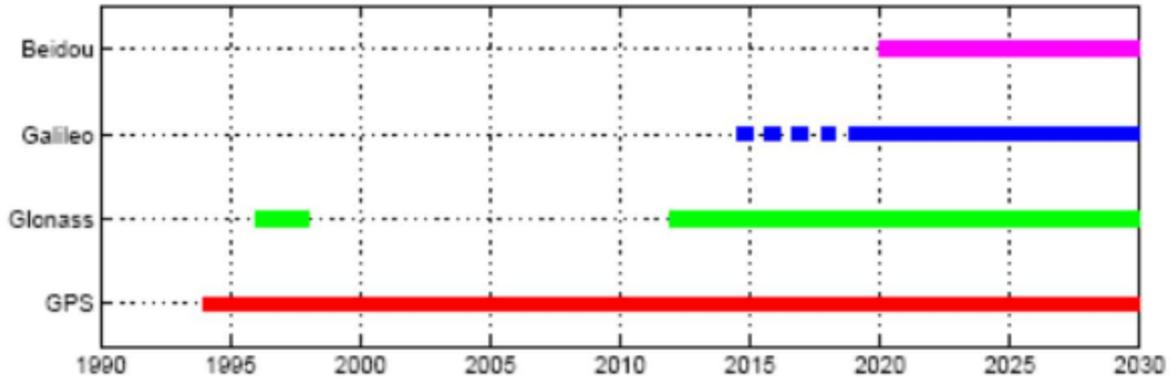
A un GNSS donné est associé :

- Un système de référence et une ellipsoïde de référence, permettant de décrire un point quelconque de l'espace selon ses coordonnées géocentriques et/ou géographiques
- une échelle de temps, permettant de synchroniser 2 horloges différentes (par exemple l'émetteur et le récepteur).

*Il existe actuellement trois services mondiaux de positionnement par satellite:*

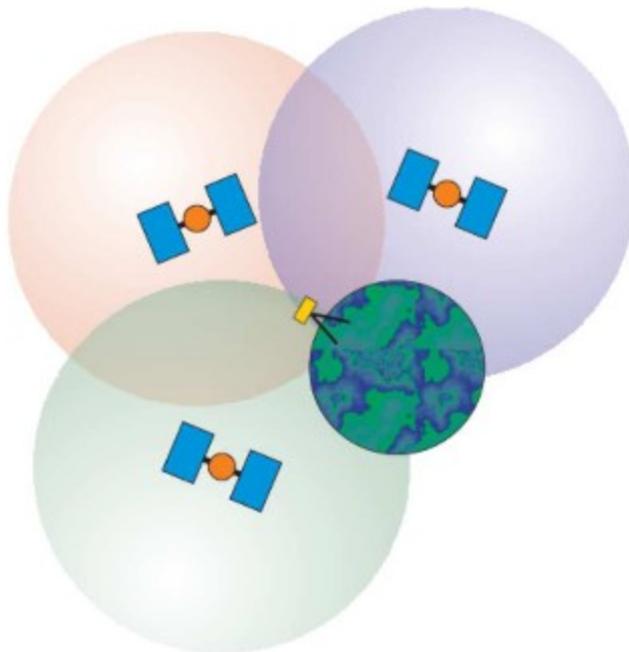
- *Le GPS* (Global Positioning System ou système de positionnement par satellite), dispositif américain mis en service depuis 1978 et graduellement amélioré. Jusqu'en 2007, seul GNSS opérationnel. Le système de référence associé au GPS est le WGS-84 (World Geodetic System).
- *GLONASS*, dispositif militaire russe mis en service en 1982
- *GALILEO*, dispositif civil européen mis en service en 2011, et devant être 100% opérationnel en 2019.

## La navigation radioélectrique – généralités



### *Principe de positionnement*

- Le fonctionnement des GNSS repose sur la mesure du temps de propagation du signal électromagnétique (micro-ondes) 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.
- Connaissant la vitesse de propagation de l'onde  $c$  (vitesse de la lumière), on peut calculer la distance  $d$  qui sépare le satellite du récepteur en connaissant la durée de propagation de l'onde  $\Delta t$  que l'onde a mis pour parcourir le trajet ( $d = c \cdot \Delta t$ ).
- La mesure précise de  $\Delta t$  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  $\sim 10^{-6}$  s)
- En pratique, il existe donc une désynchronisation entre satellites et récepteurs noté  $\delta t$ . Dans ce cas on ne parle plus de distance mais de pseudo-distance: mesure indirecte de

## La navigation radioélectrique – généralités

la distance par le repérage de l'instant de réception d'un signal daté à l'émission lorsque les horloges de l'émetteur et du récepteur ne sont pas synchronisées ( $\rho = c \cdot \Delta t + c \cdot \delta t$ ).

- 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 ( $\delta t$ )

Comment 4 mesures imprécises peuvent donner une mesure précise de positionnement?

### **Comment fonctionne la géolocalisation ?**

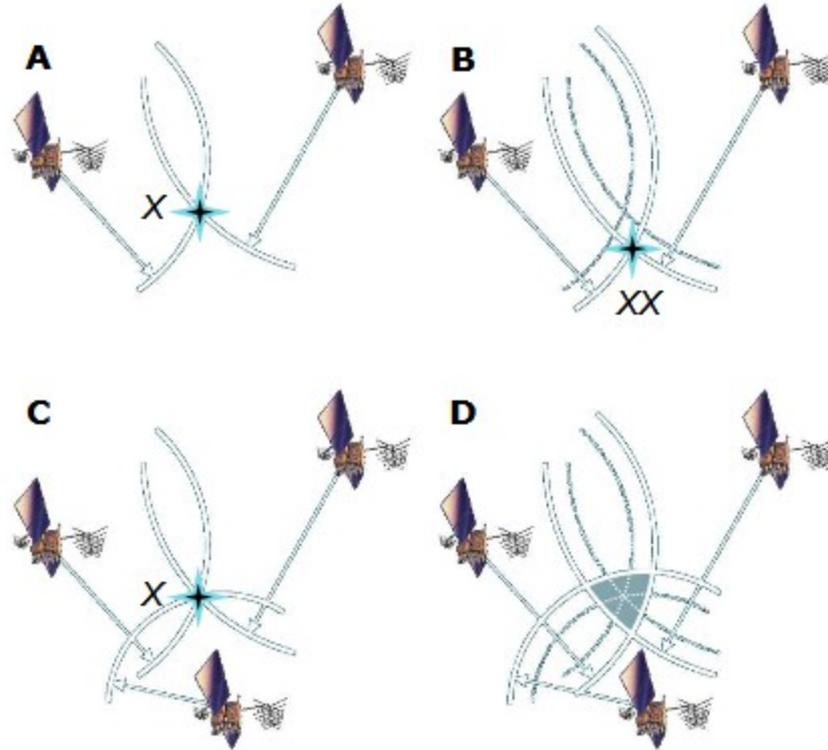
La méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la position d'un point à la surface du globe repose sur le principe de la triangulation. La triangulation permet par exemple de localiser un objet en connaissant la distance qui le sépare de 3 points de référence (**Figure 2**). En 3D il est nécessaire de rajouter une quatrième distance reliant l'objet à un autre point de référence pour connaître l'altitude, on parle alors de multilatération. Extrapolée à la géolocalisation d'un récepteur à la surface du globe, il est possible de définir les coordonnées X, Y et Z d'un point si l'on connaît les distances qui le séparent de quatre satellites. 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.

Raisonnons dans un espace en 2 dimensions:

- A. 2 satellites nécessaires pour repérer un point X;
- B. Erreur commise par le récepteur: point XX;
- C. Si pas d'erreur de mesure, un 3<sup>ème</sup> satellite confirme le résultat des 2 autres (X);
- D. Avec l'erreur de mesure, le 3<sup>ème</sup> satellite permet de définir une zone dans laquelle se trouve le point X. Il suffit de chercher quelle valeur enlever à chaque mesure pour que les arcs de cercles soient coalescent.

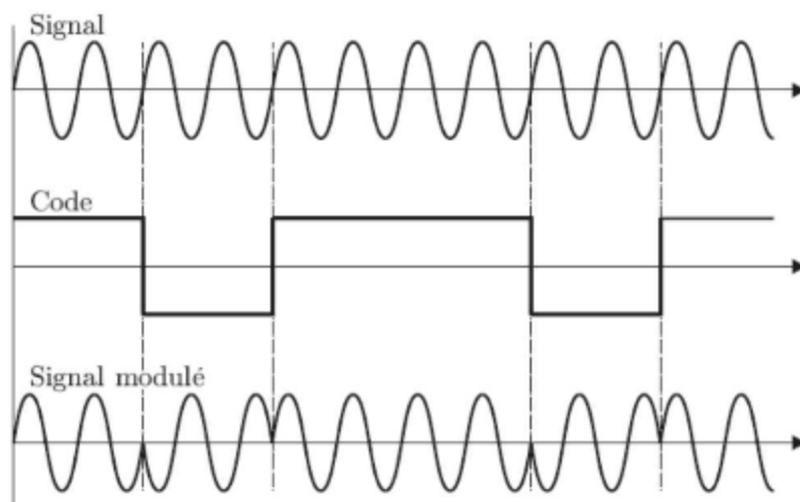
Comme il s'agit d'un espace en 3D, il faut donc recourir à un 4<sup>ème</sup> satellite.

## La navigation radioélectrique – généralités



### Signaux et mesures – Codes pseudo-aléatoires

- Pour déterminer le temps de transmission du signal, le satellite et le récepteur émettent une trame pseudo- aléatoire identique. Ceux sont des séquences d'impulsions ou de bits.
- La transmission de l'information se fait par l'onde porteuse par modulation du signal.
- En GNSS, on parle de modulation du signal par la phase : la modulation consiste à augmenter la phase de  $180^\circ$  à chaque changement de parité du code transporté.



### Calcul des pseudo-distances satellites-récepteur

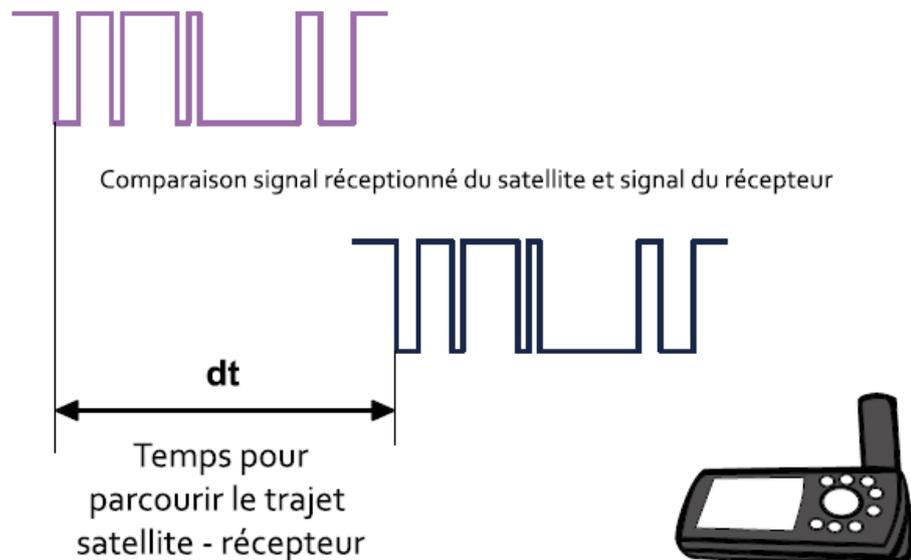
## La navigation radioélectrique – généralités

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 par multilatération de définir les coordonnées X, Y et Z de l'opérateur. La précision de cette méthode peut atteindre au mieux 1 mètre si on lui associe des corrections de positionnement. Des méthodes utilisant la phase de la porteuse et non le code ont été développées pour de nombreuses applications nécessitant des résolutions plus importantes.



Calcul de la distance satellite – Récepteur :  
 $= dt * \text{vitesse de la lumière}$

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



### Utilisation des phases et levée des ambiguïtés

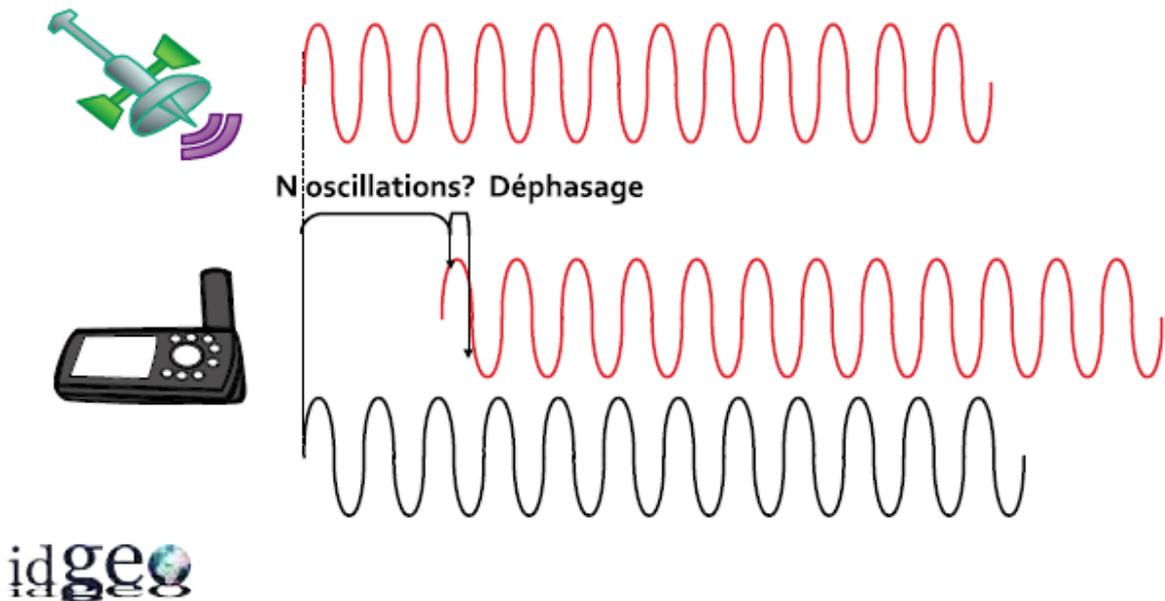
Le calcul de la position se base ici sur la phase de la porteuse L1 (ou L2) et non sur le code C/A comme vu précédemment. En comparant le signal émis et le signal réceptionné le récepteur peut mesurer le décalage de phase, une mesure que permet de calculer la distance séparant l'opérateur du satellite en théorie au millimètre près. La difficulté de cette méthode est liée à l'inconnue, dite « ambiguïté », du nombre d'oscillations qu'il y a eu entre l'émission et la réception du signal (**Figure 4a**). Pour lever cette ambiguïté il existe des méthodes liées à des dispositifs très longs à mettre en oeuvre et qui nécessitent un matériel sophistiqué capable de gérer de lourds algorithmes. Une des méthodes couramment utilisées (**Figure 4b**) consiste à regarder les intersections des fronts d'ondes émis par les satellites avec une surface discoïdale (2D) représentant la position possible de l'opérateur, surface obtenue rapidement à partir d'une géolocalisation classique basée sur les pseudo-distances. Les intersections entre cette surface et les fronts d'ondes des signaux émis par les satellites vont représenter un maillage. Les satellites étant mobiles dans l'espace, la direction des fronts d'ondes va varier dans le temps et le maillage avec. Seule la maille où se situe l'opérateur ne varie pas, c'est là

## La navigation radioélectrique – généralités

que se situe sa position précise. Devant suivre le mouvement des satellites un certain temps, l'initialisation d'un tel dispositif est très longue à mettre en œuvre. Le dispositif est également très coûteux car il fait appel à du matériel très lourd et onéreux mais il permet d'obtenir une géolocalisation millimétrique (en théorie).

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

Déphasage : mesure possible  
Nombre d'oscillations ? Ambiguïtés



### **Système géodésique de référence : le WGS 84**

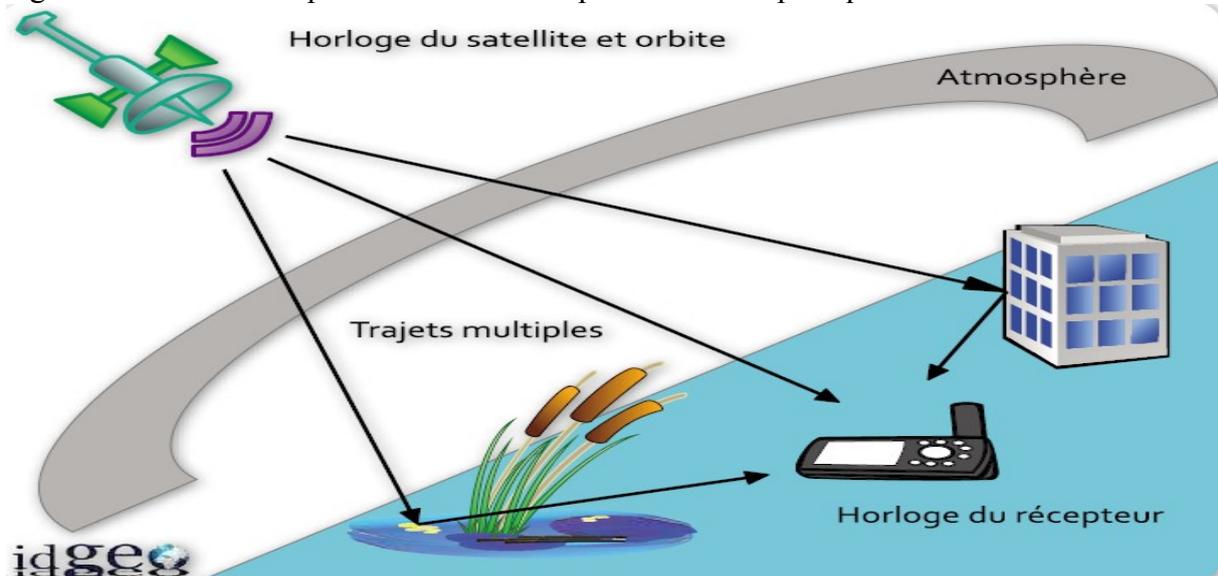
Les coordonnées X, Y et Z sont converties par défaut par le récepteur dans un référentiel global largement utilisé sur terre, le WGS84. Les coordonnées « géographiques » ainsi converties sont mieux connues sous les termes « longitude, latitude et altitude ». La plupart des récepteurs peuvent également convertir les coordonnées vers d'autres référentiels comme le RGF93, le système géodésique officiel français. Concernant l'altitude donnée par le récepteur, il faut prendre en compte que celle-ci est calculée par rapport à l'ellipsoïde du système géodésique et non par rapport au géoïde. Certains récepteurs incluent des modèles de géoïde qui permettent de corriger l'altitude selon la position du récepteur.

### **Sources d'erreur**

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

## La navigation radioélectrique – généralités

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 ( $1 \text{ ns} = 30 \text{ cm}$ ). 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**

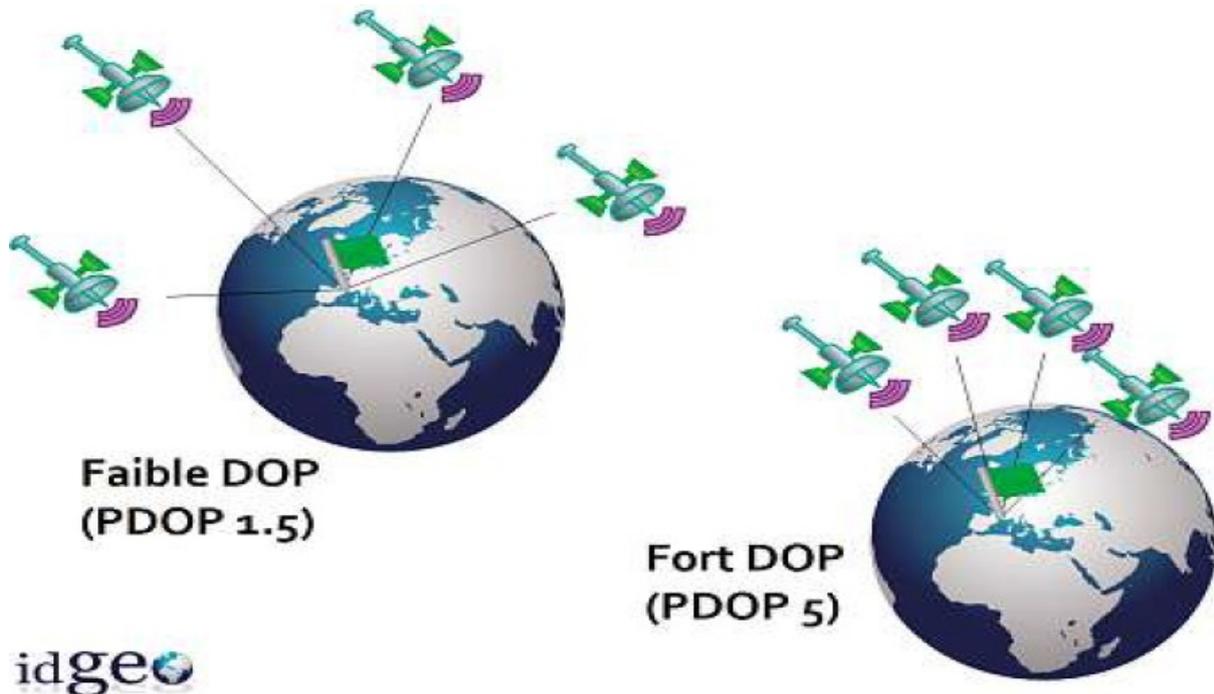
Les ondes ont des vitesses variables selon le milieu qu'elles traversent. Émises des satellites les ondes auront à traverser des couches de l'atmosphère plus ou moins humides, plus ou moins ionisées. La présence d'humidité et les modifications de pression de la troposphère modifient la vitesse et la direction de propagation des ondes radios. 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. Les distances utilisées pour le calcul doivent en quelques sortes être le plus hétérogènes possible afin d'échantillonner au mieux l'espace au-dessus du récepteur. Les effets de la géométrie du

## La navigation radioélectrique – généralités

Le système peut être apprécié par un paramètre : le DOP (dilution of precision). 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 hostile. Ce but est atteint par deux brouillages : la dégradation volontaire de la précision du positionnement et le cryptage du code P. L'accès sélectif ou « selective availability » (SA) est une dégradation de la précision des horloges embarquées à bord des satellites. Cette dégradation volontaire a fonctionné de manière permanente jusqu'en mai 2000. L'anti-leurrage ou « anti spoofing » (AS) est le cryptage du code P (précis) transformé en code dit « Y ». Ce cryptage rend impossible la mesure directe des pseudo-distances basée sur le code P.

### **Réflexion et perte des signaux : trajets multiples et effets « canyons »**

La topographie du milieu et sa structuration peuvent influencer sur la qualité de la géolocalisation. Le relief ou des bâtiments peuvent occulter des satellites et influencer directement sur la précision du positionnement. Ce phénomène de « canyon » 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. Dans ce cas le géonavigateur ne réceptionne que des échos des signaux et la géolocalisation calculée tarde à se stabiliser.

### **Les systèmes d'optimisation de la précision de la géolocalisation**

Il existe des systèmes dont l'objectif principal est de réduire l'imprécision de la géolocalisation induite par les sources d'erreur précédemment citées. Les erreurs ionosphériques ou troposphériques peuvent être corrigées par des stations d'observation. Ces

## La navigation radioélectrique – généralités

stations, dont les coordonnées X, Y et Z sont précisément connues, vont mesurer en permanence les erreurs pour ensuite transmettre le signal de correction aux utilisateurs. La diffusion des corrections peut se faire indirectement via des satellites, on parle alors de système SBAS (satellite based augmentation system) ou directement au récepteur par d'autres moyens de communication (téléphone, radio, internet, ...), on parle alors de LBAS (local based augmentation system).

- SBAS (WAAS / EGNOS) Principe : des satellites géostationnaires délivrent en temps réel des corrections permettant d'accroître la précision ainsi que des informations permettant de garantir l'intégrité de ces corrections. Les erreurs sont observées sur un réseau de stations au sol. Exemple : EGNOS (european geostationary navigation overlay service). Ce système prend en compte les satellites des constellations GPS et GLONASS (et prochainement Galileo). Trois satellites géostationnaires transmettent en Europe des corrections de positionnement. L'activation de l'utilisation de ce système d'optimisation sur le géonavigateur peut permettre d'atteindre une précision comprise entre 1 et 3 mètres. Le système équivalent dont la couverture est principalement américaine se nomme le WAAS (wide area augmentation system).
- LBAS (DGPS, RTK) Principe : ce système est un processus de différenciation qui supprime les sources d'erreurs de positionnement du GPS et améliore son intégrité. Les corrections sont calculées à partir d'une station de référence qui peut être paramétrée par l'opérateur ou faire partie d'un réseau (par exemple le RGP, réseau GNSS permanent). Les corrections sont appliquées au GPS mobile en temps réel ou dans un logiciel de post-traitement. On parle alors de correction différentielle ou DGPS (Lahaye et Ladet, 2014b). Si le récepteur est en mouvement et que la précision souhaitée est centimétrique en temps réel, la méthode de géolocalisation utilisera la phase plutôt que le code et des algorithmes permettant de répondre aux contraintes de la mobilité.

### **Les bonnes pratiques**

Une fois que l'opérateur a pris connaissance des principes et des contraintes de la géolocalisation par GPS, des bonnes pratiques s'imposent.

- Reconnaissance terrain (identification des masques) Cette première étape a pour objectif d'identifier des éléments du milieu d'expérimentation qui pourront impacter la précision de la géolocalisation. La présence de « masques » comme des bâtiments imposants, une pente importante et une exposition sur un versant par exemple Sud qui empêchera le matériel de capter les signaux des satellites venant du nord, ces éléments devront être notés et pris en compte dans l'étape suivante. Cette reconnaissance peut s'effectuer à partir de logiciels cartographiques comme Google Earth mais il est préférable d'aller directement sur le terrain, cela permettra notamment d'avoir une idée du temps d'accès à la zone.
- Utilisation des éphémérides et modélisation de la journée de relevés Les satellites ayant une périodicité de 12 h avec des trajectoires orbitales connues, il est possible de modéliser leur évolution durant les différentes heures de la journée. Ces données sont également disponibles via une éphéméride que des applications peuvent utiliser pour représenter graphiquement le nombre de satellites disponibles durant la journée, l'évolution des DOPs, pour matérialiser des obstacles (masques) et visualiser l'impact sur la visibilité des satellites.

## La navigation radioélectrique – généralités

- **Fiches terrain / notes papier** Avant d'aller sur le terrain il est plus sûr de dédoubler sa prise de notes sur des fiches terrain ou un carnet. Si l'appareillage tombe en panne, on dispose d'une sauvegarde papier. Ces fiches pourront également stocker des informations non saisissables dans un simple géonavigateur qui lui est limité à deux types d'information, l'identifiant du point ou de la trajectoire et des commentaires (255 caractères).
- **Choix du matériel** Il existe une grande gamme de matériels de géolocalisation dont les prix augmenteront avec la précision et la diversité des fonctionnalités proposées. Un simple GPS géonavigateur de randonnée permettra une géolocalisation de l'ordre d'une dizaine de mètre et une saisie d'informations limitée. Un carnet de note avec un système d'exploitation couplé à un système de géolocalisation utilisant les phases, dont le prix sera jusqu'à 100 fois supérieur au précédent matériel, permettra d'atteindre une précision centimétrique et une saisie personnalisée d'informations.

### **1.12 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de mieux appréhender et de mieux comprendre les différents types d'orbite ainsi que les avantages qu'on peut en tirer. Ceci reste vrai, et exige une certaine technologie afin de répondre aux besoins croissants ressentis par un grand nombre de domaines d'application comprenant la télédétection, la localisation, la météorologie, etc. Dans une évolution logique, le chapitre suivant met l'accent sur la trace du satellite, sa position, sa géométrie de vue et sur le problème d'échantillonnage temporelle et spatiale.