

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et De la Recherche  
Scientifique  
Université Saad Dahleb De Blida  
Département d'Aéronautique



*Etude et modélisation des effets de  
l'ionosphère sur le système  
de positionnement par satellite GPS*

Rédigé par :  
KHELIL AHMED

Encadré par :  
Mr RAHMOUNI

Année universitaire : 2011/2012

# SOMMAIRE

## CHAPITRE 1 : Le système GPS

### INTRODUCTION

#### 1. Historique

#### 2-Description du système GPS..... 2

##### 2.1- Segment spatial ..... 2

###### 2.1.1- orbite des satellites Navstar ..... 3

###### 2.1.2- couverture terrestre des satellites..... 4

##### 2.2- Segment de contrôle ..... 5

##### 2.3- Segment utilisateur ..... 6

#### 3- les Service fournis ..... 6

##### 3.1- Le PPS ..... 6

##### 3.2- Le SPS ..... 6

#### 4- les signaux GPS..... 7

##### 4.1- porteuses GPS..... 7

##### 4.2- Message de navigation ..... 7

##### 4.3- Caractéristiques électriques des signaux ..... 8

#### 5- Les antennes ..... 9

##### 5.1- Position de l'antenne..... 9

##### 5.2- la puissance de réception ..... 9

## **CHAPITRE 3 : milieux de propagation et sources d'erreurs**

<b>I- MILIEUX DE PROPAGATION.....</b>	<b>28</b>
1- L'atmosphère .....	28
1.1- Types d'atmosphère .....	28
1.2- la ionosphère .....	28
1.2.1- Les couches ionosphériques .....	29
1.2.2- Le soleil et l'ionosphère .....	30
1.2.3- profil d'ionisation.....	31
1.2.4- ordre et origine de l'ionosphère de la haute atmosphère.....	32
1.2.5 - Taux de disparition électronique.....	34
2 Les perturbations solaires sur le GPS.....	36
<b><i>II- LES SOURCES D'ERREURS.....</i></b>	<b>37</b>
1- Introduction .....	37
2- Erreurs d'origine naturelle.....	37
2.1- l'ionosphère.....	37
2.2- La troposphère.....	38
2.3- Les multi trajets.....	38
3- Erreurs d'origines techniques.....	38
3.1- Validité sélective (SA).....	39
3.2- Diminution de la précision.....	40
4- Autres sources d'erreurs.....	42

4.3- Erreurs dues à l'utilisateur.....	43
4.4- Panne du récepteur.....	43

## **CHAPITRE 4 :            modélisation des effets de l'ionosphère sur le GPS**

<b>MODELISATION DES EFFETS DE L'IONOSPHERE SUR LE GPS.....</b>	<b>44</b>
1- Introduction.....	44
2- Effets ionosphériques.....	44
3- Erreurs De Propagation Atmosphérique.....	45
4- Amélioration de la précision.....	46
4.1- DGPS.....	46
4.2- GPS par analyse de phase des fréquences porteuses.....	49
5- Influence du centre de phase des antennes.....	51
6- Autre méthode.....	51
6.1- phase porteuse (Carrier Phase) .....	51
6.2- La moyenne.....	52
6.3- Le GPS bi-fréquence.....	52
6.4- Stratégies de traitement pour la mesure de phase.....	53
7- le retard ionosphérique.....	56
8- Modèles d'ionosphère.....	57
8.1- le modèle de BENT.....	58
8.2- le modèle de klobuchar.....	58
9- Applications du GPS.....	60
9.1- Applications Militaires.....	61

9.2- Applications Civiles.....	61
9.2.1- Le domaine maritime.....	62
9.2.2- L'agriculture.....	63
10 – Algorithme.....	63
11- Organigramme.....	64
CONCLUSION	
BIBLIOGRAPHIE	

## RESUME

L'ionosphère joue un rôle important dans la précision des signaux GPS, Les chercheurs ont essayé de le modéliser pour déduire la valeur de l'erreur ionosphérique, Dans notre étude on l'estimera à partir de deux modèles des plus utilisés à savoir le Modèles de Bent et le Modèle de klobuchar. A partir de ces modèles on étudiera L'emploi des ondes radioélectriques a permis l'étude de l'ionisation de la haute atmosphère aux altitudes comprises entre 100 et 500 km. Région qu'on dénomme l'ionosphère Il a été constaté que l'ionosphère comportant essentiellement trois régions de variation rapide de la densité électronique. On a pu évaluer pour chacune de ces régions la valeur de cette densité qui présente des variations diurnes et saisonnières. L'étude de ces variations conduit à la conclusion que l'ionisation de la haute atmosphère est due en grande partie à l'action des rayons ultra-violet et que la disparition des électrons est due à la recombinaison des ions positifs.

## ABSTRACT

The ionosphere plays an important role in the accuracy of GPS signals, researchers have tried to model to derive the value of the error ionospheric In our study we will estimate from two of the most used models ie models Bent and Klobuchar model. From these models we explore the use of radio waves has allowed the study of the ionization of the upper atmosphere at altitudes between 100 and 500 km. Region that denominates the ionosphere It was found that the ionosphere essentially comprising three regions of rapid variation of the electron density. It has been evaluated for each of these areas the value of this density has diurnal and seasonal variations. The study of these changes led to the conclusion that the ionization of the upper atmosphere is largely due to the action of ultra-violet rays and the loss of electrons is due to the recombination of positive ions.

## ملخص

الأيونوسفير يلعب دورا هاما في دقة إشارات GPS، وقد حاول الباحثون إلى نموذج لاستخلاص قيمة الخطأ الأيوني في دراستنا ونحن سوف يقيمون من اثنين من أكثر النماذج المستخدمة أي النماذج وبينت (Bent) نموذج كلوبوشار (Klobuchar). من هذه النماذج نستكشف استخدام موجات الراديو وسمح للدراسة تأين الغلاف الجوي العلوي على ارتفاعات تتراوح بين 100 و 500 كلم. المنطقة التي يسمى الغلاف الأيوني وتبين أن الغلاف الأيوني تضم أساسا ثلاث مناطق من التباين السريع في كثافة الإلكترونات. تم تقييمها لكل من هذه المجالات قيمة هذه الكثافة لديه اختلافات يومي والموسمية. دراسة هذه التغييرات أدت إلى استنتاج مفاده أن تأين الغلاف الجوي العلوي ويرجع إلى حد كبير إلى عمل أشعة فوق البنفسجية وفقدان الإلكترونات ويرجع ذلك إلى إعادة التركيب من الأيونات الموجبة.

## INTRODUCTION

Depuis son origine, l'Homme a toujours eu besoin de se repérer dans des lieux inconnus ou peu familiers. Il a de tout temps eu recours à des méthodes ou des systèmes plus ou moins fiables et compliqués pour pouvoir s'orienter et rejoindre un lieu déterminé.

Aujourd'hui, un récepteur GPS tient dans le creux de la main et permet de connaître instantanément sa position avec une erreur inférieure à 22 mètres, quels que soient le lieu, l'heure ou les conditions météorologiques. Il permet de connaître la distance et la direction de tous les lieux connus.

De nombreuses informations utiles sont également fournies en permanence par le récepteur GPS, comme la vitesse et la direction de déplacement, l'heure, le jour ou bien encore une estimation de l'heure d'arrivée. Son utilisation ne requiert généralement aucune compétence particulière, il suffit de mettre en marche le récepteur GPS comme n'importe quel récepteur radio et d'attendre que la position soit affichée.

Le positionnement est aujourd'hui une information vitale pour un grand nombre de professionnels et concerne notamment la marine, l'aviation, la défense nationale, les opérations de sécurité et de sauvetage, le suivi et la gestion de flotte de véhicules, les pêcheurs ou bien les relevés topographiques.

Cependant, le GPS est de plus en plus utilisé pour les loisirs tels que la randonnée pédestre, la navigation aérienne. Le récepteur GPS fait aujourd'hui partie de l'équipement de base de tout bateau s'éloignant à plus de 20 milles des côtes et de pratiquement tous les avions. Les constructeurs d'automobiles en équipent maintenant de nombreux véhicules et bientôt nos téléphones portables, nos ordinateurs de poche et même nos montres.

Le GPS ouvre la voie à des applications nécessitant une précision jusqu'alors très difficile ou impossible à atteindre, notamment pour le guidage de véhicules, les mesures de courants marins ou aériens, la surveillance de plaques tectoniques ou l'exploration géophysique. L'exploitation civile du GPS offre des améliorations notables en matière de sécurité et d'efficacité dans le transport et le commerce.

## LE SYSTEME GPS

### 1- Historique :

En avril 1973, le département de la défense américaine (DOD) décide de regrouper en un seul projet le système 621B de l'U.S. ce nouveau programme de positionnement et de navigation par satellites est toujours connus sous le nom de système 621B. Il sera plus tard appelé Navstar Global Position Système, puis en simplifié en Navstar GPS. Le but de projet est de fournir un moyen de positionnement totalement furtif, de déduire vulnérabilité des stations terrestres de positionnement de l'époque et de couvrir la terre entière. Ce système autorise un positionnement précis en trois dimensions (horizontal et verticale), et renseigne sur la vitesse d'un mobile ainsi que sur l'heure exacte.

Les signaux GPS seront disponibles n'importe où sur la terre à n'importe quelle altitude, n'importe quand et quelles que soient les conditions météorologiques.

C'est en juin 1977, que l'on effectue les premiers tests concluants. On décide alors de lancer une constellation pré-opérationnelle de sept satellites (bloc I) pour valider l'ensemble du système.

Le 14 février 1989, le premier satellite du bloc II est mis en orbite. Il ne s'agit plus de satellite de recherche et de développement comme ceux du premier bloc, mais de satellites totalement fonctionnels et opérationnels.

Ces nouveaux satellites sont beaucoup plus précis. Ils peuvent ainsi rester 14 jours sans aucun contact avec les stations au sol, tout en conservant une précision suffisante.

Le 4 juillet 1991, les messages de navigation émis par les satellites du bloc II pour une utilisation civil, sont volontairement dégradés par manipulation des informations transmises. Cette technique de manipulation est appelée SA (Selective Availability).

Le 29 mars 1996, le président des Etats-Unis approuve un texte de « l'office des sciences et technologie » qui propose de supprimer la disponibilité sélective (SA) dans les dix prochaines années à venir.

Le 2 mai 2000, la dégradation volontaire des signaux émis par les satellites GPS est totalement supprimée. La précision fournie par tous les récepteurs GPS civils passe alors de 100m à 22m. Cette modification entraîne d'importants changements dans l'utilisation du GPS.



## **2- Description du système :**

Lorsque nous parlons de GPS, nous pensons tous de suite à l'appareil qui sert à donner une position. Cependant, le système GPS ne se limite pas à cet instrument, puisqu'il se compose de trois éléments distincts, appelé segments. Le premier segment, composé des satellites, est appelé « segment spatial ». Le deuxième segment qui comprend des stations de contrôle, s'appelle « segment de contrôle ». Le dernier correspond aux récepteurs GPS est dit « segment utilisateur ».

### **2.1- Segment spatial :**

Le segment spatial (ss, space segment) est constitué d'une constellation de 24 satellites GPS. Ils circulent à 20200 kilomètres d'altitude et se répartissent sur 6 orbites distinctes à raison de 4 satellites par orbite. La figure (1) montre une représentation schématique de la disposition des satellites autour de la terre. En outre, d'autres satellites sont maintenus en réserve pour pallier toute défaillance. Chaque orbite est inclinée de  $55^\circ$  par rapport à l'équateur, sachant qu'elles sont espacées de  $60^\circ$  les unes des autres. Chaque satellite effectue une révolution complète autour de la terre en 12 heures (orbite semi-synchrone). Chaque satellite repasse donc deux fois par jour au même endroit, et à tout moment au moins 4 satellites devraient être simultanément visible depuis n'importe quel point de la terre.

Chaque satellite transmet en permanence un message de navigation indiquant sa position orbitale ainsi que l'heure exacte d'émission du message. Un almanach qui fournit la position et l'état de chaque satellite opérationnel est également transmis.

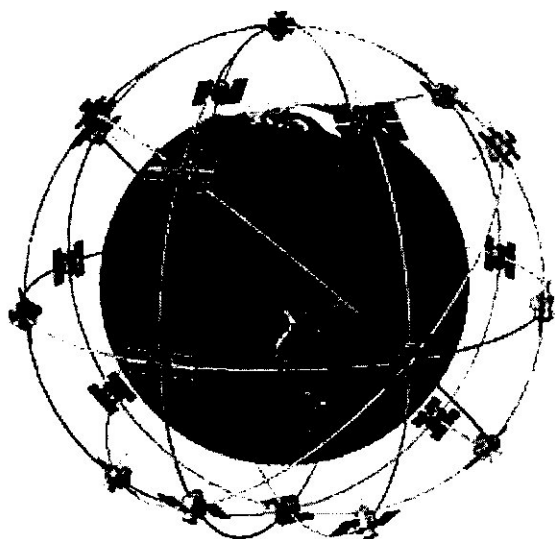


Figure 1 : constellation des satellites GPS

### **2.1.1- orbite des satellites Navstar :**

Il existe essentiellement trois types d'orbites qui peuvent être employées dans les concepts ou configuration de système de navigation par satellites :

#### **a- Orbites géostationnaires :**

La vitesse et la direction du satellite correspondent à peu près à la rotation de la terre de telle sorte que le satellite semble stationnaire au dessus d'un point fixe sur l'équateur. Ces orbites ne peuvent être réalisées que pour les satellites qui évoluent dans le plan de l'équateur terrestre. Les systèmes des satellites basés sur des configuration orbitales géostationnaires peuvent assurer une fonction régionale de navigation et de localisation avec un petit nombre de satellite (deux au minimum) Les satellites se trouvent à une altitude d'environ 36000 Km.

Mais étant donnée la position du satellite est n'est pas possible d'obtenir une couverture aux latitudes supérieures à 70. En raison de leur position apparemment fixe par rapport à la terre, les satellites de ce type d'environ conviennent pour les communication. La plupart des satellites de communication et de radiodiffusion sont géostationnaires par contre c'est une très mauvaise solution pour la navigation à couverture mondiale, sauf si l'on cherche à desservir une zone limitée de latitude moyenne.

#### **b- Orbite fortement excentrique :**

Etant connus les inconvénients de l'orbite géostationnaire pour la navigation, on étudié d'autres types d'orbites susceptibles de fournir une meilleure réception tout en assurant la couverture des attitudes élevées et des régions polaire. Lorsque les satellites évoluent en orbite inclinée fortement elliptique, leur vitesse apparente semble, pour l'usage, relativement faible à proximité de l'apogée et compte tenue de la vitesse de rotation de la terre les satellites sembleront presque stationnaire au dessus d'une zone géographique donnée pendant une partie de leur période orbitale (point fort de l'apogée).

#### **c- Orbites circulaires inclinées :**

Le satellite est en orbite autour de la terre en maintenant un rayon à peu près constant par rapport au centre de la terre, et une vitesse à peu près constante. La trajectoire suivie par chaque satellite autour de la terre, sur une orbite quelconque, ressemble de très près à la trajectoire suivie sur l'orbite précédente, avec un décalage en longitude qui dépend du rayon de l'orbite. Ces satellites défilent par rapport à la terre dans des plans qui font des angles plus ou moins grands avec le plan équatorial terrestre le nombre, l'altitude des satellites et

l'inclinaison des plans des orbites sont choisis de telle sorte qu'à tout instant, en tout point de la terre, en puisse voir le nombre de satellites minimal pour l'utilisation envisagée. Des paramètres de forme de l'orbite :

a : demi grand axe de l'ellipse

b : demi petit axe de l'ellipse

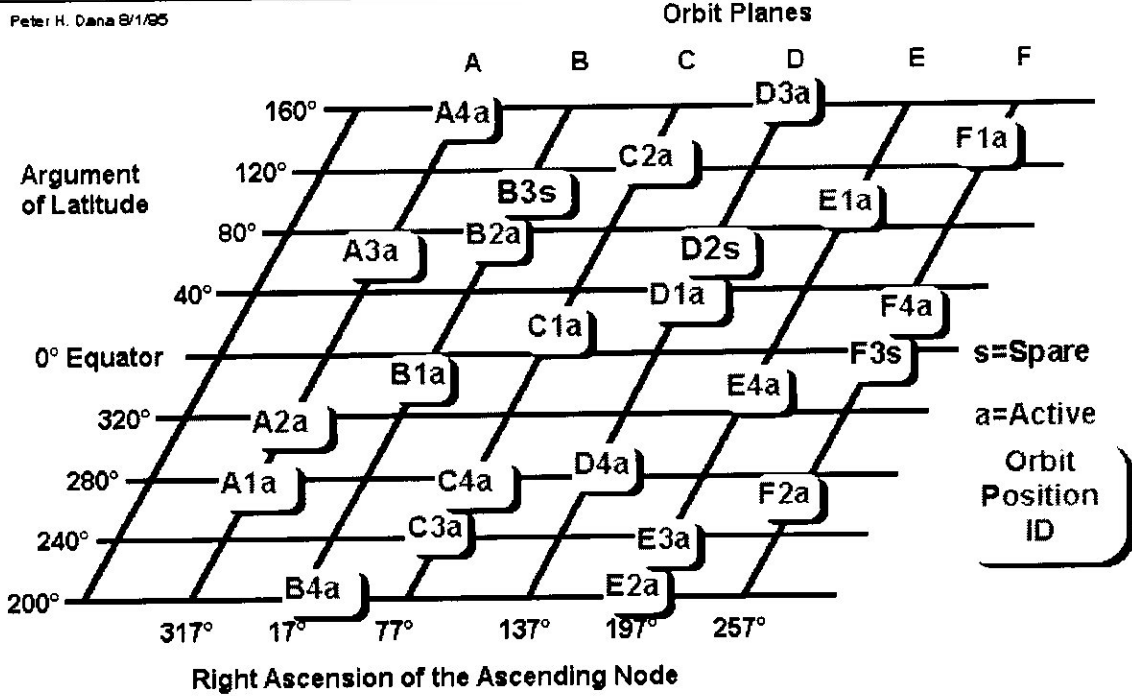
e : excentricité fonction de a et b, elle est nulle dans le cas d'une orbite circulaire.

### **2.1.2- couverture terrestre des satellites :**

L'arrangement des satellites permet d'avoir, dans 99 % des cas, un minimum de 4 satellites visibles à  $5^\circ$  au plus au dessus de l'horizon, quel que soit l'endroit où l'on se trouve sur la terre. Mais cela signifie également que, pendant une minute et demi par jour, le système GPS est peut ne pas indiquer une position suffisamment fiable. En outre, si le lieu n'est pas parfaitement dégagé, c'est -à-dire si le ciel n'est pas totalement visible au dessus de  $5^\circ$  de l'horizon, la couverture des satellites peut être totalement insuffisante. A quelques rares endroits du globe, dans des zones dits de réception difficile, cette couverture n'est pas assurée dans plus de 3 % des cas.

Il arrive aussi régulièrement qu'un ou plusieurs satellites soient momentanément mis hors service. Généralement, cela est dû à une maintenance périodique du satellite ou à un problème technique. Normalement, un satellite n'est pas hors service pendant plus de 24 heures, il n'y a pas de 4 satellites mis hors service chaque mois et jamais plus de trois hors service en même temps.

Le nombre de satellites visibles varie tout au long de la journée, et est en moyenne égale à huit.

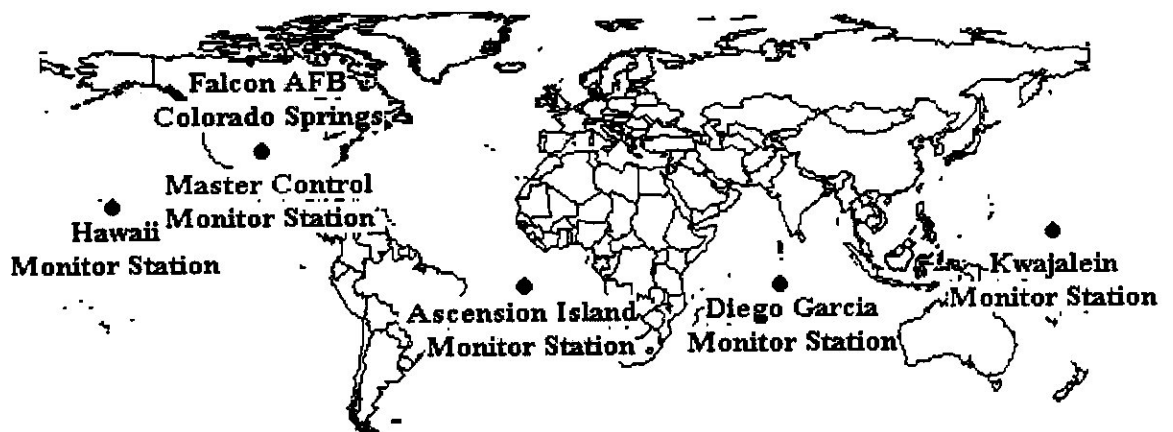


**Simplified Representation of Nominal GPS Constellation**

**2.2- segment de contrôle :**

Le segment de contrôle ( cs, contrôle segment) est constitué de cinq stations de surveillance réparties autour de la planète. Il comprend également une station maître que assure le bon fonctionnement du système en calculant les corrections à apporter au message émie par les satellites. Trois antennes terriennes assurent la transmission de ces corrections aux satellites.

Les 5 stations se situent à Hawaï, à Kwajalein dans les îles marshall, dans les îles de l'Ascension, à Diego Garcia et à Colorado springs. Leur rôle est de capter tous les signaux émis par les satellites, d'accumuler les messages reçus et de transmettre toutes les informations recueillies à la station maître. Voir figure suivante :



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

### **2.3- segment utilisateur :**

Le segment utilisateur comprend l'antenne de réception et le récepteur calculateur GPS qui effectue tous les calculs à partir des messages de navigation reçus des satellites. Il peut ainsi fournir des informations sur la position, la vitesse, la route, l'heure et la date, ainsi que toutes autres informations nécessaires à la navigation.

### **3- les Services fournis :**

Le GPS fournit deux types de positionnements, le positionnement précis (PPS) et le positionnement standard (SPS). Seul le positionnement standard est librement disponible, le PPS est réservé à l'armée américaine.

#### **3.1- Le PPS :**

Le PPS ( precise positioning service ) est un système de positionnement précis. L'erreur de positionnement maximale dans 95 % des cas est inférieure à 21 mètres en horizontale et à 27.7 mètres en vertical. L'heure peut être obtenue avec une précision de 100 nanosecondes.

Les signaux du PPS sont transmis sur deux fréquences différentes, appelées L1 et L2, et qui contiennent le code de précision ou p-code. Le p-code est généralement crypté, le mode antillure dit A-S (anti-spoofing) est activé. Le signal L2 est également utilisé pour déterminer le retard introduit par les couches de l'ionosphère. Le PPS n'étant normalement pas accessible aux civils, nous ne décrivons pas ce système.

#### **3.2- Le SPS:**

Le SPS (standard positioning service) est la version civile du GPS. Les signaux du GPS sont transmis sur une seule fréquence, appelé L1, et qui contient le code d'acquisition dit « grossier » (C/A, coarse acquisition code), ainsi que les différents messages de navigation.

En cas de conflit, l'armée américaine peut supprimer totalement toute utilisation du GPS dans la zone de conflit, son fonctionnement restant inchangé en dehors de la zone de conflit.

## 4- les signaux GPS :

### 4.1- porteuses GPS :

Chaque satellite émet simultanément sur deux fréquences porteuses, l'une à 1575.42 Mhz ( $L_1$ ), l'autre à 1227.6 Mhz ( $L_2$ ), le signal est modulé en modulation de phase. Les signaux émis par les satellites sont générés par une fréquence fondamentale de 10.23Mhz. Produite par un ensemble d'horloges atomiques.

La porteuse  $L_1$  est modulée par deux séquences de code pseudo-aléatoire code P et code C/A, et par un signal contenant un message de navigation, la porteuse  $L_2$  n'est modulée que par un seul code, le code P et un message de navigation. (Voir figure suivante).

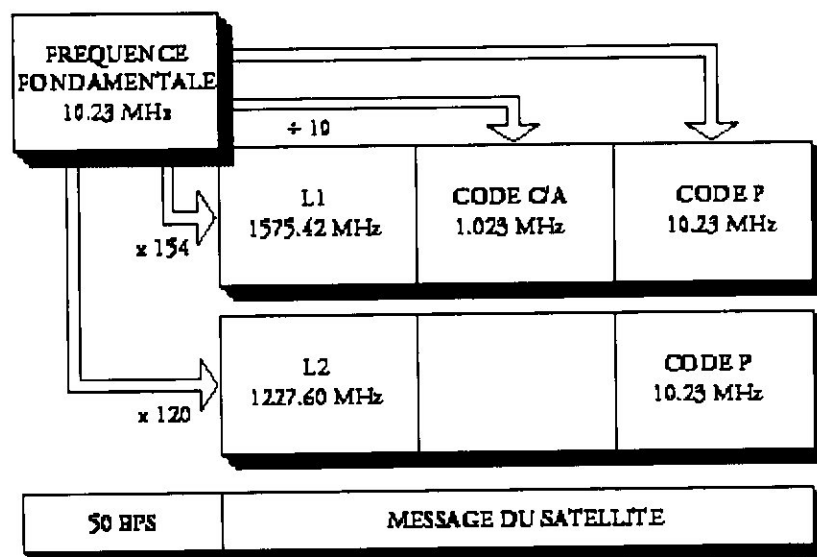


Figure 2 : le signal émis par le satellite

### 4.2- Message de navigation :

Chaque satellite GPS émet un message de navigation, qui contient toutes les données nécessaires au récepteur pour effectuer tous les calculs de navigation (orbite du satellite, correction d'horloge....)

Ce message est une suite de données binaires transmises en mode série à 50 bits/s. Il est composé de 5 sous-trame de 300 bits chacune c'est-à-dire 5 blocs (voir figure 3). Donc pour sous-trame il faut ( $300 \times 0.02 = 6s$ ) une trame comporte

donc 1500 bits et il faut 30 seconde au récepteur l'acquérir entièrement. Ces données comprennent :

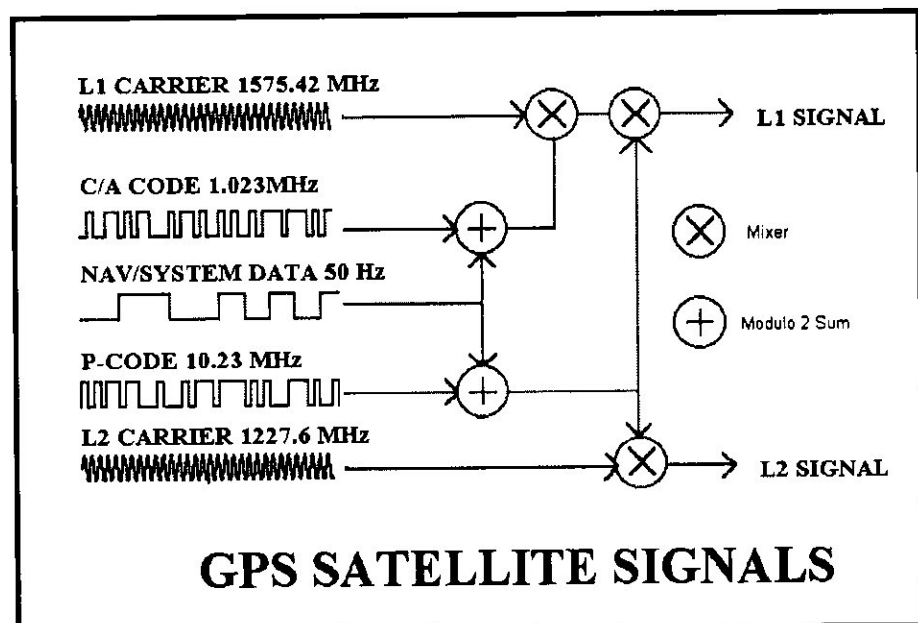
- Une information de l'état de santé du satellite
- Les informations nécessaires à l'acquisition du code du message
- Les informations de précision du satellite
- Une information concernant le retard de propagation dû à la ionosphère
- Les éphémérides du satellite

Bloc 1	Paramètres de correction d'horloge
Bloc 2	Paramètres d'éphémérides
Bloc 3	Paramètres d'éphémérides
Bloc 4	L'almanach, correction ionosphérique
Bloc 5	L'état des satellites

Figure 3 : Contenu des blocs du messages de navigation

#### 4.3- Caractéristiques électriques des signaux :

La porteuse  $L_1$  est modulée par sauts de phase bipolaire (BPSK) à la fréquence de 1.023 Mhz, au moyen d'une séquence pseudo-aléatoire d'une longueur de 1023 bits qui compose le code PRN des satellites, cette séquence, d'une durée d'une milliseconde, forme le code d'acquisition dit grossier : le code C/A. chaque satellite possède son propre code PRN qui permet au récepteur d'identifier le satellite. Les informations de navigation proprement dites, modulent à leur tour le code C/A à la fréquence de 50HZ. Le spectre des signaux étant très large, le système GPS présente une bonne immunité aux interférences.



➤ **Acquisition du signal :**

Le signal reçu diffère du signal émis pour plusieurs raisons :

- Le bruit du canal de transmission
- Le décalage temporel dû au temps de propagation et aux décalage des horloges de l'émetteur et du récepteur
- Le décalage fréquentiel dû à l'effet Doppler et aux instabilités des horloges d'émission et de réception.

La conception de récepteur doit tenir compte des incertitudes des signaux et de leurs variations. Le signal GPS présente de nombreux avantages essentiellement liés à sa non-détérioration lors de l'émission et de la propagation, mais il est également facile à acquérir, à décomposer et est riche en informations.

### **5- Les antennes :**

Tout récepteur GPS a besoin d'une antenne afin de recevoir les signaux émis par les satellites. Cette antenne peut être intégrée, fixée, ou bien déportée et reliée au récepteur par un câble. L'antenne est un élément essentiel du récepteur GPS et influe sur la qualité des informations qu'il fournit.

#### **5.1- Position de l'antenne :**

L'endroit où est placée l'antenne influe directement sur la qualité des signaux reçus et donc sur la précision des indications fournies par le récepteur GPS. Il est primordial de choisir un emplacement bien dégagé, ne risquant pas d'être masqué par des objets ou des personnes. S'il est possible de recevoir les signaux à l'intérieur d'un édifice ou d'un véhicule, la réception s'en trouvera toujours dégradée. Les signaux GPS sont arrêtés par les métaux ou les matériaux comme le béton ou le carbone. Ils peuvent traverser le bois ou les matériaux composites mais sont toujours affaiblis.

Bien que la surélévation de l'antenne n'apporte aucune amélioration de réception, sur tout type de véhicule et d'une manière générale, le meilleur emplacement est le toit. L'antenne se place souvent le plus haut possible de façon à réduire tout risque de masquage. Il est important de ne pas placer l'antenne GPS près d'équipements émettant des signaux de fréquences élevées tels qu'une antenne radar, VHF.

#### **5.2- la puissance de réception :**

La puissance de réception, et donc la qualité du signal reçu, dépendent de l'élévation du satellite observé. Le signal d'un satellite GPS est reçu avec le



maximum de puissance lorsque celui-ci se trouve à 40° au-dessus de l'horizon. Dans ce cas, la puissance du signal reçue est maximale. Cependant, cette puissance n'excède jamais -153 dBw.

### **6- Temps GPS :**

Les signaux temporels diffusés par les satellites GPS sont synchronisés sur les horloges atomiques du centre principal de contrôle GPS (Colorado Springs, Etats-Unis). Cette échelle de temps GPS (appelée GPST) est reliée au temps UTC (Temps universel coordonné). L'origine du temps GPS est le 5 janvier 1980 à 0 h UTC. Le signal de chaque satellite GPS contient une correction à apporter au temps de l'horloge du satellite pour obtenir le temps GPS, ainsi que le décalage entre les temps GPS et UTC ( $GPST = UTC + x \text{ secondes}$ ). Le système GPS permet d'accéder en temps réel au temps UTC avec une précision variant de quelques nanosecondes à 100 nanosecondes selon le mode de mesure.

La grande précision du temps GPS, sa diffusion en tout point du globe et son coût relativement peu élevé en ont fait un système de référence de synchronisation des horloges pour de très nombreuses applications. En météorologie, de nombreuses campagnes de mesure qui nécessitent des fréquences d'acquisition élevées ou des synchronisations précises entre différents lieux utilisent le temps GPS comme référence.

### **7- La précision :**

Quelle est la véritable précision d'un GPS ? distinguons tout d'abord la précision horizontale et la précision verticale. La précision horizontale informe sur l'erreur possible de la position reportée sur une carte par rapport à la position réelle. La précision verticale indique l'erreur possible de l'altitude calculée par le récepteur GPS (par rapport au niveau de la mer).

#### **7.1- précision horizontale :**

Depuis que la dégradation volontaire de la précision du GPS (SA) a été supprimée en mai 2000, la plupart du récepteur GPS fournissent une position horizontale avec une incertitude inférieure à 22 mètre dans 95% des cas. Dans 4.99 % des cas, elle peut être comprise entre 22 et 65 mètres et supérieure à 65 mètres dans 0,01 % des cas. Ces valeurs sont des maximums théoriques, mais signifient que chaque jour l'erreur horizontale fournie par le GPS, peut être

supérieur à 22 mètres pendant une durée totale de 1 heure et supérieure à 65 mètres pendant près de 9 secondes.

### **7.2- Précision verticale (ou altitude)**

L'erreur verticale théorique est de l'ordre de 50 mètres dans 95 % des cas. Les raisons d'une précision verticale moins bonne que l'horizontale sont multiples. On remarque que plus le satellite utilisé est haut dans le ciel, meilleure sera la précision verticale obtenue. Toutefois, il y a moins deux chances pour qu'un satellite se situe au-dessus de 45° de l'horizon qu'en dessous. Généralement, il n'y a que deux ou trois satellites au-dessus de 45° pour 8 satellites visibles. De plus, il n'est pas possible qu'un satellite se situe au-dessous du récepteur.

Cette précision verticale n'est que théorique et peut très bien être dégradée suivant la façon dont le récepteur sélectionne les satellites.

La précision verticale généralement observée avec un bon appareil est de l'ordre de 15 mètres dans 95 % des cas.

### **7.3- précision de l'heure :**

L'heure est transmise avec une précision de 200 (ns) dans 95 % des cas, pour obtenir une telle précision il est indispensable d'avoir un récepteur de très bonne qualité et que celui-ci soit parfaitement immobile. C'est de toute façon un des systèmes les plus fiables, qui permet de connaître l'heure n'importe où avec une très grande précision.

### **7.4- précision relative :**

La précision relative est la différence indiquée par deux récepteurs identiques, utilisant les mêmes satellites pour la résolution de la position et distants de moins de 40 Km l'un de l'autre. Dans ces conditions, la précision horizontale est l'ordre de 6 mètres dans 95 % des cas. La précision verticale est de l'ordre de 9 mètres dans 95 % des cas. Cette précision peut cependant varier suivant les récepteurs GPS utilisés. Si la position de l'un des récepteurs est connue avec précision, la position du second se déduit alors avec une bonne précision. Cette particularité est exploitée dans le principe du GPS différentielle.

## Fonctionnement du GPS :

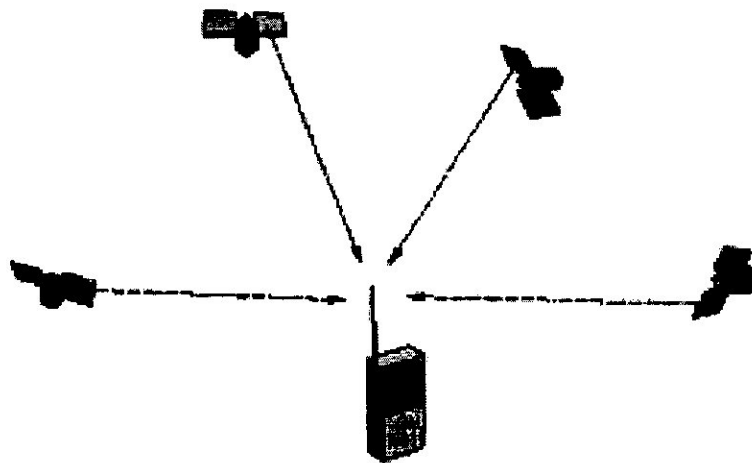
### 1.- principe :

Le principe du positionnement par GPS se fonde sur la mesure de la distance entre le récepteur GPS et plusieurs satellites. La position de chaque satellite dans l'espace est connue avec une très grande précision par le récepteur. En effet, chaque satellite transmet en permanence sa position exacte par rapport à la terre. En même temps que sa position, il indique l'heure exacte de transmission du message. En calculant le temps mis par les signaux pour arriver jusqu'à au récepteur, on établit la distance du satellite.

### 2- les différents types des mesures :

#### 2.1- la triangulation :

Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. La détermination d'un lieu géographique est basée sur l'intersection de trois sphères dans l'espace. Chaque sphère est définie par son centre correspondant à la position d'un satellite, et par son rayon qui est la distance entre le centre et le récepteur GPS de l'utilisateur. On peut décomposer ce principe en 3 étapes :

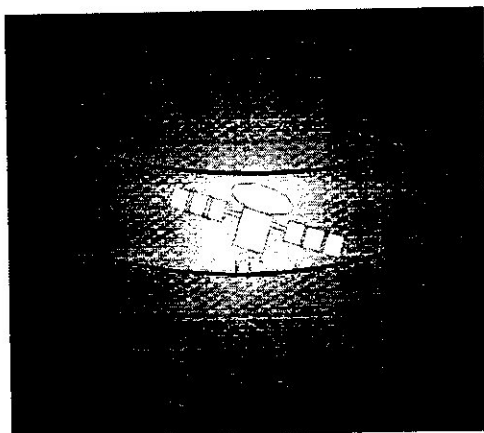


*Figure 1: type de mesure par triangulation*

#### ➤ 1<sup>ère</sup> étape :

Supposons pour commencer que nous connaissons la distance séparant un satellite d'un récepteur GPS. Sachant que le satellite a une position X précise et

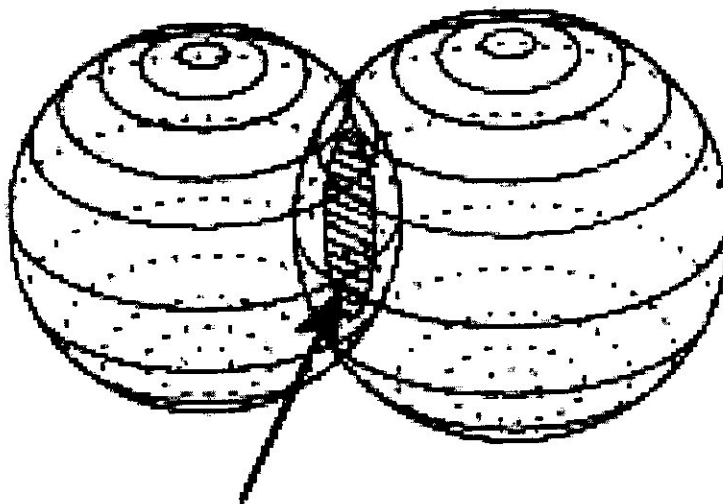
définie dans un espace à 3 dimension, l'ensemble des points possibles où pourrait se situer l'utilisateur du GPS est la sphère de centre le satellite et de rayon la distance connu (figure 2).



*Figure 2 : positionnement du récepteur GPS avec 1 satellite.*

➤ 2<sup>ème</sup> étape :

En faisant intervenir un 2<sup>ème</sup> satellite qui connaît la distance le séparant du récepteur, on obtient pour ensemble des points possibles, un cercle, issu de l'intersection des 2 sphères.(figure 3).



*Figure 3: positionnement du récepteur avec deux satellites*

➤ 3<sup>ème</sup> étape :

Le raisonnement est identique avec un 3<sup>ème</sup> satellite : on obtient alors 2 point possibles.

Dans notre contexte, l'utilisateur n'est pas un astronaute flottant dans l'espace, donc il se trouve sur la surface terrestre, connaissant cette donnée on peut

déduire sa position exacte en éliminant le point donnant un résultat incohérent (figure 4).

Donc : en théorie 3 satellites suffisent pour connaître la position exacte d'un point sur la terre pourtant, nous verrons qu'en pratique il faut 4.

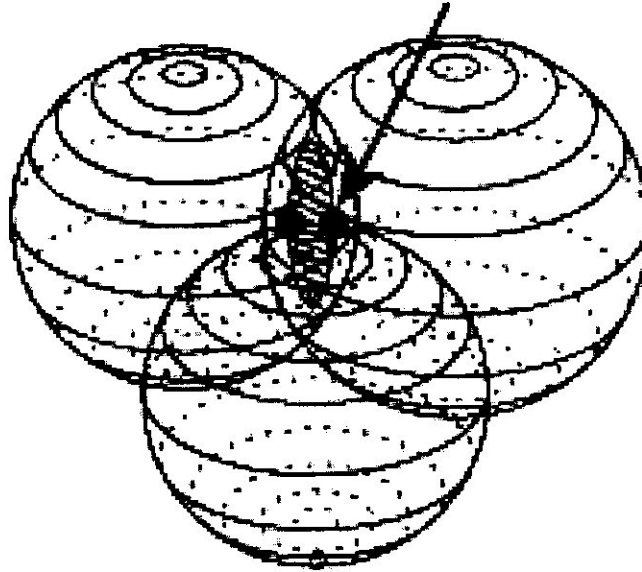


Figure 4 : positionnement du récepteur GPS avec 3 satellites.

### **2.1.1- positionnement en deux dimensions (2D) :**

Le positionnement que nous venons d'étudier appelé positionnement en deux dimensions (2D), car il nous donne que la latitude et la longitude. Ce type de positionnement au moyen de trois satellites n'est possible que lorsque l'altitude est parfaitement connue, comme au niveau de la mer.

Si l'horloge du récepteur est suffisamment stable, on peut pendant une courte période établir une position avec seulement deux satellites en vue. Cependant, il ne s'agit là que de cas particuliers et généralement peu fiables, la plupart du temps, il est nécessaire d'établir une position en trois dimension, c'est-à-dire où l'altitude est également inconnue.

### **2.1.2- Positionnement en trois dimensions (3D) :**

Si trois satellites sont suffisants pour un positionnement en deux dimensions, ils ne sont pas en mesure d'indiquer une position lorsque l'altitude n'est pas connue. Il est alors nécessaire d'utiliser un quatrième satellite afin de positionner un récepteur en trois dimensions (3D) : latitude, longitude et altitude. Le temps mis par le signal pour parvenir au récepteur GPS définit une sphère autour du satellite, l'intersection de deux sphères de positionnement définit un cercle dans l'espace sur lequel se situe le récepteur. L'intersection de

ce cercle avec la sphère de positionnement d'un troisième satellite détermine deux points. Un quatrième satellite est alors nécessaire au récepteur pour éliminer l'un des points ainsi que pour ajuster son horloge pour que l'intersection des quatre sphères définisse un volume aussi réduit que possible. La position en trois dimensions sera déterminée par le point d'intersection de quatre sphères de positionnement. Le positionnement en trois dimensions nous fournit donc un point dans l'espace. Pour qu'il soit utilisable, il est nécessaire d'établir sa position par rapport à la terre. On utilise pour ce la un système à trois axes ayant pour origine le centre de la terre, et où la terre est fixe. Ce système est appelé ECEF (Earth-Centred, Earth-Fixed : Terre centrée, terre fixe) et se réfère au système géodésique mondial WGS 84 (World Geodesic System 1984). Le récepteur effectue automatiquement toutes les conversions entre le système ECEF à partir des coordonnées « x, y, z » et le système WGS 84 en coordonnées « latitude, altitude, longitude ». Si l'horloge du récepteur est suffisamment stable, il est possible pendant un certain temps d'établir une position en trois dimensions lorsque seulement (03) satellites sont en vue. Cependant, au bout d'un certain temps qui dépend de la précision de son horloge, le récepteur passera en mode deux dimensions, en conservant la dernière valeur de l'altitude calculée.

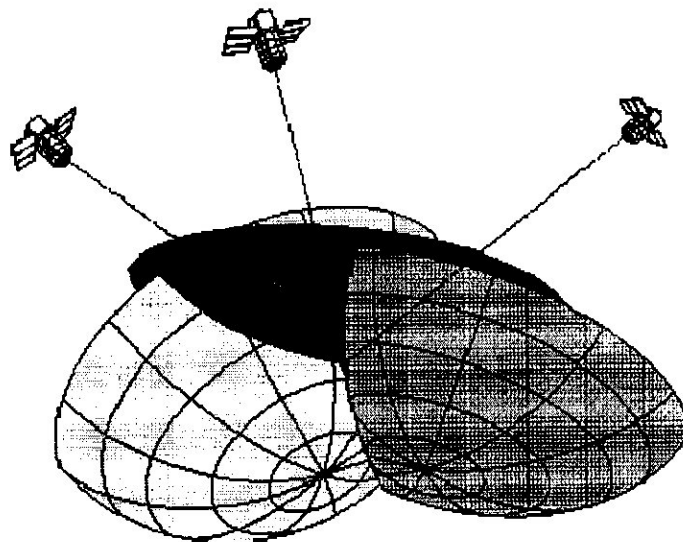


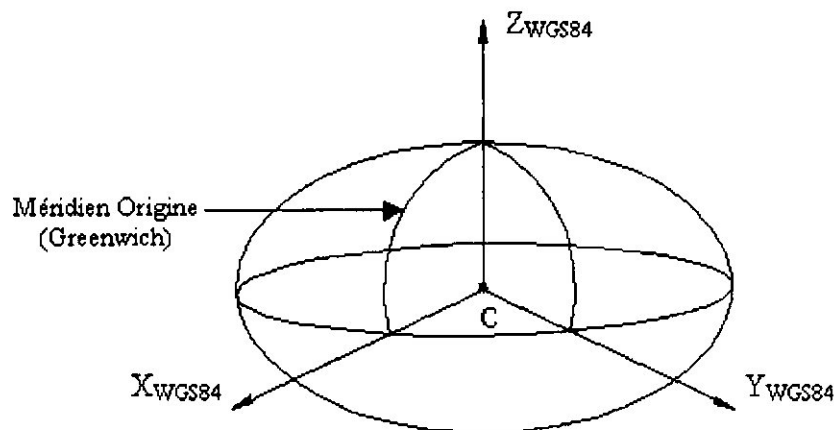
Figure 5: positionnement tridimensionnel à trois satellites

### ➤ Le système WGS84 :

Le système géodésique global (WGS 1984) a été développé par le département de la défense américaine. Ce système de référence est utilisé pour les deux types d'éphémérides (précise et radiodiffusées). Cependant, WGS84 sera d'une

très grande importance pour les différents types d'applications du système GPS.

Le système de référence correspondant à WGS84 est un système lié à la Terre et matérialisé par un réseau de points d'ordre zéro se trouvant à la surface terrestre. L'origine du système est le centre des masses de la Terre ; son orientation est choisie de telle façon qu'elle soit identique à celle du système CIO-BIH (conventionnal international origin – bureau international de l'heure). L'axe des Z est parallèle à la direction du CTP (Conventionnal Terrestrial Pole) et l'axe des X est parallèle à la direction du BIH qui définit le méridien origine. Au système WGS84, est associé un système géocentrique de coordonnées cartésiennes (O, X, Y, Z) voire figure suivante :



**Figure 6 :** définition du système de coordonnées WGS84

Avec :

- origine  $O$  : centre de gravité des masses Terrestres.
- axe  $Z$  : pôle Nord astronomique (axe de rotation de la Terre).
- axe  $X$  : intersection de l'équateur avec le méridien de Greenwich.
- axe  $Y$  : tel que le système d'axe soit direct.

### **2.2- Pseudo-distance sur le code :**

Si on mesure la durée de propagation d'un signal émis par le satellite jusqu'à son arrivée à un récepteur sur la Terre, on peut estimer la distance du satellite au récepteur.

La mesure de pseudo-distance nécessite la connaissance des codes pseudo-aléatoires (C/A et (ou) P (ou Y)). Le code généré par le satellite arrive au récepteur avec un retard  $\Delta t$  correspondant au temps mis par le signal pour parcourir le chemin satellite récepteur. Un algorithme connu génère le code

### 2.3- La mesure de phase :

La donnée que l'on récupère à la sortie d'un récepteur GPS est la différence entre la phase de l'onde émise par un satellite et la phase d'un oscillateur interne au récepteur. La phase de l'onde reçue est affectée par l'effet Doppler (la variation de la fréquence du " son " perçu en fonction de la distance sa source et observateur) dû au déplacement du satellite, la réfraction atmosphérique, et le bruit de mesure du récepteur. On peut écrire la différence de phase  $\Phi_{ij}(t_j)$ , au temps  $t$ , à la station  $j$ , et pour le satellite  $i$ , comme suit :

$$\Phi_{ij}(t_j) = \Phi_{ij}^r - \Phi_j^l + n_{ij} + \Phi_{\text{bruit}}$$

$t_j$  : temps de la réception du signal à la station  $j$

$\Phi_{ij}^r$  : phase reçue à la station  $j$  en provenance du satellite  $i$

$\Phi_j^l$  : phase de l'oscillateur du récepteur  $j$

$\Phi_{\text{bruit}}$  : bruit aléatoire sur la mesure de phase

$n_{ij}$  : un entier (n-cycles) représentant l'ambiguïté de phase

Par ailleurs, le signal reçu au temps  $t_j$  est lié au signal émis au temps  $t_i$  par le  $i^{\text{ème}}$  satellite par la relation suivante:

$$t_j = t_i + \tau_{ij}(t_j)$$

Dans laquelle  $\tau_{ij}$  est le temps de propagation qui dépend de la géométrie satellite-

Station et des perturbations ionosphériques et troposphériques.

On déduit que la phase du signal reçu au sol est relié à la phase transmise par le satellite par:

$$\Phi_{ij}^r(t_j) = \Phi_i^l(t_j - \tau_{ij})$$

### 3- la mesure précise du temps :

Pour valider tout le raisonnement qui précède, il faut que la mesure du temps soit extrêmement précise. En effet, si une erreur d'un millième de seconde est faite, cela produit une erreur de position de 300km !

A la vitesse de la lumière, une très grande précision est de rigueur.

Les horloges internes des satellites sont très précises car il s'agit d'horloges atomiques au césium, cependant celles des récepteurs sont beaucoup moins.

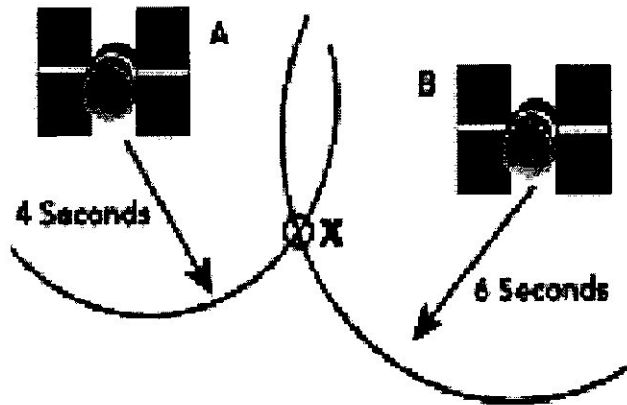


La solution : utiliser un 4<sup>ème</sup> satellites.

Essayons de comprendre comment 4 mesures imprécises de satellites peuvent donner une mesure précise de positionnement, pour cela ramenons-nous à un espace à 2 dimensions car le raisonnement est le même.

➤ Etape n° 1 :

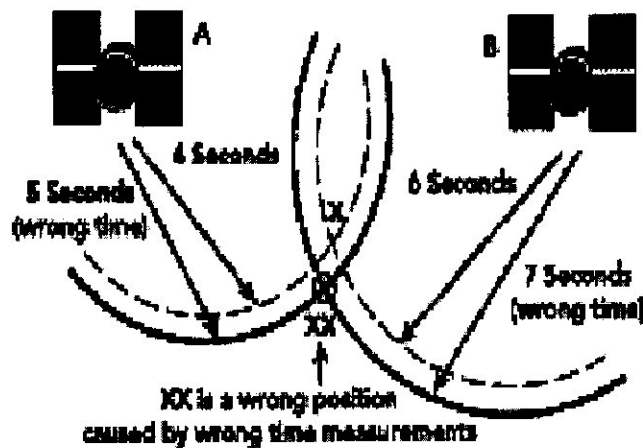
Dans un espace 2D, il faudrait 2 satellites pour repérer un point.



Le satellite A mesure 4 secondes, le satellite B mesure 6 secondes. A l'intersection de ces deux mesures on obtient le point x.

➤ Etape n° 2 :

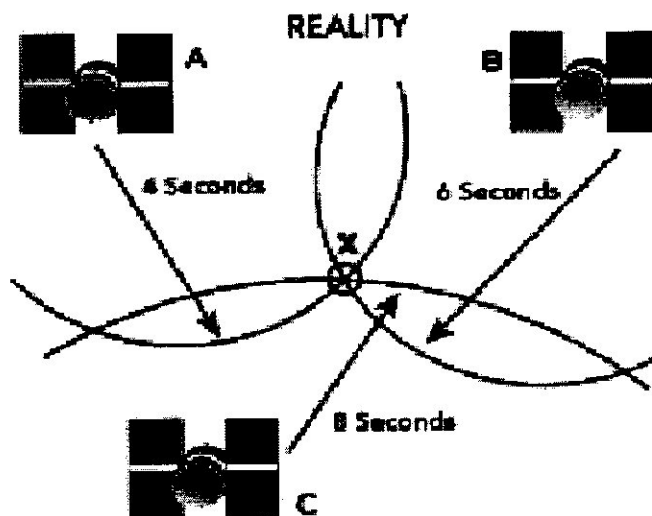
Mais les satellites on commis une erreur d'une seconde.



Au lieu de trouver le point x, c'est le point xx qui calculé.

➤ Etape n° 3 :

En utilisant un troisième satellite, sans erreur de mesure.

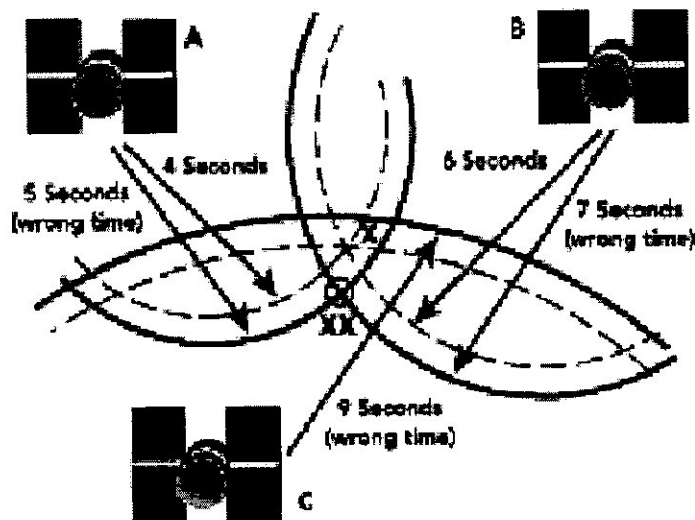


Le 3<sup>ème</sup> satellite confirme le résultat des deux autres.

L'utilisation de cette méthode avec trois satellites permet alors à l'utilisateur de déterminer ses distances  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  par rapport à trois satellites de positions connues. Ainsi, si  $(x, y, z)$  sont les coordonnées de l'utilisateur et  $(x_i, y_i, z_i)$  celles des satellites, on obtient le système de trois équations à trois inconnues ci-dessous dont la résolution aboutit aux coordonnées (longitude, altitude, latitude) de l'utilisateur.

➤ Etape n° 4 :

Dans le cas d'une erreur d'une seconde de chaque satellite



Le 3<sup>ème</sup> satellite permet de définir une zone pour laquelle se trouve le point à trouver.

### ➤ **Synchronisation de l'horloge du récepteur :**

Afin d'ajuster son horloge, le récepteur GPS utilise l'intersection des cercles de position. Si l'horloge du récepteur est en avance, le temps de propagation du signal apparaîtra plus long que le temps réellement mis par le signal pour parvenir au récepteur. Celui-ci positionnera alors les satellites plus loin qu'ils ne le sont dans la réalité et les cercles de position seront plus grands qu'ils ne le devraient.

Si l'on prend trois cercles de positionnement par rapport à trois satellites, ces cercles se chevauchent, formant une zone au centre de laquelle l'on devrait se situer. Le récepteur retardera alors son horloge jusqu'à ce que cette zone devienne aussi petite que possible.

Au contraire, lorsque l'horloge du récepteur est en retard, il voit les cercles de position plus petits qu'ils ne sont en réalité. Les cercles s'écartent les uns des autres. Lorsque l'horloge du récepteur GPS est parfaitement synchronisée sur celle des satellites, les trois cercles se coupent exactement en un seul point.

Les satellites de la constellation Navstar comportent des horloges atomiques qui sont quotidiennement remises à l'heure par les stations de contrôle de l'armée américaine. Il est donc possible à l'utilisateur de régler également son horloge sur cette heure précise.

### **4- modes de positionnement :**

On distingue deux modes de positionnement qui se différencient par la manière de lier les mesures à un système de référence.

#### **4.1- positionnement relative :**

Le positionnement relatif fait intervenir deux récepteurs qui enregistrent simultanément les signaux GPS sur 2 points différents. Dans ce cas, on s'intéresse au vecteur spatial reliant ces 2 points. La connaissance d'un point de référence dans un système de coordonnées permet de rattacher précisément chaque vecteur à ce dernier, c'est pourquoi l'on parle de positionnement relatif. Ce mode est utilisé pour les applications de géodésie et de mensurations précises car la précision obtenue est de l'ordre du mm. (Voir figure 8).

## 5- calcul de la position et la vitesse :

### 5.1- la position :

Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. On mesure la distance entre l'utilisateur et certain nombre de satellites de positions connues. On définit ainsi des sphères centrées sur des satellites et dont l'intersection donne la position. Le récepteur GPS est capable d'identifier le satellite qu'il utilise à l'aide du signal pseudo aléatoire émis par chaque satellite.

Il charge, à l'aide de ce signal, les informations sur l'orbite et la position du satellite. Pour mesurer la distance qui sépare le satellite du GPS, on mesure le temps T mis par le signal pour aller de l'un vers l'autre.

Le signal voyageant à la vitesse de la lumière, la distance recherchée est donnée par :

$$d = c \cdot T$$

La mesure de T nécessite une manipulation : le satellite et le récepteur émettent tous deux au même instant (instant réglé sur l'horloge général du système GPS) le code pseudo aléatoire PRN (le récepteur en génère une réplique).

Le récepteur retarde ensuite le début de cette émission jusqu'à ce que son signal se superpose avec celui provenant du satellite. la valeur de ce retard est ainsi le temps mis par le signal pour se propager du satellite jusqu'à l'utilisateur. L'utilisation de cette méthode avec trois satellites permet alors à l'utilisateur de déterminer ses distances  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  par rapport à trois satellites de positions connues.

Ainsi, si  $(x, y, z)$  sont les coordonnées de l'utilisateur et  $(x_i, y_i, z_i)$  celles des satellites, on obtient le système de trois équations à trois inconnues ci-dessous dont la résolution aboutit aux coordonnées de l'utilisateur.

$$R_1^2 = (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2$$

$$R_2^2 = (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2$$

$$R_3^2 = (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2$$

$T_i$  correspond à la durée du trajet reliant le satellite au récepteur. ( $R_i = c \cdot T_i$ ),  
 $c = 3 \cdot 10^8$  m/s.

### **5.2- la vitesse :**

Le système GPS permet également de mesurer la vitesse à laquelle se déplace l'utilisateur. Cette évaluation se fait par mesure de doppler sur le signal provenant d'un satellite GPS. Le principe de doppler explique pourquoi la sirène d'une ambulance paraît plus aiguë quand elle s'approche d'un observateur et plus grave si elle s'éloigne de lui, en effet, le signal perçu par le récepteur GPS n'a pas exactement la même fréquence que lorsqu'il est généré par le satellite. Suivant le principe doppler, le rapport des fréquences est fonction des positions et des vitesses relatives du satellite et de l'utilisateur. La vitesse du satellite est calculée de l'éphéméride transmise par celui-ci et les coordonnées sont calculées lors de la détermination de la position.

### **6- les récepteurs GPS :**

Les récepteurs GPS peuvent, selon leur architecture, être sous-divisée en trois catégories :

- Les récepteurs multi-canaux
- Les récepteurs séquentiels.
- Les récepteurs multiplex.

**6.1- les récepteurs multi- canaux :** forment le trop-niveaux des récepteurs GPS. Ils sont généralement utilisés pour des applications ultra précises ou dans des applications de positionnement dynamique. Ces récepteurs disposent d'un canal de réception par satellite, par lequel chaque satellite peut être suivi en continu. On peut encore faire une distinction entre les récepteurs SPS et les récepteurs PPS. Les récepteurs SPS mesurent uniquement les codes C/A et les phases  $L_1/L_2$  alors que les récepteurs PPS peuvent également faire des mesures sur le code P.

**6.2- les récepteurs séquentiels :** existent en version un ou deux canaux. Le deuxième canal est généralement utilisé pour l'acquisition d'un satellite initial et pour recevoir le message de navigation. L'autre canal traite les satellites un après l'autre avec une fenêtre d'observation typique de 1 seconde par satellite. Cela implique, pour chaque satellite, une courte phase d'initialisation. Cette méthode a pour conséquence que le récepteur peut seulement déterminer une position tridimensionnelle toutes les 4 à 5 secondes. En outre, cette position est moins précise puisque les mesures des différents satellites ne sont pas effectuées en même temps.

**6.3- Les récepteurs multiplex :** forment un compromis entre les récepteurs multi- canaux et séquentiels. Ils peuvent, malgré un principe de fonctionnement analogue à un récepteur séquentiel, et grâce à une conception améliorée, faire un enchaînement entre les différents satellites en moins de 20 millisecondes. Pour les récepteurs multiplexe, comme pour les récepteurs séquentiels, le message de navigation est téléchargé, pour chaque satellite, d'une manière asynchrone. C'est pourquoi le premier calcul de position demande de plus de temps.

### **7- la navigation par GPS :**

Cet appareil de navigation basée sur le code GPS offre une panoplie de fonction permettant de contrôler le déplacement de l'utilisateur.

#### **7.1- les paramètres de navigation :**

Nous avons vu que le récepteur calcule une position en coordonnées x, y, z à un instant t, si l'on considère une succession d'événements dans le temps , on obtient pour chaque époque une nouvelle position .l'intervalle de temps entre deux époques peut être programmé dans le récepteur . On choisit en général un intervalle de quelques secondes. Si l'utilisateur se déplace, le récepteur peut construire le vecteur liant 2 points successifs et calculer la direction de déplacement ainsi que la vitesse. De cette manière, on obtient des informations précises pour la navigation. Le récepteur fournit cette information de la manière suivante :

**TRACK :** direction de navigation par rapport au Nord géographique.

**SPEED :** vitesse de déplacement en km/h ou en miles /h.

**TRIP :** trajet horizontal parcouru depuis un point de départ fixé par l'utilisateur.

**POSITION :** coordonnées actuelles dans la référence choisie.

**ALT :** altitude.

Certains appareils permettent d'enregistrer le trajet parcouru avec une marque de temps pour chaque point. Pour une entreprise devant gérer une flotte de camions ou de bateaux, on peut transmettre cette information en temps réel, via un moyen de télécommunication, à une centrale.

#### **7.2- les outils de navigation :**

Le récepteur GPS ne fournit pas seulement des paramètres de navigation ; il permet également à l'utilisateur de programmer et de gérer son déplacement.

Ceci se fait par l'intermédiaire de l'enregistrement de points de destination (waypoints) ou de routes. (Voir figure 11).

Lors de la planification d'un déplacement, on peut lire les coordonnées de points remarquables sur une carte topographique ou marine. Ensuite on stocke ces points dans le récepteur et on peut définir une route comme une suite de points. Le déplacement entre deux points est à considérer comme un segment de droite.

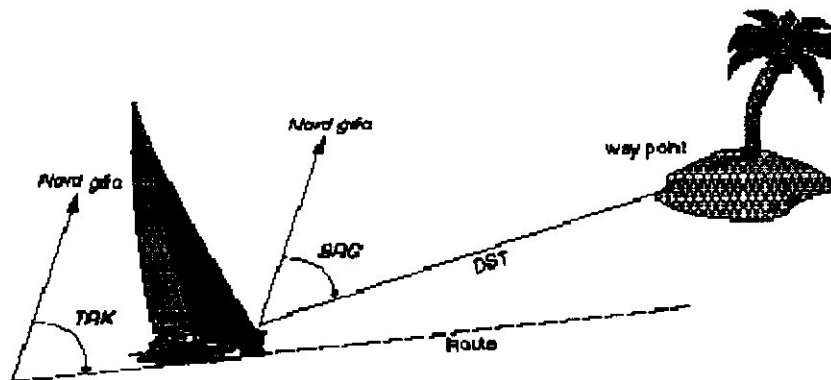


Figure 11 : les paramètres de navigation

Lorsque l'utilisateur désire se rendre sur un point fixe, il sélectionne une fonction (GOTO) lui permettant d'activer le point choisi. Le récepteur va calculer les éléments géométriques reliant sa position actuelle et le point de destination sélectionné. Si le navigateur se déplace avec une certaine vitesse, il peut notamment connaître le temps nécessaire pour atteindre son but.

Le récepteur de type Garmin fournit cette information de la manière suivante :

Compass page

- => BRG (bearing) : azimuth entre la position instantanée et le way point
- => DST : distance horizontale entre la position instantanée et le way point
- => TRK : direction de navigation par rapport au Nord géographique
- => SPEED : vitesse de déplacement en Km/h ou en Miles/h
- => ETE : estimation du temps nécessaire pour atteindre le but

Lorsque l'on choisit une route, le récepteur sélectionne les points dans l'ordre donné. Dès qu'il atteint un point intermédiaire, il passe automatiquement au suivant. On peut ainsi décrire une trajectoire contenant une multitude de points. Si le trajet est sinueux, il suffit d'enregistrer assez de points. Certains appareils ont une possibilité de visualiser le trajet parcouru. Un petit affichage présente la

trajectoire suivie depuis le point de départ. Ceci offre à l'utilisateur une vision d'ensemble de sa navigation, plus particulièrement lorsqu'il choisit une route à suivre. Les récepteurs de dernière génération permettent même d'afficher une carte comme fond d'écran. On voit alors la ligne de trajet parcouru se superposer à la carte. Ceci est particulièrement intéressant lorsque l'on doit se référer à des repères terrestres ou à un balisage maritime.



## I- MILIEUX DE PROPAGATION

### 1- L'atmosphère :

#### 1.1- Types d'atmosphère:

Du point de vue altitude on a l'habitude de parler de trois atmosphères :

##### a) Atmosphère inférieure :

Elle représente les couches inférieures qui constituent l'environnement terrestre elle s'étant à une altitude de 10 km à 15 km selon l'endroit (la troposphère).

##### b) Atmosphère moyenne :

C'est la région intermédiaire qui s'étant entre 15 km et 60 km d'altitude, elle est plus difficilement accessible à l'observation (stratosphère).

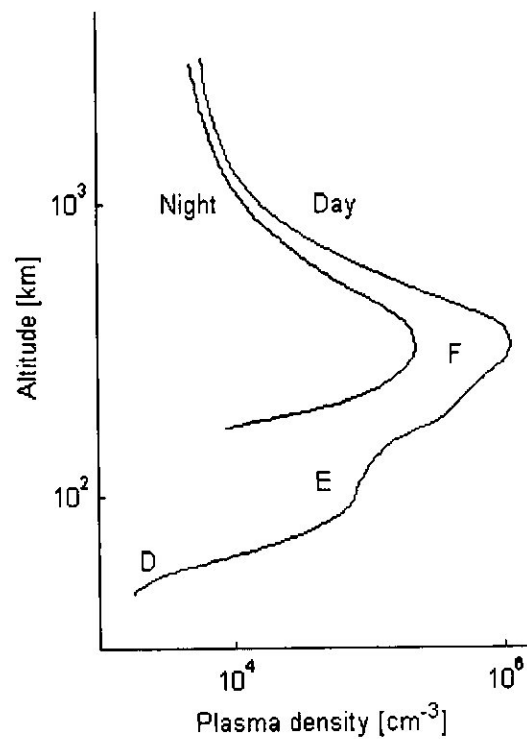
##### c) Atmosphère supérieure :

C'est la partie supérieure qui a été découverte est étudiée grâce au développement des fusées et des satellites. Elle s'étend de 60 km à 2000 km en dessus de la terre (la ionosphère).

### 1.2- la ionosphère :

L'ionosphère est ainsi nommée par ce que c'est une région de l'atmosphère où existent des ions. Dans la plupart des régions de l'atmosphère, les molécules sont à l'état combiné et restent électriquement neutres. Dans l'ionosphère, cependant, le rayonnement solaire (principalement l'ultraviolet) est si intense que lorsqu'elle frappe les molécules de gaz elle les partitionne, on dit qu'elle les ionise, un électron est ainsi rendu libre. Le résultat est un ion positif (molécule ou atome à qui il manque un électron) et un électron libre. Bien que ce soit les ions qui ont donné leur nom à cette région, ce sont principalement les électrons qui affectent les ondes radio. Le nombre d'électrons commence à croître à une altitude d'environ 30 km mais leur densité n'est pas suffisante pour affecter les ondes radio jusqu'à environ 60 km. On pense souvent à l'ionosphère comme ayant un certain nombre de couches distinctes. Ceci convient pour beaucoup d'explications mais ce n'est pas entièrement exact car toute l'ionosphère contient des molécules ionisées et des électrons libres. Au lieu de cela, les couches doivent plutôt être vues comme des

maxima de niveau d'ionisation. Pour identifier de façon simple et rapide les couches, maxima ou régions nous nous référeront à elles par les lettres D, E et F. Il existe aussi une couche C mais son niveau d'ionisation est si bas qu'elle n'a pas d'effet détectable sur les ondes radio. (voir figure 1).



*Figure 1: le contenu de la ionosphère*

### 1.2.1- Les couches ionosphériques :

La couche D est la plus basse, à des altitudes comprises entre 60 et 80 km. Elle est présente durant la journée, quand elle est frappée par le rayonnement solaire. Cependant, du fait que la densité de l'air est encore élevée à cette altitude, les ions et les électrons se recombinant assez rapidement. Après le coucher du soleil, quand le rayonnement solaire est bloqué par la terre, la concentration en électrons libres chute rapidement et la couche D disparaît. Au-dessus de la couche D, le

prochain niveau d'ionisation est appelé couche E. On le trouve à des altitudes entre 100 et 125 km. Du fait que les électrons et les ions se recombinant assez rapidement ici, le niveau d'ionisation chute rapidement après le coucher du soleil. Bien qu'une petite quantité d'ionisation résiduelle persiste, la couche E disparaît pratiquement la nuit. La couche la plus importante pour les communications à longue distance est la couche F. Durant le jour elle se scinde souvent en deux sous-couches que l'on nomme F1 et F2,. La nuit, les deux sous-couches se fondent en une unique couche F. L'altitude de la couche F varie considérablement en fonction du moment de la journée, de la saison et de l'état d'activité du soleil. L'été, la couche F1 peut être à 300 km, avec la couche F2 à 400 km ou plus. L'hiver, ces chiffres peuvent être de 150 km et 200 km respectivement. La nuit, la couche F est généralement autour de 250 à 300 km. Ces chiffres varient considérablement cependant et ne doivent être considérés que comme des approximations. Comme avec les couches D et E, le niveau d'ionisation dans la couche F décroît la nuit. La vitesse de recombinaison est beaucoup plus faible cependant car cette couche se situe plus haut, dans une région où la densité de l'air est beaucoup plus faible. (NDT : le libre parcours moyen des électrons étant plus grand, il mettent plus de temps avant de rencontrer l'ion qu'ils vont neutraliser). Du fait que l'ionisation demeure durant la nuit, elle peut encore affecter les signaux radio.

### 1.2.2- Le soleil et l'ionosphère :

Il n'est pas surprenant que les variations solaires affectent l'ionosphère. Un facteur majeur est le nombre de tâches visibles. Les tâches apparaissent à la surface du soleil comme des zones sombres. Ces tâches peuvent être vues quand on projette l'image du soleil sur un écran ou une feuille de papier blanc.

Les tâches affectent l'ionosphère par ce que les zones autour de ces tâches émettent de grandes quantités de rayonnement ultraviolet, principal facteur d'ionisation. (Note : Ne jamais regarder directement le soleil, même à travers des verres sombres ou noircis. Procéder ainsi peut conduire à une altération irréversible de la vision). Le nombre de tâches varie, grossièrement, en conformité avec un cycle de 11 ans. Cela signifie que les conditions ionosphériques, et donc de propagation radio, varient en synchronisme avec ce cycle. Au point bas du

cycle, les bandes HF au-dessus de 20 MHz environ ne permettent plus la propagation ionosphérique. Au maximum du cycle de 11 ans et à son voisinage, les fréquences de 50 MHz et plus peuvent être utilisées avec succès.

### 1.2.3- profil d'ionisation :

Il est de coutume de diviser l'ionosphère en plusieurs couches caractéristiques de la distribution verticale moyenne de la concentration électronique, en utilisant la nomenclature basée sur les sondages radioélectriques. L'allure de la distribution verticale moyenne de la concentration électronique de 1000 Km d'altitude est donné par la figure 2 : La figure montre des valeurs maximales et minimales typique respectivement d'une ionosphère de jour et d'une ionosphère de nuit.

- profil d'ionisation jour et nuit  $n$  (électrons/m<sup>3</sup>)
- fréquence des collisions  $\nu$  (Hz).

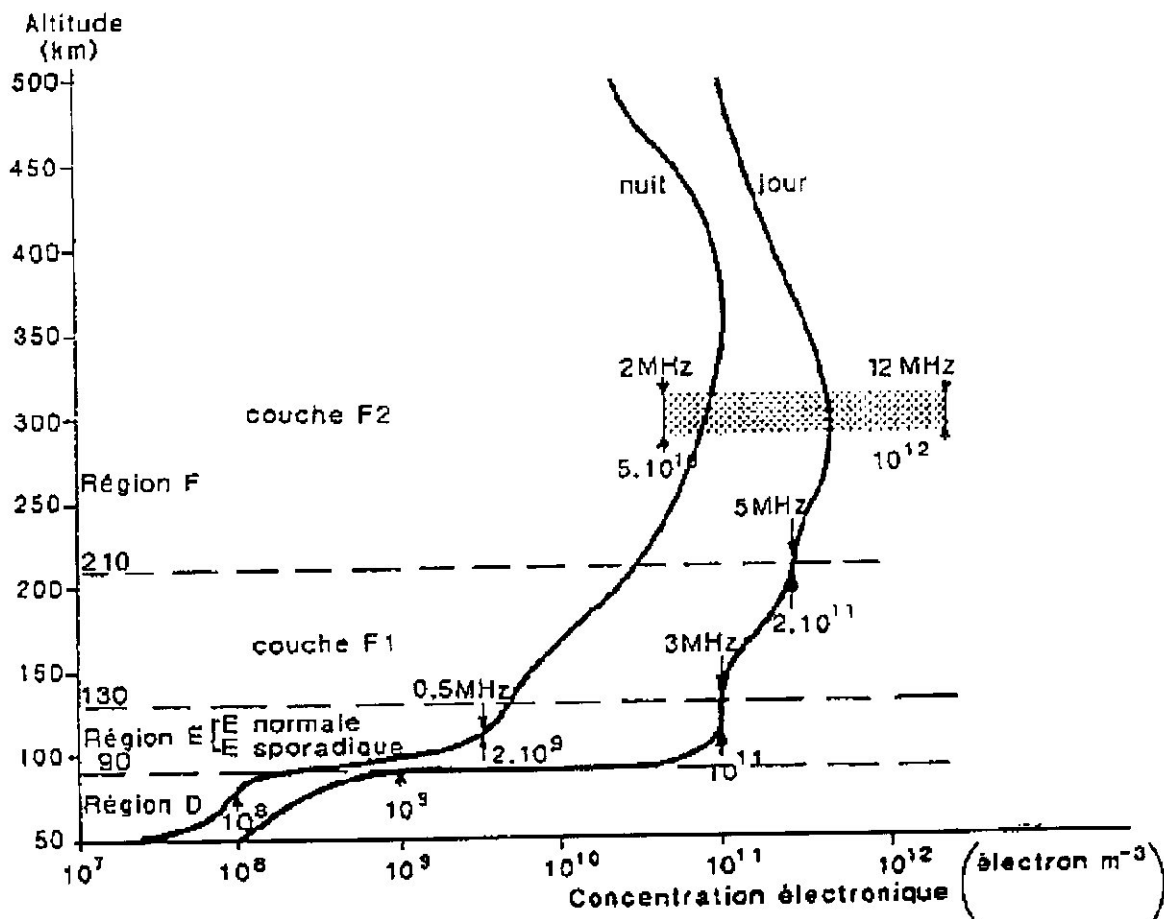


Figure.2: Distribution de l'ionisation en fonction de l'altitude

#### 1.2.4- ordre et origine de l'ionosphère de la haute atmosphère :

Par ordre d'importance décroissante, les agents ionisants de la haute atmosphère sont :

- les photons solaires UV et X (distance zénithale du soleil)
- des particules chargées ( $e^-$ , protons etc....) d'origine solaire, cosmique ou magnéto sphériques.
- L'absorption d'un rayonnement incident par une tranche de l'atmosphère peut conduire à :
  - l'excitation d'atomes.
  - La dissociation de molécules.
  - L'ionisation d'atomes (photo-ionisation).

Le soleil joue donc le rôle principale est par suite les caractéristiques de l'ionosphère varient au rythme de l'activité solaire en particulier on retrouve dans ces variations :

- une composante diurne.
- Une composante annuelle.
- Une composante ayant une période d'environ 11 ans (périodicité de l'activité solaire moyenne).

La densité d'électrons résulte d'un équilibre entre ces processus de création d'électrons et les processus de dés ionisation qui sont :

- la recombinaison particule positive – particule négative.
- La capture d'un électron par un atome neutre.

Lorsqu'un rayonnement UV ou X pénétré dans l'atmosphère il rencontre des couche de plus en plus denses, ce qui tendrait à faire augmenter le taux de production d'électrons, mais l'intensité du rayonnement décroît à cause de l'absorption il existe donc une altitude ou le taux de production d'électrons est maximal.

L'ionosphère est donc un fluide faiblement ionisé qui est électriquement neutre.

Les lois de la formation des ions doivent tenir compte de :

- la distribution spectrale de l'éclairement solaire aux plus courtes longueurs d'onde.
- La structure des courants corpusculaires solaires et galactiques.
- La composition chimique de l'atmosphère et de ses caractéristiques physiques telles que : la pression, la température, ...etc.

Les variations de l'activité solaire doivent également être considérées.

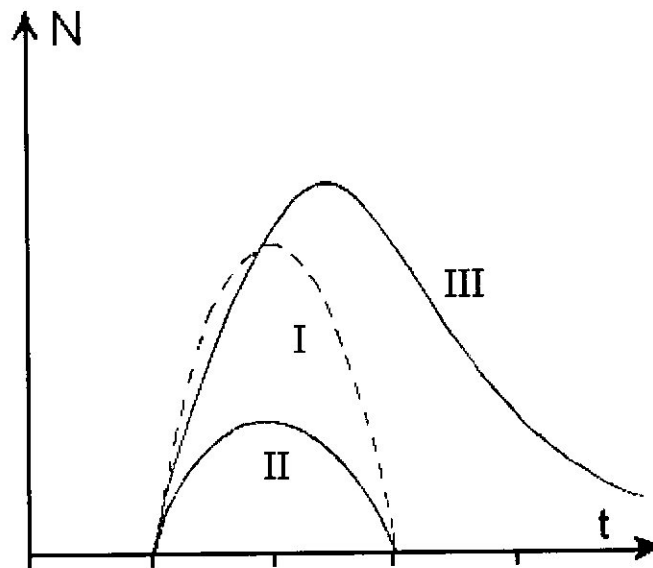
Dans une hypothèse d'une ionisation, on trouve donc en premier lieu un gaz constitué pour une part d'ions positifs et d'autre part d'électrons. Les électrons peuvent alors :

- se recombinant avec l'atome ionisé dont ils sont issus pour donner naissance à un atome neutre de même nature que l'atome générateur c'est un effet de recombinaison.
- être capturés par un ion positif d'un autre, c'est un effet d'annexion.
- dans certains cas, l'ion positif capteur est un ion moléculaire et la capture de l'électron ( $e^-$ ) peut dissocier la molécule, c'est un effet de recombinaison dissociative.

La présence d'un champ électrique ou magnétique influera sur le comportement des particules chargées, mais il est évident que les incidences des actions induites sur les ions ou les électrons seront quantitative disproportionnées puisque la masse de l'électron ( $e^-$ ) ne vaut que (1/1843) de la masse de l'atome d'hydrogène.

### 1.2.5 - Taux de disparition électronique :

Par suite de l'agitation thermique et de l'attraction entre les ions de signes opposés, les atomes et les molécules neutres tendent à se reformer. On retrouve le phénomène inverse de la photo-ionisation : une recombinaison avec émission d'énergie appelée recombinaison radiative :  $X^+ + e^- \rightarrow X + h\nu$ . Le nombre de recombinaisons par seconde et par unité de volume est proportionnel au carré de la densité électronique ( $N$ ) et est donc de la forme  $\alpha N^2$ . Le coefficient de proportionnalité  $\alpha$  est appelé coefficient de recombinaison. Le taux de disparition électronique est donc  $\alpha N^2$ .



*Figure 3 : Variation de la densité électronique au cours du temps*

Courbe I :  $P(t)$ , variation schématique du taux de production électronique au cours de la journée ; courbe II : variation schématique de la densité d'électrons au cours de la journée, dans le cas d'une recombinaison intense; courbe III : variation schématique de la densité d'électrons au cours de la journée, dans le cas d'une recombinaison lente

Cette figure illustre qualitativement le comportement de la densité électronique  $N(t)$  au cours du temps, dans deux situations extrêmes:

- Si le coefficient de recombinaison  $\alpha$  est élevé, tout accroissement du facteur ionisant  $P(t)$  entraîne presque immédiatement un accroissement correspondant de  $N$  : la valeur de  $N$  ne diffère jamais beaucoup de sa valeur dans un état d'équilibre ( $dN/dt$  négligeable). Tout se passe comme si la couche ionisée passait par une suite d'états d'équilibre. La densité électronique  $N$  répond sans inertie aux variations pas trop rapides du taux de production  $P$ . Cette situation est représentée par la courbe II ( $N^2 P(t)/\alpha$ ). Elle rend approximativement compte du comportement de l'une des régions ionisées, la région E.
- Si la valeur de  $\alpha$  est faible ou si les variations de  $P$  sont brusques, la recombinaison est en retard sur ces variations :  $N^2(t)$  n'est plus proportionnel à  $P(t)$  : la couche présente de l'inertie.



➤ **2- Les perturbations solaire sur le GPS :**

Les perturbations solaire se manifestent principalement par :

- perturbations ionosphériques à début brusque, il sont de courte durée et intéresse surtout la région D de l'ionosphère.
- Les absorptions sévères d'onde électromagnétique dans les régions polaires.(absorption polaire).
- Les orages magnétique ou variations anormales de l'induction terrestre sur l'ensemble du globe accompagnée d'orages ionosphériques intéressant toutes les régions.
- Des aurores visibles au dessus des régions de latitudes élevées.

Ces effets ont un rôle très important sur notre cas qui le positionnement par satellite GPS car les signaux GPS sont transionosphériques.

## II- LES SOURCES D'ERREURS

### 1- Introduction :

Les sources d'erreurs affectant la précision du GPS sont multiples. Certaines sources d'erreurs sont d'origine naturelle, d'autre d'origine technique. Le tableau suivant fournit les contributions à l'erreur dues à chacun de ces composantes.

Source d'erreurs	Erreur typique mètre
Ionosphère non modélisée	4
Troposphère	0.7
Réflexions parasites	1.4
Horloge et précision des satellites	3.0
Bruit du récepteur	0.5
Erreur par satellite	Environ 5.5 m

Tableau: contribution des sources d'erreurs

La précision de la position dépend non seulement de l'erreur induite par chaque satellite, mais aussi de la géométrie des satellites, c'est-à-dire de la manière dont les satellites, qui servent à déterminer la position, sont répartis dans le ciel. Afin de connaître l'erreur induite sur la position, l'erreur par satellite doit être multipliée par un facteur appelé diminution de la précision (PDOP).

### 2- Erreurs d'origine naturelle :

#### 2.1- l'ionosphère :

La couche de l'atmosphère comprise entre 60 et 2000 kilomètres d'altitude composée d'air ionisé – retarde la propagation des signaux qui la traversent. L'ionosphère est responsable de plupart des erreurs du GPS. Une partie de retards liés à l'ionosphère peut être facilement modélisée, car ils sont valables sur une grande région. Ces informations de navigation permettent au récepteur de corriger le temps de propagation du signal. Malheureusement, il n'est pas possible de

modéliser tous les retards induits par l'ionosphère. Il est cependant possible de corriger plus de 50% de ces erreurs.

### **2.2- La troposphère :**

La couche basse de l'atmosphère qui s'élève jusqu'à une dizaine de kilomètres d'altitude- engendre des retards dans la réception des signaux. Ils peuvent difficilement être modélisés : ils dépendent de la température, de la pression et de l'humidité de l'air.

La réflexion du signal sur des objets proches du récepteur produit des échos qui interfèrent parfois sur le signal reçu et provoquent ainsi un décalage. Si l'écho est suffisamment fort, il peut même être pris pour le signal lui-même lorsque le satellite est masqué. Il est important de noter que l'erreur typique ne considère pas les effets dus à des réflexions parasites supérieures à un angle de  $5^0$  par rapport à l'horizontal.

### **2.3- Les multi trajets :**

Ces phénomènes sont parmi les plus difficiles à appréhender. Il est clair que tout objet réflecteur placé dans le voisinage de l'antenne de la station GPS, peut renvoyer une partie du signal provenant du satellite sur cette antenne. Tout comme un miroir crée une image de soi même lorsque l'on se regarde dedans, le réflecteur crée une image de l'antenne GPS. C'est la position de cette antenne virtuelle que l'on risque alors de mesurer en lieu et place de la véritable antenne. Qui plus est, au fur et à mesure que le satellite se déplace sur son orbite, l'angle d'incidence sur le réflecteur change, et l'image se déplace d'autant. C'est donc finalement la position d'une antenne virtuelle mobile que l'on mesure ! Compte tenu de la complexité des calculs correctifs qu'il faudrait effectuer, il n'y a pas vraiment de remèdes aux problèmes des multitrajets. La seule solution consiste donc à essayer d'éviter les multi trajets (c'est à dire les objets parasites) autant que faire se peut, ce qui n'est pas si facile quand on considère que le sol lui même est un réflecteur potentiel.

### **3- Erreurs d'origines techniques :**

La dérive de l'horloge du satellite non corrigée par la station de contrôle ainsi que la précision de l'éphéméride peuvent provoquer des erreurs. Le bruit introduit par le codage du signal de navigation peut aussi entraîner des imprécisions sur la

Valeur de ces signaux. Le bruit ainsi que la précision de l'horloge du récepteur produit également des erreurs dont la valeur dépend de la qualité des récepteurs utilisés.

### 3.1- Validité sélective (SA) :

La validité sélective (SA) est l'erreur introduite volontairement par le département de la défense des États-Unis afin de dégrader les performances du GPS.

Le SA a été utilisé jusqu'en mai 2000 afin d'éviter que le GPS ne soit utilisé pour construire une arme autoguidée d'une précision suffisante pour atteindre une cible. À partir de cette date, le SA a complètement été supprimé par l'armée américaine, celle-ci ayant dès lors la possibilité d'interdire tout accès au GPS dans les zones de conflit militaire.

La validité sélective était responsable de la plus grande partie des erreurs du GPS. L'erreur introduite par le SA était différente pour chaque satellite. Le SA introduisaient un mouvement très lent autour de la position exacte ; il a été observé que la position affichée par un récepteur GPS lorsque le SA était activé variait d'environ 1 mètre par seconde comme le montre la figure suivante :

Erreurs de pseudorange de GPS - une série chronologique d'exemple

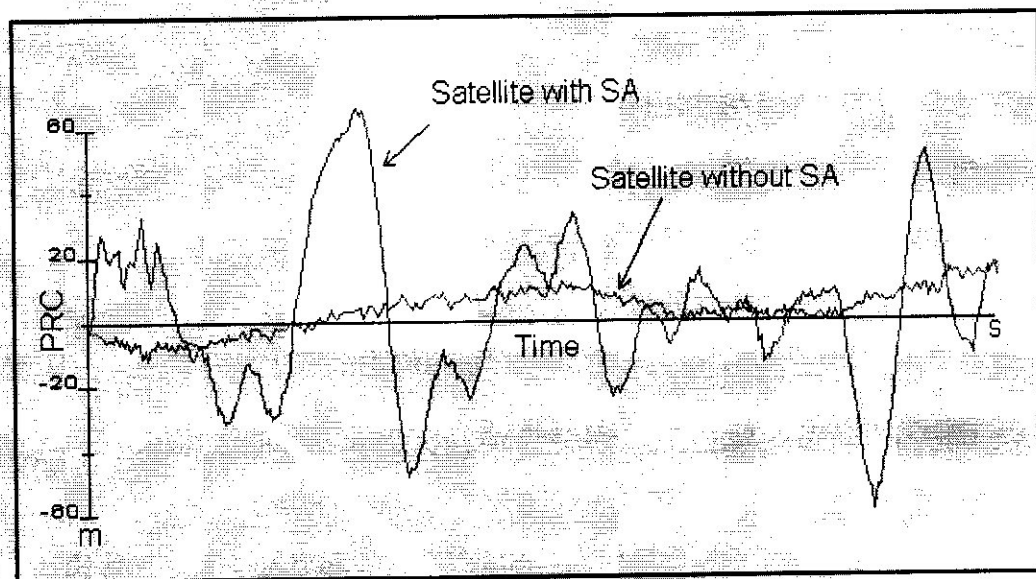
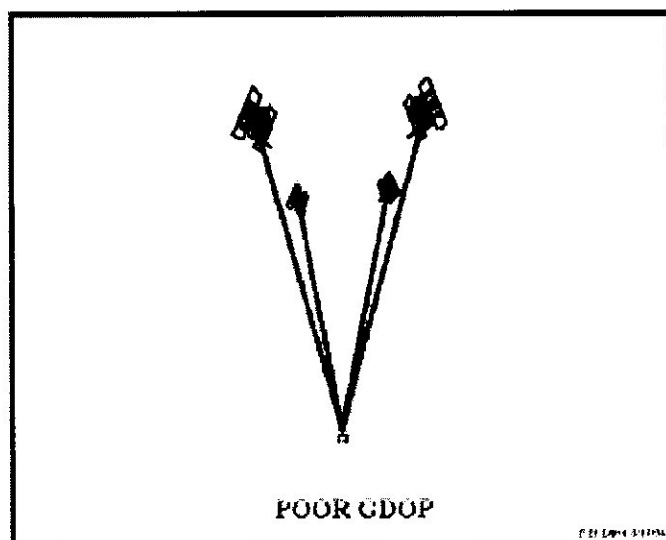


Figure 4: erreurs de pseudo range de GPS

### 3.2- Diminution de la précision :

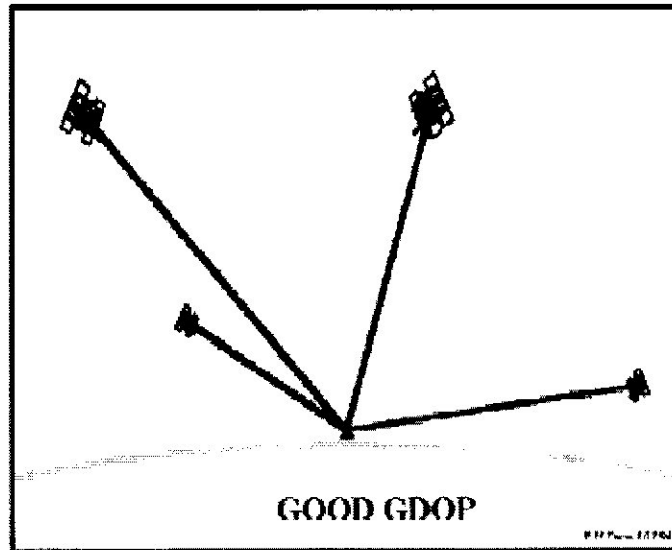
La distance de chaque satellite peut être évaluée avec une précision caractéristique de l'ordre de 5 mètres. Cependant, le positionnement par satellite requiert l'utilisation de plusieurs satellites pour qu'une position en deux ou trois dimensions puisse être déterminée. L'erreur total sera donc supérieur à la précision fournie par chaque satellite et dépendra essentiellement de la position des satellites entre eux. La géométrie des satellites est ainsi appelée diminution de la précision géométrique (GDOP, Geometry dilution of précisions).

Afin de connaître la précision de la position, il faut multiplier l'erreur introduite par les satellites par un facteur qui dépend de la géométrie des satellites sélectionnés en fonction de la position du récepteur. Lorsque les satellites sont groupés, comme sur la figure suivante, le GDOP obtenu est très grand, et la position imprécise.



*Figure 5 : GDOP très grand et une position imprécise.*

On obtient un bon facteur de GDOP lorsque tous les satellites forment des angles différents entre eux et aussi grands que possible, comme sur la figure suivante :



*Figure 6 : un bon GDOP et une position précise.*

A partir du GDOP, on détermine différents facteurs :

- PDOP (Position Dilution Of Précision) permet de définir la précision d'une position en trois dimensions ;
- HDOP (Horizontal Dilution Of Précision) permet de définir la précision de la latitude et de la longitude.
- VDOP (Vertical Dilution Of Précision) permet de définir la précision de l'altitude.
- TDOP (Time Dilution Of Précision) permet de définir la précision de l'heure.

Tous ces termes sont liés, le nombre de satellites et leur position ont été calculés pour qu'au moins 4 satellites soient toujours en vue, avec un PDOP inférieur ou égal à 6. Le facteur HDOP est le plus important puisque de lui dépend directement la précision de la position horizontale. Un HDOP supérieur à 12 ne permet plus de donner une position avec une fiabilité suffisante.

#### **4- Autres sources d'erreurs :**

Outre les erreurs courantes que nous venons de passer en revue, les performances du GPS peuvent être dégradées lorsque surviennent certains événements comme la panne ou l'arrêt d'un satellite. Nous recensons ici les principales sources d'erreur pouvant survenir.

##### **4.1- mauvais fonctionnement d'un satellite :**

Un problème, ou la panne d'un satellite, peut très bien n'être détecté et corrigé par les stations au sol, qu'au bout d'un délai de 3 heures. Cela signifie que votre récepteur peut recevoir des informations erronées pendant près de 3 heures avant d'être informé que les informations provenant de ce satellite ne doivent pas être utilisées. Cependant, l'on a constaté que le temps de réponse à une panne est généralement de 10 à 30 minutes. Le système GPS différentiel corrige immédiatement de telles anomalies.

Les erreurs introduites lors du mauvais fonctionnement d'un satellite peuvent être de plusieurs centaines de kilomètres. Dans ce cas, la plupart des récepteurs GPS rejettent le satellite car il ne permet pas de résoudre la position. Le récepteur rejette également un satellite si celui-ci présente des variations très importantes. Cependant, lorsque l'erreur n'est que de quelques centaines de mètres, le récepteur n'écarte pas systématiquement le satellite défectueux.

##### **4.2- Arrêt d'un satellite :**

Un satellite peut cesser d'émettre pour plusieurs raisons. En particulier pour permettre la maintenance du satellite. L'arrêt du satellite peut également être dû à une panne du satellite.

Lorsqu'un satellite n'émet plus alors qu'il devrait permettre au récepteur de résoudre la position, PDOP en est affecté. La précision de la mesure peut donc en être dégradée.

Lorsqu'un satellite est indispensable pendant une durée de 6 heures, la probabilité pour qu'il soit en vue est de 63%. La durée moyenne pour laquelle ce satellite sera en vue est de 3 heures.

La probabilité pour qu'au moins 21 satellites soient en fonctionnement est de 99%. Il a été estimé que la totalité des arrêts de satellite cumulés ne dépasse pas 18 heures par an.

**4.3- Erreurs dues à l'utilisateur :**

Sélectionner un mauvais système géodésique peut entraîner une erreur de plusieurs centaines de mètres. L'introduction de coordonnées erronées d'un waypoint (points de route) représente une autre source d'erreur assez courante. L'erreur peut être due à une confusion des chiffres saisis ou à une erreur de système géodésique.

**4.4- Panne du récepteur :**

Le récepteur n'est pas à l'abri de pannes qui engendrent des erreurs dont la distance est difficilement prévisible.



## MODELISATION DES EFFETS DE L'IONOSPHERE SUR LE GPS :

### 1- Introduction :

On peut à partir de principe physique établir des modèles mathématiques assez conforme à la réalité, la répartition de l'ionisation en fonction de l'altitude ; on se fonde à cet effet sur des estimations du :

- flux solaire ionisant.
- La distribution verticale des constituants neutres de l'atmosphère et de leurs capacités d'absorption.
- La distance zénithale du soleil.

Les signaux GPS subit un grand déficit des couches ionosphériques de l'atmosphère. Comme le signal traverse l'ionosphère, il affronte deux retards :

Le premier vient de l'inflexion du signal et le second du ralentissement du signal. Ceci pose beaucoup de problèmes aux utilisateurs GPS, surtout les utilisateurs de GPS mono fréquences. L'idée principale du GPS dépend du calcul du temps exacte que met le signal pour passer du satellite au récepteur.

L'effet de l'inflexion du signal est minimisé en utilisation un angle d'élévation de coupure de ( $10^0$  à  $15^0$ ) [Dejong, 1991], donc le facteur remarqué est le retard de propagation du signal.

Le retard ionosphérique est directement proportionnel a la densité d'électron libre et inversement proportionnel a la fréquence du signal comme ce qui indiqué dans la formule suivante

[Dodson, 1986].

$$n = 1 \pm \left[ \frac{A_1 N_e}{f^2} \right]$$

Où :  $n$  = l'indice de réfraction.

$A_1$  = constante (40.3) en [SI units].

$N_e$  = la densité d'électron libre dans l'ionosphère [électron/m<sup>3</sup>]

$f$  = fréquence du signal [Hz] .

Une estimation précise de l'indice de réfraction dépend de la précision de l'estimation de la densité d'électron libre le long du trajet du signal, qui est contrôlé par l'activité du soleil.

L'activité solaire à une période moyenne de 11 ans, la dernière activité solaire maximale c'est déroulé en l'an 2000.

Le retard ionosphérique est considéré à être l'une des principales sources des dérives (biais) d'observation pour les utilisateurs mono fréquence. Durant l'activité maximale ionosphérique, le retard ionosphérique peut être de l'ordre de 300 ns, ce qui produit autour de 100 mètres d'erreurs de distance [Newby and Langely, 1992].

### 2- Effets ionosphériques :

Ces effets varient en fonction de l'activité solaire (taches solaires) et sont plus prononcés sous les latitudes septentrionales et à l'équateur.

Actuellement, la seule manière fiable de minimiser ces effets consiste à utiliser des récepteurs **GPS bifréquences** pour tenir compte de la plus grande partie de l'erreur. D'importants effets ionosphériques peuvent également entraîner la perte du «verrouillage» des signaux GPS, ce à quoi il n'y a aucune manière de remédier. Il est toujours conseillé de surveiller les bulletins de prévisions de l'activité ionosphérique et d'éviter les périodes d'intense activité ionosphérique.

### 3- Erreurs De Propagation Atmosphérique :

Les signaux satellites propagent par des couches atmosphériques pendant qu'ils voyagent du satellite au récepteur. Deux couches sont généralement considérées en traitant le GPS: l'ionosphère qui s'étend d'une taille de 70 à 1000 kilomètres au-dessus de la terre, et la troposphère de 8 à 15 kilomètres (Gu et autres, 1993). Pendant que le signal se propage à travers l'ionosphère, le porteur éprouve une avance de phase et les codes éprouvent un groupe retarde. En d'autres termes, l'information de code de GPS est retardée ayant pour résultat les pseudo ranges étant mesurés trop longtemps par rapport à la distance géométrique au satellite (Hofmann-Wellenhof et autres, 1992). Le point auquel les mesures sont retardées dépend du (TEC) le long du chemin qui est une mesure de la densité d'électron. Qui dépend de trois facteurs:

- la latitude géomagnétique du récepteur.
- l'heure.
- l'altitude du satellite.

Sensiblement plus grand retarde se produisent pour des signaux émis par des satellites basse altitude (puisque'ils voyagent par une plus grande section de l'ionosphère), faisant une pointe pendant la journée et s'abaissant pendant la nuit (due au rayonnement solaire). Dans les régions près de l'équateur géomagnétique. Le retard de la ionosphère dépend de la fréquence, et peut donc être éliminé en utilisant des observations doubles fréquence GPS, par conséquent les deux fréquences porteuses dans la conception de GPS. Les utilisateurs du récepteur simple fréquence, cependant, peuvent partiellement modeler l'effet de l'ionosphère en utilisant le modèle de Klobuchar. Huit paramètres pour ce modèle sont transmis par les données d'émission pour les satellites. Ces polynômes ont comme conséquence une évaluation de retard vertical de l'ionosphère. La valeur finale fournit une évaluation à moins de 50% du vrai retarde (Cohen et autres, 1992) et produit une retarde s'étendre de 5m (nuit) à 30m (jour) pour des satellites basse altitude et à 3-5m pour des satellites de hauts altitude à de mi latitudes.

#### **4- Amélioration de la précision :**

##### **4.1- DGPS :**

Le différentiel GPS (DGPS) se fonde sur le concept que les erreurs en position à un endroit sont semblables à ceux pour tous les endroits dans un secteur (local) donné. Par des mesures de raccordement GPS à un point avec des coordonnées connues, ces erreurs peuvent être mesurées et des corrections peuvent être appliquées aux autres endroits. En appliquant ces corrections en temps réel. DGPS est maintenant une technique bien pratiquée pour des secteurs tels que la navigation, terrestre et en mer .....

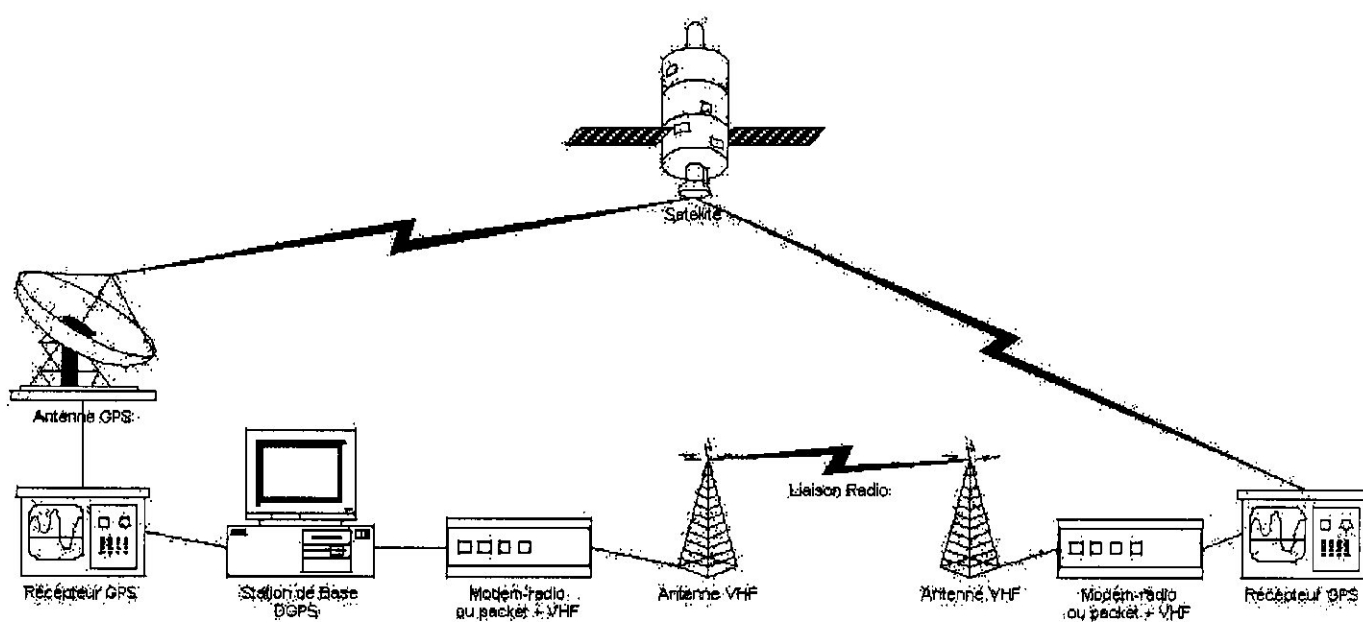
##### **➤ Base du DGPS :**

Devant les performances variables des systèmes GPS traditionnels et les dégradations (Selective Availability) introduites par le Département Of Défense des USA les constructeurs de matériels ont cherché une solution pour améliorer la précision. C'est ainsi qu'est né le système Différentiel GPS qui repose sur une base fixe (composée d'un récepteur GPS et d'un ordinateur équipé du logiciel adéquat) dont la position est connue et qui va comparer sa position effective (connue) et les données fournies par le GPS qui lui est connecté, de la différence des deux positions (effective et GPS) des algorithmes complexes vont déduire le niveau de dégradation des signaux émis par les satellites. La base pourra ainsi transmettre

aux GPS de terrains les corrections à apporter aux données reçues des satellites. Il existe plusieurs systèmes de DGPS, cependant, quel que soit le système utilisé, le DGPS est généralement constitué de trois composantes suivantes :

- une station de contrôle terrienne qui recueille en permanence les données émises par les satellites et qui calcule les corrections à apporter pour chaque satellite ;
- un moyen de transmissions des informations de corrections. l'émetteur peut se situer au même endroit que la station de contrôle ou bien être déporté, par exemple dans le cas d'un satellite. les informations peuvent également être enregistrées pour un traitement différé ;
- un récepteur capable de recevoir les informations de corrections DGPS et connecté à un récepteur GPS équipé d'une fonction de correction différentielle. Lors de traitement en mode différé, les informations reçues sont simplement enregistrées, puis traitées ultérieurement. La précision du DGPS varie de quelques mètres à quelques millimètres, suivant la technique utilisée et la qualité des récepteurs. Cependant, dans tous les cas, la précision dépend de la distance entre le récepteur et la station de contrôle. Plus la distance les séparant est grande, moins la précision est bonne. Il existe deux solutions pour appliquer les corrections DGPS :

➤ **par liaison radio** : un modem radio transmet les informations de correction issue de la base DGPS aux récepteurs GPS eux même équipés d'un modem radio. (Ces signaux de correction sont au format RTCM).



*Figure 1 : représentation schématique de DGPS*

Ce type de liaison est assez lourd à gérer car il nécessite une installation plutôt complexe : modem-radio ou modem packet + radio (VHF) + antenne à chaque extrémité de la liaison (coté base et coté récepteur GPS). Les liaisons modem-radio ayant un rayon d'action limité (de 3 à 100km suivant puissance des émetteurs et gain des antennes) il faut parfois se rabattre sur une solution paquet radio basée sur un émetteur/récepteur HF nécessitent des aériens (antennes) volumineux et peu transportables de plus des problèmes de licences d'opérateur radio peuvent être requises en fonction du pays d'utilisation.

➤ **par post-processing** : de retour de collecte des données (en mode GPS normal), les données issues du récepteur GPS sont introduites dans un logiciel spécifique sur la base DGPS et les traitements de correction d'erreur sont alors réalisés à posteriori. Ce système s'il présente parfois des performances inférieure à la liaison radio est cependant beaucoup plus souple à gérer.

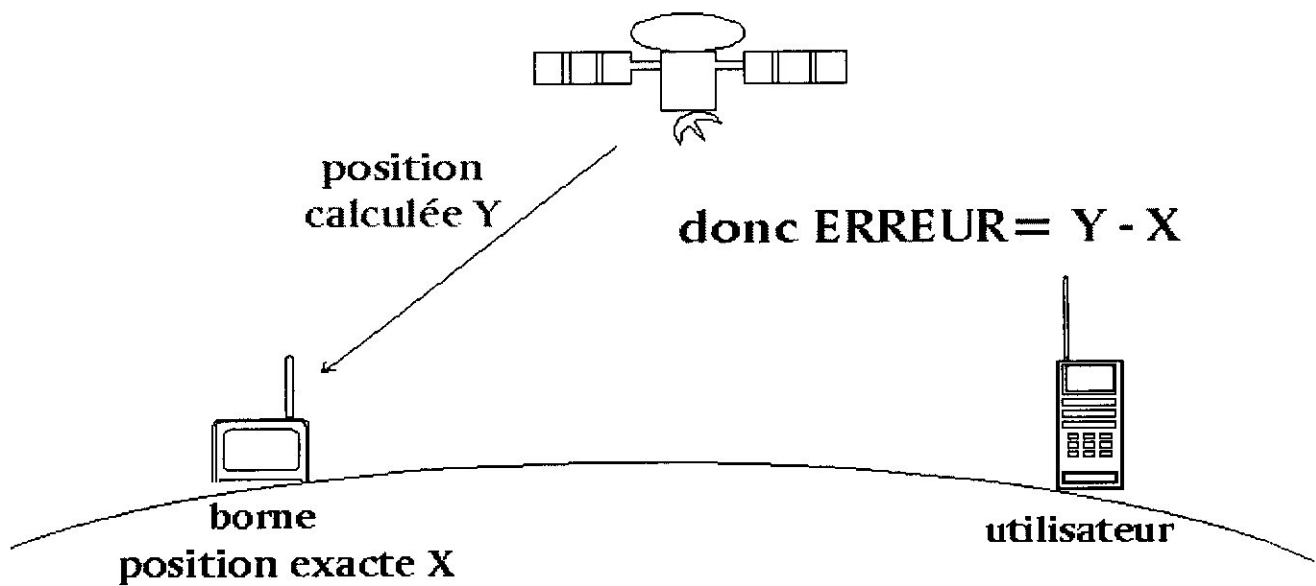
Cause	Erreur (en mètres)
Horloge atomique	0 m
Position satellite	0 m
Traversé ionosphère	0,4 m
Traversé troposphère	0,2 m
Précision du récepteur	0,3 m
Réflexion parasites	0,6 m
Sélective Availability (SA)	0 m
<b>TOTAL</b>	<b>1,5 m</b>

Tableau : les erreurs commises par le DGPS

#### 4.2- GPS par analyse de phase des fréquences porteuses :

Basé sur le principe du GPS ou couplé à un système DGPS, les récepteurs équipés de ce dispositifs intègrent un algorithme analysant le signal provenant des satellites et connaissant la longueur d'onde de la porteuse utilisé par ceux-ci va en déduire les erreurs introduites dans le calcul du récepteur GPS voir DGPS. La précision de ce système est très importante, centimétrique ou millimétrique suivant le temps de mesure. Il n'est cependant que peu utilisé en raison du coût des équipements. On voit bien que pour certaines applications particulières, la précision obtenue dans le meilleur des cas n'est pas suffisante : navigation routière, ou arienne...il ne s'agit pas d'atterrir à 50 m de la piste ! Rapidement le besoin d'une précision de l'ordre du mètre s'est fait sentir, c'est ainsi qu'a été créé le GPS différentiel, dont voici le principe de fonctionnement :

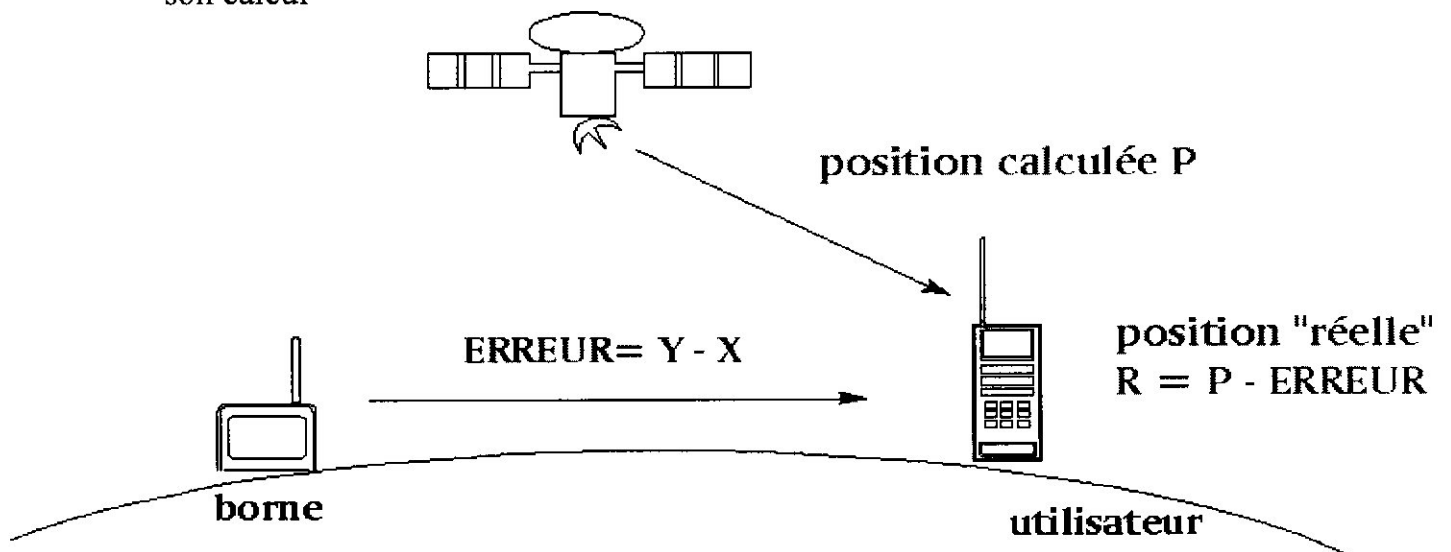
- Un récepteur est muni d'un dispositif qu'il lui permet de recevoir des informations provenant d'une borne.
- Des bornes ont été installées à travers le monde, qui connaissent exactement leur position



*Figure 2 : positionnement de la station de référence*

Considérons une borne à une position X et un récepteur à proximité :

- la borne calcule une position Y en utilisant un satellite
- elle déduit donc l'erreur commise par la mesure :  $\text{erreur} = Y - X$
- elle envoie au récepteur l'erreur que celui-ci devra prendre en compte dans son calcul



*Figure 3 : Calcul de la position réelle*

- Ce dispositif très fiable permet d'obtenir une précision de 1 mètre environ tout comme pour le système GPS normal, le système DGPS subit des perturbations influençant directement les performances, cependant celles-ci sont moins importantes.

### 5- Influence du centre de phase des antennes :

Le point physique où se matérialise l'onde GPS qui arrive sur l'antenne réceptrice est appelé le **centre de phase** de l'antenne. Le problème est que ce point est immatériel, que sa localisation au millimètre près est très difficile, et qu'en plus sa position a tendance à dépendre de l'angle incidence et de l'azimut du signal. Il apparaît donc que l'on ne mesure pas la position d'un point fixe : le centre géométrique de l'antenne, mais la position d'un point mobile dans un espace qui peut aller jusqu'à 10mm de rayon. Il n'y a pas d'autre solution que de **calibrer** parfaitement chaque antenne, afin d'établir une cartographie précise de la position du centre de phase en fonction de l'azimut et de l'élévation du signal incident. Cette "fonction d'appareil" devra être appliquée à chaque mesure de phase. En pratique, de tels calibrages sont extrêmement difficiles à réaliser. On procède donc de manière relativement empirique : en n'utilisant que des antennes identiques, toutes alignées dans la même direction. si la **position** de chaque antenne varie dans le temps, la **distance** entre les antennes reste bien invariable, le centre de phase de toutes les antennes se déplaçant en même temps de la même quantité dans le même direction.

### 6- Autre méthode :

#### 6.1- phase porteuse (Carrier Phase) :

Dans des applications techniques très sensibles (tectonique des plaques par exemple), il est nécessaire d'obtenir une précision encore meilleure (de l'ordre du centimètre). Le système utilisé est le " Carrier Phase GPS " (GPS à décalage de porteuse). Comme il est difficile de savoir si les deux signaux se superposent exactement, le Carrier Phase GPS compare non pas ces signaux, mais leur porteuse (qui ont une fréquence 1000 fois supérieure), ce qui permet un ajustement 1000 fois plus précis.



**6.2- La moyenne :**

Il faut laisser le récepteur GPS sur le point à mesurer pendant un temps relativement long. Le récepteur est configuré pour enregistrer périodiquement un point (multiple de 30 secondes). A la fin de la mesure, on télécharge les points sur un micro-ordinateur et on effectue une simple moyenne. En fonction de la durée et des conditions des mesures, on obtient une meilleure précision.

**6.3- Le GPS bi-fréquence :**

Les ondes émises par les satellites GPS orbitant à 20200 km d'altitude doivent donc traverser cette couche avant d'arrivée sur la Terre. Le signal GPS est perturbé comme toute onde électromagnétique traversant un milieu conducteur. Cette perturbation se manifeste par un retard, c'est à dire que la vitesse de propagation de l'onde dans ce milieu conducteur qu'est l'ionosphère est plus faible que ce qu'elle serait dans le vide. Le temps de propagation de l'onde est donc plus long que ce qu'il serait dans le vide, ce qui conduit à surestimer la longueur de la distance satellite-station

Si l'onde GPS se propageait dans le vide, la phase vaudrait :

$$\Phi = \frac{f \cdot r}{c}$$

Où  $f$  est la fréquence de l'onde,  $r$  la distance à parcourir, et  $c$  la vitesse de propagation (la vitesse de la lumière dans le vide).

Du fait de la propagation dans un milieu conducteur (l'ionosphère) il faut considérer une perturbation. Au premier ordre, l'ionosphère peut être considérée comme un milieu dispersif, c'est à dire que le retard induit est inversement proportionnel au carré de la fréquence de l'onde. Sur la phase, cela se traduit par un décalage qui est inversement proportionnel à la fréquence de l'onde. On peut donc écrire la phase :

$$\Phi = \frac{f \cdot r}{c} - \frac{k}{f}$$

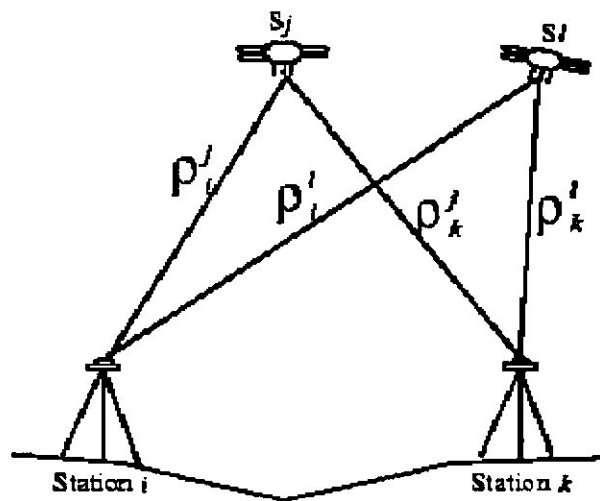
Où  $k$  est un nombre qui dépend de la conductivité de l'ionosphère, c'est à dire de la densité d'électrons et d'ions dans ce milieu. Le problème vient du fait que ce

$$\Phi'_{ik} = \Phi'_k - \Phi'_i$$

$$\Phi'_{ik} = f(dt_i - dt_k) + \frac{f}{c}(\rho'_k - \rho'_i) - (N'_k - N'_i)$$

On remarque que le décalage d'horloge satellite est éliminé par cette différence.

**b) La double différence :**



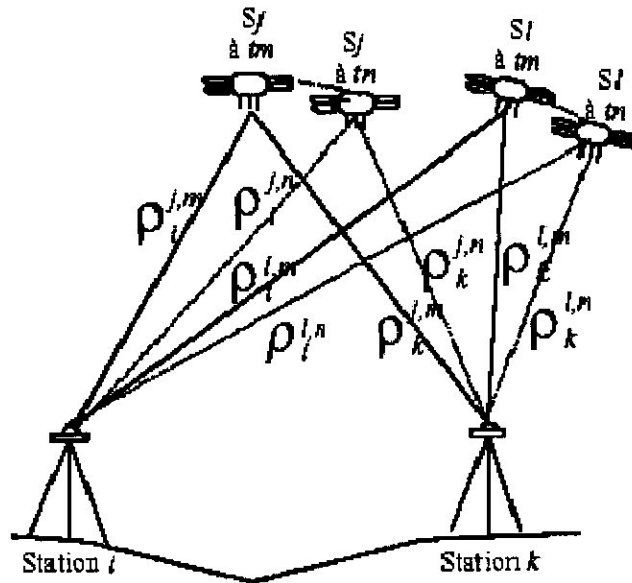
Les deux stations  $i$  et  $k$  observent les deux satellites  $j$  et  $l$  simultanément, et on forme la double différence:

$$\Phi''_{ik} = \Phi''_{ik} - \Phi''_{ik}$$

$$\Phi''_{ik} = \frac{f}{c}(\rho'_k - \rho'_k + \rho^j_i - \rho^j_i) - (N'_k - N'_k + N^j_i - N^j_i)$$

On remarque que le décalage des horloges réceptrices en  $i$  et  $k$  est éliminé par cette différence.

c) Triple différence :



Les stations  $i$  et  $k$  observent toujours simultanément les satellites  $j$  et  $l$ , et on considère ici les mesures à deux époques  $tm$  et  $tn$ . On forme la triple différence:

$$\Phi_{ik}^{j,l,tn} = \Phi_{ik}^{l,n} - \Phi_{ik}^{j,m}$$

$$\Phi_{ik}^{j,l,tn} = \frac{f}{c} (\rho_k^{l,n} - \rho_k^{j,n} + \rho_i^{j,n} - \rho_i^{l,n} - \rho_k^{l,m} + \rho_k^{j,m} - \rho_i^{j,m} + \rho_i^{l,m})$$

On remarque que les ambiguïtés entières sont toutes éliminées; en effet l'ambiguïté entière pour une station et un satellite est constante dans le temps tant qu'il n'y a pas d'interruption du signal.

La triple différence est d'ailleurs un des moyens de détection des sauts de cycles.

**7- le retard ionosphérique :**

La vitesse de propagation dans la ionosphère dépend de la densité électronique à l'instant de la propagation et le long du trajet.

La correction dépend de la fréquence de l'onde et en première approximation peut être exprimée sous la forme:

$$\Delta\rho^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} \int Neds$$

Avec  $\int ds Ne$  le nombre total d'électrons sur le trajet.

La correction ionosphérique peut-être éliminée ou déterminée en utilisant des mesures sur les deux fréquences. En effet on peut dire que, les deux signaux parcourant le même trajet au même instant, la quantité d'électrons rencontrée est la même et on peut alors comparer les distances obtenues sur les deux fréquences. Soit  $\rho_1$  et  $\rho_2$  les distances mesurées sur  $L_1$  et  $L_2$ ,  $\rho_t$  et la distance théorique.

On a :

$$\rho_1 = \rho_t + \Delta\rho_1^{iono}$$

$$\rho_2 = \rho_t + \Delta\rho_2^{iono}$$

$$\Delta\rho_1^{iono} = \frac{A}{f_1^2} \quad \text{et} \quad \Delta\rho_2^{iono} = \frac{A}{f_2^2} \Rightarrow \Delta\rho_2^{iono} = \frac{f_1^2}{f_2^2} \Delta\rho_1^{iono}$$

d'où

$$\rho_1 - \rho_2 = \Delta\rho_1^{iono} - \Delta\rho_2^{iono} = \Delta\rho_1^{iono} \left( 1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right)$$

et donc,

$$\Delta\rho_1^{iono} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\left( 1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right)}$$

On voit ici que l'utilisation de la combinaison  $L_2$  élimine le biais ionosphérique mais dans certains logiciels on peut aussi introduire des paramètres stochastiques ionosphériques ce qui permet de résoudre plus facilement les ambiguïtés entières. Pour un positionnement relatif, dans le traitement par double différence on voit que ce qui va rester c'est la correction relative à chaque extrémité de la ligne de base, et donc plus la ligne de base sera longue, plus le trajet suivi entre le satellite et chaque station sera différent et plus la correction ionosphérique sera importante. On admet que pour des lignes de base inférieures à 15-20 km la correction est la même aux deux extrémités et peut être éliminée par les doubles différences. Cependant l'erreur résultante peut être de l'ordre de 1 ppm. Lorsque l'on observe avec une seule fréquence, il est préférable d'utiliser un modèle d'ionosphère.

### 8- Modèles d'ionosphère :

#### ➤ Introduction :

Beaucoup de travail dans le domaine de modélisation de l'ionosphère a été élaboré avec les modèles développés qui varient en :

- Précision.
- Données d'entrée.
- Complexité de calcul.

Le choix entre ces différents modèles dépend des circonstances individuelles de l'utilisateur.

Plusieurs modèles sont disponibles pour les utilisateurs mono fréquence et peuvent être divisées en deux principales catégories :

#### ➤ premièrement :

Etat de l'art des modèles ionosphérique , nécessite des centaines de coefficients avec une pénalité énorme dans la complexité de calcul a des fin de simulation , mais qui convient a une variation moyenne et mensuelle du retard de mesure ionosphérique avec une biais résiduel de 10% approximativement , de modèles typique : l'IRI (the International Reference Ionosphere ) et le modèle de BENT.

➤ **Deuxièmement :**

Modèles simple calcul avec une idéal description pour la moyenne des variations ionosphérique, mais avec d'autre imperfection tel que, faible précision dans la description de variabilité de la variation ionosphérique avec différentes latitudes et temps, faibles précision dans le calcul du retard ionosphérique et incapacité de modeler les changements les plus grandes de l'ionosphère a partir de ces variations moyennes.

Un modèle typique est le modèle klobuchar , pour lequel ces coefficients sont transmises a travers le message de navigation .

**8.1- le modèle de BENT :**

Le modèle de Bent [ Llewellyn et Bent, 1973] est un grand et universel algorithme, capable d'estimer avec précision le profil de la densité électronique et le retard associé , et les changements directionnel d'une onde due a la réfraction.

A l'origine il était désigné pour les communications terre-satellites mais peut être utilisé pour des communications de terre a terre ou satellite-satellite.

Les entrées nécessaire au modèle sont les positions de stations et satellites, l'information temps, les valeurs quotidiennes du flux solaire, les moyennes des 12 moins de l'écoulement du flux solaire et le nombres de taches solaires Zurich. Le modèle pour le calcul demande des comptes jusqu'à 80% du total de l'effet ionosphérique [ Newby et Langely, 1992].] .

**8.2- le modèle de klobuchar :**

C'est le modèle le plus utilisé vu sa simplicité .N'importe quel utilisateur GPS peut accéder au coefficient du modèle klobuchar dans le message de navigation diffusée.

Le centre européen pour la détermination d'orbite (CODE) fournit un nouvel ensemble de coefficients pour le modèle de klobuchar qui offre plus de résultats précise pour le calcul du retard ionosphérique.

Les produits du service GPS international IGS (International GPS Service) englobe les cartes ionosphérique globale dans le format IONEX-format (IONosphère EXchange format) qui permet le calcul de retard ionosphérique à n'importe quel endroit désiré et a n'importe quel moment.

➤ Etude du modèle klobuchar :

Le modèle Klobuchar [Klobuchar, 1982] a été désigné en se basant sur le modèle de BENT, il est le plus utilisé vu sa simplicité de calcul.

Le modèle a été établi sur une simple représentation cosinusoïdale du retard ionosphérique, avec une phase-zéro fixée à 14<sup>h</sup>:00 en temps local et un décalage temps nuit constant (DC) de 5 nanosecondes.

La période et l'amplitude de ces termes sont représentés par des polynômes de troisième degré en temps local et latitude géomagnétique.

Les huit (08) coefficients variables en temps de Klobuchar des deux polynômes sont diffusés dans le message de navigation GPS, et renouvelés tous les jours. Ces coefficients sont sélectionnés parmi 370 séries possibles de constantes par la station maîtresse de contrôle GPS et placés dans le message chargé du satellite afin de les transmettre sur le faisceau descendant vers l'utilisateur.

Ils sont basés sur deux coefficients, le jour de l'année et la moyenne solaire de flux 10.7 cm pour les cinq jours précédentes.

Le modèle de Klobuchar utilise les deux équations suivantes pour calculer le retard ionosphérique pendant le jour et la nuit respectivement :

$$\Delta T_{ion} = DC + A \cos \left[ \frac{2\pi(t - \phi)}{P} \right] \quad (\text{Jour})$$

$$\Delta T_{ION} = DC \quad (\text{Nuit})$$

Où :

- $T_{ion}$  = le retard vertical ionosphérique
- DC = décalage constant temps- de nuit (5 ns)
- A = amplitude dépend du retard ionosphère.
- $\Phi$  = décalage constant de phase (14:00 heures)
- t = temps local du récepteur.
- P = période dépend du retard ionosphère.

- Le modèle présente un lissage idéal de variation de l'ionosphère, donc aucune fluctuation significative de jours en jours ne sera modélisée proprement.

- La précision du model est limité de 50-60% de l'effet total [klobuchar, 1982] et [Dodson ,1988], basé sur une étude comparative du model contre 490 mois de données stations situées dans les régions auroral nordiques, et stations d'altitudes moyennes sudistes.
- Dans des circonstances spécial, comme activité sévère ionosphérique a des élévations basses, l'erreur de mesure peut être de l'ordre de 50m. [ Newby et al, 1990].

Le model klobuchar a un avantage, qui est du a sa simplicité et donc de calcul facile et rapide, mais il a aussi plusieurs imperfections, on cite par mis ces imperfections :

- Faible précision pour le calcul de correction du retard l'ionosphère.
- L'algorithme ne représente pas proprement la variation de l'ionosphère au prés de région équatorial du monde, a de tel incident les valeurs les plus hautes des retard ionosphérique peuvent parvenir.
- L'algorithme est optimisé pour des altitudes moyennes.
- L'algorithme est très faible dans des régions de hautes altitudes où la variabilité ionosphérique est très élevée à cause processus auroral.
- Le model général a une incapacité pour représenter la variation de l'ionosphère lorsque celui-ci diffère en quantités substantielles de variation moyenne.

### **9- Applications du GPS**

La navigation en temps réel est l'une des applications élémentaire et principale du GPS. Tout objet mobile muni d'un récepteur GPS peut connaître en temps réel sa position et sa vitesse dans un repère terrestre. La précision attendue pour un tel mode de navigation est de 10 à 15 mètres sur sa position et de quelques centimètres par seconde sur sa vitesse si l'utilisateur utilise le code précis et une centaine de mètres dans le cas contraire.

Que ce soit sur terre, sur mer, dans les airs ou dans l'espace, ces performances excellentes et le faible coût du récepteur GPS, fait de ce système un instrument de navigation très prisé. Seule la navigation civile aérienne est encore réticente pour des raisons techniques (l'intégrité du système, c'est à dire la certitude dans un temps très court, que tel ou tel satellite fournit ou non des données correctes, n'est pas assurée, et il faut installer de lourds moyens de surveillance de la constellation GPS) et politiques ( il faut beaucoup de garanties pour faire accepter par la



communauté internationale un instrument essentiel de navigation qui est entièrement dans les mains des militaires d'un pays). Mais la navigation en temps réel est loin d'être l'unique application du GPS.

### **9.1- Applications Militaires**

Des essais de guidage de bombes ont eu lieu dans le désert de Yuma. Les bombes ont été larguées à une altitude de 10 000 pieds (environ 3 kilomètres). L'erreur maximale entre la déflagration et la cible initiale était en moyenne de 56 pieds (17 mètres). L'application directe du GPS se trouve dans l'utilisation des missiles de croisière. A priori, le système NAVSTAR n'est pas approprié au guidage de missiles intercontinentaux (ou de tout autre de missiles) en terrain ennemi sur des milliers de kilomètres. Cependant l'utilisation de la navigation par GPS permet d'accroître les performances de certains missiles utilisés par le DoD. Pour les bombardiers utilisant le système NAVSTAR, pour déterminer la position de leurs cibles, peuvent potentiellement détruire de 400 à 600% d'unités ennemies de plus qu'en utilisant les systèmes de localisation habituels.

### **9.2- Applications Civiles**

Le système NAVSTAR est financé par des organismes militaires. Pourtant, nombreuses sont les applications civiles. Le GPS présente des avantages non négligeables vis-à-vis des conditions atmosphériques mais également vis-à-vis de sa non-dépendance en luminosité (signal accessible jours et nuits). Ainsi il donne lieu à de multiples utilisations :

L'utilisation du système NAVSTAR par d'autres satellites. Certains satellites d'observation de la surface terrestre utilisent le GPS pour déterminer leur position. Le GPS leur permet de calibrer très précisément les images qui leur sont commandées.

L'orbitographie des satellites de haute altitude La constellation NAVSTAR permet un positionnement précis aux satellites de basse et moyennes altitudes mais lorsqu'on franchit les 20 200 Km d'altitude des satellites GPS, le positionnement est plus délicat. Au-delà de cette altitude on ne peut recevoir des signaux GPS que des satellites situés dans l'hémisphère opposé de celle où l'on se trouve. La plupart de ces signaux sont cachés par la terre, ceux qui proviennent des satellites plus excentrés sont très affaiblis. Le système GPS reste cependant exploitable pour des satellites munis d'antennes à gain très important. La géométrie des satellites

utilisables n'étant pas optimum, la précision atteinte reste très en dessous de celle des satellites de basse altitude.

Pour les compagnies d'ambulances ou les services de police responsables de la vie et de la sécurité des citoyens mais aussi pour les compagnies de taxis désireuses d'améliorer leur efficacité, il est capital de connaître instantanément la position de chaque véhicule d'une flotte. Grâce au GPS, il nous est possible de visualiser directement la position d'un véhicule sur un écran. Ce système de localisation automatique de véhicule s'appelle AVLS. Un AVLS comprend :

- les équipements embarqués sur les véhicules
- le centre de commandement et de conduite
- la liaison de télécommunication

Le système GPS présente plusieurs avantages pour ces applications de localisation de véhicules :

- il est disponibles 24h/24h dans le monde entier
- il est indépendant des conditions météorologiques
- il est gratuit et le restera pendant au moins 7 ans
- il permet un positionnement précis en n'importe quel point du globe.

✓ **Aide à la navigation pour les trains :**

La navigation des trains est également touchée par le syndrome du système NAVSTAR. Des systèmes avancés de voies ferrées (ARES) sont actuellement développés. Les trains seront précisément positionnés en temps réel grâce au signal GPS. Leurs positions, par l'intermédiaire d'ondes radio 900 MHz, seront relayées au central. Celui-ci contrôlera le cheminement du train sur un écran et informera les voyageurs de tout retard en temps réel. Il pourra effectuer plus rapidement les interventions de maintenance et contrôler les correspondances entre cars et trains.

### **9.2.1- Le domaine maritime :**

En mer plus qu'ailleurs, un bateau à besoin de connaître sa position pur se déplacer. Le GPS permet de donner la position instantanément de embarcation sans le moindre calcul, ni instrument traditionnel (carte, boussole....). En mer, le GPS aide les navires à se rendre à destination en sécurité et de manière efficace.

**9.2.2- L'agriculture :**

Le GPS peut avoir de nombreuses applications dans le domaine de l'agriculture et des ressources naturelles.

Par exemple, on peut l'employer pour améliorer la fertilisation et la récolte en dirigeant le mouvement des machines agricoles. Après que les images des satellites de télédétection ont brossé un tableau de l'état des terres, le GPS entre en action pour orienter l'épandage des engrais ou diriger le déplacement des machines de récolte.

**10. Algorithme :**

1) Introduire les paramètres du récepteur et du satellite :

- Latitude du récepteur
- Longitude du récepteur
- Angle d'élévation du satellite
- Azimut du satellite

2) Calculer l'amplitude :

$$A = \alpha_1 + \alpha_2 * \text{lat} + \alpha_3 * \text{lat}^2 + \alpha_4 * \text{lat}^3$$

$$\alpha_1 = 1.117587e-8$$

$$\alpha_2 = -7.450581e-9$$

$$\alpha_3 = -5.960464e-8$$

$$\alpha_4 = 1.192093e-7$$

3) décalage constant de phase :

$$\Phi = 2 * \pi * (t - 50400) / P$$

Avec t = temps local du récepteur.

4) Calculer la Période du modèle:

$$P = \beta_1 + \beta_2 * \text{lat} + \beta_3 * \text{lat}^2 + \beta_4 * \text{lat}^3$$

$$\beta_1 = 1.146880e5;$$

$$\beta_2 = -1.6384e5;$$

$$\beta_3 = -1.96608e5;$$

$$\beta_4 = 9.17504e5;$$

5) calculer le retard ionosphérique pendant le jour et la nuit respectivement :

$$\Delta T_{ion} = DC + A \cos \left[ \frac{2\pi(t - \phi)}{P} \right] \quad (\text{Jour})$$

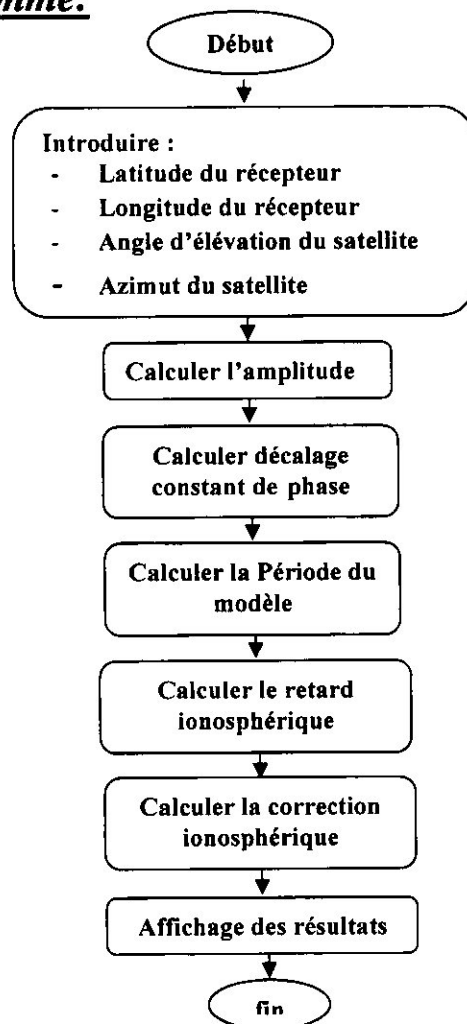
$$\Delta T_{ION} = DC \quad (\text{Nuit})$$

6) calculer la correction ionosphérique :

$$\Delta \rho^{ion} = sf * (5 * 10^{-9} + A * (1 - \Phi^2/2 + \Phi^4/24))$$

$$\text{Slant factor : } sf = 1 + 16 * (0.53 - e)^3$$

### 11. Organigramme:



## CONCLUSION

Au travers de ce travail modeste de projet de fin d'études, on a tenté de montrer que le GPS n'est pas simplement un appareil de mesure d'une position sur la Terre, mais qu'il est utilisé dans un grand nombre d'applications et de domaines d'activité à des précisions variables. En effet, la communauté civile a trouvé, dès la mise en place du projet GPS, un intérêt manifeste à développer des solutions pour le positionnement et la navigation.

On voit que le GPS s'impose comme un véritable outil d'aide à la navigation dans de nombreuses applications civiles. Toutefois les utilisateurs sont conscients qu'ils dépendent d'une administration américaine, où l'accent est mis sur le contrôle.

On peut apporter les perspectives suivantes :

- La localisation d'un lieu géographique restera une donnée essentielle pour la plupart des activités humaines et pour la gestion de ressources naturelles;
- Le GPS ne résout pas tout seul l'ensemble des problèmes de navigation et de positionnement;
- Le GPS ouvre une voie prometteuse pour le développement de systèmes de navigation fiables, précis et à la portée d'un large public. Mais le problème majeur du système GPS, est l'influence de la couche ionosphère, qui affecte le signal arrivant au récepteur.

Donc on a étudié par mis les modèles les plus utilisés pour la modélisation des effets de la ionosphère, **Le modèle klobuchar** qui reste le modèle pratique et simple pour le calcul du retard ionosphérique dans les signaux GPS en dépit de sa faible précision et sa faible description pour la variation de l'ionosphère. Cependant l'imperfection du modèle le rend incompatible pour des fins de simulation de données GPS.

En conclusion, quelle que soit la méthode utilisée pour corriger l'effet de la réfraction ionosphérique, modélisation ou doubles différences, il importe de disposer d'un outil (moyen) permettant d'étudier le TEC et ses gradients au-dessus des stations GPS, pour tenter d'obtenir la meilleure précision possible dans les mesures de positions par GPS.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Sandrine LEJEUNE « Les effets ionosphériques affectant les systèmes de positionnement par satellites », 2006.
- [2] Ahmed Hafid BEELBACHIR, « CONTROLE DE L'ACTIVITE IONOSPHERIQUE A PARTIR DES DONNEES GPS » le 29 mai 2006.
- [3] Sammuneh Muhammd Ali, « contribution au positionnement en temps réel par GPS prédiction de la correction ionosphérique ». Thèse soutenue le 15 décembre 2003, Ecole doctorale Astronomie et Atmosphérique d'Ile de France.
- [4] Jérôme Tarniewicz, « Données de propagation ionosphérique et méthodes de prévision requises pour la conception de services et de système stellites » 1990.
- [5] Docteur Mohamed Nadjib salahou «Global portioning system», University of Aleppo.
- [6] LOCALISATION PAR SATELLITE", UNIVERSITE D'ORLEANS, 2007-2008.
- [7] James Bao-Yen Tsui, « Fundamentals of Global Positioning System Receivers a software Approach" Copyright 2005 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New jersey.
- [8] « Guide pour le positionnement GPS»: Publié avec l'autorisation de Ressources Naturelles Canada (Juillet 1993).
- [9] René WARNAT, « L'effet de l'atmosphère sur les signaux GPS: une perturbation ou un signal géophysique?" Liège 2006.

### Adresse Internet :

- [1] <http://www.geologie.ens.fr/vigny/gps-processing-f.html#ION>
- [2] <http://www.aeronomie.be/fr/themes/systemterr/ionosphere-gps.htm>  
<http://www.sat-info.fr/rubrique,le-reseau-gps,comment-cela-fonctionne-s,les-erreurs-gps.php>
- [3] [erreurs-gps.php](http://www.sat-info.fr/rubrique,le-reseau-gps,comment-cela-fonctionne-s,les-erreurs-gps.php)
- [4] <http://gps-tpe.e-monsite.com/pages/facteurs-limlitant-l-efficacite-du-gps/perturbations-naturelles.html>
- [5] <http://www.fruitymag.com/ionospherique-probleme-d1126144.htm>