

REMERCIEMENTS

Au premier lieu, nous remercions Allah tout puissant de nous avoir donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste mémoire de fin d'étude.

Nous tenons particulièrement à remercier notre encadreur, M^r RAHMOUNI Mohamed pour ces aides précieuses qu'il nous a offerts à réaliser ce mémoire malgré ces occupations.

A M^r BENOURED Abdelhalim qui a bien voulu diriger notre travail et aussi pour les conseils qu'il n'a pas cessés de nous les prodiguer.

Nous remercions également les enseignants de département d'Aéronautique et toutes les personnes qui nous ont assistées soutenues de près ou de loin. Sans oublier nos amis qui restent dans l'ombre que nous n'oublierons guère.

Enfin, nous présentons tous nos honnêtes remerciements à monsieur le président et les membres du Jury qui ont accepté d'honorer par leur présence notre travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

✚ *A mes parents qui m'ont aidé
moralement et financièrement durant
tout mon cursus, et aussi mes frères et ma
sœur.*

● *A tout la famille Gouta et ses proches.*

● *A tous mes amis de tous les temps dont
Je ne peux citer les noms.*

✚ *Enfin je désire remercier toutes les
personnes qui ont participé de près ou de loin
à la réalisation de ce mémoire.*

Redouane



DÉDICACE

J'ai l'immense honneur de dédier ce mémoire :

A mes très chers parents qui étaient présents

Pour moi durant toute ma vie.

A mes chers frères et sœurs.

A tous mes amis

A tous qui m'ont aidé durant mes études universitaires



Mohamed



SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE 1 : Généralité sur le système GPS

1.1 Introduction.....	2
1.2 Différents types de système de navigation.....	2
1.3 Description du système GPS.....	3
1.4 Les services fournis.....	5
1.4.1 Le service PPS.....	5
1.4.2 Le service SPS.....	5
1.5 Le signal GPS.....	7
1.5.1 Le contenu du signal GPS.....	7
1.5.2 Acquisition du signal.....	10
1.6 Les Applications du GPS.....	10
1.7 Les Avantages et inconvénients du GPS.....	11
1.8 Principe du positionnement du GPS.....	12
1.9 Fonctionnement du GPS.....	13
1.9.1 Positionnement à partir du GPS.....	13
1.9.2 Triangulation classique.....	14
1.10 Le système WGS84.....	16
1.11 Les différents types de mesure.....	17
1.11.1 La mesure de distance.....	17
1.11.2 La mesure de phase.....	18
1.12 Le positionnement des satellites.....	20

1.12.1 Utilisation en mode « naturel ».....	20
1.12.2 Utilisation en mode « différentiel ».....	21
1.13 Visibilité et disponibilité des satellites.....	21

CHAPITRE 2 : Milieux de propagation et source d'erreur

2.1 L' Atmosphère.....	23
2.1.1 Définition.....	23
2.1.2 Quelques Gaz constituants de L'atmosphère.....	23
2.1.3 Couches Atmosphériques.....	23
2.1.3.1 L'ionosphère.....	24
2.1.3.2 La stratosphère GPS.....	25
2.1.3.3 La troposphère.....	25
2.1.3.3.1 Absorption troposphérique.....	26
2.1.3.3.2 Réfraction troposphérique.....	27
2.1.3.3.3 Dispersion troposphérique.....	28
2.1.3.3.4 Affaiblissements de propagation.....	28
2.2 Les sources d'erreurs	31
2.2.1 La réfraction dans l'ionosphère.....	31
2.2.2 La réfraction dans la troposphère.....	31
2.2.3 La précision des orbites des satellites GPS.....	32
2.2.4 Les multi trajets.....	33
2.2.5 Autres sources d'erreurs.....	33
2.2.5.1 Mauvais fonctionnements d'un satellite.....	34
2.2.5.2 Arrêt d'un satellite.....	34
2.2.5.3 Erreurs dues à l'utilisateur.....	34
2.2.5.4 Panne du récepteur.....	34

CHAPITRE 3 : Calcul d'erreur troposphérique

3.1 Introduction.....	35
3.2 Les paramètres météorologiques.....	35
3.2.1 L'humidité	35
3.2.2 La température.....	35

RESUME

Comme la troposphère joue un rôle important dans la communication et cette dernière présente beaucoup de turbulences dans l'espace et dans le temps, ainsi les chercheurs ont essayé de le modéliser pour déduire la valeur de l'erreur troposphérique, cette dernière joue un rôle important dans la précision des signaux GPS. Dans notre étude on l'estimera à partir de trois modèles des plus utilisés à savoir le Modèle de Saastamoinen, le Modèle de Hopfield et le Modèle de Goad et Goodman. À partir de ces modèles on étudiera l'influence des paramètres météorologiques (la pression, la température et l'humidité), ainsi que la variation de l'angle d'élévation et l'altitude de station récepteur ; à la fin on terminera par une comparaison entre eux pour déduire le meilleur d'entre eux.

ABSTRACT

As troposphere plays an important role in the communication and the latter presents many turbulences in space and time, thus the researcher tried to model it to deduce the value from the error tropospheric, this last cheek an important role in the precision of signals GPS. In our study one will estimate it starting from three the most used models of at knowing the Models of Saastamoinen, the Model of Hopfield and the Model of Goad and Goodman. From these models one will study the influence the weather parameters (pressure, the temperature and moisture), as well as the variation of the angle of elevation and the altitude of station receiver; at the end one will finish by a comparison between them to deduce the best of them.

ملخص

مثلما أن الوسط الجوي السفلي يكون معلما رئيسيا في مجال الاتصالات، وهذه الأخيرة تظهر ارتدادات في مدة من الزمن، من أجل هذا حاول الباحثون تعديلها لتقدير قيمة الخطأ الجوي، وهذه الأخير يلعب دورا مهما في دقة إشارات نظام التموقع العالمي، وفي دراستنا قيمنا هذه الإشكالية بواسطة ثلاث نماذج الأكثر استعمالا وهم نموذج **Saastamoinen**، نموذج **Hopfield**، ونموذج **Goad et Goodman**. ومن خلال هذه الأمثلة ندرس تأثير الخصائص الجوية (الضغط، درجة الحرارة والرطوبة) زاوية الارتفاع للأقمار الاصطناعية وعلو استقبال محطة الأرصاد الجوية وفي الأخير قمنا بمقارنة النماذج لإستخلاص الأفضل منها.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure (1.1) : Les trois segments du GPS.....	3
Figure (1.2) : Constellation des satellites du GPS.....	3
Figure (1.3) : Équipement GPS.....	4
Figure (1.4) : Précision du service PPS.....	5
Figure (1.5) : Précision du service SPS.....	6
Figure (1.6) : La génération du signal.....	7
Figure (1.7) : Le format de message.....	9
Figure (1.8) : Distance satellite-récepteur.....	12
Figure (1.9) : La triangulation classique.....	14
Figure (1.10) : Définition du système de coordonnées WGS84.....	16
Figure (1.11) : Mesure de pseudo distance.....	17
Figure (1.12) : Mesure de phase.....	19
Figure (1.13) : Utilisation en mode naturel.....	20
Figure (1.14) : Station de référence GPS.....	21
Figure (1.15) : Hauteurs et angles de masquage.....	21
Figure (1.16) : Angle d'azimut.....	22

Chapitre 2

Figure (2.1) : Composition de l'air en %.....	23
Figure (2.2) : Les couches atmosphériques.	24
Figure (2.3) : La zone troposphérique.....	25
Figure (2.4) : Absorption à la traversée verticale de la troposphère.....	26
Figure (2.5) : Atténuation de la pluie.....	30
Figure (2.6) : Décalages verticaux d'une station créés par un retard troposphérique.....	32
Figure (2.7) : Source d'erreur.....	33

Chapitre 3

Figure (3.1) : Trajet du signal GPS dans l'atmosphère.....	37
Figure (3.2) : Différentes couches de la troposphère.....	39
Figure (3.3) : Organigramme du modèle de Saastamoinen.....	42
Figure (3.4) : Organigramme du modèle de Hopfield.....	44
Figure (3.5) : Organigramme du modèle de Goad Et Goodman.....	47

Chapitre 4

Figure (4.1) : Menu principal.....	48
Figure (4.2) : Sous menu du choix des modèles.....	49
Figure (4.3) : Sous menu du modèle de Saastamoinen.	50
Figure (4.4) : Sous menu du modèle de Hopfield.	50
Figure (4.5) : Sous menu du modèle de Goad et Goodman.	51
Figure (4.6) : Sous menu du modèle de Hopfield en atmosphère réel.....	51
Figure (4.7) : Erreur troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.....	53
Figure (4.8) : Retard troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.....	53
Figure (4.9) : Variation d'erreur due à la composante humide en fonction de l'angle d'élévation.....	55
Figure (4.10) : Variation d'erreur due à la composante sèche en fonction de l'angle d'élévation.....	55
Figure (4.11) : Variation d'erreur troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.....	56
Figure (4.12) : Variation de Retard troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.....	56
Figure (4.13) : Variation d'erreur due à la composante humide en fonction de l'angle d'élévation.....	59
Figure (4.14) : Variation d'erreur due à la composante sèche en fonction de l'angle d'élévation.....	59
Figure (4.15) : Erreur troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.....	59
Figure (4.16) : Retard troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.....	60
Figure (4.17) : Erreur troposphérique calculé par trois modèles.....	61
Figure (4.18) : Variation d'erreur troposphérique en fonction d'altitude du récepteur.....	64
Figure (4.19) : Variation d'erreur troposphérique en fonction de température.....	66
Figure (4.20) : Variation d'erreur troposphérique en fonction d'humidité.....	68
Figure (4.21) : Variation d'erreur troposphérique en fonction de pression.....	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (1.1) : contenu des sous trames du signal GPS.....	8
Tableau (1.2) : Comparaison entre les deux types de mesures.....	20
Tableau (2.1) : Affaiblissement réduit en fonction de λ	29
Tableau (2.2) : Les coefficients k et α	30
Tableau (3.1) : Paramètres d'atmosphère standard au niveau de la mer.....	39
Tableau (3.2) : La fonction $B(h)$ du modèle de Saastamoinen.....	39
Tableau (4.1) : Les résultats de simulation du modèle de Saastamoinen.....	52
Tableau (4.2) : Les résultats de simulation du modèle Hopfield.....	54
Tableau (4.3) : Les résultats de simulation du modèle Goad et Goodman.....	58
Tableau (4.4) : Les résultats de simulation pour une altitude ($h=30m$).....	62
Tableau (4.5) : Les résultats de simulation pour une altitude ($h=1km$).....	63
Tableau (4.6) : Les résultats de simulation pour une altitude ($h=2km$).....	63
Tableau (4.7) : Variation d'erreur troposphérique en fonction de température.....	66
Tableau (4.8) : Variation d'erreur troposphérique en fonction d'humidité relative.....	67
Tableau (4.9) : Variation d'erreur troposphérique en fonction de pression atmosphérique.....	68

INTRODUCTION GENERALE

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.

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.

L'objectif recherché à travers ce travail est d'étudier l'erreur troposphérique due aux changements de paramètre atmosphérique (pression, température, humidité) en utilisant trois modèles différents (Saastamoinen, Hopfield, Goad et Goodman) ainsi que de déduire le meilleur entre eux. Ce travail comprend cinq chapitres :

Une description générale sur le système de navigation par satellite GPS est exposée dans le premier chapitre.

Le deuxième chapitre consacre le fonctionnement du système et les types de mesures.

Le troisième chapitre présente les différentes couches atmosphériques avec une description détaillée sur la troposphère et les paramètres qui influent sur cette couche, ainsi que les différentes sources d'erreurs.

Le quatrième chapitre offre une présentation sur les différents algorithmes utilisés dans le calcul d'erreur avec des organigrammes de chaque modèle.

Dans le dernier chapitre, on s'intéresse à l'étude et à l'analyse des résultats obtenus accompagnés de plusieurs simulations graphiques constituant notre logiciel nommé 'MATLAB Tropo'.

Et en fin, on terminera notre travail par une conclusion générale.

CONCLUSION GENERALE

D'après ce modeste travail, on a l'occasion de comprendre principalement que le system navigation par satellite 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 troposphérique, qui affecte le signal arrivant au récepteur ce qui résulte un retard sur les signaux émise par le satellite, et ca influe sur le positionnement.

Pour améliorer cette problématique on à user trois algorithmes pour la modélisation des effets troposphérique.

D'après les modèles qu'on a vue, l'erreur troposphérique vari en fonction des trois paramètres :

 L'élévation du satellite : plus l'élévation est faible plus l'erreur troposphérique est grand c'est-à-dire l'angle d'élévation et inversement proportionnelle à l'erreur troposphérique.

 La hauteur du récepteur : Plus la hauteur du récepteur est élevée, moins est la partie traversée dans la troposphère donc plus est faible la valeur de l'erreur.

 Le délai troposphérique dépend aussi de la température, pression et d'humidité. il varie selon la variation des conditions météorologiques.

Le choix des modèles joue un rôle important pour optimiser l'erreur troposphérique et pour ce faire on à utilise trois modèles et on à déduire la meilleure entre eux.

GLOSSAIRE

Altitude

L'altitude d'un point est la coordonnée par laquelle on exprime l'écart vertical de ce point à une surface de référence proche du géoïde.

Latitude

Angle formé, en un lieu donné, par la verticale du lieu avec le plan de l'équateur.

Longitude

Angle formé, en un lieu donné, par le plan méridien de ce lieu avec le plan méridien d'un autre lieu pris pour origine.

Élévation

L'élévation est l'angle formé entre l'horizontale du point de réception une ligne reliant ce point au satellite.

Azimut

L'azimut est l'angle formé par le nord géographique et la direction du satellite. C'est à peu de chose près ce qu'on mesure avec une boussole (nord magnétique).

Méridien

Le plan méridien géodésique est le demi-plan contenant à la fois la normale et le petit axe de l'ellipsoïde : à partir de cette normale, on définit les coordonnées géographiques géodésiques ou ellipsoïdiques.

Anti-Spoofing [AS]

Ce dispositif est un procédé permettant le cryptage du code-P. Afin d'empêcher d'éventuelles forces militaires adversaires de toute copie. Crypté, le code-P est identifié alors sous le nom code-Y.

GLOSSAIRE

Éphémérides

Les éphémérides sont un ensemble de paramètres utilisé par un récepteur de positionnement global par satellites pour prévoir l'emplacement d'un satellite et le comportement de ses horloges. Chaque satellite contient et transmet des données d'éphémérides relatives à son orbite et son horloge. Les données d'éphémérides sont plus précises que les données d'almanach mais leur usage est limité de quatre à six heures. Les éphémérides sont transmises par les satellites toutes les 30 secondes

Almanach

Un almanach est un ensemble de données qu'un récepteur GPS utilise pour estimer la position approchée d'un satellite de navigation et les corrections à apporter aux horloges du satellite. Chaque satellite GPS contient et transmet les données l'almanach de la constellation de satellites toute entière.

Neige

Précipitation de cristaux de glace agglomérés en flocons, dont la plupart sont ramifiés, parfois en étoile, quand la température des basses couches de l'atmosphère est inférieure à 0°C, la neige se forme par la présence, dans un nuage, de noyaux de condensation faisant cesser le phénomène de surfusion

Nuage

Mélange d'air humide et de gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère.

Pluie

Précipitation d'eau atmosphérique sous forme de gouttes. La pluie résulte de l'ascendance de l'air, qui, se refroidissant, provoque la condensation en gouttelettes de la vapeur d'eau qu'il contient, le nuage qui se forme ne donne des pluies qu'avec l'accroissement de la taille des gouttelettes, qui ne peuvent plus rester en suspension.

Humidité

Etat de ce qui est humide, c'est-à-dire chargé d'eau ou de vapeur d'eau.

GLOSSAIRE

Humidité relative

Quantité qui caractérise à la fois le contenu de l'air en vapeur d'eau et l'écart à la condensation, on l'exprime en %. A 100% d'humidité relative, la vapeur d'eau se condense en gouttelettes d'eau liquide.

Perturbation

Modification de l'état de l'atmosphère, caractérisée par des vents violents et des précipitations.

Absorption

Propriétés qu'ont certaines molécules de consommer une partie du rayonnement électromagnétique à des longueurs d'onde déterminées.

Pression

Poids par unité de surface. La pression atmosphérique (ou pression exercée par l'atmosphère) est l'une des quantités utilisées par les météorologistes (comme la température) pour caractériser le temps qu'il fait. Pour comparer entre elles les pressions atmosphériques mesurées à des endroits d'altitudes différentes, on calcule une pression fictive qui serait celle qu'on mesurerait au niveau de la mer à cet endroit c'est la pression au niveau de la mer.

Dépression

Zone de l'atmosphère dans laquelle la pression au niveau de la mer est basse, associée aux perturbations météorologiques, les dépressions sont caractéristiques des climats tempérés. Dans les régions tropicales, elles peuvent donner naissance aux cyclones.

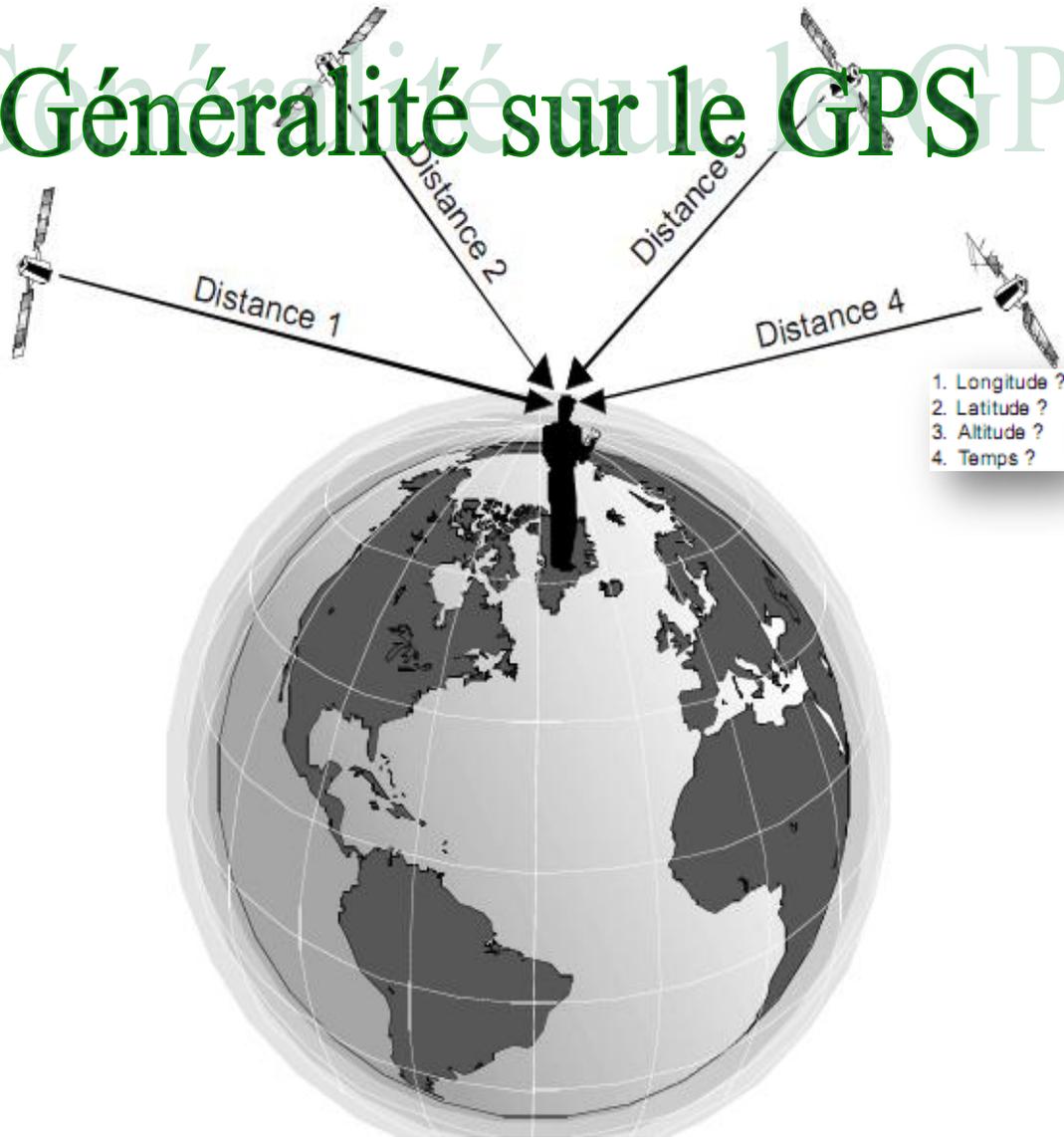
Erreur troposphérique

Retard dans la transmission des signaux GPS attribuable à leur passage à travers la troposphère.

Chapitre 1

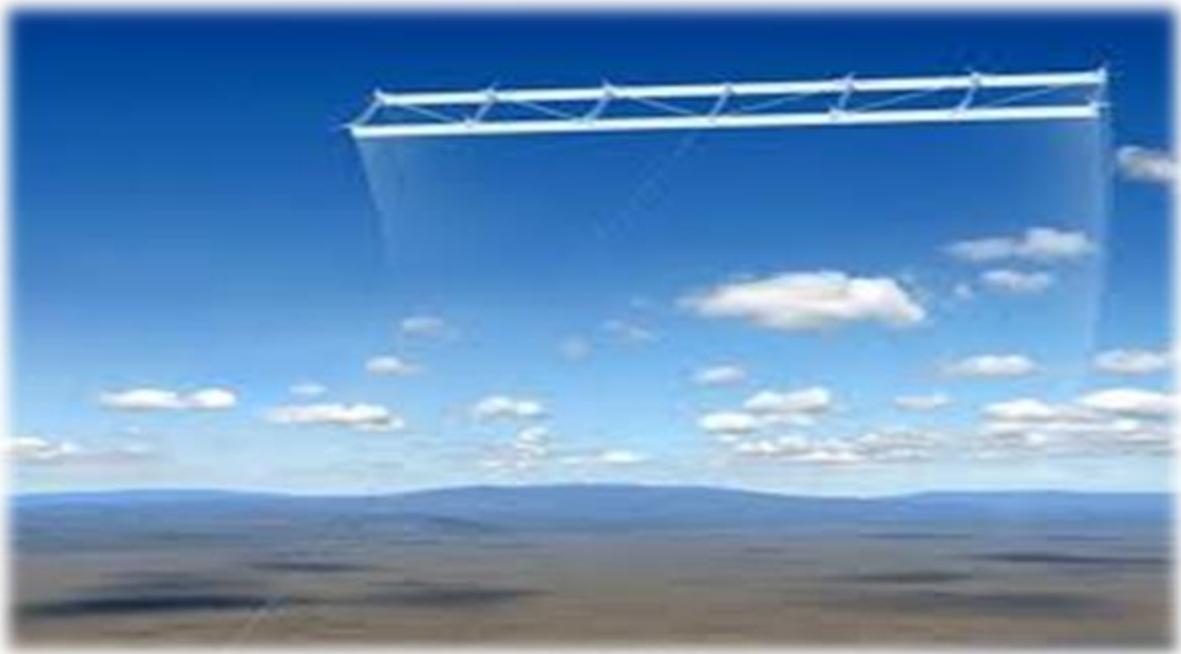
Chapitre 1

Généralité sur le GPS



Chapitre 2

Milieu de propagation et sources d'erreurs



Troposphère

20

Chapitre 3

Chapitre 3

Calcul des erreurs

Calcul des erreurs

troposphérique

troposphérique

15

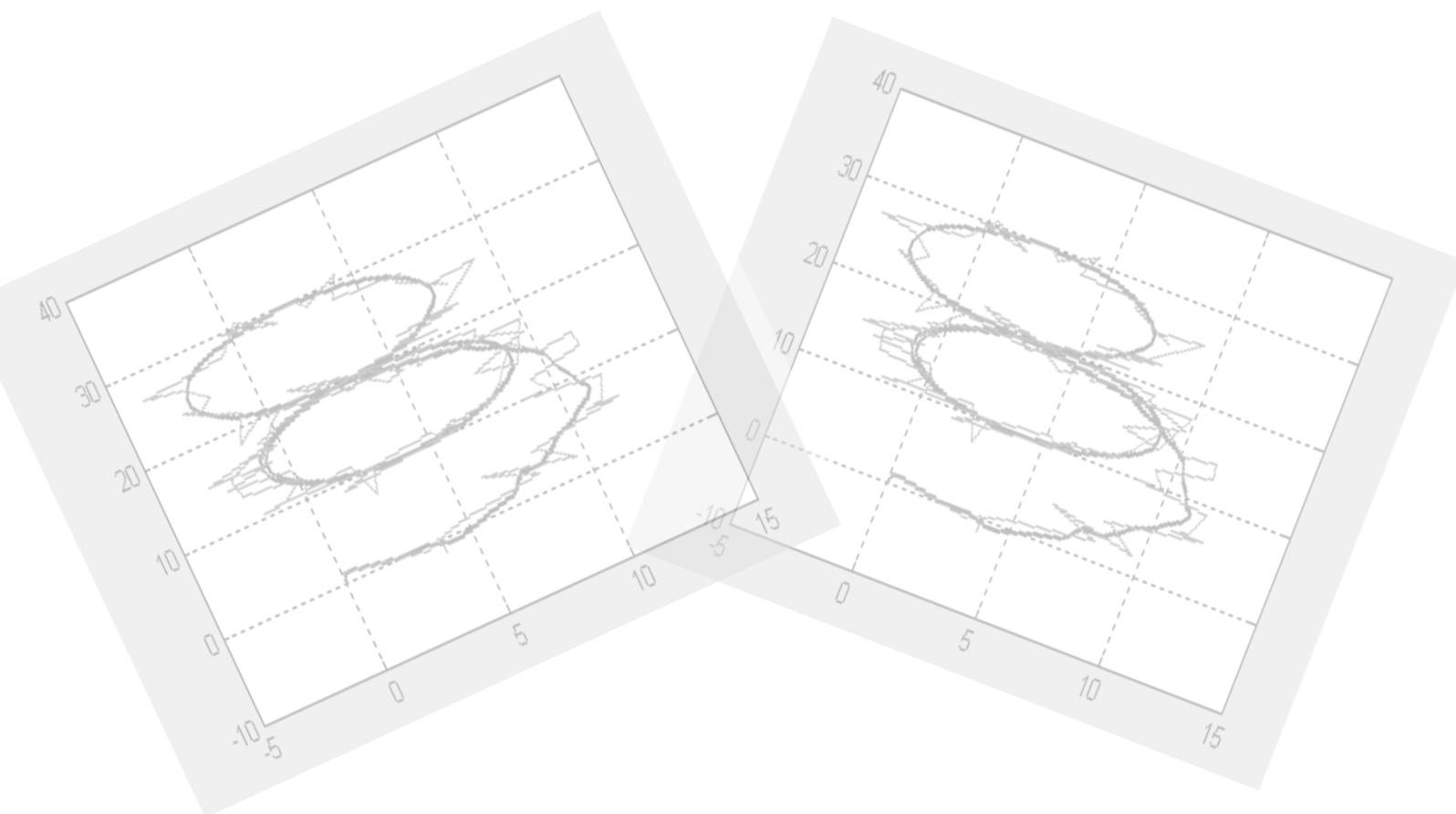
10

Altitude (mètres)



Chapitre 4

Simulations et résultats



A. /

A.1 PROPRIETES D'UN SATELLITE :

On peut dire qu'on générale un satellite est caractériser par :

Taille : 5 mètres	
Durée de Vie : 7.5 ans	
Largueur du Satellite	152 cm
Hauteur du Satellite	191 cm
L'air des panneaux solaires	7.2 m ²
Puissance embarquée	1136 W
Hauteur de sa gravitation	20 180 km
Masse : 1 tonne (Bloque IIR : 2 tonnes)	
Horloges Atomiques : 2 rubidiums et 2 césiums	



A.2 GENERATION DES SATELLITES :

Voici un petit aperçu de l'évolution des satellites depuis le lancement du premier module, type Block I, le 22 février 1978 jusqu'au satellite du Block IIR en activité aujourd'hui.

- **Block I :**

11 Satellites de ce type ont été construits et lancé de 1978 à 1985. Leur objectif était essentiellement expérimental, ils avaient une orbite avec une inclinaison de 63° par rapport à l'équateur; ce paramètre a été modifiée pour les générations suivantes. Le dernier satellite du Block I a été mis hors service le 18 novembre 1995, après 10 ans de service.



Image 1: satellite du type Block

- **Block II/IIA :**

La deuxième génération de satellites possède une capacité de stockage plus importante, ainsi ils peuvent fonctionner sans support pendant 14 et 180 jours pour le type II et IIA respectivement. Ils ont été lancés entre 1989 et 1997, leur durée de vie est prévue pour 7 ans et demi. L'inclinaison de leur orbite par rapport à l'équateur a été ramenée à 55° , et ils possèdent de nouvelles fonctionnalités de sécurité, dont la "Selective Availability" (SA) qui permet de limiter la résolution latérale à 100m pour les utilisateurs non autorisés.

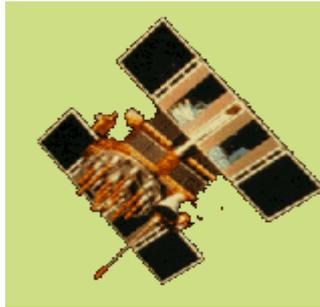


Image 2: Satellite du type Block II

- **Block IIR :**

Cette nouvelle génération de satellites est compatible avec le type II/IIA mais présente une autonomie de plus de 180 jours sans corrections de trajectoire ni dégradation de leur précision. Leur durée de vie est prévue pour plus de 10 ans.

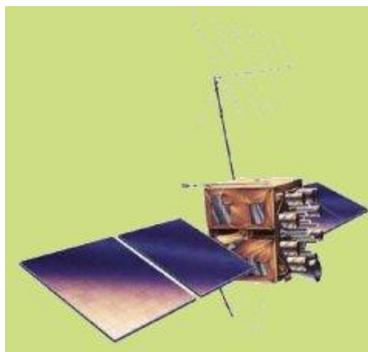
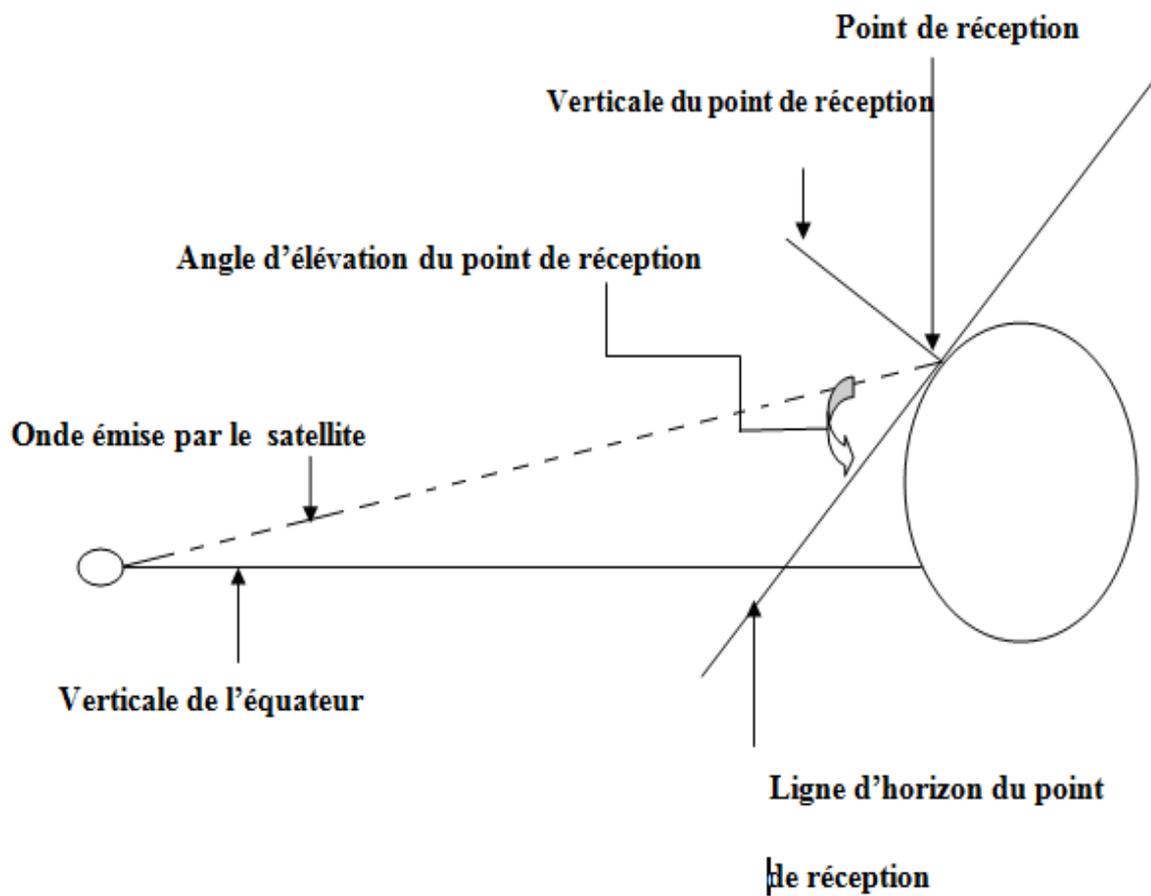


Image 3: satellite type Block IIR

B. /



C. /

TROPOSPHÈRE		
Altitude (m)	Pression (hPa)	Température (°C)
10000	265	-50,0
9000	307	-43,5
8000	357	-37,0
7000	411	-30,5
6000	471	-24,0
5000	541	-17,5
4000	617	-11,0
3500	658	-7,5
3000	700	-4,5
2500	746	-1,0
2000	794	2,0
1500	845	5,5
1000	900	8,5
500	955	12,0
0	1 013	15,0

D. / Exemple des conditions météorologique pour la station de Ouargla

Vendredi 2 décembre 2011

<-15° -15° - -10° -10° - -5° -5° - 0° 0° - 5° 5° - 10° 10° - 15° 15° - 20° 20° - 25° 25° - 30° 30°+

Ciel dégagé

La température ressentie 22 °C
 Pression 1 021 mb
 Humidité 50%
 Visibilité 10 km
 Vent Faible
 Lever du soleil 07:22
 Coucher du soleil 17:34

22 °C

Dernière mise à jour : 16:00 (heure locale)

<-15° -15° - -10° -10° - -5° -5° - 0° 0° - 5° 5° - 10° 10° - 15° 15° - 20° 20° - 25° 25° - 30° 30°+

Beau

La température ressentie 20 °C
 Pression 1 021 mb
 Humidité 52%
 Visibilité 10 km
 Vent Faible
 Lever du soleil 07:22
 Coucher du soleil 17:34

20 °C

Dernière mise à jour : 18:00 (heure locale)

Samedi 3 décembre 2011

Conditions actuelles:

<-15° -15° - -10° -10° - -5° -5° - 0° 0° - 5° 5° - 10° 10° - 15° 15° - 20° 20° - 25° 25° - 30° 30°+

Peu nuageux

La température ressentie 5 °C
 Pression 1 018,96 mb
 Humidité 81%
 Visibilité 8 km
 Vent Du nord nord-ouest à 11 km/h
 Lever du soleil 07:22
 Coucher du soleil 17:34

7 °C

Dernière mise à jour : 08:00 (heure locale)

Conditions actuelles:

<-15° -15° - -10° -10° - -5° -5° - 0° 0° - 5° 5° - 10° 10° - 15° 15° - 20° 20° - 25° 25° - 30° 30°+

Ensoleillé

La température ressentie 11 °C
 Pression 1 018,96 mb
 Humidité 71%
 Visibilité 8 km
 Vent Du nord nord-ouest à 11 km/h
 Lever du soleil 07:22
 Coucher du soleil 17:34

11 °C

Dernière mise à jour : 10:00 (heure locale)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Djamel Asgari, « Etude De Modèles Prédicatifs Dans Un Réseau De Stations GPS Permanentes » thèse soutenue le 28 novembre 2005, Ecole Doctorale Astronomie & Astrophysique d'Ile de France.
- [2] Stéphane Durban, « Amélioration de la précision de la localisation différentielle temps réel par mesure de phase des systèmes GNSS » thèse Soutenu le 13 janvier 2003.
- [3] Sammuneh Muhammad Ali, « Contribution au positionnement en temps réel par GPS Prédiction de la correction ionosphérique » thèse soutenue le 15 décembre 2003, Ecole Doctorale Astronomie & Astrophysique d'Ile de France.
- [4] Jérôme Tarniewicz, « Etude d'une méthode de sondage de la vapeur d'eau dans la troposphère appliquée a la correction de mesures GPS pour l'altimétrie de haute précision » soutenue le 25 mars 2005, Ecole doctorale Sciences de l'Environnement d'Ile-de-France.
- [5] Boussaad Akrou, « Utilisation optimal du system de positionnement GPS Pour les travaux d'auscultation de barrages » Soutenu le Janvier 1998, Université Laval.
- [6] H .Naamaoui, S.kahlouche, H.Dekliche, « Choix optimal du modèle Troposphérique Pour la détermination précise des coordonnes des stations GPS » Centre des Techniques Spatiales (CTS). Division de Géodésie Spatiale.
- [7] Ahmed El-Rabbani, « Introduction to GPS he Global Positioning System » Artech House Boston London, G109.5E6, 2002.
- [8] James Bao-Yen Tsui, « Fundamentals of Global Positioning System Receivers a .Software Approach » Copyright 2005 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [9] « Guide pour le positionnement GPS » : Publié avec l'autorisation de Ressources Naturelles canada (juillet 1993).
- [10] Frank Kleijer, « Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling » NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission Delft, April 2004.
- [11] Jenifer Haase, « Accuracy and variability of GPS tropospheric Delay Measurements of water Vapor in the Western Mediterranean » October [2002] France.

BIBLIOGRAPHIE

- [12] S. KATSOUGIANNOPOULOS, C. PIKRIDAS, D. ROSSIKOPOULOS,
I. M. IFADIS and A. FOTIOU, Greece, «Tropospheric Refraction Estimation Using
Various Models, Radiosonde Measurements and Permanent GPS Data »
October 8-13, 2006.
- [13] Mohamed Ali El Yahmadi, « Traitement et analyse des délais troposphérique issus
des données d'un récepteur GPS bifréquence embarqué sur un navire »
Le 28 Septembre 2009.

Adresse internet :

- [1] <http://www.dzmeteo.com/meteo-ouargla.dz>
- [2] <http://rgp.ign.fr/glossaire.php>

1.1 INTRODUCTION :

Le Global Positioning System (GPS) (Système de positionnement global) est un système de radionavigation par satellites mise en place par la Défense américaine en vue d'applications de positionnement militaire et, en second lieu, mis à la disposition de la communauté civile. La navigation, l'arpentage et les systèmes d'information géographique (SIG) ne sont que quelques-uns des domaines dans lesquels la technologie du GPS a été appliquée avec succès.

Le GPS est un système complexe qui peut servir à établir une position avec une exactitude allant de 100 m à quelques millimètres, selon l'équipement utilisé et la procédure suivie. En règle générale, plus l'exactitude du positionnement est grande, plus les coûts sont élevés et plus les procédures d'observation et de traitement sont complexes. Il importe donc aux utilisateurs de comprendre quelles techniques leur permettent d'atteindre l'exactitude souhaitée, moyennant des coûts et une complexité les moins grands possibles.

1.2 DIFFERENTS TYPES DE SYSTEME DE NAVIGATION:

1.2.1 GLONASS:

Le GLONASS (**G**lobale **N**avigation **S**atellite **S**ystème) est un système d'origine russe concurrent au système GPS, certains récepteurs intègrent les systèmes **GLONASS** et **GPS** de manière à présenter une meilleure précision par obtention d'une valeur moyenne entre les deux systèmes.

1.2.2 BEIDOU :

Le Beidou (Grande Ourse) est une partie du système **Navigation Satellite System**. Dans le futur la Chine envisage de mettre en orbite son propre système de navigation et positionnement Beidou-II composé de 25 satellites dont 4 géostationnaires. L'unique raison d'être de ce système est de s'affranchir de la dépendance des Etats-Unis.

1.2.3 GALILEO:

Le système Galileo sera compatible avec GPS et il est attendu qu'il y ait de nombreux développements de récepteurs mixtes GPS - GLONASS - GALILEO.

Néanmoins, il en sera indépendant, c'est-à-dire que si GPS est mis hors service GALILEO devrait continuer à fonctionner. Les premiers satellites étaient lancés en 2003 pour un ensemble pleinement opérationnel vers 2008.

1.3 DESCRIPTION DU SYSTÈME GPS:

Le GPS se compose d'une constellation de satellites de radionavigation, d'un segment de contrôle au sol qui gère le fonctionnement des satellites et, enfin, des utilisateurs avec récepteurs spécialisés qui utilisent les données des satellites pour répondre à une vaste gamme de besoins en positionnement (figure 1.1). Le système a été mis en place par le ministère américain de la Défense (DoD) afin de répondre à des besoins de positionnement pour la défense et, à titre de sous-produit, pour servir la communauté civile.

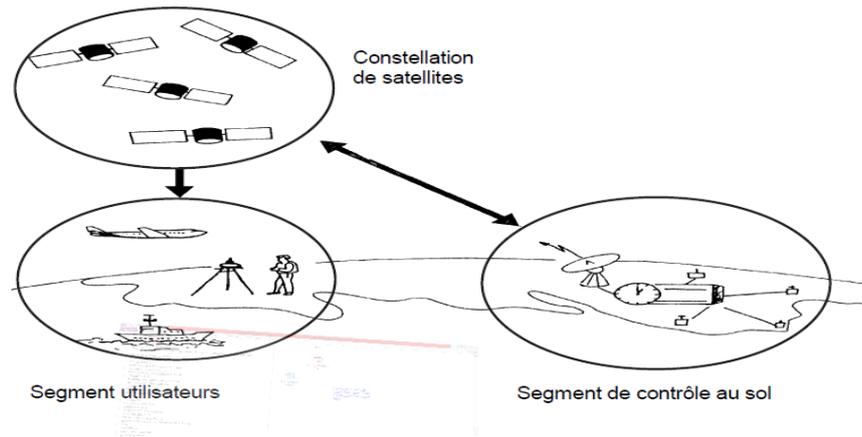


Figure (1.1) : Les trois segments du GPS

* **La constellation de satellites**, qui est pleinement opérationnelle depuis juillet 1995, comprend 24 satellites, en plus de 3 satellites actifs de rechange, positionnés à 20 000 km (environ trois fois le rayon terrestre) au-dessus de la surface de la Terre. Les satellites sont répartis de telle manière qu'au moins quatre d'entre eux soient visibles presque n'importe où dans le monde à tout moment (figure 1.2). Chaque satellite reçoit et stocke des données en provenance du segment de contrôle, tient le temps avec grande précision grâce à ses horloges atomiques précises et transmet des signaux à la Terre.

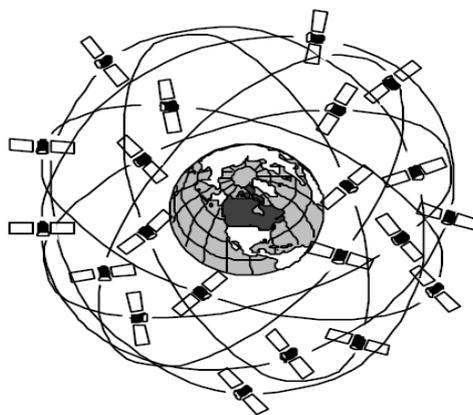


Figure (1.2) : Constellation des satellites du GPS

* **Le segment de contrôle** au sol (figure 1.1) gère le système de satellites sur une base permanente. Il compte cinq stations de poursuite réparties tout autour de la Terre, dont l'une, située à Colorado Springs, constitue la station maîtresse. Ce segment de contrôle suit tous les satellites, veille à ce qu'ils fonctionnent adéquatement et calcule leurs positions dans l'espace. Si un satellite ne fonctionne pas correctement, le segment de contrôle au sol peut le déclarer «hors d'état de marche» et adopter les mesures nécessaires pour corriger le problème. Dans un de tel cas, le satellite ne doit pas servir au positionnement avant d'être nouveau déclaré fonctionnel. Les positions calculées des satellites permettent de dériver des paramètres qui servent à prévoir les positions futures de ces mêmes satellites. Ces paramètres sont téléchargés depuis le segment de contrôle jusqu'aux satellites et sont appelés éphémérides.

* **Le segment utilisateurs** comprend tous ceux qui utilisent de l'équipement de poursuite GPS pour capter les signaux du système afin de satisfaire des besoins particuliers en matière de positionnement. On trouve sur le marché toute une gamme d'appareils conçus pour capter les signaux GPS dans le but d'offrir aux utilisateurs un éventail toujours croissant d'applications. Presque tous les appareils de poursuite GPS se composent des mêmes éléments de base : une antenne, une section R.F. (radiofréquence), un microprocesseur, un panneau de commande et d'affichage (CDU), un enregistreur et un bloc d'alimentation. Ces composantes peuvent prendre la forme d'unités distinctes, peuvent être intégrées en une seule unité ou être partiellement intégrées (figure 1.3).

Habituellement, toutes les composantes à l'exception de l'antenne sont regroupées en un seul appareil appelé récepteur. De nos jours, certains récepteurs GPS commercialement disponibles se réduisent à une carte qui peut être montée dans un ordinateur portable ou intégrée à d'autres systèmes de navigation.

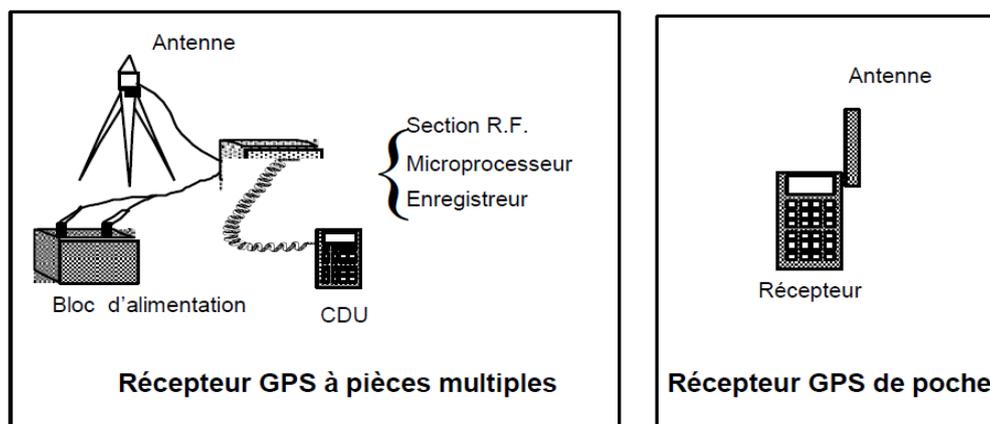


Figure (1.3) : Équipement GPS

1.4 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.

1.4.1 Le service 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 mètre en vertical. L'heure peut être obtenu avec une précision de 100 nanosecondes.

Les signaux du PPS sont transmis sur deux fréquences différentes, appelées L_1 et L_2 , et qui contiennent le code de précision ou p-code. Le p-code est généralement crypté, le mode anti leurre dit A-S (anti-spoofing) est activé. Le signal L_2 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.

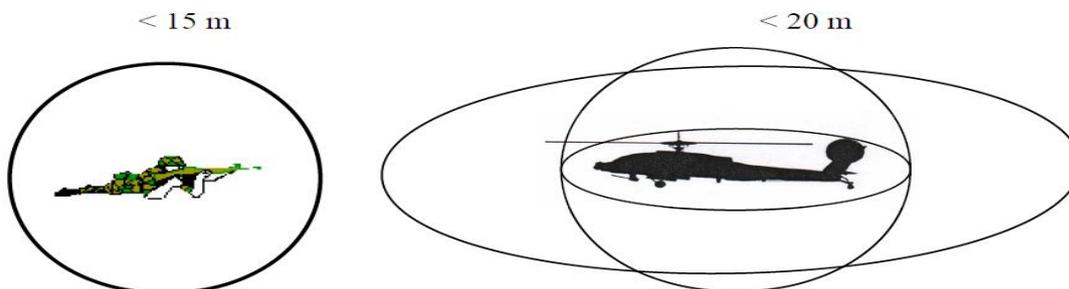


Figure (1.4) : Précision du service PPS

1.4.2 Le service SPS (Standart Positioning Service) :

Est la version civile du GPS. Tous les utilisateurs disposant d'un récepteur GPS y ont accès. Ce mode est gratuit et anonyme, les Américains n'ont actuellement aucune possibilité de connaître le nombre d'utilisateurs ni de les identifier. Les signaux du GPS sont transmis sur une seule fréquence, appelé L_1 , 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.

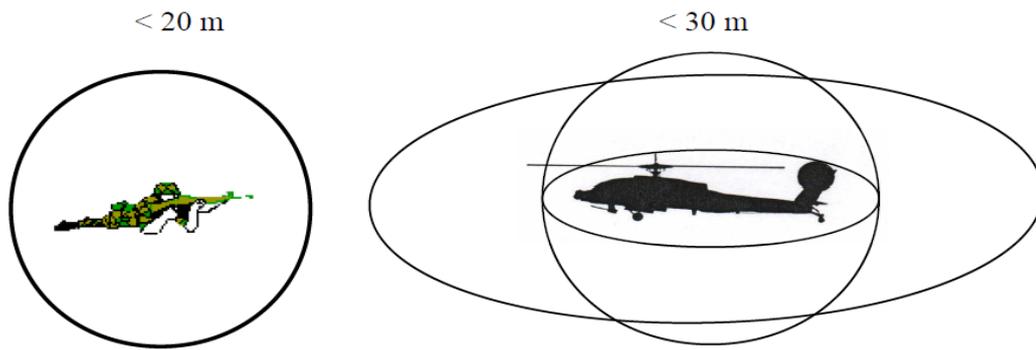


Figure (1.5) : Précision du service SPS

Deux types de dégradations existent qui permettent de limiter l'utilisation civile sont les suivantes :

✚ L'antibrouillage (AS) :

Qui consiste à rendre inconnu une partie des informations transmises afin qu'elles ne puissent être reproduites, l'activation de l'AS est continue depuis février 1994.

✚ L'accès sélectif (SA) :

Qui dégradait les performances nominales du système, il comporte au moins deux types de dégradations du message radiodiffusé (dégradations des éphémérides et dégradation de la fréquence de l'horloge des satellites).

Remarque : la dégradation (SA) n'est plus active depuis le 2 mai 2000

1.5 LE SIGNAL GPS :

Les satellites GPS transmettent deux codes : un code crypté pour la défense militaire américaine (signaux PPS) et un code civil (signaux SPS).

Pour l'ensemble des satellites, la fréquence fondamentale est $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$.

A partir de la fréquence fondamentale, chaque satellite génère deux ondes porteuses :

$L_1 = 154 \cdot f_0 = 1575,42 \text{ MHz}$ (soit une longueur d'onde d'environ 19 cm).

$L_2 = 120 \cdot f_0 = 1227,60 \text{ MHz}$ (soit une longueur d'onde d'environ 24 cm).

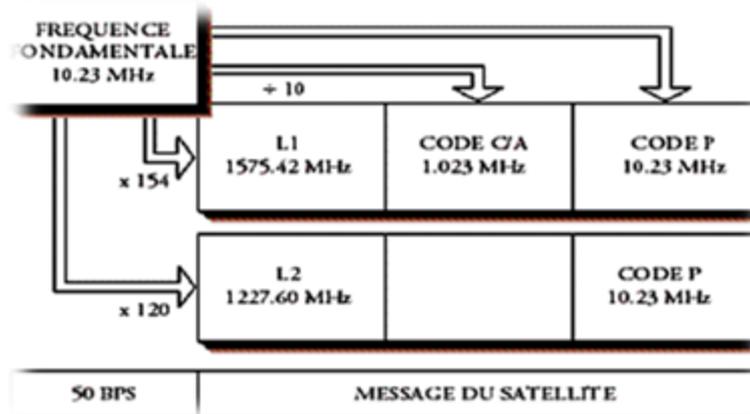


Figure (1.6): la génération du signal

Les signaux seront radiodiffusés sur ces deux fréquences.

Pour des raisons techniques, ces deux ondes porteuses seront modulées par des codes pseudo aléatoires (**P**seudo **R**andom **N**oise) qui seront transmis en direction de la Terre. Les informations véhiculées par ces ondes permettront de se positionner.

Les codes pseudo aléatoires sont les suivants :

► Le **C/A-code** (**C**orse **A**cquisition-**c**ode) disponible sur la porteuse **L1** pour les applications civiles (donc accessible à tous), C'est une série pseudo aléatoire de défini de façon déterministe par une fonction mathématique de période 1 ms à une fréquence de

$$f_0/10 = 1,023 \text{ MHz.}$$

Un code spécifique est attribué à chaque satellite. La courte période de ce signal (1 ms), permet au récepteur une acquisition et donc une identification rapide des satellites.

► Le **P/Y-code** disponible sur les deux porteuses **L1** et **L2** pour les applications militaires.

Le **P-Code** (**P**recision **c**ode) est une série pseudo aléatoire de fréquence $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$.

Le P-code est généralement rendu inaccessible aux civils par l'activation d'une fonction dite A.S. (**A**nti-**S**poofing) qui encode le P-code. Ce code n'est accessible qu'aux utilisateurs possédant des clés de décryptage comme l'armée américaine et certains de ses alliés. Ses caractéristiques sont inconnues et il est donc impossible de les reproduire.

1.5.1 LE CONTENU DU SIGNAL GPS :

Nous allons à présent décrire brièvement les données de navigation contenues dans le signal GPS et la façon dont elles sont ordonnées.

1.5.1.1 Format du Message :

Le signal émis par un satellite est composé de trames de 1500 bits. Chaque trame est divisée en sous trames contenant chacune 10 mots de 30 bits. Comme le débit du message est de 50 bits/sec, une trame est donc émise en 30 secondes.

Les sous trames 1, 2 et 3 contiennent un message qui en général ne change pas d'une trame à l'autre : ce sont des informations indispensables à la navigation, qui sont répétées toutes les 30 secondes. Les sous trames 4 et 5, quant à elle, sont réservés à des messages plus longs mais moins importants ; en conséquence, il y a 25 messages différents pour les sous trames 4 et 5. On appelle alors trame principale l'ensemble des 25 trames différentes ; elle dure 12,5 minutes.

Les mots de 30 bits se décomposent en 24 bits d'information et 6 bits de parité : les mots sont donc codés, à l'aide d'un code de Hamming étendu. On rappelle qu'un code de Hamming permet de corriger une erreur de transmission.

1.5.1.2 Contenu du Message :

Pour qu'un utilisateur puisse déterminer sa position à l'aide du signal satellite, il faut qu'il connaisse la position des satellites et la distance qui le sépare de ceux-ci.

Les satellites GPS doivent donc émettre des éléments permettant de calculer leur position, ainsi que l'âge de ces informations, afin de déterminer les satellites à utiliser en priorité pour obtenir une meilleure précision. Tous ces éléments se retrouvent dans les sous trames 1, 2, et 3, répartis comme suit :

Sous trame	1	2	3
Contenu	N° du satellite. N° de semaine. Age des données. Précision, état de santé du satellite. Coefficients de correction de l'horloge.	Paramètres d'orbite (éphémérides)	Paramètres d'orbite (éphémérides)

Tableau (1.1) : contenu des sous trames du signal GPS.

Les éphémérides contiennent les paramètres orbitaux du satellite ainsi que leurs coefficients de correction. Les sous trames 4 et 5 décrivent, quant à elles, les almanachs de tous les satellites en orbite et leur état de santé. L'almanach permet de calculer approximativement la position d'un satellite, et de déterminer s'il est visible ou pas.

De plus, il donne une idée grossière de la vitesse relative du satellite et ainsi de l'effet Doppler à prendre en compte pendant l'acquisition. La sous trame 4 contient également les coefficients du modèle ionosphérique, qui permet d'affiner le calcul de la distance satellite récepteur. Notons pour conclure que le segment de contrôle du système GPS (les stations fixes au sol qui supervisent les satellites) calcule et rafraîchit les éphémérides régulièrement (une fois par jour), et transmet les nouvelles informations aux satellites.

Comme ces corrections ne sont pas rafraîchies simultanément, l'utilisateur a intérêt à utiliser les plus récentes (l'âge des données étant données dans la sous trame 1).

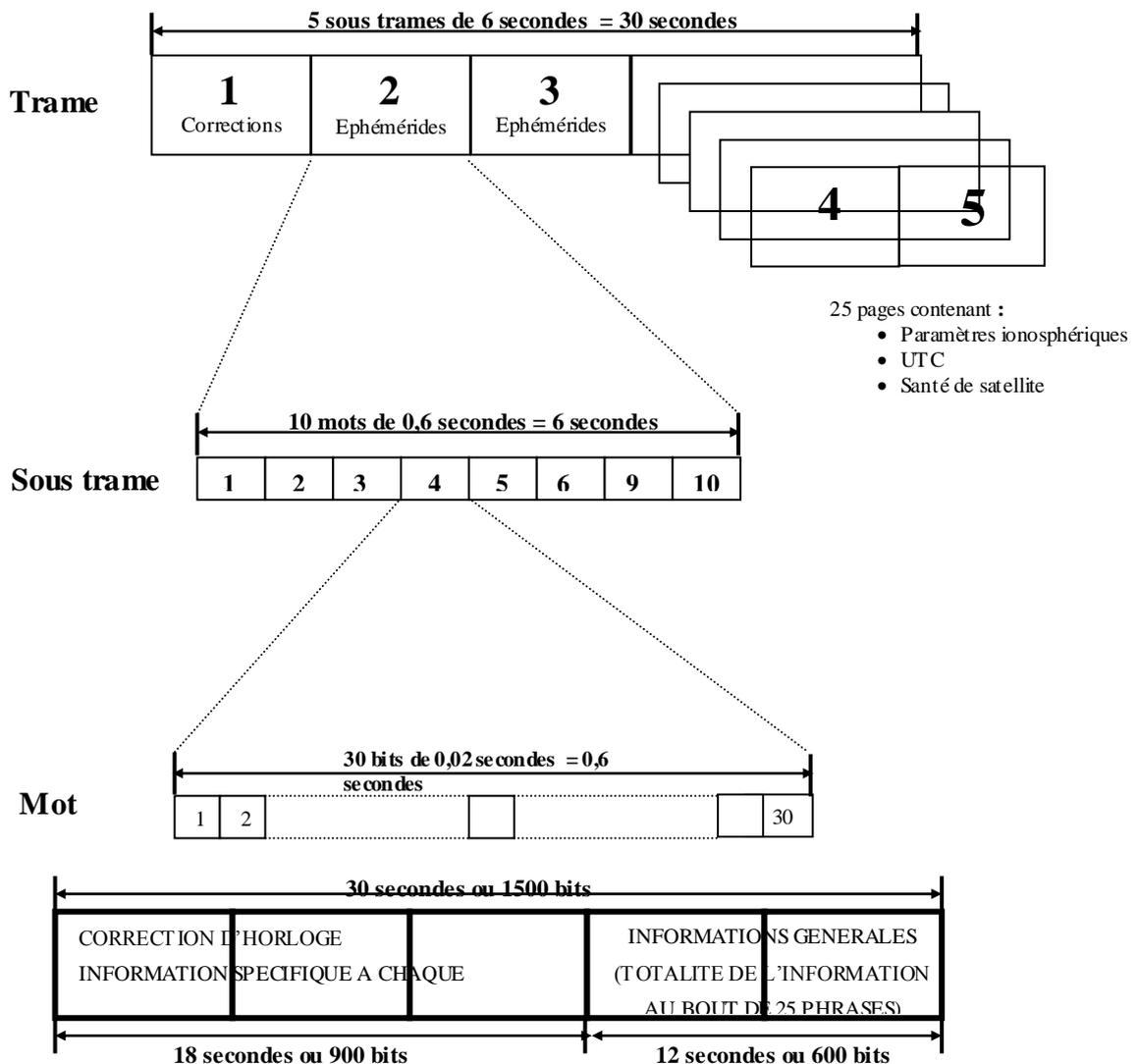


Figure (1.7) : Le format de message

Les informations spécifiques à chaque satellite, comme les corrections d'horloge et les éphémérides des satellites sont répétées en totalité dans toutes les « phrases » (les 900 premiers bits), soit toutes les 30 secondes pendant 18 secondes.

Les informations générales dont le contenu change à chaque phrase sont transmis en totalité en 12,5 minutes (durée nécessaire pour 25 phrases).

1.5.2 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 décalages 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 du récepteur doit tenir compte des incertitudes des signaux et de leurs variations. Des principes de détection et d'atténuation de décalage temporel et fréquentiel sont à l'étude. 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.

1.6 LES APPLICATIONS DU GPS:

De part sa précision et son faible coût, le positionnement par GPS a trouvé de nombreuses applications dans les activités terrestres, maritimes et aériennes, parmi les quelles on peut citer :

La navigation routière, la météorologie, la Génie civil, l'agriculture, la Gestion des ressources naturelles et la cartographie

1.7 LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU GPS:

1.7.1 Les avantages:

Le GPS permet d'obtenir un positionnement précis en n'importe quel point du globe. Ce système est totalement indépendant des conditions atmosphériques, de la topographie du terrain ou des différentes interférences radioélectriques (le signal de navigation est normalement protégé du brouillage par un très fort étalement du spectre). De plus, son indépendance en luminosité permet son utilisation de jour comme de nuit.

L'utilisation du système est gratuite: seul l'achat du récepteur GPS entre en compte et les prix ne cessent de chuter.

Le système est robuste : l'altitude des satellites de plus de 20 000 Km est une distance qui demande des ressources considérables pour une destruction physique. De plus, l'espacement entre les satellites est optimisé pour éviter une destruction multiple.

Le système est en constante évolution et de nouvelles applications ne cessent d'apparaître.

1.7.2 Les inconvénients:

Le manque d'intégrité du système GPS : on définit l'intégrité d'un système comme sa capacité à prévenir l'utilisateur en temps opportun lorsque le système ne doit pas être utilisé parce que ses performances sont trop dégradées.

Cette incapacité à avertir les utilisateurs d'un dysfonctionnement dans un délai raisonnable est aujourd'hui sa faiblesse la plus critique: en effet, un satellite GPS peut délivrer des informations erronées pendant plusieurs minutes avant d'être réparé ou neutralisé sans en avertir les utilisateurs.

Le segment de contrôle qui analyse l'ensemble des signaux destinés aux utilisateurs détecte un dysfonctionnement avec un délai de 15 à 20 minutes.

Cet inconvénient limite l'utilisation du GPS dans certains secteurs. Par exemple, les exigences de la sécurité de l'aviation civile imposent de ramener le délai à moins de 10 secondes.

Le système GPS, qui appartient aux militaires américains, accentue l'emprise des Etats-Unis sur le monde.

1.8 PRINCIPE DE POSITIONNEMENT DU GPS:

Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. On mesure la distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues.

Pour cela, le récepteur mesure la différence de temps entre l'émission et la réception du signal.

Le signal voyageant pratiquement à la vitesse de la lumière, on peut appliquer la relation :

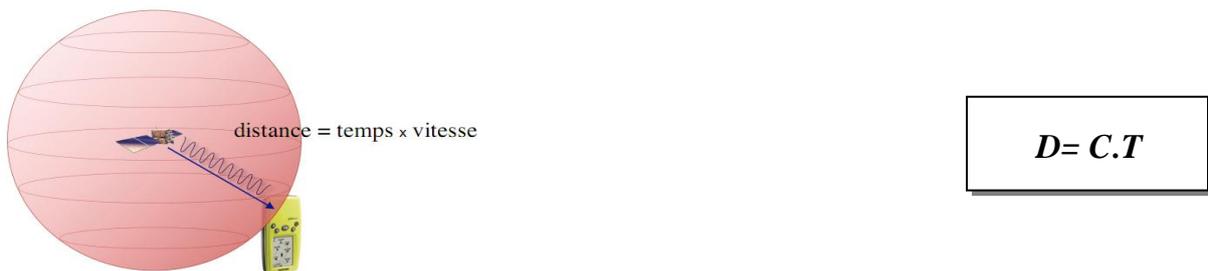


Figure (1.8) : Distance satellite-récepteur

Avec :

- ✚ **D** : distance entre le récepteur et le satellite (c'est en fait le rayon d'un cercle où le satellite serait le centre).
- ✚ **C** : vitesse de propagation des signaux radios (la vitesse retenue par convention pour le système GPS est $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$),
- ✚ **T** : durée de signal entre l'émission et la réception.

On obtient donc des "pseudo distances" qu'il faudra corriger des perturbations naturelles.

Comme la longueur d'onde du signal codé est de 10 à 100 m selon le code utilisé, la distance absolue que l'on obtient n'est estimée qu'à quelques mètres près.

Connaissant la position des satellites ainsi que les pseudo-distances, on définit ainsi des sphères centrées sur les satellites et dont l'intersection donne deux positions : l'une sur le globe terrestre et l'autre dans l'espace (cette dernière sera éliminée).

Les données (code et phase) enregistrées par le récepteur GPS sur le terrain sont ensuite traitées par des logiciels qui prennent en compte les différentes sources d'erreurs dues aux perturbations naturelles.

► **Remarque:**

Il existe une autre manière de calculer les distances satellites-récepteurs en comptant le nombre de longueurs d'onde (de « phases ») qui se sont propagées entre un satellite et un récepteur. La longueur d'onde des signaux GPS est de l'ordre de 20 centimètres : comme les récepteurs sont capables de détecter une fraction de longueur d'onde, théoriquement, la précision millimétrique est donc possible. C'est cette stratégie qui est utilisée pour les applications géophysiques du GPS.

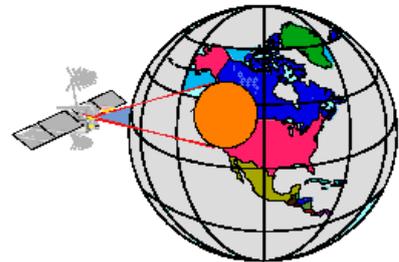
1.9 FONCTIONNEMENT DE GPS:

Les récepteurs GPS fonctionnent sur le principe de la « TELEMETRIE ». Le récepteur calcule la distance entre un point sur terre et plusieurs satellites afin d'établir la latitude et la longitude de ce point.

1.9.1 POSITIONNEMENT A PARTIR DU GPS:

Un Seul Satellite Visible:

Supposons que vous allumez votre récepteur GPS et qu'il capte le signal d'un satellite. Il vous donne sa position et sa distance de votre poste. Une seule distance ne vous aide pas beaucoup car tout ce que vous savez, c'est que vous vous trouvez quelque part dans un cercle dont la circonférence détermine votre distance du satellite. Vous êtes toujours perdu!



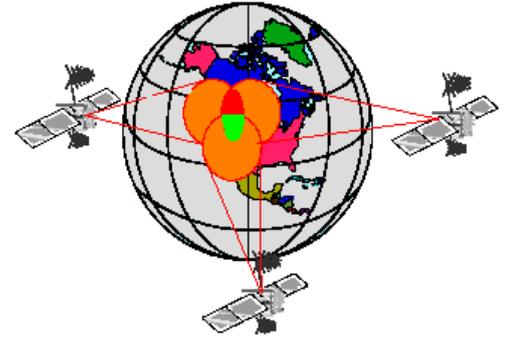
Deux Satellites Visibles:

Si le récepteur capte un signal provenant d'un deuxième satellite, vous pouvez cerner un peu mieux votre position. Vous savez maintenant que vous êtes quelque part dans l'intersection de ces deux cercles. Vous ne savez toujours pas où vous vous trouvez exactement, mais votre situation s'améliore!



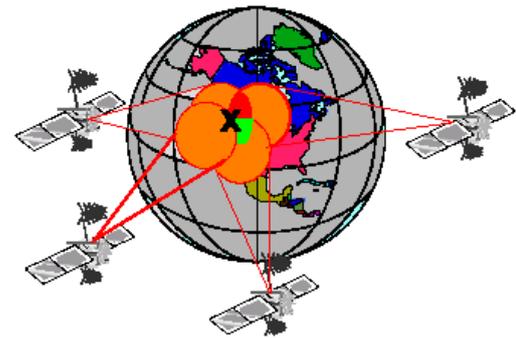
Trois Satellites Visibles :

Maintenant, si votre récepteur capte les signaux d'un troisième satellite vous vous trouvez dans l'intersection des trois cercles. Vous savez où vous vous trouvez, mais cela manque de précision!



Quatre Satellites Visibles :

Avec quatre satellites, vous obtenez votre Positionnement par point unique (absolu) et l'élévation du point. Voilà, vous savez où vous vous trouvez, à quelques mètres près!



1.9.2 LA TRIANGULATION CLASSIQUE:

Toute position dans l'espace tridimensionnel est repérée par 3 points. Le centre du repère étant choisit arbitrairement.

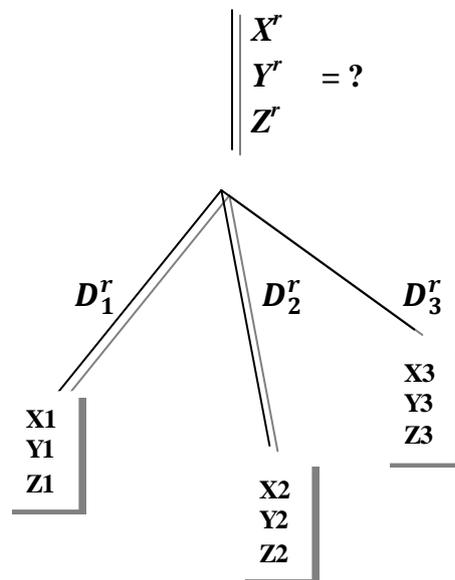


Figure (1.9) : la triangulation classique

$$D_i^r = \sqrt{(X^r - X_i)^2 + (Y^r - Y_i)^2 + (Z^r - Z_i)^2} + c(dt_i + dt^r) + T_i^r + I_i^r + E_i^r ; i = 1, 2, 3 \dots (1.1)$$

Tel que :

- C : est la vitesse de la lumière.
- dt_i : est l'offset de l'horloge récepteur.
- dt^r : est l'offset de l'horloge satellite.
- T^r : est le délai troposphérique.
- I^r : est le délai ionosphérique.
- (X^r, Z^r, Y^r) : est sont les coordonnées du récepteur.
- (X_i, Y_i, Z_i) : est sont les coordonnées du satellite.

C'est le principe utilisé d'ordinaire par les instituts géographiques, en temps normal ce système s'appuie sur un réseau de balise terrestre fixe.

Ce type de positionnement est appelé positionnement en 2D, car il donne seulement une information concernant la latitude et la longitude. Il est donc nécessaire de faire intervenir un quatrième satellite dans le positionnement afin de déterminer l'altitude du récepteur GPS : on obtient alors un positionnement 3D.

Connaissant la distance qui sépare le récepteur du satellite et la position du satellite, il est possible de dessiner une sphère imaginaire autour de chaque satellite, sur laquelle se situe obligatoirement le récepteur.

L'intersection de ces deux sphères donne un cercle de position sur lequel se situe le récepteur. En continuant ainsi, on trouve que l'intersection de trois de ces sphères donne deux points, où est susceptible de se trouver le récepteur. L'utilité d'un quatrième satellite s'avère alors de nouveau utile afin d'éliminer un de ces deux points. La position 3D est ainsi définie par quatre satellites, donc quatre sphères de positionnement.

➤ **Remarque:**

Certains récepteurs sont capables d'affiner leurs calculs en utilisant plus de quatre satellites (ce qui rend les mesures plus faciles) tout en ôtant les sources qui semblent peu fiables.

Avec une horloge assez stable, un récepteur peut calculer la position de satellite en 3D grâce à trois satellites seulement (cela reste encore un cas extrêmement rare !). L'imprécision sera alors due au décalage de l'horloge.

1.10 LE SYSTEME 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 (précises 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 (conventionnel international origine – bureau international de l'heure). L'axe des Z est parallèle à la direction du CTP (Conventionnel Terrestrial Pole) et l'axe des X est parallèle à la direction du BIH qui définit la méridienne origine. Au système WGS84, est associé un système géocentrique de coordonnées cartésiennes (O, X, Y, Z) voire figure suivante :

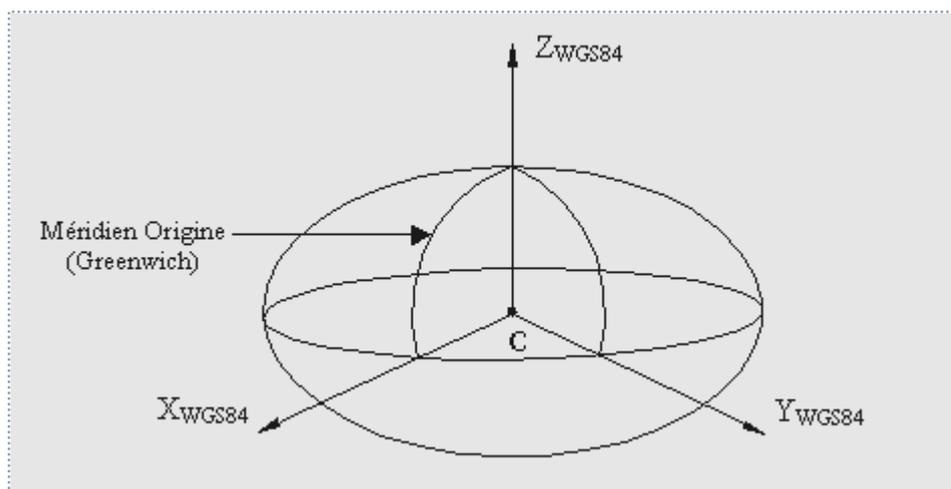


Figure (1.10) : définition du système de coordonnées WGS84

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.

1.11 LES DIFFERENTS TYPES DE MESURES:

1.11.1 LA MESURE DE LA DISTANCE:

Toute la démonstration précédente reposait sur l'hypothèse que l'on connaissait exactement la distance séparant le satellite du récepteur, étudions comment calculer cette distance.

Le principe est simple : le satellite envoie un signal vers le récepteur, celui ci détermine le temps de transmission de ce signal et ainsi peut déduire la distance le séparant du satellite grâce à l'équation: **Distance = vitesse x temps.**

La célérité des ondes transmises est proche de celle de la lumière : 300 000 km/s.

Il reste donc à déterminer le temps de transmission du signal. Pour cela, le récepteur et le satellite émettent au même moment une trame pseudo aléatoire identique (appelée ainsi car elle est générée par des équations très complexe, la rendant ainsi unique. Une fois que cette trame sera reçue par le récepteur, celui-ci pourra la décaler dans le temps de façon à la faire coïncider avec celle qu'il a générée, la mesure du temps de transmission est déduite de ce procédé, et ainsi on peut connaître la distance séparant le récepteur du satellite.

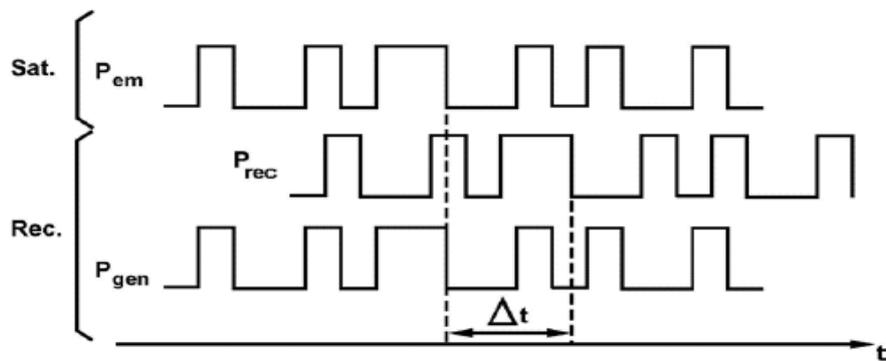


Figure (1.11): Mesure de pseudo distance

L'équation du pseudo distance est donner par la formule suivant :

$$P_{r,i}^k = \rho_r^k + d_{\rho_{orb}} - (\delta_{t_r} - \delta t^k)c + \delta ion_{r,i}^k + \delta trop_r^k + \delta m_{r,p}^k + c(b_{r,i} + b_i^k) + \epsilon_p \dots \quad (1.2)$$

Avec les notations suivantes :

Indice r : le récepteur r.

Indice i=1 ou 2 : les mesures sur les fréquences L1 ou L2 respectivement.

Indice k : le satellite k.

ρ_r^k : La distance géométrique entre le satellite et le récepteur.

$d_{\rho_{orb}}$: L'erreur orbitale.

δ_{t_r} : L'erreur d'horloge du récepteur.

δt^k : L'erreur d'horloge du satellite.

c : La vitesse de la lumière.

$\delta ion_{r,i}^k$: L'erreur ionosphérique.

$\delta trop_r^k$: L'erreur troposphérique.

$\delta m_{r,p}^k$: Multi-trajet de code.

ϵ_p : Le bruit de mesure du code.

$b_{r,i}$: Le biais électronique du récepteur.

b_i^k : Le biais électronique du satellite.

ρ_r^k : Contient l'information géométrique et peut être utilisée pour l'estimation de la position du récepteur, l'orbite du satellite, l'excentricité de l'antenne et ses variations.

Les termes δ_{t_r} et δt^k correspondent aux horloges du récepteur et du satellite (Transfert de temps). δion est la signature de l'ionosphère dans les mesures, ce qui permet d'effectuer l'estimation de TEC. Enfin $\delta trop$ contient l'information concernant la troposphère.

1.11.2 LA MESURE DE LA 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) du 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 les satellites i , comme suit :

$$\Phi_{ij}(t_j) = \Phi_{ij}^r - \Phi_j^l + \mathbf{n}_{ij} + \Phi_{\text{bruit}} \quad \dots (1.2)$$

- t_j : temps de la réception du signal à la station j
- Φ_{ij}^r : phase reçue à la station j en provenance du satellite i
- Φ_j^l : phase de l'oscillateur du récepteur j
- Φ_{bruit} : bruit aléatoire sur la mesure de phase
- \mathbf{n}_{ij} : un entier (n cycles) représentant l'ambiguïté de phase

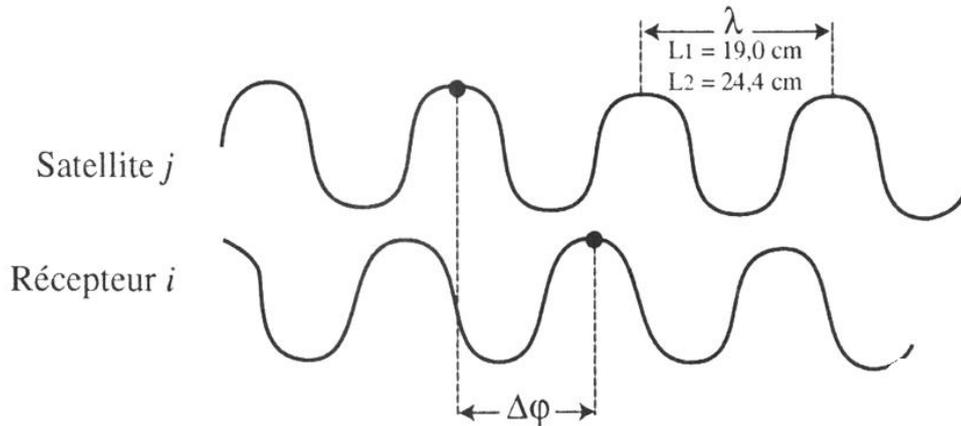


Figure (1.12) : mesure de phase

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 relation suivante:

$$\mathbf{t}_j = \mathbf{t}_i + \tau_{ij}(\mathbf{t}_j) \quad \dots(1.3)$$

Dans laquelle τ_{ij} est le temps de propagation qui dépend de la géométrie satellite station et des perturbations ionosphériques et troposphériques.

On en déduit que la phase de signal reçu au sol est liée à la phase transmise par le satellite par:

$$\Phi_{ij}^r(\mathbf{t}_j) = \Phi_i^t(\mathbf{t}_j - \tau_{ij}) \quad \dots (1.4)$$

Cependant, si l'on compare les équations (2.2) et (2.4), on se rend immédiatement compte de la difficulté qu'il y a à employer les observations de phase plutôt que les pseudo-distances. Avec ces dernières, on mesure directement la distance satellite récepteur. Avec les observations de phase, le terme d'ambiguïté (nombre de cycles entiers) doit être estimé avant que l'on puisse tirer avantage de la précision de cette observation. L'estimation de l'ambiguïté mène à des complexités dans l'utilisation des observations de phase, inexistantes avec les pseudo-distances. Le tableau qui suit, résume les avantages et les inconvénients des deux types d'observations :

	Pseudo distances	Observations de phase
Avantage	Non ambiguës Simples	Possibilité d'une grande exactitude de positionnement
Inconvénients	Faible exactitude de positionnement	Complexité plus grande

1.12.1 .UTILISATION EN MODE « NATUREL » : RECEPTEUR AUTONOME :

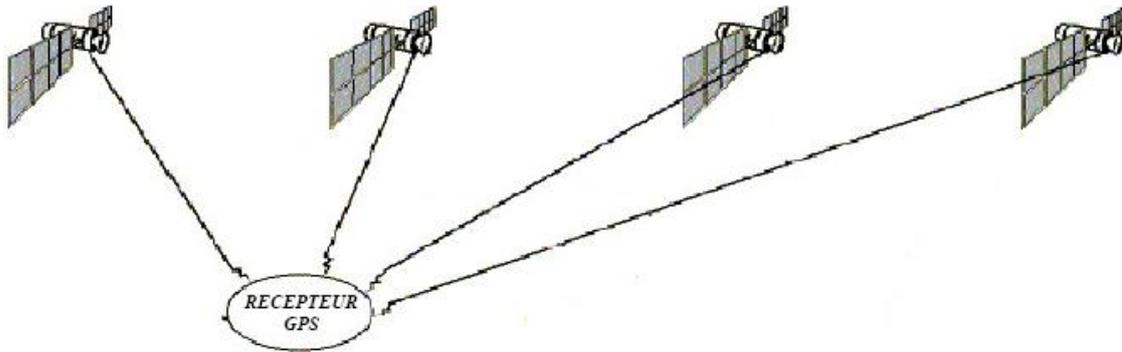


Figure (1.13) : Utilisation en mode naturel

Les utilisateurs civils du GPS peuvent obtenir une position GPS naturelle avec une précision allant, suivant l'endroit où l'on se trouve dans le monde, de quelques mètres à une dizaine de mètres, au lieu d'une centaine de mètres.

1.12.2 Utilisation en mode « différentiel » (DGPS pour Différentiel GPS):

Le mode différentiel (DGPS) est un ensemble de techniques permettant d'améliorer la précision du système. Le mode différentiel nécessite deux récepteurs: l'un qui sera positionné sur un point fixe de coordonnées connues (une référence) et l'autre, sur les positions à déterminer), soit l'utilisation de deux récepteurs pour un seul effectuant les mesures.

Dans le cas où l'utilisateur se servirait d'une station GPS permanente, un seul récepteur sera nécessaire :

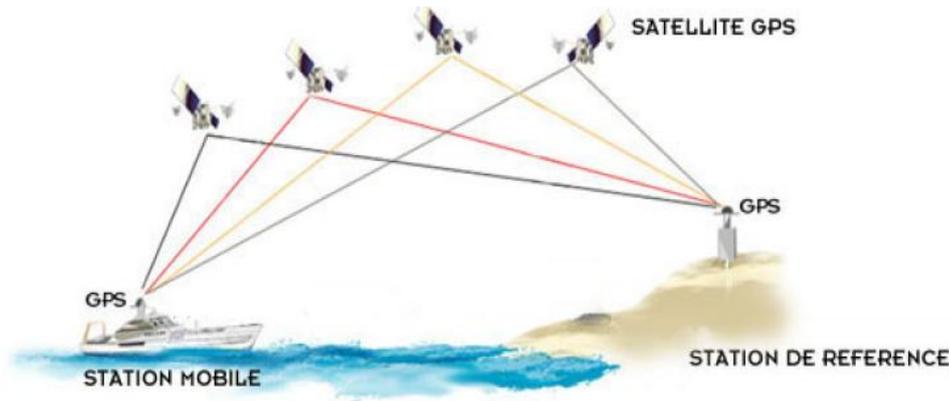


Figure (1.14) : Station de référence GPS

Son principe est basé sur le fait qu'il est raisonnable de considérer que deux positions mesurées par le système GPS, à un instant donnée, distantes l'une de l'autre de moins de 100Km, présentent la même erreur.

1.13 VISIBILITE ET DISPONIBILITE DES SATELLITES :

Les utilisateurs du GPS doivent savoir quels satellites suivre à quel moment et où les trouver, pour obtenir de meilleurs résultats. La terminologie permettant de décrire la visibilité des satellites est présentée ci-après suivie d'un exposé sur leur géométrie, leurs azimuts et leurs hauteurs, sur l'accès sélectif et sur l'antileurrage (ou antibrouillage).

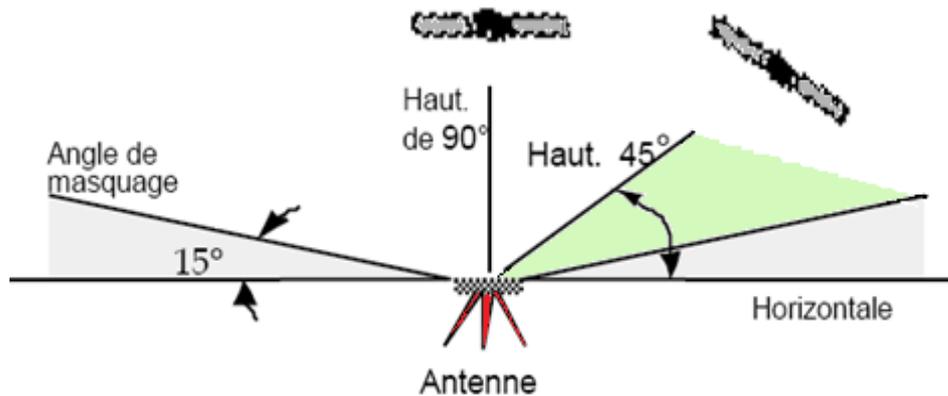


Figure (1.15) : Hauteurs et angles de masquage

La position des satellites par rapport à un point particulier sur la Terre est décrite en termes de leur hauteur et de leur azimut. La hauteur d'un satellite est l'angle entre l'horizontale et la ligne de visée du satellite à l'emplacement de l'antenne (désignée «Haut.» à la figure 3-5).

L'azimut est l'angle mesuré dans le sens horaire entre le nord et la position du satellite dans le ciel (désigné «Az.» à la figure 3-6). Les récepteurs et les logiciels de traitement GPS

comportent habituellement une option qui permet d'adopter un angle de masquage particulier (aussi appelé angle de coupure). L'angle de masquage est la hauteur sous laquelle les signaux GPS ne sont pas enregistrés ou utilisés (figure 3-5). Un satellite est dit «visible» à un moment donné s'il se trouve au-dessus de l'angle de masquage adopté et supposant l'absence de tout obstacle.

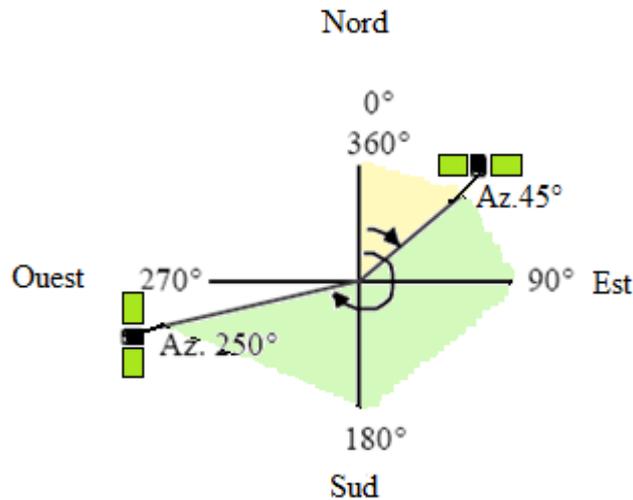


Figure (1.16) : Angle d'azimut

Les obstacles sont des objets qui bloquent le signal entre un satellite et un récepteur. Si par exemple, le satellite dont on souhaite capter les signaux se trouve à une hauteur de 20 degrés et à un azimut de 70 degrés et un immeuble s'élève à la même hauteur et dans la même direction, le signal du satellite est bloqué. Il est donc très important d'éviter les obstacles pour optimiser le positionnement GPS.

Pour n'importe quel endroit sur la Terre, pour une date et une heure données, il est possible de prévoir quels satellites seront visibles ainsi que leur position dans le ciel. Cette prévision est réalisée au moyen d'un logiciel conçu à cette fin et des fichiers d'almanach, qui contiennent des paramètres tronqués des orbites des satellites, ou encore des fichiers d'éphémérides radiodiffusés, qui contiennent les paramètres complets des orbites des satellites. Beaucoup de récepteurs affichent l'information sur la disponibilité des satellites en vue et permettent de télécharger les fichiers d'almanach.

2.1 L'ATMOSPHERE :

2.1.1 Définition :

L'atmosphère terrestre est un mélange formé de différents gaz et de particules diverses. Ce mélange forme une enveloppe gazeuse autour de la Terre qui contient l'air que nous respirons. C'est grâce à l'atmosphère que l'apparition et le maintien de la vie sont possibles sur Terre.

La moitié de la masse de l'atmosphère se trouve dans les 5 premiers kilomètres d'altitude, il faut s'élever jusqu'à 20 km pour atteindre 90% de la masse totale de l'atmosphère.

2.1.2 Quelques gaz constituants de l'atmosphère :

L'air est principalement constitué de diazote et de dioxygène. Cependant 1% de l'air est constitué d'autres gaz : les gaz rares. Ce sont par exemple l'argon, le néon, le krypton, le xénon, la vapeur d'eau ou bien l'ozone qui nous protège des rayons UV du Soleil.

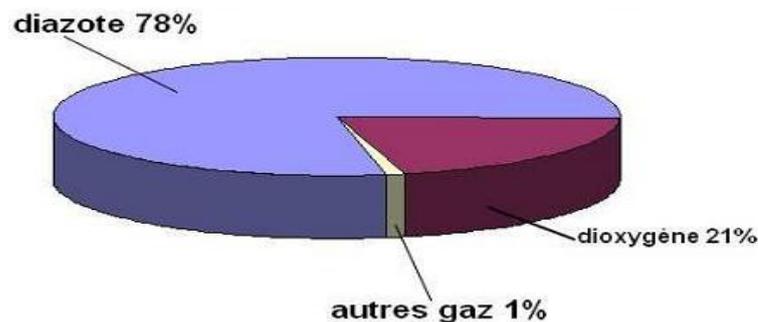


Figure (2.1): Composition de l'air en %

Gaz Rares 1% (Argon: 0.9%, Gaz carbonique 0,035%, et Xénon, Néon, Hélium à l'état de « traces »).

2.1.3 Couches Atmosphériques :

Les gaz composant l'atmosphère sont distribués dans les trois couches principales de l'atmosphère :

- L'ionosphère
- La stratosphère.
- La troposphère.

Ces couches n'ont pas la même pression, ni la même température et sont constituées de différents Gaz.

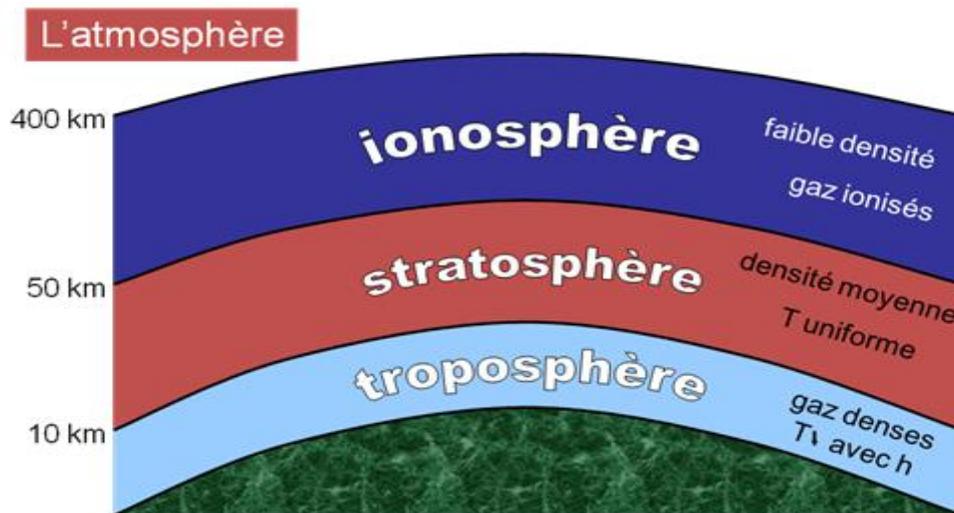


Figure (2.2): Les couches atmosphériques.

2.1.3.1 L'IONOSPHERE :

L'ionosphère est la partie ionisée de l'atmosphère terrestre, elle s'étend d'environ 50-60 km jusqu'à 1000 km d'altitude, l'énergie irradiée par le soleil (l'ultraviolet) ainsi que par les ondes cosmiques, est la principale cause d'ionisation des molécules des gaz, l'ionisation étant beaucoup plus importante le jour que la nuit.

Les tâches du soleil émettent de grandes quantités de rayonnement ultraviolet et affectent l'ionosphère, ce sont les principaux facteurs d'ionisation.

Le nombre de tâches varie avec un cycle de 11 ans, cela signifie que les conditions ionosphériques, et la propagation des ondes varient en synchronisme avec ce cycle. L'effet de la réfraction ionosphérique sur le signal émis par les satellites GPS dépend du contenu électronique total c'est-à-dire du nombre d'électrons libres rencontrés par le signal lors de son parcours dans l'ionosphère.

2.1.3.2 LA STRATOSPHERE :

La caractéristique principale de cette couche est qu'on s'élève à l'intérieur, la température reste presque constante avant de se mettre à augmenter après 25 km d'altitude pour atteindre les environs du point de congélation.

Les mouvements de l'air y sont beaucoup moindres, Il s'agit d'un environnement beaucoup plus calme et dépourvue de vapeur d'eau, avec un indice de réfraction très proche de l'unité ($n=1$).

Le nombre d'électrons libres 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 60km.

2.1.3.3 LA TROPOSPHERE :

Zone de l'atmosphère terrestre située entre la surface du globe et une altitude d'environ 8 à 15 kilomètres, selon la latitude et la saison. Elle est plus épaisse à l'équateur qu'aux pôles. La frontière entre la troposphère et la stratosphère s'appelle la tropopause. La troposphère terrestre présente trois caractères essentiels qui la distinguent des autres régions de l'atmosphère : la première c'est la couche la plus troublée (d'où son nom) ; la deuxième le brassage assure une constance relative de la composition sur toute l'épaisseur (on y trouve les trois quarts de la masse atmosphérique, pratiquement tous les corps solides en suspension et toute l'eau sous ses trois états) ; et la troisième la température décroît rapidement, de 0,6 %, en moyenne, avec l'altitude.

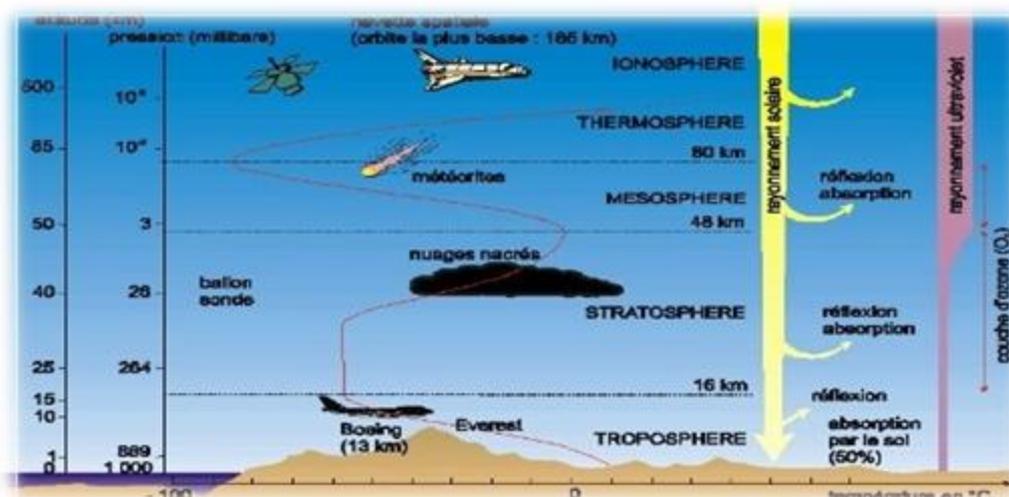


Figure (2.3) : La zone troposphérique.

2.1.3.3.1 Absorption troposphérique:

L'absorption due aux gaz résulte des résonances moléculaires de l'oxygène et de la vapeur d'eau (transitions, vibrations des atomes et molécules).

Ils influent lourdement sur les ondes radioélectriques sous forme :

$$\gamma_{O_2} = \left[\frac{6.6}{f^2 + 0.33} + \frac{9.8}{(f - 57.5)^2 + 2.2} \right] f^2 10^3 \quad f < 57.5 \text{ GHz}$$

$$\gamma_{O_2} = 14.7 \text{ dB} \quad 57.5 < f < 62.5 \text{ GHz}$$

$$\gamma_{O_2} = \left[\frac{4.13}{(f - 62.5)^2 + 1.1} + \frac{0.19}{(f - 118.7)^2 + 2} \right] f^2 10^3 \quad 62.5 < f < 350 \text{ GHz}$$

$$\gamma_{H_2O} = \left[0.067 + \frac{2.4}{(f - 22.3)^2 + 6.6} + \frac{7.33}{(f - 183.5)^2 + 5} + \frac{4.4}{(f - 323.8)^2 + 10} \right] f^2 \rho 10^{-4} \quad \dots (2.1)$$

Avec f : est exprimée en GHz et ρ vapeur d'eau g/m^3 d'air.

La figure 3.4 illustre l'atténuation sur un trajet traversant la troposphère en direction du zénith dans la bande [0-40] GHz, il existe deux composantes sèche et humide.

Pour la composante humide (7.5 g/m^3) l'absorption de vapeur d'eau est maximale à 22.2 GHz.

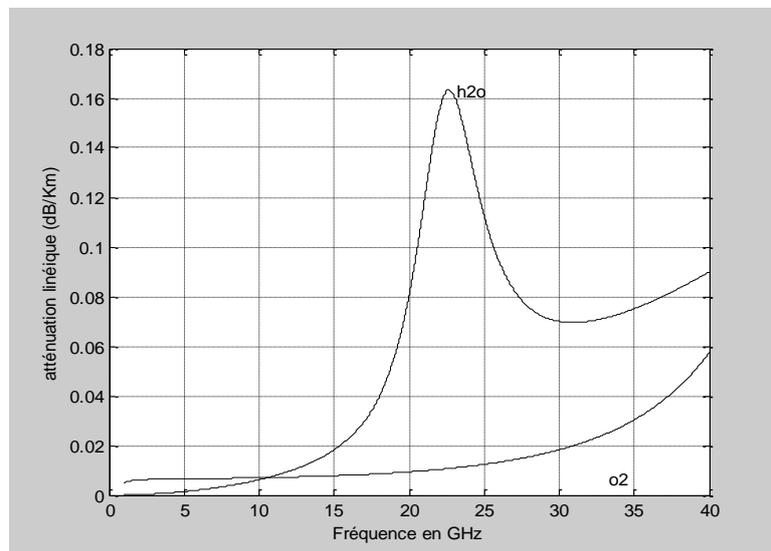


Figure (2.4): Absorption à la traversée verticale de la troposphère

2.1.3.3.2 Réfraction troposphérique :

L'indice de réfraction est défini par les conditions météorologiques (pression, température, humidité) comme il est toujours très voisin de l'unité, on considère non pas l'indice réel n mais un Co-indice N relié à n par la relation :

$$N = (n - 1)10^6 \quad \dots (2.2)$$

Ce Co-indice de réfraction N , appelé aussi simplement l'indice de réfraction, il est mesuré par un nombre compris entre 0 dans le vide en environ 300 au niveau du sol, en fonction des grandeurs météorologiques, N est donné par la formule :

$$N = \frac{77.6(P + 4810 \frac{E}{T})}{T} \quad \dots (2.3)$$

Où T : est la température absolue (k°), P la pression en millibars et E la pression partielle de vapeur d'eau (mbar), comme l'humidité de l'atmosphère peut s'exprimer de plusieurs façons différentes, cela donne autant d'expressions différentes de la formule ci-dessus, par exemple si on exprime l'humidité par le taux de mélange "S" qui est le rapport du poids de vapeur d'eau mélangé à l'air au poids d'air sec correspondant, on obtient:

$$N = P \left(\frac{77.6}{T} + 600 \frac{S}{T^2} \right) \quad \dots (2.4)$$

Le premier terme, qui ne dépend pas de l'humidité, est parfois appelé terme sec et l'autre terme humide. L'humidité est souvent donnée aussi sous forme d'humidité relative, qu'on peut définir comme le rapport entre le taux de mélange réel et le taux de mélange saturant S_0 à la même température :

$$RH = \frac{S}{S_0} \quad \dots (2.5)$$

S_0 est donné par des tables, mais pour la gamme courante des températures, on peut utiliser l'expression approchée :

$$\text{Log} S_0 = 12.22 - \text{Log} \left(p - \frac{2360}{T} \right) \quad \dots (2.6)$$

Lorsqu'on s'élève au-dessus du sol l'indice de l'air décroît généralement de façon irrégulière, cependant si on fait la moyenne d'un grand nombre de résultats de sondage, on obtient une courbe moyenne de décroissance à peu près exponentiels on a donc défini une atmosphère de référence par la relation :

$$N = 315e^{-0.136h} \quad \dots (2.7)$$

Où h : est exprimé en Km au-dessus de la mer, en fait l'atmosphère ne devient vraiment exponentielle qu'à partir de quelques Km d'altitude, les basses couches étant le siège de nombreuses irrégularités.

Dans toute la gamme des fréquences radioélectriques, l'indice de réfraction de la troposphère peut être considéré comme indépendant de la fréquence.

2.1.3.3.3 Dispersion troposphérique :

La propagation d'ondes d'espace se fait généralement en ligne droite, un changement d'indice de réfraction pourrait altérer la trajectoire rectiligne, c'est ce qui produit lors des variations de température, et la présence adjacente des masses d'air à des degrés d'humidité différentes, c'est souvent le cas au-dessus de l'océan.

2.1.3.3.4 Affaiblissements de propagation :

L'atmosphère n'est pas parfaitement transparente, même en dehors des bandes d'absorption intense.

Il existe une certaine atténuation due principalement aux composants gazeux de l'atmosphère, à l'eau sous forme liquide (pluie et nuages) ou solide (glace et neiges).

a) Affaiblissements par les éléments solides de la troposphère:

Les éléments solides qu'on peut rencontrer dans l'atmosphère appartiennent à deux familles, suivant qu'ils sont constitués d'eau ou d'autres matériaux.

a .1) Tempêtes de sable et de poussière :

Les tempêtes de sable et de poussière sont des nuages denses formés par des particules de sable et de poussière, dont les dimensions respectives sont généralement de 0.015cm et 0.0018cm.

Des mesures menées aux laboratoires à 10Ghz à travers une atmosphère artificielle chargée de poussière et de sable ont montré que pour des concentrations de particules inférieures à 10^{-5} (g/cm³), l'affaiblissement linéique n'atteindrait pas 0.1dB/Km pour le sable et 0.4dB/Km pour la poussière d'argile.

On peut déduire que l'affaiblissement provoqué par des tempêtes de sable et de poussière est négligé, et ne peut dépasser 1dB, même par des fortes tempêtes.

a .2) Neiges et glace :

Aux fréquences inférieures à 35Ghz les nuages de glaces, donnent lieu à des affaiblissements 100 fois plus petite environ que des nuages de pluie, aux fréquences supérieures à 35Ghz les nuages de glaces peuvent contribuer sensiblement à l'affaiblissement. Pour la neige le problème se pose à 50Ghz environ, bien que des chutes de neige mouillée

puissent causer par rapport à des chutes de pluie équivalentes, un affaiblissement beaucoup plus important.

L'affaiblissement produit par une chute de neige peut déterminer à l'aide de la formule :

$$\gamma = P\varphi \text{ (dB/Km)} \quad \dots \text{ (2.8)}$$

Où P : est le taux de précipitation, c'est la hauteur de l'eau liquide obtenue par la diffusion de la neige.

Est l'affaiblissement réduit donné en fonction de la longueur d'onde par le tableau suivant :

λ (cm)	1	2	3	4	5	7	10
φ (dB/Km)	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$5.8 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$

Tableau (2.1) : Affaiblissement réduit en fonction de λ .

Donc l'affaiblissement du à la neige est très faible et souvent négligé dans les calculs.

b) Affaiblissements par éléments liquides de la troposphère :

b.1) Brouillards et nuages :

Les brouillards et les nuages de pluie sont formés de particules d'eau liquide, typiquement de diamètre de celle-ci varie de 10^{-2} cm (brouillard) et de 10^{-1} cm (nuage de pluie).

Dans les nuages et les brouillards, les particules d'eau sont plus petites par rapport à la longueur d'onde jusqu'à 50Ghz, par suite l'atténuation est due principalement à l'absorption de l'énergie par les particules et on montre que l'affaiblissement linéique qui en résulte est à peu près proportionnel au carré de la fréquence, et à la quantité du nuage ou de brouillard, suivant la relation

$$\gamma = A \cdot f^2 \cdot M \quad \dots \text{ (2.9)}$$

Avec A : le coefficient qui dépend uniquement de la température, γ l'affaiblissement en dB/Km, f la fréquence (GHz) et M la quantité d'eau (g/cm^3).

b.2) Pluie :

L'influence de la pluie est assez important, elle est due à l'absorption et à la dispersion des ondes radio par les gouttes d'eau de différentes tailles, au-dessous de 10Ghz, l'influence de la pluie est relativement faible, par contre au-dessus de 10Ghzson importance est beaucoup plus grande et représente l'effet principal de la propagation.

L'atténuation par la pluie est données par :

$$\gamma_p = k \cdot \sigma^\alpha \quad \dots \text{ (2.10)}$$

Avec γ_p : est l'atténuation de la pluie (dB/K m)

σ : Est le taux de précipitation (mm/h).

k et α sont deux coefficients dépendants de la fréquence, ils sont donnés dans le tableau suivant :

Fréquence (Ghz)	α	k
01	0.940	0.000369
02	0.943	0.000146
04	1.098	0.000620
06	1.286	0.001650
08	1.318	0.004240
10	1.270	0.009485
12	1.208	0.617800
15	1.141	0.036100
20	1.082	0.072100
25	1.045	0.118500
30	1.010	0.177000
35	0.971	0.248000
40	0.934	0.330000

Tableau (2.2): Les coefficients k et α .

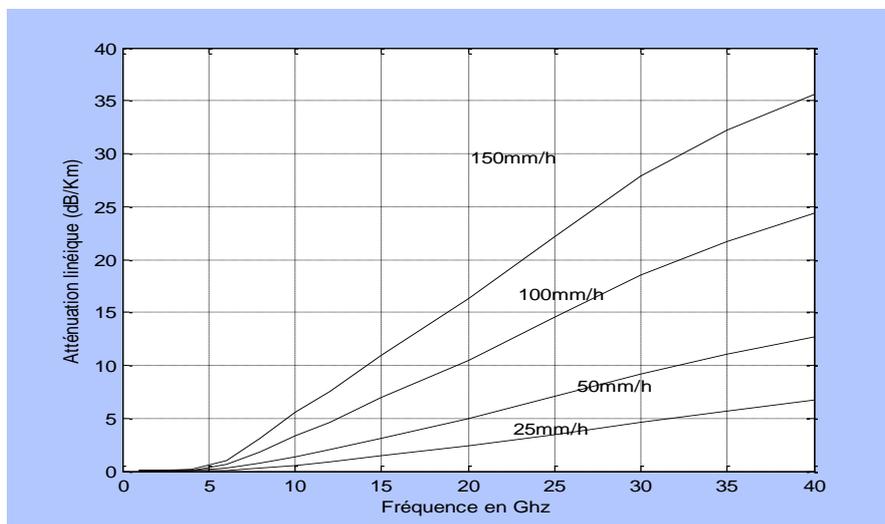


Figure (2.5): Atténuation de la pluie

2.2 LES SOURCES D'ERREURS :

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

2.2.1 La réfraction dans l'ionosphère :

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

2.2.2 La réfraction dans la troposphère :

La troposphère engendre un retard sur le signal correspondant à un allongement moyen de la distance satellite station supérieur à 2 mètres au zénith et peut atteindre 30m pour une élévation de 5°, cet allongement dépend des conditions météorologiques le long du trajet du signal ainsi que de l'altitude de la station.

Le retard troposphérique est scindé en deux composantes : sèche et humide.

La composante sèche représente environ 90 % du retard et peut être prévue avec un grand degré d'exactitude, la composante humide du retard troposphérique dépend de la concentration de vapeur d'eau le long de la trajectoire parcourue par le signal GPS. La composante humide est beaucoup moins homogène et varie rapidement, elle n'est pas facile à prévoir, et on la traite comme paramètre inconnu additionnel dans le processus d'estimation.

Les variations de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère sont trop locales et irrégulières pour pouvoir être modélisées, elles détériorent donc la précision du positionnement GPS, des erreurs dans l'estimation du retard troposphérique humide conduisent à une solution erronée principalement pour la composante verticale de la station.

Dans le cas simple d'une couche de vapeur d'eau horizontale à la surface de la terre, si le modèle sous estime la quantité d'humidité, alors la distance théorique satellite station est trop courte.

L'ajustement des paramètres lors du calcul de la solution va compenser la différence entre les observations et le modèle.

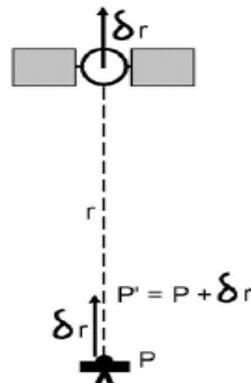


Fig (2.6): Décalages verticaux d'une station créés par un retard troposphérique.

Dans le cas des satellites au zénith, la hauteur mesurée est décalée de la hauteur modélisée, à cause des effets troposphériques mal pris en compte, il faut alors ajuster le paramètre troposphérique.

2.2.3 La précision des orbites des satellites GPS :

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

2.2.4 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 multi trajets. Un "blindage" des antennes contre les réflexions parasites est toujours possible, mais celui-ci ne peut être que partiel puisqu'il faut bien que le vrai signal parvienne à l'antenne. La seule solution consiste donc à essayer d'éviter les multi trajets (c'est à dire les objets parasites) autant que faire ce peut, ce qui n'est pas si facile quand on considère que le sol lui-même est un réflecteur potentiel !

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

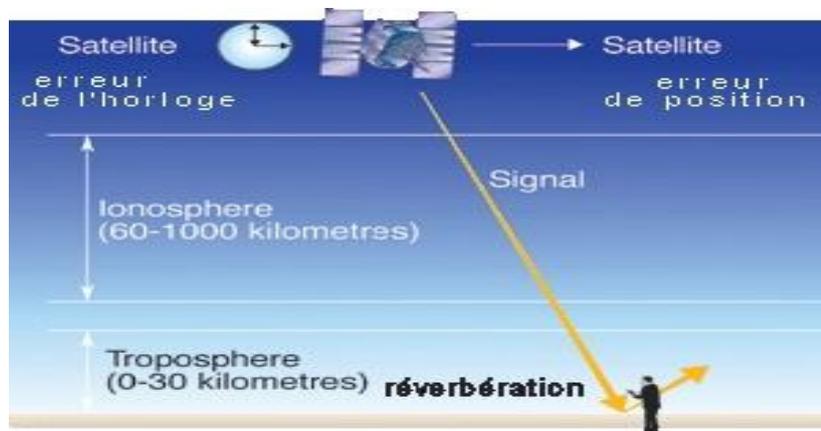


Figure (2.7) : Source d'erreur.

2.2.5 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 :

2.2.5.1 Mauvais fonctionnements 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.

2.2.5.2 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.

2.2.5.3 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.

2.2.5.4 Panne du récepteur :

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

3.1 INTRODUCTION:

La précision sur la détermination des coordonnées horizontales peut descendre en dessous du centimètre, il n'en est pas de même pour la composante verticale qui est principalement perturbé par la troposphère. Bien que l'on puisse considérablement minimiser les effets atmosphériques sur les observations, le milieu de propagation (troposphère) demeure essentiellement la limite de précision du système. Plusieurs modèles de correction troposphérique peuvent être utilisées.

Dans ce chapitre on essaie de présenter trois modèles ainsi que calculer l'erreur et le retard troposphérique et la variation de l'erreur en fonction des plusieurs paramètres.

3.2 LES PARAMETRES METEOROLOGIQUES:

3.2.1 L'humidité:

L'humidité représente la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air, sans compter l'eau liquide et la glace. On doit distinguer l'humidité relative et l'humidité absolue. L'humidité relative joue un rôle sur la formation du brouillard, de la rosée et des nuages. L'humidité relative est le rapport entre la quantité d'eau contenue réellement dans l'atmosphère (l'humidité absolue, mesurée en grammes d'eau par kg d'air) et la quantité d'eau maximum que l'air peut contenir. Sous forme mathématique, cela donne ceci: $H_{relative} = H_{air} / H_{max}$. Un air saturé en vapeur d'eau a une humidité relative de 100 % ; un air très sec, une humidité de 10 à 20 %. La pression de vapeur saturante et l'humidité relative dépendent de la température, plus la température de l'air est élevée, plus il peut contenir de vapeur d'eau.

3.2.2 La température:

La température est considérée comme une grandeur physique liée à la notion immédiate de chaud et froid, L'unité internationale de température est le kelvin (K). Le degré Celsius (°C) est une autre unité très répandue en Europe. Certains pays anglo-saxons et les Etats-Unis utilisent une autre unité : le degré Fahrenheit (°F). La plus basse température du système Celsius est -273,15 °C correspondant à 0 K. Les formules de transformations d'unités sont les suivantes : $^{\circ}\text{C} = 0,55 \times (^{\circ}\text{F} - 32)$, $\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15$, $^{\circ}\text{F} = 32 + (1,8 \times ^{\circ}\text{C})$.

Généralement, la température est une caractéristique thermodynamique importante de l'air. En effet, suivant la température d'un gaz, les autres grandeurs restant fixes, les propriétés de ce gaz (en particulier sa masse volumique) varient. Les variations de température de l'air vont donc influencer sur les phénomènes météorologiques. Dans la troposphère, zone qui nous intéresse, les variations de température sont dues à plusieurs facteurs que nous allons étudier. La variation de température en fonction de l'altitude est d'environ -2°C tous les 1000 pieds.

3.2.3 La pression:

Tout comme la température, la pression est une caractéristique thermodynamique importante de l'air. Elle traduit le poids de l'air de l'atmosphère et s'exprime en pascals (Pa) ou en bars ($1 \text{ bar}=100000 \text{ Pa}$). Néanmoins, l'unité la plus utilisée en météorologie est l'hectopascal (hPa) qui vaut 100 Pa. La pression est particulièrement importante car c'est la mesure de celle-ci, réalisée avec un baromètre, qui permet de déterminer l'altitude des avions. Il existe au niveau de la troposphère des zones de haute pression, où la pression est supérieure à la pression moyenne régionale et des zones de basse pression appelées où la pression est inférieure à la pression moyenne régionale. Ces zones de haute et basse pression peuvent se déplacer et ont une importance considérable sur les phénomènes météorologiques, comme nous le verrons par la suite. Au niveau de la mer, la pression moyenne est de 1013,25 hPa (soit 760 mm de mercure qui est une ancienne unité de mesure). Les pressions record enregistrées à ce niveau à nos jours sont de 1050 hPa pour la pression la plus élevée et de 870 hPa pour celle la plus basse.

3.3 FONDEMENTS THEORIQUES DU DELAI TROPOSPHERIQUE:

La troposphère est la partie de l'atmosphère terrestre située entre la surface du globe et une altitude d'environ 8 à 18 km. Elle se compose principalement d'azote (78%) et d'oxygène (21%). Le quasi totalité de la vapeur d'eau et les aérosols se trouvent dans la troposphère.

C'est un milieu non dispersif pour les ondes radio de fréquence supérieure à 30 GHz.

En traversant cette couche basse de l'atmosphère, l'onde GPS subit un retard (figure 4.1) dépendant de la pression atmosphérique, de la température et de la teneur en vapeur d'eau. L'effet est le même pour les deux fréquences GPS.

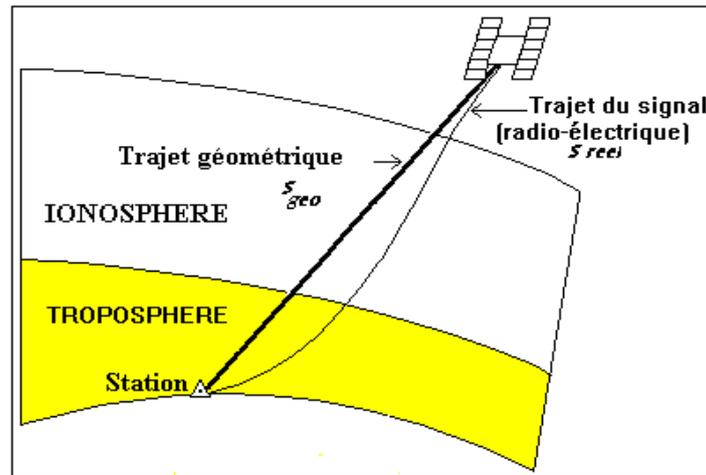


Figure (3.1): Trajet du signal GPS dans l'atmosphère.

La distance géométrique entre le satellite et le récepteur est :

$$\int_{s_{geo}} ds \quad (3.1)$$

Cependant, à cause de la variation de l'indice de réfraction de la troposphère et du principe de Fermat qui considère que le temps de propagation de la lumière entre deux points quelconques devrait être un minimum, la trajectoire réelle entre le satellite et le récepteur est légèrement courbée pour des angles inférieurs à 90° . Cette distance est donnée par :

$$\int_{s_{reel}} ds \quad (3.2)$$

Le délai troposphérique est la différence entre le temps de propagation réel de l'onde et le temps de propagation géométrique de la même onde.

$$DL = RT = \frac{1}{c} \left[\int_{s_{reel}} n(s) ds - \int_{s_{geo}} ds \right] \quad (3.3)$$

Avec :

$n(s)$: l'indice de réfraction variant en fonction de la position spatiale.

C : Vitesse de la lumière dans le vide.

On peut faire le changement suivant :

$$RT = \frac{1}{c} \left[\int_{S_{\text{reel}}} n(s) ds - \int_{s_{\text{reel}}} ds + \int_{s_{\text{reel}}} ds - \int_{s_{\text{geo}}} ds \right]$$

$$RT = \frac{1}{c} \left[\int_{S_{\text{reel}}} (n(s) - 1) ds + \int_{s_{\text{reel}}} ds - \int_{s_{\text{geo}}} ds \right]$$

$$RT = \frac{1}{c} \left[\int_{S_{\text{reel}}} (n(s) - 1) ds + \Delta_{\text{geo}} \right] \dots \quad (3.4)$$

Où Δ_{geo} représente la différence entre la trajectoire réelle et la ligne géométrique. Ce terme peut être négligé pour les grands angles d'élevation. En multipliant par la vitesse de la lumière c , on obtient

$$\Delta L = 10^{-6} \int_s N ds \quad (3.5)$$

$N = 10^6(n-1)$: réfractivité du milieu traversé

ds : distance élémentaire dans la direction du zénith.

Une bonne approximation valable dans le domaine des micros ondes est donnée par la formule :

$$N^{\text{trop}} = 77.6 \frac{P_s}{T} - 12.96 \frac{e_v}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{e_v}{T^2} \quad (3.6)$$

P_s : pression en millibars.

T : température en degrés Kelvin.

e_v : pression partielle de vapeur d'eau en millibars.

Du fait que la pression de vapeur d'eau devient négligeable à une altitude de l'ordre de 10 km, la réfractivité s'exprime par:

$$N = N_{\text{sèche}} + N_{\text{humide}}$$

$N_{\text{sèche}}$: Représente la réfractivité de la partie sèche.

N_{humide} : Représente la réfractivité de la partie humide.

3.3.1 Le délai troposphérique :

En traversant la troposphère, l'OEM émise par un satellite emprunte une trajectoire appelée chemin optique S. En raison de la réfraction dans l'atmosphère, cette onde subit un retard DL sensiblement proportionnel à la densité dépendant du type des molécules rencontrées. Ce délai correspond à un allongement apparent du trajet du signal GPS.

Le délai DL est la somme de deux termes : le premier, appelé composante hydrostatique, représente la contribution de l'atmosphère totale et retarde le signal zénithal GPS d'un peu plus de 2 mètres ; le second, appelé composante humide, représente la contribution de la vapeur d'eau et retarde le signal zénithal GPS d'une dizaine de centimètres.

3.3.2 La composante sèche et humide :

La partie sèche ou hydrostatique qui s'étend jusqu'à environ 40 km d'altitude se compose essentiellement de gaz secs tels que l'azote l'oxygène, l'argon, le dioxyde de carbone, le néon, l'hélium. Elle peut être déterminée avec une grande précision à partir des mesures de pression et de température au sol. Cette dernière représente la contribution de l'atmosphère totale et le retarde signal zénithal GPS d'un peu plus de 2 mètres.

La partie humide ou bien la composante humide juste au-dessus de la surface terrestre est d'environ 11 km d'épaisseur qui contient les molécules de vapeur d'eau. C'est la partie la plus difficile à modéliser à cause de la variabilité de la concentration de la vapeur d'eau.

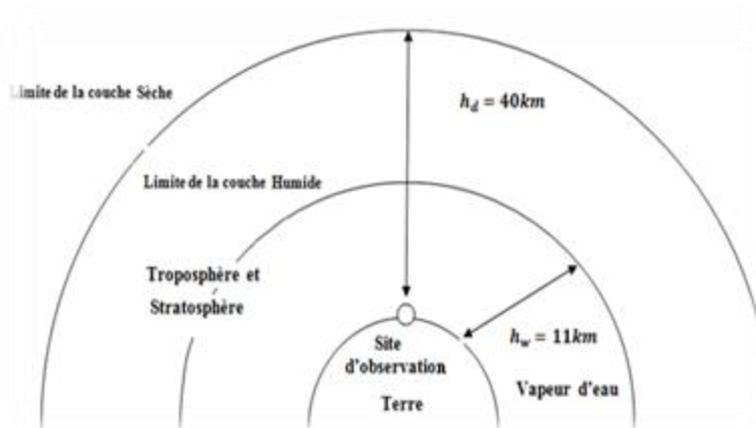


Figure (3.2): Différentes couches de la troposphère

3.4 MODELISATION DE LA TROPOSPHERE:

Comme le délai troposphérique évolue en fonction de la météorologie locale, il est nécessaire de modifier ce paramètre au cours du temps, cela finit par introduire beaucoup d'inconnues, ce qui rend les calculs instables et les solutions moins fiables. Afin de réduire l'erreur due au délai troposphérique, deux approches sont possibles, la modélisation de la réfraction troposphérique sans utiliser les observations GPS et l'utilisation des observations GPS pour estimer des paramètres troposphériques. Les modèles atmosphériques standards sont les outils le plus couramment utilisés, ils permettent de donner une première approximation du délai humide. Il existe plusieurs modèles atmosphériques utilisables pour corriger les erreurs troposphériques qui affectent les signaux GPS, il est possible d'utiliser ces différents modèles, chacun de ces modèles à sa fonction de projection associée, tels que les modèles suivants :

3.4.1 Modèle de Saastamoinen :

Est un modèle atmosphérique régulièrement appliqué, on l'utilise en extrapolant les valeurs de pression, température et humidité d'une atmosphère standard au niveau de l'océan à l'altitude de la station.

Il décrit très bien la composante sèche de l'atmosphère mais seulement approximativement celle humide, son algorithme est le suivant :

$$\Delta\rho = \frac{0.002277}{\sin(EI)} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \frac{B}{\tan^2(EI)} \right] \quad (3.7)$$

- **T** est la température en Kelvins.

- **P** et **e** sont respectivement la pression totale et la pression partielle de vapeur d'eau.

- Le terme **B** c'est un terme correctif pour la prise en compte de la hauteur par rapport au niveau de la mer.

- **EI** : L'élévation du satellite.

Avec :

$$P = P_0 (1 - 0.000226(h - h_0))^{5.225} \quad (\text{mbar})$$

$$T = T_0 - 0.0065(h - h_0) \quad (\text{K}^\circ)$$

$$H = H_0 \exp(-0.0006396(h - h_0)) \quad (\%)$$

Hauteur de référence	$h_0 = 0 \text{ m}$
Température	$T_0 = 291.16 \text{ K} (18\text{C}^\circ)$
Pression totale	$P_0 = 1013.25 \text{ mbar}$
Humidité relative	$H_0 = 50\%$

Tableau (3.1) : Paramètres d'atmosphère standard au niveau de la mer.

Il est important ici de noter que le tableau (4.1) contenant les paramètres d'atmosphère standard fait intervenir le pourcentage d'humidité dans l'air H. Or les modèles troposphériques utilisent généralement la pression partielle de vapeur d'eau (e). Ces deux quantités sont en fait reliées simplement par la formule :

$$H = 100 \frac{e}{e_s} \quad (3.8)$$

Equation dans laquelle e_s (mbar), appelée pression de vapeur d'eau saturante, est une Fonction de la température (K^0) dont l'expression la plus connue :

$$e_s = 6.112 * \exp \frac{17.67(T-273.16)}{T-29.66} \quad (3.9)$$

Altitude(Km)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
B	1.156	1.079	1.006	0.938	0.813

Tableau (3.2) : La fonction B(h) du modèle de Saastamoinen

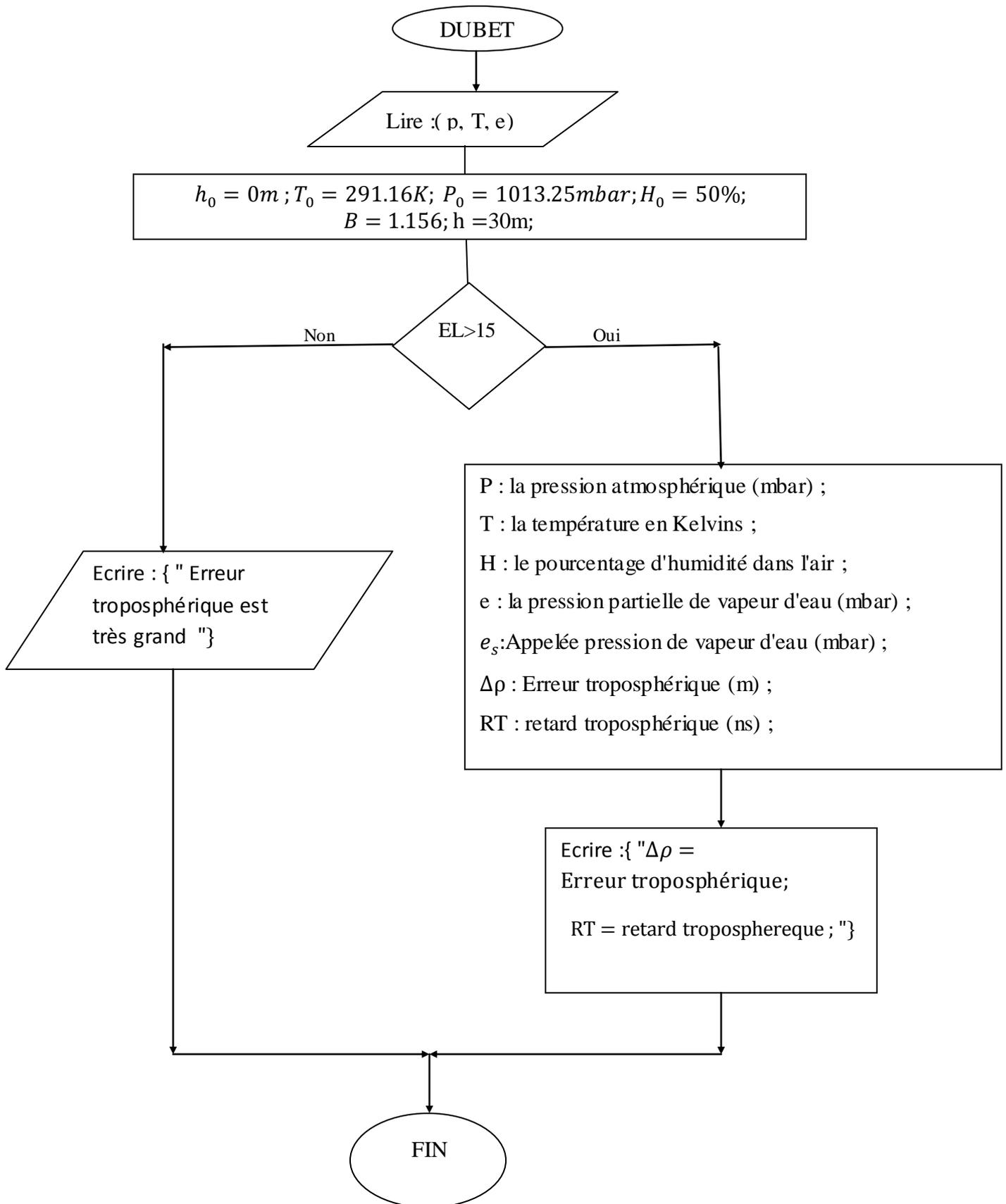


Figure (3.3) : Organigramme du modèle de Saastamoinen

3.4.2 Modèle de Hopfield :

Dans ce modèle deux étapes à suivre, ces étapes sont :

- L'utilisation des paramètres de l'atmosphère standard, ces paramètres sont les suivants :
 - la température de l'air ambiante $T_{amb} = 15C^{\circ}$.
 - la pression de l'air ambiante $P_{amb} = 10.325kPa$.
 - la pression de vapeur d'eau ambiante $P_{vap} = 0.85kPa$ qui est correspond à une valeur d'humidité relative de 50% pour la température ambiante).
- L'utilisation des mesures par récepteur pour T, P et P_{vap} .

$$\text{Avec } P_{vap} = (0.017 * H_R + 0.056 * T_{amb})/2$$

H_R : Humidité relative ;

Erreur zénithal de la composante humide est donnée par:

$$\rho_{hu} = 1.55208E - 4P_{amb} \frac{40136 + 148.72T_{amb}}{T_{amb} + 273.16} \quad (m) \quad (3.10)$$

Erreur zénithal de la composante sèche est donnée par:

$$\rho_s = \frac{-0.282P_{vap}}{T_{amb} + 273.16} + \frac{8307.2P_{vap}}{(T_{amb} + 273.16)^2} \quad (m) \quad (3.11)$$

Erreur troposphérique est donnée par :

$$d\rho_{tro} = \frac{\rho_{hu}}{\sin\sqrt{(\theta^2 + 1.904E-3)}} + \frac{\rho_s}{\sin\sqrt{(\theta^2 + 0.6854E-3)}} \quad (m) \quad (3.12)$$

Où : θ est l'élévation en [rad].

Lorsqu'on utilise l'atmosphère standard l'expression devient :

$$\rho_{tro} = \frac{2.312}{\sin\sqrt{(\theta^2 + 1.904E-3)}} + \frac{0.084}{\sin(\sqrt{\theta^2 + 0.6854E-3})} \quad (m) \quad (3.13)$$

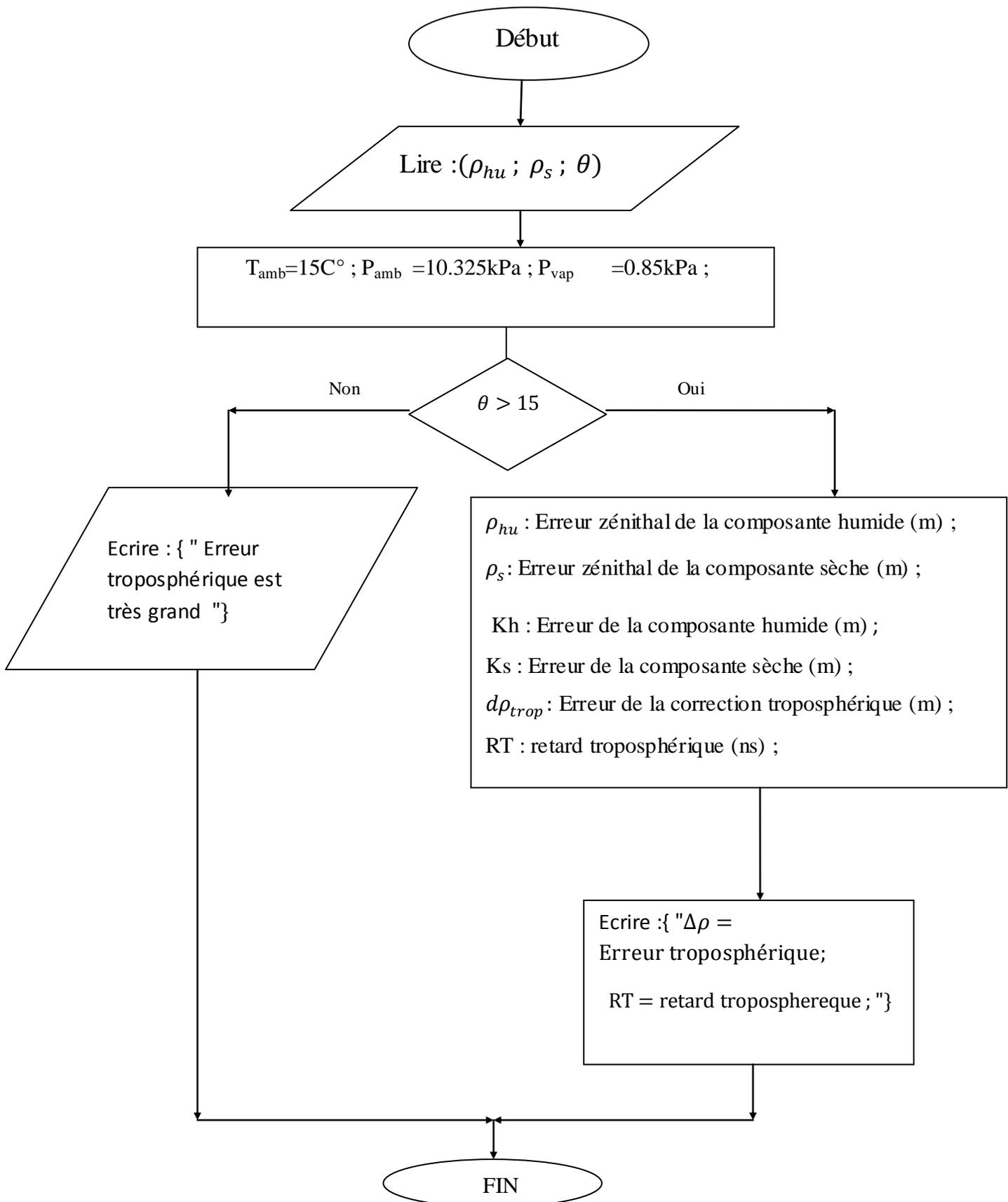


Figure (3.4): Organigramme du modèle de Hopfield

3.4.3 Modèle de Goad et Goodman :

Est un modèle utilisé pour estimer le retard troposphérique à l'aide d'un calcul numérique il considéré que l'atmosphère est en équilibre hydrostatique, la température décroît d'une façon linéaire en fonction de l'altitude et qu'elle est constante dans la stratosphère et la tropopause le modèle calcule séparément les composantes sèche et humide du délai troposphérique. Son algorithme est :

$$dtrop_i = 10^{-6} N_i \sum_{j=1}^9 A_{ji} \frac{R_j^i}{j} \quad (3.14)$$

$$N_1 = 77.624 \frac{P}{T} \quad (3.15)$$

$$N_2 = -12.92 \frac{e}{T} + 3.719 * 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (3.16)$$

$$R_i = \sqrt{(a_e + h_i)^2 - a_e^2 \cos^2(\theta)} - a_e \sin(\theta) \quad i=1,2 \quad (3.17)$$

$$h_1 = 5 \frac{0.002277 * P}{N_1 10^{-6}} \quad (3.18)$$

$$h_2 = 5 \frac{0.002277}{N_2 10^{-6}} \left(\frac{1255}{T} + 0.5 \right) e \quad (3.19)$$

$$A_{1i} = 1$$

$$A_{2i} = 4a_i$$

$$A_{3i} = 6a_i^2 + 4b_i$$

$$A_{4i} = 4a_i(a_i^2 + 3b_i)$$

$$A_{5i} = a_i^4 + 12a_i^2 b_i + 6b_i^2$$

$$A_{6i} = 4a_i b_i (a_i^2 + 3b_i)$$

$$A_{7i} = b_i^2 (6a_i^2 + 4b_i)$$

$$A_{8i} = 4a_i b_i^3$$

$$a_i = -\frac{\sin E}{h_i}$$

$$b_i = -\frac{\cos^2 E}{2a_e h_i}$$

$$e = 6.108RH \exp\left(\frac{17.15T-4684}{T-38.45}\right) \quad \text{Ou}$$

$i = 1$: composant sèche;

$i = 2$: composant humide;

$dtrop_i$: délai troposphérique de la composante i ;

T: température (K);

P: pression atmosphérique (mbar);

e: pression partielle de vapeur d'eau (mbar);

E: angle d'elevation ($^\circ$);

a_e : demi – grand axe de l'ellipsoïde terrestre ;

RH: humidité relative (fraction de 1).

N_1 : L'indice de réfraction de la composante sèche.

N_2 : L'indice de réfraction de la composante humide.

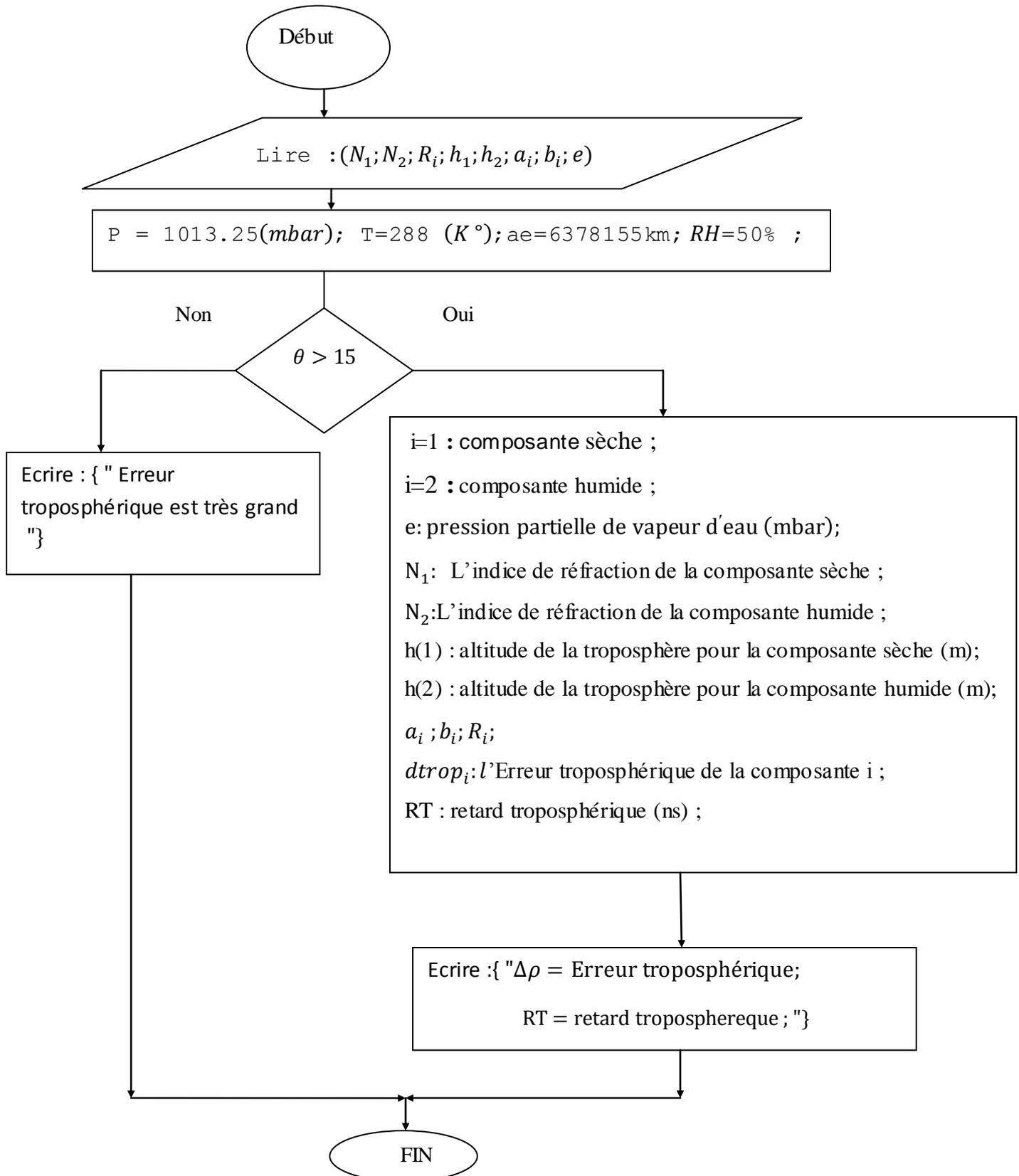


Figure (3.5): Organigramme du modèle de Goad Et Goodman.

4.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous présenteront les procédures des différents modèles que nous avons présenté dans le chapitre 3 et les résultats de simulation en utilisant logiciel Matlab, dans le but de calculer l'erreur et le retard troposphérique pour les différents modèles en tenant compte des paramètres liés avec l'atmosphère (pression, température, humidité relative). En faisant aussi intervenir l'angle d'élévation 'EL' des satellites et la hauteur de la station réceptrice h.

4.2 PRESENTATION DES APPLICATIONS :

Dans ce qui suit, on va diviser notre travail en deux parties :

La première partie : on réalise une interface qui ne permet de calculer l'erreur et le retard troposphérique des quatre modèles.

La deuxième partie : on présentera les différents graphes de simulations lorsque les paramètres atmosphériques changent.

4.3 PRESENTATION DE L'INTERFACE DES APPLICATIONS :

Pour présenter les résultats nous avons réalisé un menu principal avec Matlab voir figure 4.1



Figure (4.1) : Menu principal

C'est en clic sur les boutons A, B :

Entrée : passer au menu de la figure 4.2

Quitter : fermer la fenêtre 4.1

Le menu de la figure 4.2 nous permet de choisir les différents modèles (C, D, E, F)



Figure (4.2) : Sous menu du choix des modèles

Le choix se fait en cliquant sur l'un des modèles ; puis on clique sur le bouton **Appliquer**.

Appliquer : pour aller au menu d'exécution de chaque modèle.

Retour : pour aller au menu précédent **Figure (4.1)**.

Quitter : quitter tous les programmes.

4.3.1 Applications du modèle de Saastamoinen :

Le premier choix **C** de la figure 4.2 nous permet de visualiser les résultats de calcul d'après les données des paramètres météorologiques avec un angle d'élévation comprise entre : $15 \leq EL < 90$, pour $EL=50$ on aura les résultats dans la figure 4.3.

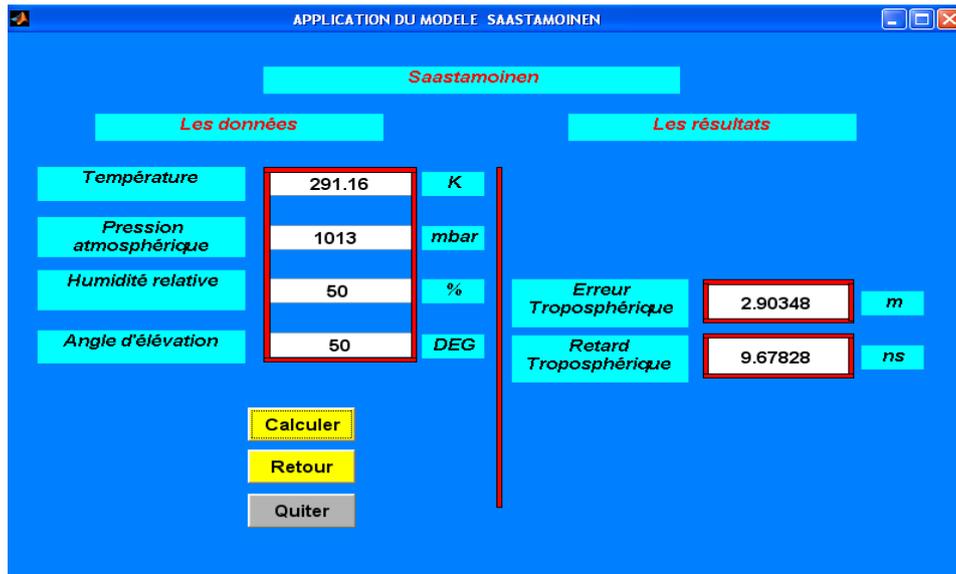


Figure (4.3) : sous menu du modèle de Saastamoinen.

4.3.2 Applications du modèle de Hopfield :

Le deuxième choix **D** de la figure 4.2 nous permet de visualiser les résultats de calcul d'après les données des paramètres météorologiques avec un angle d'élévation comprise entre : $15 \leq EL < 90$, pour $EL=55$ on aura les résultats dans la figure 4.4

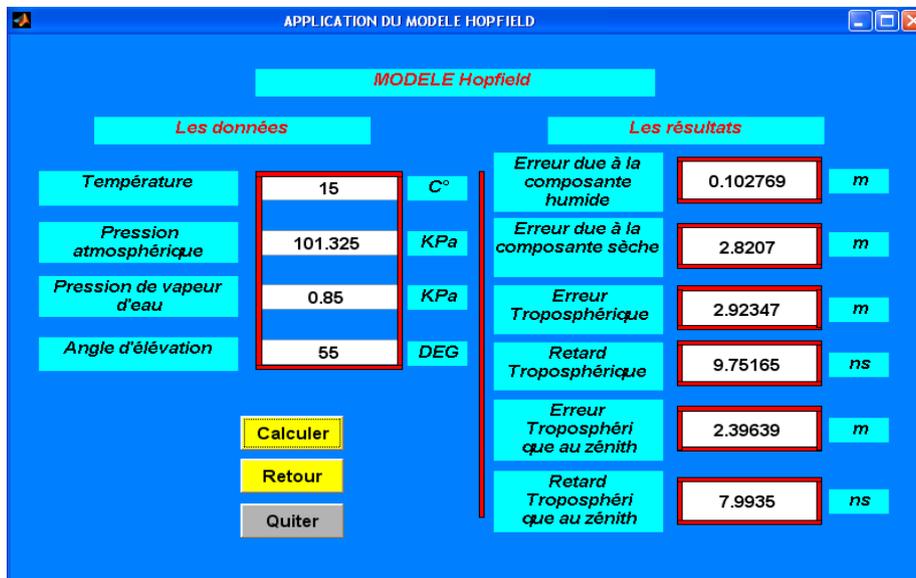


Figure (4.4) : sous menu du modèle de Hopfield.

4.3.3 Applications du modèle de Goad et Goodman:

Le troisième choix **E** de la figure 4.2 nous permet de visualiser les résultats de calcul d'après les données des paramètres météorologiques avec un angle d'élévation comprise entre : $15 \leq EL < 90$, Pour $EL=60$ on aura les résultats dans la figure 4.5.

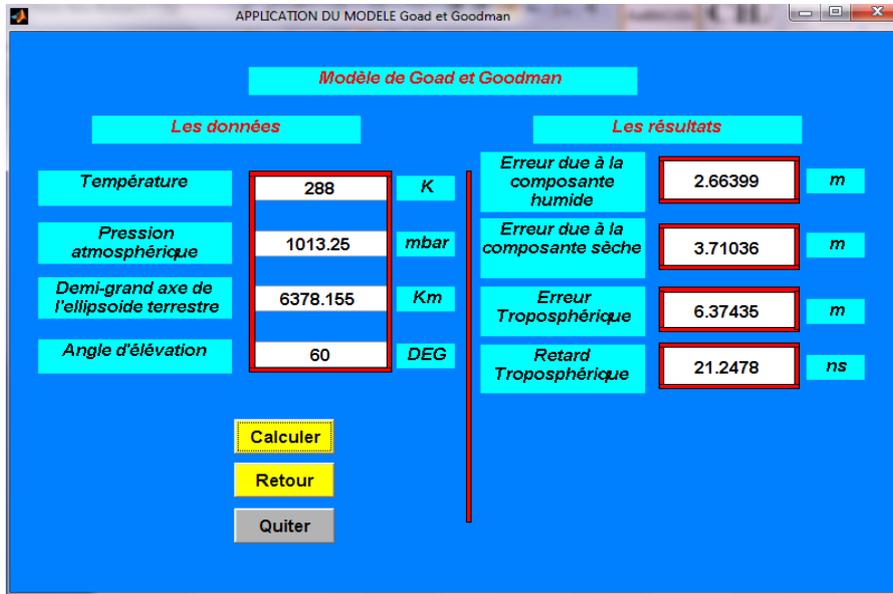


Figure (4.5) : sous menu du modèle de Goad et Goodman.

4.3.4 Applications du modèle de Hopfield en atmosphère réel:

Le quatrième choix **F** de la figure 4.2 nous permet de visualiser les résultats de calcul d'après les données des paramètres météorologiques réel avec un angle d'élévation $EL= 45$ on aura les résultats dans la figure 4.6



Figure (4.6) : sous menu du modèle de Hopfield en atmosphère réel

4.4 PRESENTATION DES RESULTATS :

4.4.1 Calcul l'erreur troposphérique à l'aide du modèle de Saastamoinen :

Les résultats de simulation sont présentés sous forme de tableau (4.1)

ANGLE D'élévation (°)	ERREUR TROSPHERIQUE (m)	RETARD TROSPHERIQUE (ns)
15	8.4591	28.1972
20	6.4504	21.5015
25	5.2386	17.4621
30	4.4363	14.7877
35	3.8716	12.9055
40	3.4573	11.5243
45	3.1444	10.4813
50	2.9035	9.6783
55	2.7159	9.0531
60	2.5694	8.5647
65	2.4555	8.1851
70	2.3685	7.8951
75	2.3044	7.6813
80	2.2603	7.5344
85	2.2345	7.4484

Tableau (4.1) : Les résultats du modèle de Saastamoinen.

- ✦ Les graphes du modèle de Saastamoinen son présenter sur deux figure suivantes :

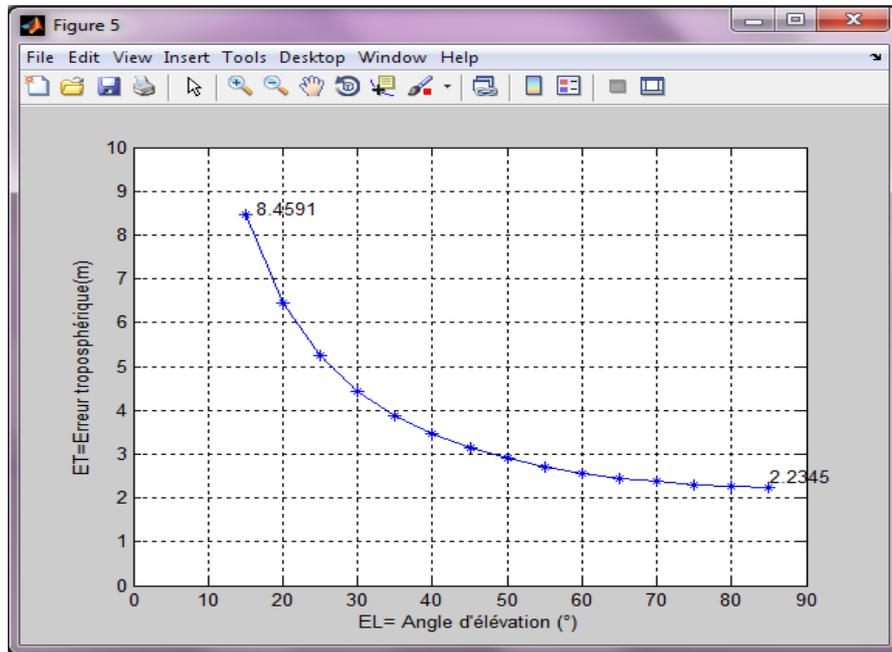


Figure (4.7) : Erreur troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.

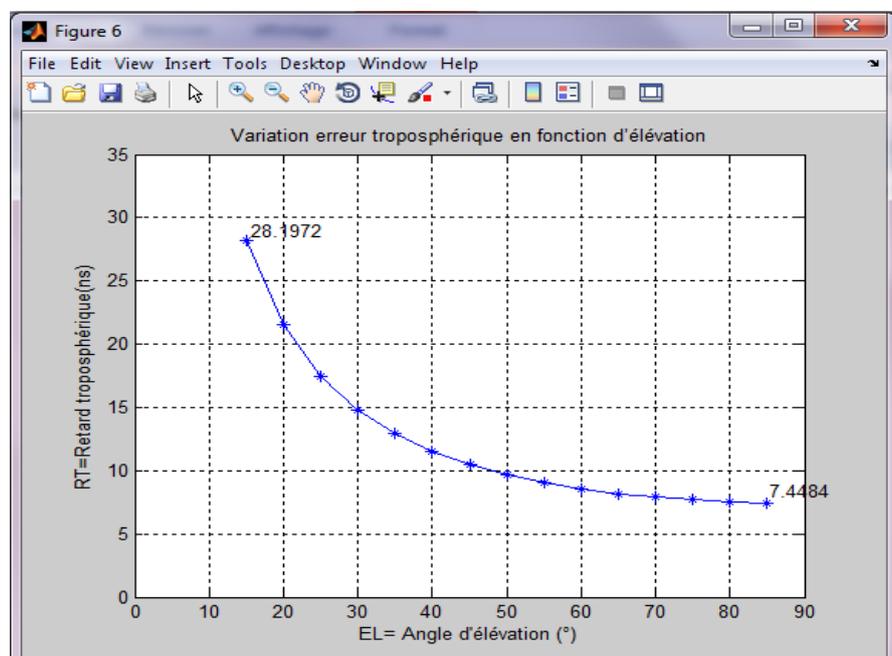


Figure (4.8) : Retard troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.

4.4.2 Calcul l'erreur troposphérique à l'aide du modèle de Hopfield :

A l'aide de ce modèle on peut calculer l'erreur troposphérique, le retard troposphérique, l'erreur due au composant humide et l'erreur due au composant sèche en fonctions de l'angle d'élévation.

Les résultats de simulation sont présentés sous forme de Tableau (4.2)

ANGLE D'élévation (°)	ERREUR DUE A LA COMPSANTE HUMIDE (m)	ERREUR DUE A LA COMPOSANT SECHE (m)	ERREUR TROPOSPHERIQUE (m)	RETARD TROPOSPHERIQUE (ns)
15	0.323765	8.81485	9.13861	30.4831
20	0.245537	6.71032	6.95585	23.2022
25	0.198911	5.44569	5.6446	18.8284
30	0.168219	4.60989	4.77811	15.938
35	0.146689	4.02224	4.16893	13.906
40	0.130923	3.59129	3.72222	12.416
45	0.119032	3.26597	3.385	11.2912
50	0.109885	3.01559	3.12547	10.4255
55	0.102769	2.8207	2.92347	9.75165
60	0.097213	2.66848	2.7657	9.22537
65	0.0928967	2.55022	2.64311	8.81648
70	0.0895998	2.45988	2.54948	8.50415
75	0.0871691	2.39328	2.48045	8.2739
80	0.0855001	2.34757	2.43307	8.11586
85	0.0845248	2.32089	2.40541	8.02359

Tableau (4.2) : Les résultats du modèle de Hopfield.

Les graphes de modèle de Hopfield son présenter sur quatre figure suivantes :

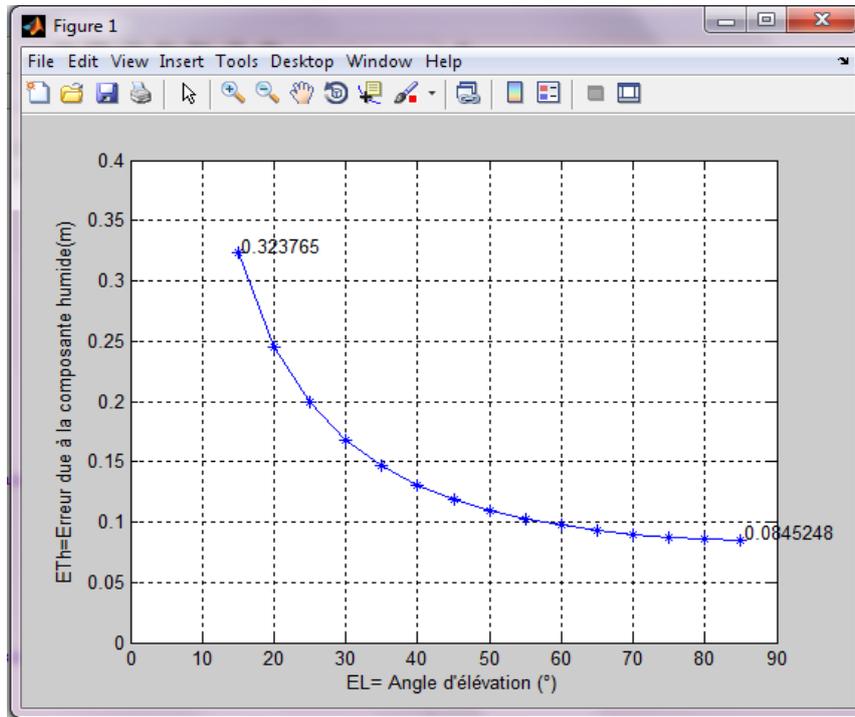


Figure (4.9) : Variation d’erreur due à la composante humide en fonction de l’angle d’élévation.

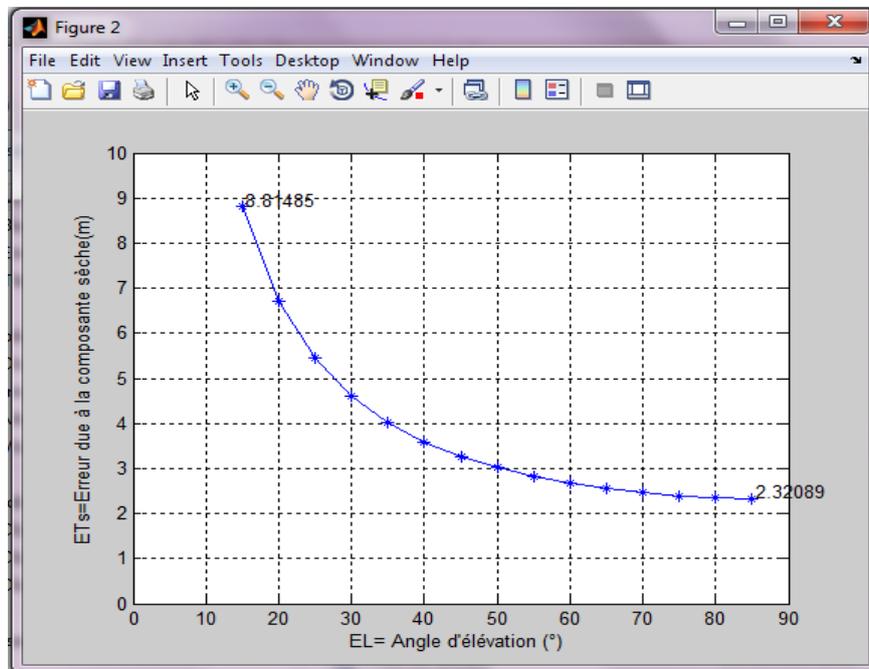


Figure (4.10) : Variation d’erreur due à la composante sèche en fonction de l’angle d’élévation.

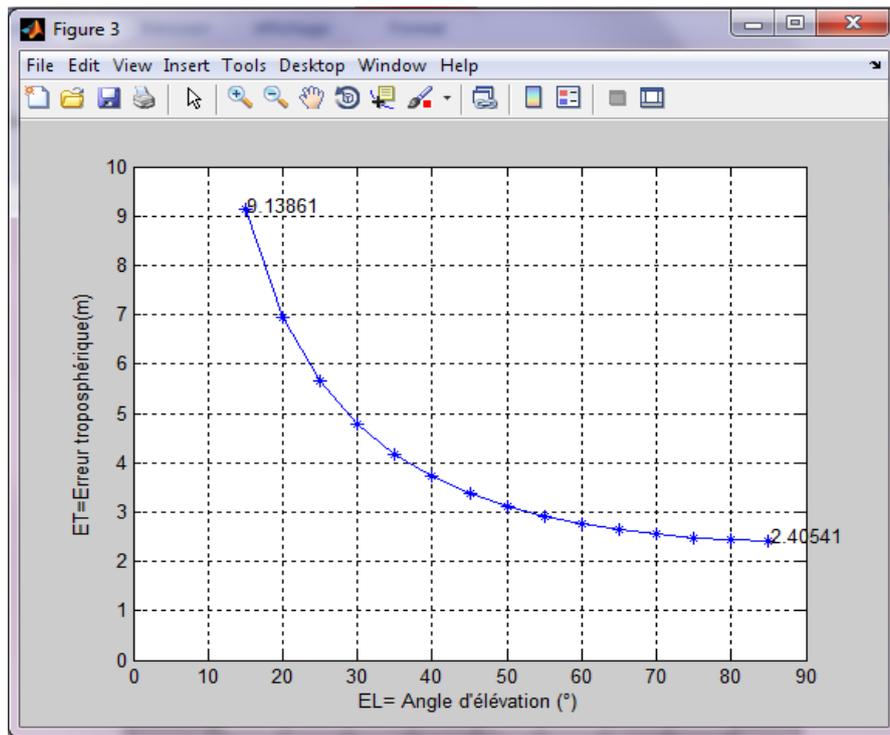


Figure (4.11) : Variation d'erreur troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.

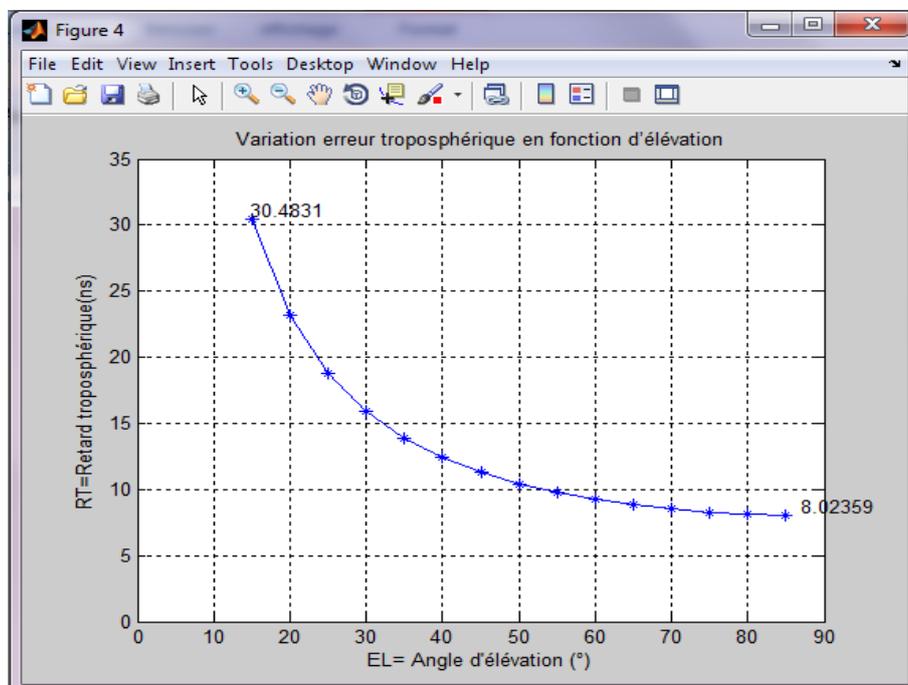


Figure (4.12) : Variation de Retard troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.

- **Interprétation des figures :**

On observe sur les figures précédentes que la valeur résiduelle du terme d'allongement troposphérique est beaucoup plus sensible à une variation d'angle d'élévation c'est-à-dire la valeur de l'erreur augmente quand l'angle d'élévation diminue, si on considère un satellite bas, l'élévation 10° ou 15° par exemple, l'erreur troposphérique atteint jusqu'à 9.13m, maintenant si on prend l'angle d'élévation 90° l'erreur troposphérique atteint jusqu'à 2.40m. Voir tableau (4.2).

L'erreur troposphérique c'est la somme de deux (02) erreurs (erreur de la composante humide plus erreur de composante sèche).

d'après les figures (4.9 et 4.10) on remarque que l'erreur de la composante humide est négligeable devant la composante sèche, par exemple si on prend la valeur maximale de l'angle d'élévation $E=85^\circ$ on obtient :

- ERREUR DUE A LA COMPOSANTE HUMIDE = 0.0845248(m).
- ERREUR DUE A LA COMPOSANTE SECHE = 2.32089(m). Voir tableau (4.2).

Ceci est dû au fait que la composante humide et la densité de vapeur d'eau ont très variable en fonction de la position et de temps est plus difficile à prédire que l'atmosphère sèche. La partie humide représente à peu près 10 % de l'effet total de la troposphère.

4.4.3 Calcul l'erreur troposphérique à l'aide du modèle de Goad et Goodman :

Les résultats de simulation sont présentés sous forme de tableaux 4.3

ANGLE D'élévation (°)	ERREUR DUE A LA COMPOSANTE HUMIDE (m)	ERREUR DUE A LA COMPOSANTE SECHE (m)	ERREUR TROPOSPHERIQUE (m)	RETARD TROPOSPHERIQUE (ns)
15	8.9006	12.3965	21.2971	70.9904
20	6.7401	9.3875	16.1276	53.7586
25	5.4565	7.5997	13.0561	43.5204
30	4.6128	6.4246	11.0374	36.7915
35	4.0215	5.6011	9.6226	32.0754
40	3.5888	4.9984	8.5871	28.6237
45	3.2625	4.5439	7.8064	26.0213
50	3.0116	4.1944	7.2060	24.0200
55	2.8164	3.9226	6.7390	22.4633
60	2.6640	3.7104	6.3743	21.2478
65	2.5456	3.5455	6.0911	20.3037
70	2.4552	3.4196	5.8748	19.5825
75	2.3885	3.3267	5.7152	19.0508
80	2.3428	3.2629	5.6057	18.6857
85	2.3160	3.2257	5.5416	18.4721

Tableau (4.3) : Les résultats du modèle de Goad et Goodman.

- ✦ Les graphes du modèle de Goad et Goodman son présenter sur les quatre figures suivantes :

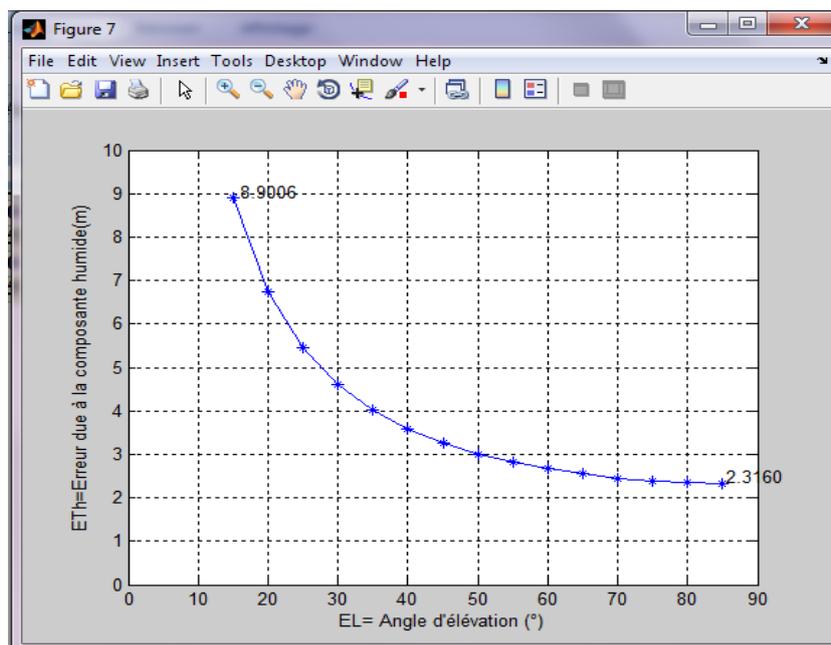


Figure (4.13) : Variation d'erreur due à la composante humide en fonction de l'angle d'élévation.

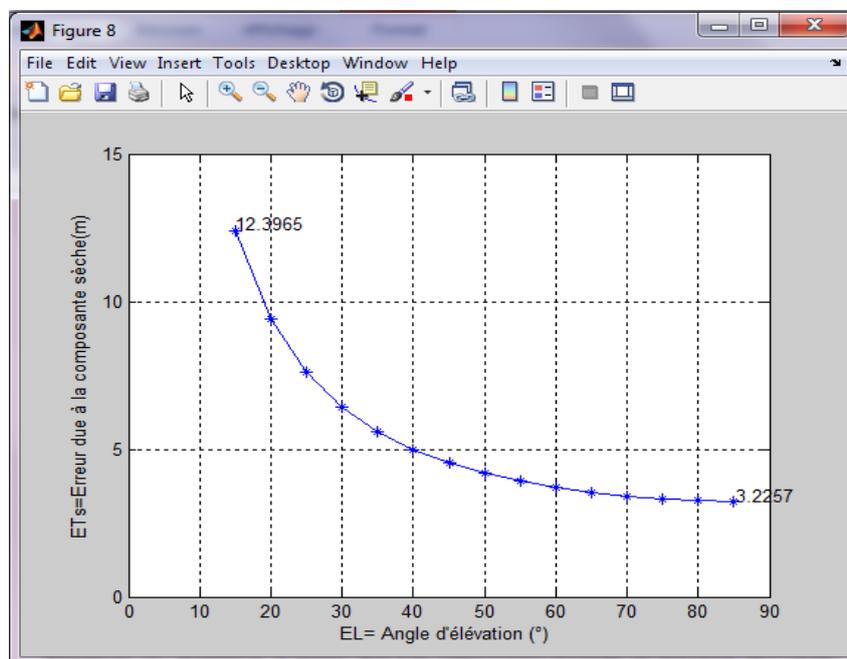


Figure (4.14) : Variation d'erreur due à la composante sèche en fonction de l'angle d'élévation.

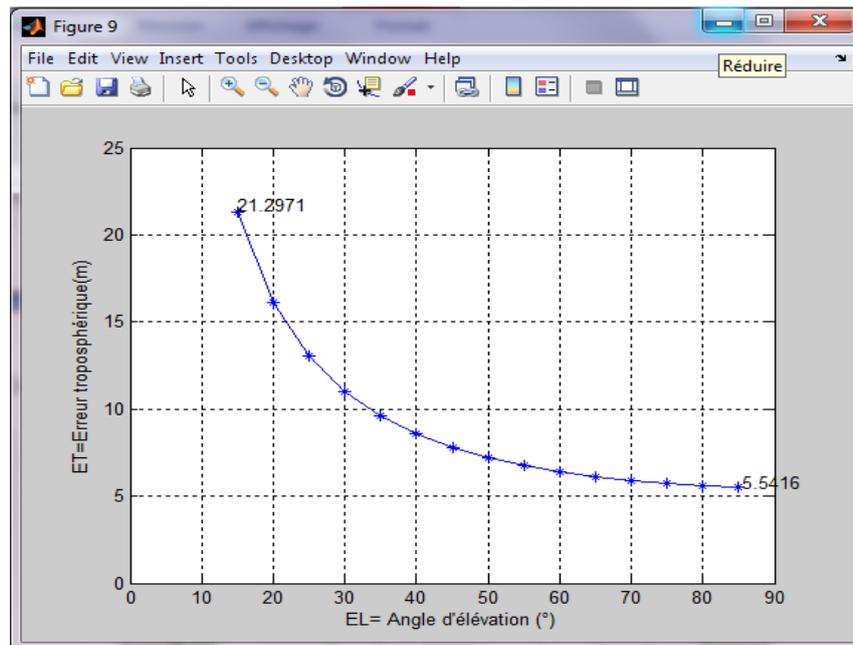


Figure (4.15) : Erreur troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.

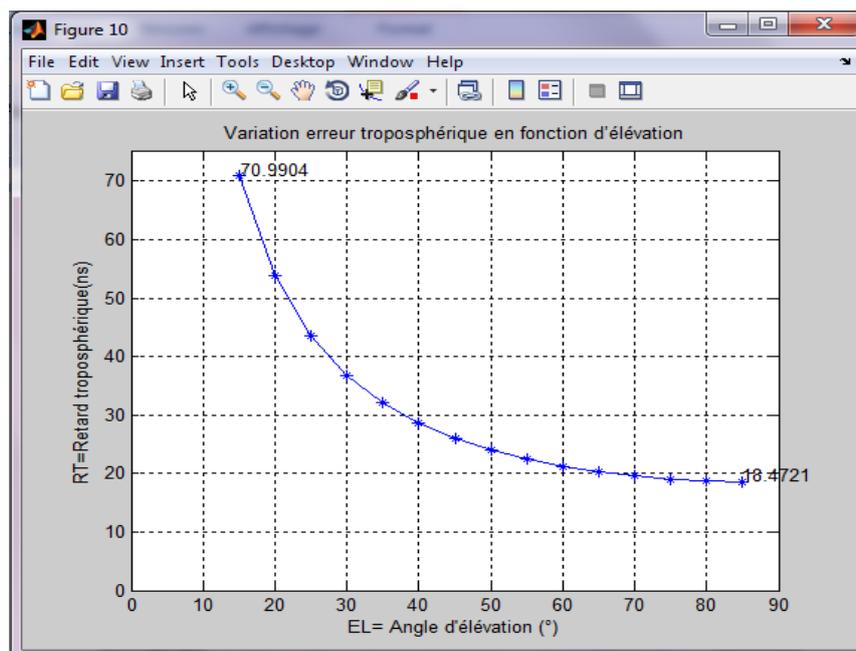


Figure (4.16) : Retard troposphérique en fonction de l'angle d'élévation.

4.4.4 Comparaison entre les trois modèles :

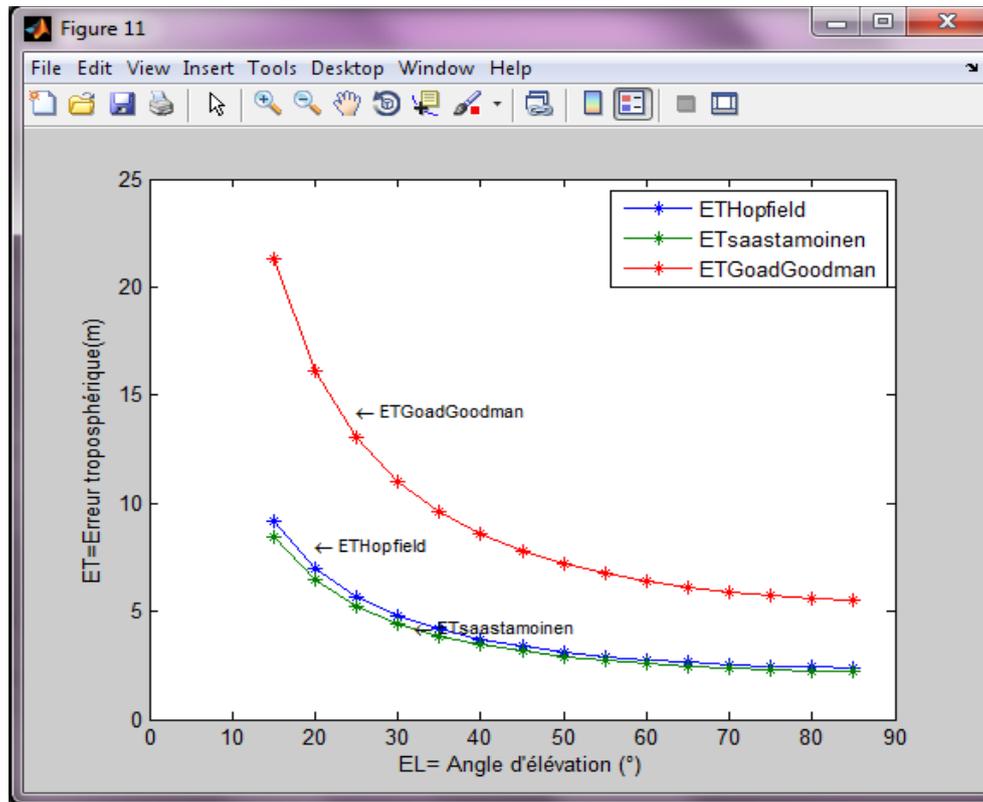


Figure (4.17) : Erreur troposphérique calculé par trois modèles.

- ⊕ Le calcul est fait à partir des paramètres météorologiques issus d'une atmosphère standard en fonction de l'élévation du satellite.

Interprétation de la figure :

Cette figure appelle quelques remarques. Tout d'abord, conformément à la partie théorique, Page (30.31) que la valeur de l'allongement troposphérique est typiquement comprise entre 2 et 10M mètres et d'autant plus importante que l'élévation du satellite est basse.

Pour expliquer cette dépendance en fonction de l'élévation du satellite, considérons que l'atmosphère terrestre est horizontalement stratifiée (au premier ordre). La distance parcourue par un signal radioélectrique pour un satellite observé sur l'horizon est alors naturellement plus importante que pour un satellite au zénith, d'où une plus grande valeur de l'allongement troposphérique.

On remarque aussi sur la **figure (4.17)** comme nous l'avons indique précédemment que si les différents modèles utilisés ont à peu près le même comportement pour des élévations Supérieures 15° et des différences importantes apparaissent pour les élévations basses (À cause de la difficulté à modéliser la composante humide).

4.4.5 Variation d'erreur troposphérique en fonction d'altitude du récepteur :

Nous avons présenté dans le chapitre (3) que l'erreur troposphérique varie selon plusieurs paramètres :

- la hauteur de la station réceptrice h .

Dans la formule **3.7 (modèle Saastamoinen)** de chapitre précédent en observons pour chaque hauteur de la station réceptrice qu'on a un terme de correction B correspondant, Maintenant en fait varie la hauteur de la station réceptrice et on observe comment varie l'erreur troposphérique en fonction de cette dernière.

Les résultats de simulation présentés dans les tableaux ci-dessous :

⊕ Pour $h=30$ m on a $B=1.156$;

ANGLE D'élévation (°)	ERREUR TROPOSPHERIQUE (m)	RETARD TROPOSPHERIQUE (ns)
15	8.4591	28.1972
20	6.4504	21.5015
25	5.2386	17.4621
30	4.4363	14.7877
35	3.8716	12.9055
40	3.4573	11.5243
45	3.1444	10.4813
50	2.9035	9.6783
55	2.7159	9.0531
60	2.5694	8.5647
65	2.4555	8.1851
70	2.3685	7.8951
75	2.3044	7.6813
80	2.2603	7.5344
85	2.2345	7.4484

Tableau (44) : Les résultats de simulation pour une altitude ($h=30$ m)

⊕ Pour $h=1.0\text{km}$ on a $B=1.006$;

ANGLE D'élévation (°)	ERREUR TROPOSPHERIQUE (m)	RETARD TROPOSPHERIQUE (ns)
15	2.2137	7.3789
20	1.7179	5.7263
25	1.4063	4.6875
30	1.1959	3.9865
35	1.0464	3.4879
40	0.9359	3.1197
45	0.8521	2.8405
50	0.7875	2.6249
55	0.7370	2.4567
60	0.6975	2.3251
65	0.6668	2.2227
70	0.6433	2.1445
75	0.6260	2.0867
80	0.6141	2.0470
85	0.6071	2.0238

Tableaux (4.5) : Les résultats de simulation pour une altitude ($h=1\text{km}$).

⊕ Pour $h=2.0\text{ km}$ on a $B=0.813$;

ANGLE D'élévation (°)	ERREUR TROPOSPHERIQUE (m)	RETARD TROPOSPHERIQUE (ns)
15	0.2851	0.9502
20	0.2502	0.8342
25	0.2154	0.7181
30	0.1880	0.6267
35	0.1670	0.5567
40	0.1508	0.5027
45	0.1382	0.4606
50	0.1283	0.4276
55	0.1204	0.4015
60	0.1143	0.3808
65	0.1094	0.3647
70	0.1057	0.3523
75	0.1029	0.3431
80	0.1010	0.3368
85	0.0999	0.3331

Tableaux (4.6) : Les résultats de simulation pour une altitude ($h=2\text{km}$)

- Les graphes des trois tableaux ci-dessous sont présent sur la figure suivante :

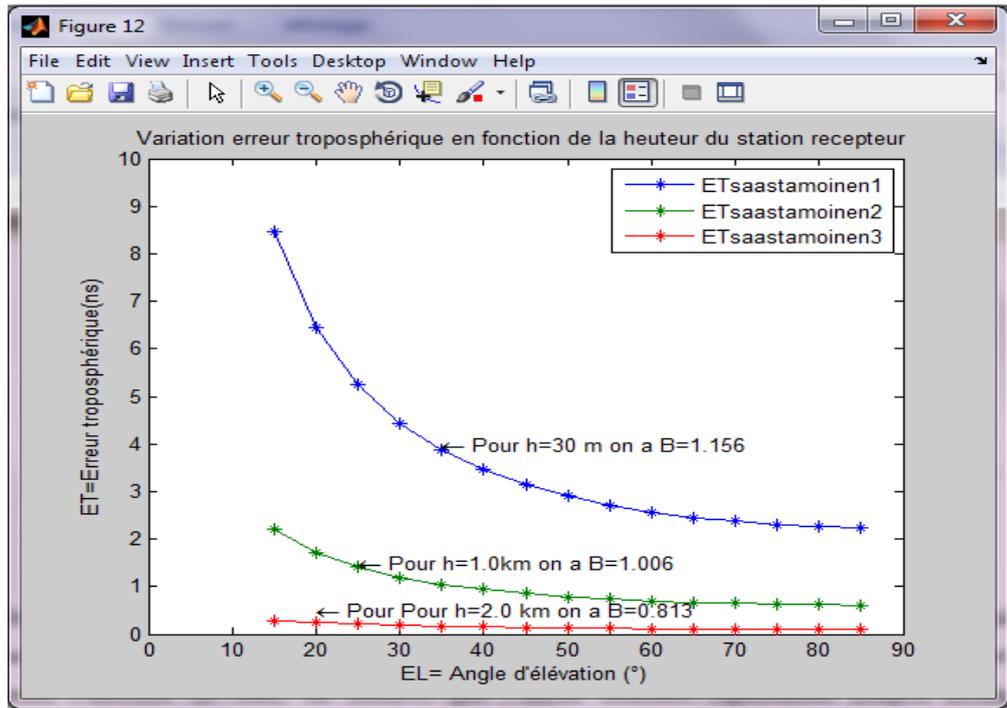


Figure (4.18) : variation d'erreur troposphérique en fonction d'altitude du récepteur.

- **Interprétation de la figure :**

Cette figure porte une remarque très important :

Dans un premier temps, nous avons fixe l'altitude ($h=30\text{m}$) en remarque que la valeur maximale d'erreur troposphérique attendre jusqu'à 9m voir tableau (4.4) maintenant c'est en prend l'altitude ($h=1\text{km}$) en observe que l'erreur démunie rapidement jusqu'à atteindre l'erreur maximale égale 2.2 m voir tableau (4.5), maintenant pour ($h=2\text{km}$) on trouve que l'erreur troposphérique et très minimale a peu près 0.3 m voir tableau (4.6), donc d'après les trois résultats qui on a vue en conclus que l'erreur troposphérique diminuer a chaque fois qu'en enlève l'altitude de récepteur c'est-à-dire que l'erreur troposphérique varie inversement proportionnel a l'altitude de récepteur.

4.4.6 Variation d'erreur troposphérique en fonction de (pression, température, et humidité) dans un modèle Hopfield :

Le délai troposphérique dépend de la température, de la pression et de L'humidité. La composante hydrostatique représente 90 % du délai troposphérique total et le délai zénithal correspondant est en général compris entre 2m et 2, 5m.

Nous en s'intéresse par le en fais varies la température, la pression et l'humidité et en remarque comment varie l'erreur troposphérique.

Les résultats de simulation présenter sur les tableaux ces dessous :

4.4.6.1 Variation d'erreur troposphérique en fonction de température :

En fixe maintenant l'angle d'élévation, la pression et l'humidité relative est on fait varie la température est en estime comment varie l'erreur troposphérique en fonction de température.

Les résultats de simulation présente sur le tableau ces dessous :

- **Angle élévation =45°**
- **pression =1021mbar**
- **humidité relative =72%**

Température C°	ERREUR TROPOSPHERIQUE (m)
7	3.16328
11	3.16591
12	3.16915
13	3.17235
14	3.1755
20	3.1786
21	3.18166
22	3.18467

Tableau (4.7) : Variation d'erreur troposphérique en fonction de température

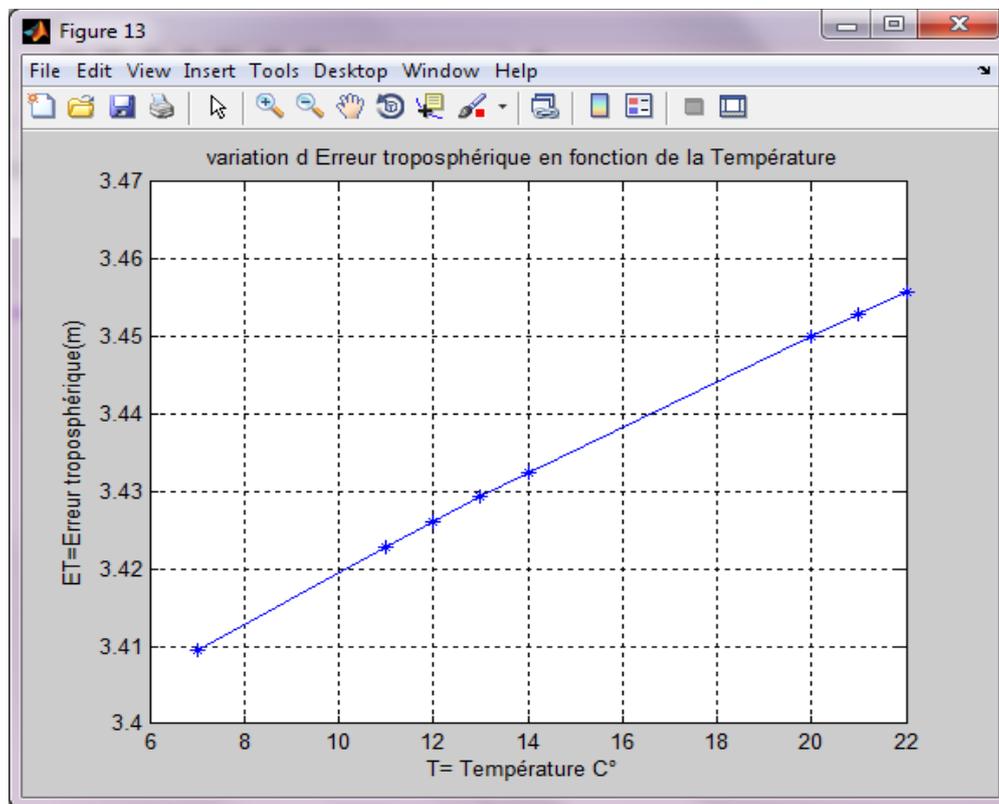


Figure (4.19) : Variation d'erreur troposphérique en fonction de température.

4.4.6.2 Variation d'erreur troposphérique en fonction d'humidité relative :

En fixe maintenant l'angle d'élévation, la pression et la température est on fait varie l'humidité relative en estime comment varie l'erreur troposphérique en fonction de L'humidité relative.

Les résultats de simulation présente sur le tableau ces dessous :

- **Angle élévation =45°**
- **pression =1021 mbar**
- **température = 14°**

Humidité relative %	ERREUR TROSPHERIQUE (m)
43	3.39764
50	3.40603
52	3.40843
71	3.4312
72	3.4324
77	3.4384
81	3.44319

Tableau (4.8) : Variation d'erreur troposphérique en fonction d'humidité relative

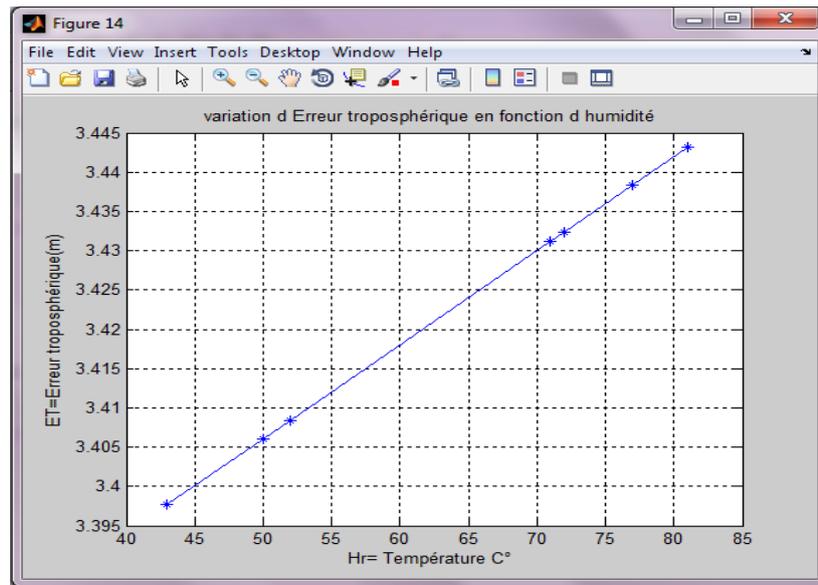


Figure (4.20) : Variation d'erreur troposphérique en fonction d'humidité.

4.4.6.3 Variation d'erreur troposphérique en fonction de la pression atmosphérique :

En fixe maintenant l'angle d'élévation, l'humidité relative et la température est on fait varie la pression après en estime comment varie l'erreur troposphérique en fonction de La pression atmosphérique.

Les résultats de simulation présente sur le tableau ces dessous :

- **Angle élévation = 45°**
- **humidité relative 72%**
- **température = 14°**

Pression mbar	ERREUR TROSPHERIQUE (m)
1021	3.4324
1018.96	3.42583
1017.95	3.42257

Tableau (4.9) : variation d'erreur troposphérique en fonction de pression atmosphérique

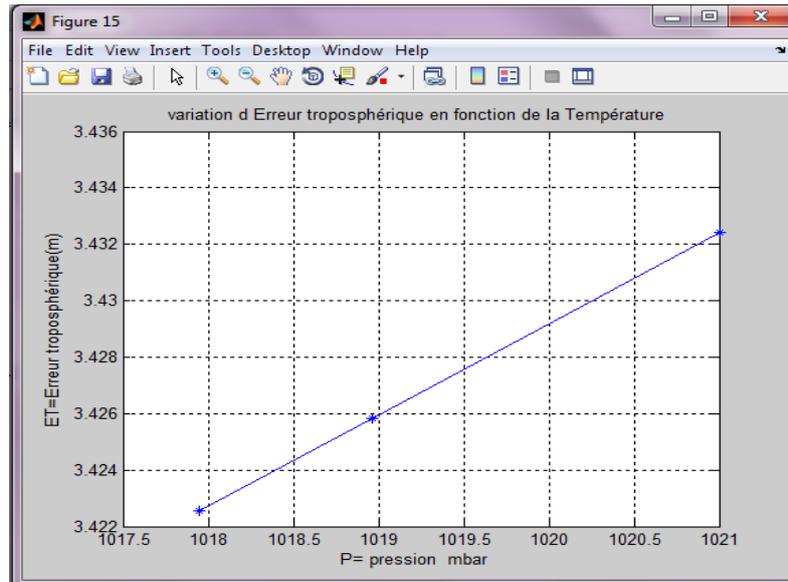


Figure (4.21) : Variation d'erreur troposphérique en fonction de pression.

• **Interprétation des figures :**

En remarque d'après les trois figures (4.19), (4.20), (4.21) que l'erreur troposphérique varie en fonction linéaire à chaque augmentation de la température, de la pression et d'humidité relative, l'erreur augmente proportionnellement en fonction des paramètres météo.

4.5 CONCLUSION :

D'après la simulation des modèles on peut tirer quelque résultat tel que :

L'élévation du satellite observe, en supposant l'atmosphère horizontalement stratifiée au premier ordre, la distance que parcourt le signal dans la troposphère pour un satellite au zénith est moins grande que pour un satellite sur l'horizon, d'où une valeur d'allongement plus faible. L'altitude du récepteur dans la couche troposphérique, plus l'altitude du récepteur est élevée, moins la partie traversée dans la troposphère est longue et donc moins la valeur de l'allongement est importante. L'erreur troposphérique c'est la somme de l'erreur de la composante sèche plus l'erreur de la composante humide, la composante humide est négligeable devant la composante sèche à cause de la difficulté de prévision ou d'estimation de cette dernière et d'après les résultats de simulations 1, 2 et 3 on constate que le modèle Hopfield et Saastamoinen sont mieux que Goad et Goodman c'est-à-dire l'estimation d'erreur est mieux.