



Département des Sciences de la Terre
Laboratoire de Géo-Sciences et Environnement



Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech
Département des Sciences de la Terre
Laboratoire de Géo-Sciences et Environnement
Licence Sciences et Techniques
« Géologie Appliquée aux Ressources Minières »

Sujet :

**Estimation de l'erreur verticale avec un dispositif GPS économique
par les méthodes différentielles et Precise Point Positioning**

Par :

Mlle Lamya YAMMEL

Mlle Hasnae ZARID

Encadré par :

- Mr Hassan IBOUH
- Mr Michel LEPAGE

Soutenue le **28 juin 2012** devant le jury constitué de :

- Mr Ahmed TOUIL Professeur à FSTM
- Mr Hassan IBOUH Professeur à FSTM
- Mr Lahoucine HANICH Professeur à FSTM
- Mr Michel LEPAGE Ingénieur associé à Institut de Recherche pour le Développement IRD

Remerciement

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier nos encadrants Monsieur **Michel LEPAGE**, Ingénieur à l'IRD de Marrakech et Monsieur **Hassan IBOUH** professeur d'enseignements supérieurs à la FST qui n'ont épargné aucun effort pour nous soutenir tout le long de la période de notre stage.

Nous exprimons également notre gratitude et nos sincères reconnaissances à Monsieur **Ibrahim IGMOULAN** le chef du département de géologie ainsi que l'ensemble des enseignants du département.

Nous remercions aussi le Topographe Monsieur Najib SAID pour nous avoir fourni les coordonnées des points sur les quelles nous avons travaillé durant le stage.

Nos vifs remerciements et reconnaissances s'adressent à nos familles pour leurs soutiens moral et financier durant la période de stage et tout au long de nos études.

Enfin, le présent travail n'aurait pu être accompli sans l'assistance et l'aide de plusieurs personnes. Ainsi, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé

L'évaluation de la précision des coordonnées surtout en altitude peut être réalisée par une méthode simple et avec un matériel moins coûteux.

Cette méthode se base sur la prise des mesures de position par deux kits GPS au même temps sur deux points géodésiques à coordonnées connues, l'un de ces points fonctionne comme station de base et l'autre comme station mobile. Pour vérifier la précision de la méthode d'autres points ont été choisis en augmentant à chaque fois la distance entre les deux stations de base et mobile.

Après la prise des données, des traitements post acquisition ont été effectués soit par le logiciel RTKPOST ou par un service web international GNSS, en utilisant deux techniques différentes :

- Le GPS différentiel (DGPS) qui se base sur l'utilisation de deux récepteurs GPS pour deux unités dont l'une fonctionne comme station de base et l'autre comme station mobile.
- Le positionnement précis du point (PPP) qui se base sur l'utilisation d'un seul récepteur GPS.

Les deux techniques donnent les mêmes résultats, montrant que la précision diminue quand la distance séparant les deux stations augmente ; mais la technique DGPS se montre plus intéressante avec non seulement une précision satisfaisante ($< 10\text{cm}$) mais aussi avec une période de prise de données courte (5 min) entre deux stations proches.

Cependant la méthode PPP se montre aussi intéressante dans le cas où la station de base ne peut être établie par manque de coordonnées connues avec précision.

Sommaire

Introduction

Présentation de laboratoire Mixte International ‘‘Téledétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Mride’’ « LMI TREMA ».....8

Première partie : Généralités

I.	Généralités sur le positionnement sur la terre.....	10
1.	Cartographie et Carte	10
2.	Les systèmes de coordonnées	11
a.	Représentation géométrique de la surface terrestre.....	11
b.	Les différents types de coordonnées	12
c.	Les projections cartographiques	13
d.	La conversion des coordonnées dans des systèmes différents.....	14
3.	La mesure de l’altitude.....	15
a.	Le système de référence marocain	15
b.	Le système de référence mondial WGS84 (World Geodetic System 1984)	17
II.	Généralités sur le GPS (Global Positioning System)	19
1.	Définition	19
2.	Historique.....	19
3.	Domaine d’application du GPS.....	21
4.	Principe de fonctionnement du système GPS	23
5.	Erreurs et imprécisions du système GPS	24
6.	Correction de GPS	27
	DGPS : Le GPS différentiel.....	27
	SBAS : Système de renforcement spatial (Space-based augmentation system)	28
	PPP : Le positionnement précis du point	28
7.	Techniques de saisie.....	29

Deuxième partie : Estimation de l’erreur verticale avec un dispositif GPS économique par les méthodes différentielles et Precise Point Positioning

I.	Choix du sujet et problématique	31
II.	Objectifs de l’étude	31
III.	Matériel et Méthode	31
1.	Matériel	31
2.	Méthodes	32
a.	La prise des données.....	33
b.	Traitement des fichiers bruts	37
a.	Analyse des résultats	44

TROISIEME PARTIE : APPLICATION PRATIQUE

I.	Situation géographique du site et conditions de pris des données	46
II.	Analyse des résultats.....	48
a.	Méthode de DGPS (GPS différentiel)	48
b.	Méthode PPP (Precise Point Positioning)	58

Discutions et conclusions

Recommandations

Liste des figures

Figure 1 : la relation entre le Géoïde, ellipsoïde local et ellipsoïde global	11
Figure 2: Paramètres d'un ellipsoïde de référence et les paramètres utilisé pour une projection donnée.	11
Figure 3: (a : Principes du système de coordonnées cartésiennes, (b : Principes de système de coordonnées géographiques, (c : Système de coordonnées planes.	13
Figure 4: A : La projection cylindrique, B : La projection conique ; C :La projection azimutale	14
Figure 5: Relation entre le géoïde, l'ellipsoïde et la surface topographique	15
Figure 6: canevas marocain	16
Figure 7 : la projection conique conforme du Maroc	19
Figure 8: Quelques domaines d'application du GPS	21
Figure 9: Le segment spatiale du Système GPS	21
Figure 10: Les cinq stations terrestre du contrôle du GPS	22
Figure 11: exemples de récepteurs GPS	22
Figure 12 : le nombre de satellite perçu par le récepteurs : 1 (A , 2 (B ; 3 (C ou 4 satellites (4	23
Figure 13:Diffusion du signal des satellites du GPS, due à la troposphère et l'ionosphère.	26
Figure 14:Schéma montrant les erreurs dues aux multi-trajets issus des réflexions parasites	27
Figure 15: Schéma montrant le principe du GPS différentielle	28
Figure 16:Photo de UBLOX LEA-6T	32
Figure 17: fenêtre du logiciel montrant comment connecter le récepteur du GPS.....	33
Figure 18:Capture d'écran de la fenêtre du logiciel U-Center montrant le réglage de la vitesse.....	34
Figure 19:Application des protocoles UBX et NMEA.....	34
Figure 20: Fenêtre montrant la configuration du protocole UBX	35
Figure 21: procédure de Lancement de la prise des données brutes.....	36
Figure 22: interface de Fonctionnement d'U-CENTER pendant la prise de données.....	37
Figure 23: fenêtre du logiciel RTCONV montrant la conversion des fichiers UBX en fichier RINEX	40
Figure 24:fenêtre du logiciel RTKPOST montrant l'option Setting 1	41
Figure 25:fenêtre du logiciel RTKPOST montrant l'option Setting 2	41
Figure 26:fenêtre du logiciel RTKPOST montrant l'option Positions	41
Figure 27:le post-traitement avec RTKPOST.....	42
Figure 28: Un extrait de fichier post du logiciel RTK.....	44
Figure 29 : la situation géographique de la région choisi avec la position des quatre point utiliser dans se travail.	46
Figure 30: A : photo de AK 13 station de base ;B : photo de AK20 loin de la station de base de 546m ; C : photo de AK18 lois de la station de base de 1600 m ;D :photo de AK25 lois de la station de base de 2000 m ; E : photo de La station de Kelàa est loin de la station de base de 87km.....	47
Figure 31:Distribution des satellites captés à la station de base AK13 (gauche et mobile AK 20 (droite ..	48
Figure 32:Le positionnement des résultats obtenu par RTKPOST pour AK20 en deux dimension X,Y	49
Figure 33: La variation des résultats obtenus par RTKPOST dans le temps en fonction de la position horizontale et verticale.....	50
Figure 34:Distribution des satellites captés à la station de base AK13 (gauche et mobile AK 18 (droite ..	51
Figure 35: Le positionnement des résultats obtenu par RTKPOST pour AK20 en deux dimension X,Y ...	52
Figure 36: La variation des résultats obtenus par RTKPOST dans le temps en fonction de la position horizontale et verticale.....	52
Figure 37:Distribution des satellites captés à la station de base AK13 (gauche et mobile AK 25 (droite ..	53
Figure 38: Le positionnement des résultats obtenu par RTKPOST pour AK25 en deux dimension X,Y ...	54
Figure 39: La variation des résultats obtenus par RTKPOST dans le temps en fonction de la position horizontale et verticale.....	55
Figure 40:Distribution des satellites captés à la station de base (gauche et mobile Kelàa Sraghna (droite	56
Figure 41: Le positionnement des résultats obtenu par RTKPOST pour Kelàa Sraghna en deux dimension X,Y.....	57
Figure 42: La variation des résultats obtenus par RTKPOST dans le temps en fonction de la position horizontale et verticale.....	57
Figure 43: Les stations IGS dans le monde	58

Liste des abréviations

C/A : code **C**oarse/**A**cquisition

CSRS : **S**ystème **C**anadien de **R**éférence **S**patiale

DGPS : GPS **D**ifférentiel

EPSG : (**E**uropean **P**etroleum **S**urvey **G**roup), groupe européen des études pétrolières

GNSS : système global de navigation par satellites (**G**lobal **N**avigation **S**atellites **S**ystem)

IGS : **I**nternational **G**NSS **S**ervice.

ITRF08 : Le cadre international de référence terrestre (The **I**nternational **T**errestrial **R**eference **F**rame)

NMEA : Association Nationale d'**E**lectronique **M**arine.

P : code **P**recise

ppm : **P**ulse **P**osition **M**odulation

PPP : **P**ositionnement **P**récis du **P**oint

RINEX : format d'échange indépendant du récepteur (**R**eceiver **I**ndependant **E**xchange format)

RTK : temps réel cinématique (**R**eal **T**ime **K**inematic)

SBAS : système d'augmentation spatial (**S**atellite-**B**ased **A**ugmentation **S**ystem)

SIG : **S**ystème d'**I**nformation **G**éographique

SRTM : **M**ission **T**opographique **R**adar **S**huttle

UTM : la projection de **M**ercator **T**ransverse **U**niverselle

Introduction

Tout travail géologique (surtout cartographique ou SIG) sur terrain nécessite la précision du positionnement et ceci en calculant les différentes coordonnées limitant l'espace et précisant la position géographique des différents éléments sur cet espace. Les techniques classiques des nivelés et les GPS géodésiques sont des solutions précises mais coûteuses.

Durant ce stage, nous avons cherché à évaluer et améliorer la précision des coordonnées surtout en altitude par une solution à bas prix (instrument, outil logiciel) et une méthode très simple.

Pour ce travail, on a effectué :

- une bibliographie sur le GPS, les logiciels et la méthode du travail ;
- un ensemble d'essais, d'enregistrements de données brutes du GPS, dans des régions où les coordonnées sont déjà connues ;
- le traitement des données brutes par un logiciel gratuit RTKlib ;
- la comparaison entre les coordonnées ainsi obtenues et celles réelles.

Le stage est effectué au Laboratoire Mixte International de Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Mride « LMI TREMA ».

Présentation de laboratoire Mixte International "Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Aride" « LMI TREMA »

Les objectifs du **Laboratoire Mixte International "Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Aride"** s'articulent autour de la gestion durable de l'eau dans les bassins versants typiques de la Méditerranée du Sud associant château d'eau de montagne, zone intermédiaire de transfert avec stockage transitoire (barrages ou lacs) où dominent l'agriculture pluviale et les zones irriguées en plaine. Les travaux proposés ont pour double ambition (1) d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrologique intégré des bassins versants et d'établir des scénarios d'évolution des ressources sous l'effet couplé de forçages anthropique et climatique ; et (2) de caractériser le cycle de l'eau régional par l'exploitation des longues séries temporelles d'observation satellitaire multi-capteurs. L'approche de ce laboratoire repose sur l'utilisation conjointe de la modélisation éco-hydro-géologique et de la télédétection spatiale. Les deux thèmes structurants de recherches du LMI TREMA sont les suivants:

Thème 1 : Fonctionnement hydrologique intégré des bassins versants du Sud Méditerranée et scénarios d'évolution : le développement d'une plateforme numérique de modélisation mécaniste des processus régissant la redistribution de l'eau sur le bassin versant du Tensift alimentée par l'observation satellitaire pour, in fine, établir des scénarios possibles d'évolution des ressources en eaux.

Thème 2 : Indicateur du cycle de l'eau terrestre à l'échelle régionale, déterminants climatiques et vulnérabilité : L'objectif est de fournir des éléments pour la compréhension du cycle de l'eau continental et la vulnérabilité des ressources en eau à l'échelle de la Méditerranée du Sud. Ce changement d'échelle spatiale conditionne en grande partie la démarche qui consiste à extraire un maximum d'information de la seule observation (in situ, ré-analyses, longues séries satellite grand-champs).

Le LMI TREMA associe des chercheurs et ingénieurs du Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère (Toulouse, France), une équipe multi-disciplinaire d'enseignant-chercheurs de l'Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc), des ingénieurs de la Direction de la Météorologie Nationale (Casablanca, Maroc) et des ingénieurs du Centre Nationale de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (Rabat, Maroc). Le LMI associe également les partenaires de l'Agence de Bassin Hydraulique du Tensift et l'Office de Mise en Valeur Agricole du Haouz à travers la convention SUDMED et l'observatoire de recherche environnementale du Tensift.

Première partie:

Généralités

Avant d'entamer la première partie, il faut savoir que les principes de la cartographie et du GPS sont largement connus et documentés. Après recherche et lecture de documentation, nous avons compilé les éléments qui permettent de mieux comprendre les difficultés du positionnement vertical par GPS.

I. Généralités sur le positionnement sur la terre.

1. Cartographie et Carte

(http://terrageog.lemig2.umontreal.ca/donnees/geo1532/NOTES/GEO1532_Notes_2012.pdf)

☞ Cartographie :

La cartographie a pour objet la conception, la préparation, la rédaction et la réalisation de tous les types de plans et de cartes; elle implique notamment l'étude de l'expression graphique des phénomènes, de la surface terrestre, à représenter.

La cartographie implique plusieurs disciplines lui servant de qualificatifs tels:

- **la cartographie mathématique** qui s'intéresse aux projections cartographiques et les propriétés géométriques des cartes résultantes ;
- **la cartographie topographique** est une représentation graphique des objets du paysage à caractère fixe et le relief topographique. L'accent est mis sur la précision de localisation des éléments du paysage sur un plan horizontal (planimétrie) et sur un plan vertical (altimétrie). La carte topographique constitue par ailleurs le document de base sur lequel on dessine une carte thématique ;
- **la cartographie thématique** a pour objet la conception des cartes illustrant la distribution spatiale des différents caractères ou des valeurs d'un phénomène de nature biophysique ou socio-économique ;
- **la cartographie numérique** qui est une branche relativement nouvelle de la cartographie. Son objectif au départ (les années 60) était de rendre le processus cartographique reproductible par l'ordinateur et ses périphériques. Cet objectif a été largement atteint à nos jours car le design, l'édition et la production des cartes topographiques et thématiques se font presque automatiquement.

☞ La carte

La carte est une représentation graphique plane, simplifiée et conventionnelle, de la disposition d'objets ou de phénomènes dans l'espace et ceci selon un rapport de similitude convenable que l'on appelle l'échelle. En d'autres mots la carte inclue deux éléments fondamentaux de la réalité : les emplacements et les attributs rattachés à ces emplacements.

Une carte comporte en général des éléments permettant de faciliter sa lecture. On note parmi ces éléments le nom des lieux (toponymie), l'orientation, l'échelle, les courbes de niveaux, les coordonnées

2. Les systèmes de coordonnées

<http://support.esrifrance.fr/documents/generalites/projections/generalites/generalites.htm>

Compte tenu de notre objectif, il s'agit de bien comprendre les composants du référentiel pour la localisation des objets à la surface du globe terrestre. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur la coordonnée verticale, c'est-à-dire l'altitude ou Z, mais sans oublier les composantes de la localisation horizontale.

a. Représentation géométrique de la surface terrestre

(<http://zoumine.free.fr/tt/navigation/defellipsoide.gif>)

La forme de l'enveloppe terrestre est une surface géométriquement irrégulière et imparfaite. La terre est globalement sphérique légèrement aplatie aux pôles. Cette surface peut être représentée par deux surfaces hypothétiques.



Figure 1 : la relation entre le Géôïde, ellipsoïde local et ellipsoïde global

(<http://zoumine.free.fr/tt/navigation/defellipsoide.gif>)

Le Géôïde (fig. 1) : est une représentation gravitationnelle de la surface de la terre. Il s'agit d'une surface équipotentielle de la valeur de la gravité au niveau des continents et équivalent au niveau moyen des mers dans les océans. La géométrie du géoïde est complexe et ne peut être formulée mathématiquement de façon simple. Il ne peut donc être utilisé en cartographie (pour la projection). L'ellipsoïde constitue donc la forme la plus proche possible du Géôïde.

L'ellipsoïde est le modèle mathématique de la terre, c'est une surface géométrique permettant de représenter au mieux possible la forme du géoïde. Un ellipsoïde se définit par la longueur de son demi grand axe (a), la longueur de son demi petit axe (b) et son aplatissement (f) qui est égale à $(a-b)/a$. (**fig. 2**).

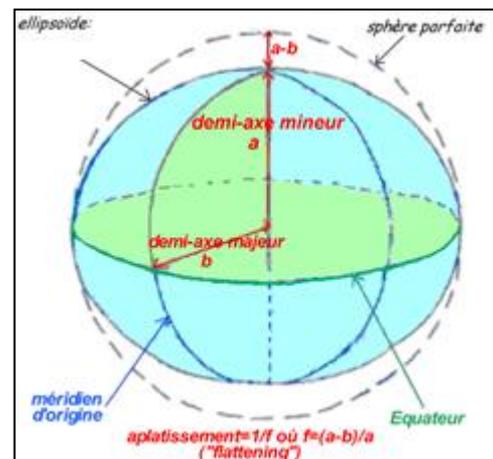


Figure 2: Paramètres d'un ellipsoïde de référence et les paramètres utilisés pour une projection donnée.

(<http://zoumine.free.fr/tt/navigation/defellipsoide.gif>)

En géodésie, on distingue l'ellipsoïde global de l'ellipsoïde local.

Les ellipsoïdes globaux sont utilisés pour des cartographies couvrant l'ensemble (ou une grande partie) de la surface terrestre.

Les ellipsoïdes locaux sont définis de manière à "épouser" au mieux la forme du géoïde sur une zone restreinte de la surface terrestre (une région ou un pays). Localement, afin de mieux suivre la

forme du géoïde, la forme de l'ellipsoïde local est modifiée et son centre est décalé par rapport au centre des ellipsoïdes globaux.

Système de référence géodésique (Datum)

Pour pouvoir définir un système de coordonnées, la seule spécification d'un ellipsoïde n'est pas suffisante. En effet, un système géodésique (Datum) se définit par son ellipsoïde mais également par la position de cet ellipsoïde par rapport au centre de la terre. Pour les calculs géodésiques, par convention, on utilise le centre du système géodésique WGS84 (World Geodetic System 1984) pour définir la position des autres systèmes géodésiques.

Ainsi, la définition d'un système nécessite la connaissance des paramètres suivants :

1. calcul de la surface géoïdale.
2. détermination de l'ellipsoïde le plus adapté, avec ses paramètres (a, b et f).
3. la déviation du centre de l'ellipsoïde par rapport au centre de la terre (WGS84) selon les trois axe X, Y et Z.
4. détermination du point fondamentale qui est la zone de confusion entre la surface du Géoïde et l'ellipsoïde.

b. Les différents types de coordonnées

Les systèmes de coordonnées cartésiennes

La localisation d'un élément dans l'espace (et donc à la surface de la terre) peut s'exprimer sous la forme de coordonnées cartésiennes ou géocentriques. Les coordonnées sont alors déclinées en X, Y et Z relatives aux 3 axes d'un repère ayant son origine au centre de masse de la Terre (**fig.3A**). Ces coordonnées sont souvent utilisées comme système de coordonnées intermédiaires lors des calculs de changement de systèmes géodésiques.

Les systèmes de coordonnées géographiques

La localisation d'un élément à la surface de la terre peut s'exprimer par des coordonnées géographiques. Les coordonnées sont alors déclinées à l'aide de deux valeurs angulaires: Longitude, Latitude (**fig 3B**). Ces deux angles peuvent être exprimés dans différentes unités : Degrés Minutes Secondes, Degrés sexagésimaux et Degrés décimaux et Grades ou radians.

Longitude : c'est l'angle formé sur le plan de l'équateur par le méridien passant par le point M ; et le plan méridien de référence (Greenwich ou Paris).

Latitude : l'angle dièdre entre le plan du parallèle de référence (l'équateur) et le plan parallèle passant par le point M à la surface de la terre.

Altitude : C'est la hauteur d'un point M à la surface du topoïde par rapport au niveau moyen des mers et par rapport au géoïde en dehors des mers.

Les coordonnées géographiques n'ont aucun sens si elles ne sont pas accompagnées par des informations sur le système de référence dans lequel elles sont exprimées.

Les systèmes de coordonnées planes Lambert (planes ou Cartographiques)

Une fois la projection est définie, la localisation d'un élément peut alors s'exprimer par des coordonnées planes ou Lambert à l'aide de deux valeurs linéaires X et Y (**fig. C**). Ces deux valeurs représentent des distances par rapport à un méridien et un parallèle d'origine défini au paravent par la projection. Ils peuvent être exprimés dans différentes unités: mètres, millimètres, miles, miles nautiques, Pieds.

Les coordonnées Lambert ou planes n'ont aucun sens si on ne les accompagne pas des informations sur le système de projection dans lequel elles sont exprimées.

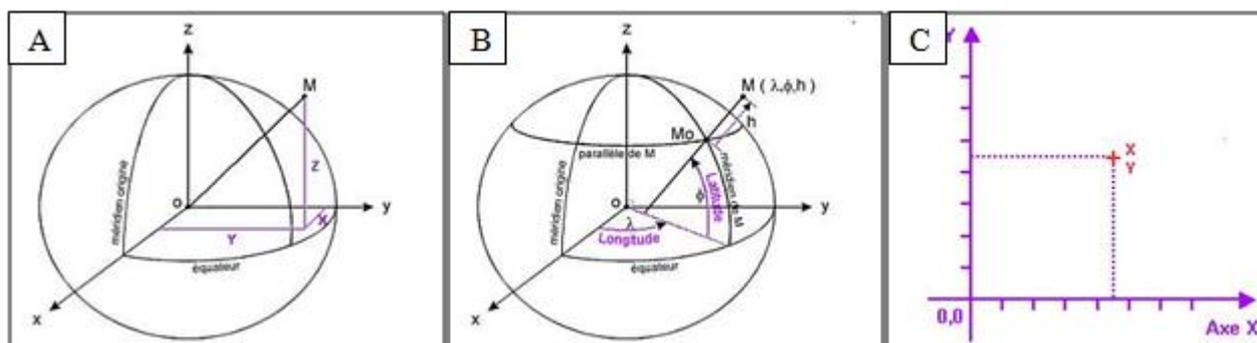


Figure 3: (A) : Principes du système de coordonnées cartésiennes, (B) : Principes de système de coordonnées géographiques, (C) : Système de coordonnées planes.

http://www.sat-info.fr/page/infotechniques/syst_coord/cartesien.jpg

c. Les projections cartographiques

Une fois la terre décrite mathématiquement par un ellipsoïde (le modèle mathématique de la terre le plus proche du géoïde), on effectue une projection cartographique.

Les projections cartographiques (fig. 4) sont utilisées pour représenter dans un plan des éléments qui sont situés sur une surface sphérique (un ellipsoïde). Il existe plusieurs types de projections. Ce processus de "mise à plat" de la surface sphérique entraîne des altérations de la forme et de la surface des éléments cartographiés mais également des distances et des directions entre ces éléments. La variété des méthodes mathématiques permet de choisir parmi plusieurs systèmes de projection selon leur aptitude à représenter des portions particulières de la surface terrestre et à préserver les distances, les surfaces ou les angles. Certaines projections minimisent la distorsion d'une propriété particulière au détriment des autres, tandis que d'autres projections minimisent globalement les altérations. Les trois types principaux de projections sont la projection cylindrique, la projection conique et la projection azimutale (**fig.4 A, B et C**).

La projection cylindrique : elle se fait sur un cylindre tangent ou sécant au sphéroïde terrestre.

La projection conique : elle se fait sur un cône tangent ou sécant au sphéroïde terrestre.

La projection azimutale : elle se fait sur un plan tangent ou sécant au sphéroïde terrestre.

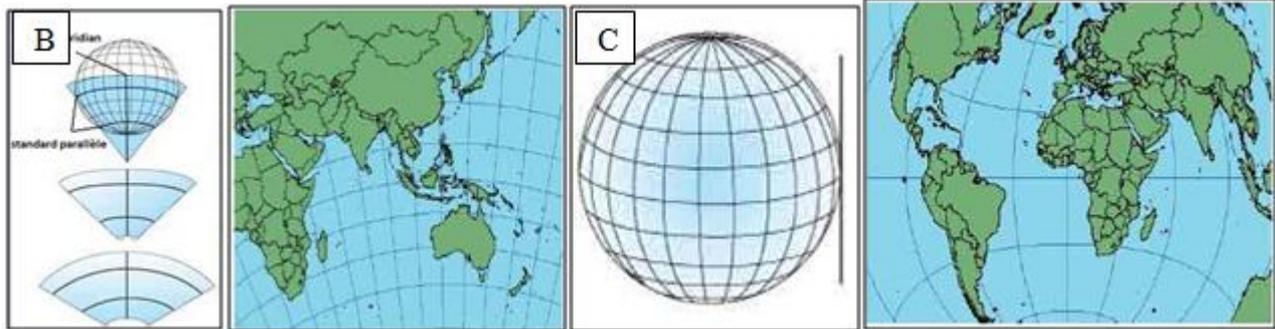
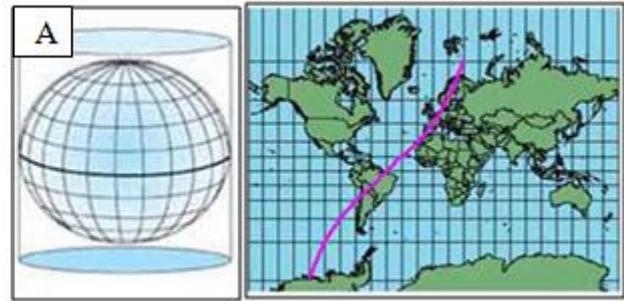


Figure 4: A : La projection cylindrique, B : La projection conique ; C : La projection azimutale
(<http://rofmr.gratisim.fr/Images/3.3.1ProjEquiAzim.jpg>)

d. La conversion des coordonnées dans des systèmes différents.

Dans le contexte des SIG, il est très fréquent de devoir manipuler des sources de données spatiales stockées dans des systèmes de coordonnées (géographiques ou projetées) différents. Deux cas de figure se présentent alors :

Cas n°1: les coordonnées sont dans le même système géodésique :

C'est le cas le plus simple. Il s'effectue en deux étapes : Déprojeter les coordonnées planes (X, Y) vers les coordonnées géographiques (Latitude/Longitude), puis reprojeter celles-ci dans l'autre système de projection.

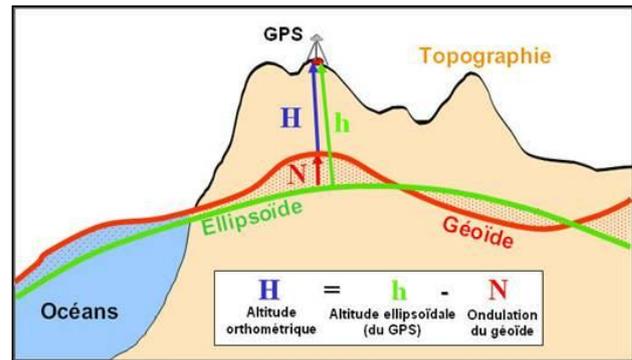
Cas n°2: les coordonnées sont basées sur deux systèmes géodésiques différents :

Dans ce cas, il est nécessaire de reprojeter les coordonnées. Ensuite réaliser un changement de système géodésique (appelé également changement de datum). Cette opération consiste à déterminer la différence par rapport aux coordonnées Latitude/Longitude exprimées dans le premier système géodésique dans le deuxième système géodésique. Pour effectuer le calcul de correction des coordonnées Latitude/longitude, le passage par le système de coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) peut être nécessaire (transformation de Molodensky) abrégée ou complète.

3. La mesure de l'altitude

L'altitude exprime l'éloignement d'un point par rapport au géoïde souvent appelé Niveau Moyen de la Mer. (fig. 5)

Figure 5 : Relation entre le géoïde, l'ellipsoïde et la surface topographique



Par exemple, si on dit qu'un point a une élévation de 2000 mètres au-dessus du niveau moyen des mers, et qu'un point différent a une élévation de 1500 mètres au-dessus du niveau moyen des mers, il est facile de calculer que le premier point est à 500 mètres au-dessus du deuxième point par rapport à la surface de la terre.

Afin de déterminer cela, nous devons physiquement observer les deux points d'une façon quelconque. En recherche, nous ne devons pas simplement employer une série de repères pour établir la différence entre deux points sans avoir recours à un mécanisme de vérification. L'arpenteur doit utiliser "une boucle fermée" qui commence au premier point et se termine à ce même point, ayant passé par le deuxième point le long du parcours. Les mêmes points de repère peuvent ou ne peuvent pas être employés dans le procédé de chaque direction, mais de faire ainsi peut être utile afin de déterminer toutes les erreurs qui ont pu s'être produites le long du parcours.

Une autre méthode est connue comme "la mise à niveau trigonométrique" emploie la distance horizontale entre deux points, et l'angle vertical mesuré entre eux, pour calculer la différence en élévation en utilisant une formule trigonométrique.

Il n'y a aucun absolu dans ces mesures. Il y aura toujours une certaine quantité d'erreur. Le contrôle de cette erreur pour se situer dans des normes acceptables est l'objectif de ce travail.

Une des difficultés de la mesure de l'altitude par GPS est que la méthode de mesure est radicalement différente de celle du topographe. Ce dernier utilise un référentiel local pour effectuer ses mesures et calculer, alors que le système GPS essaie d'établir la distance du point par rapport aux satellites puis le ramène à un référentiel global. Dans les cartes, l'altitude est toujours exprimée dans le référentiel local. Examinons le référentiel marocain et le référentiel global.

a. Le système de référence marocain (www.scribd.com/doc/88299467/TS6-2-elfettah).

Canevas marocain

C'est un ensemble de points qui sont déterminés par des mesures effectuées sur le terrain (observations angulaires) et mesures de longueurs, et dont on calcule les coordonnées XY dans un système unique.

La triangulation géodésique consiste à déterminer les coordonnées X et Y des sommets de triangles accolés dont on mesure les angles et un certain nombre des côtés.

Le réseau géodésique au Maroc (**fig. 6**) comprend :

- Le point géodésique fondamental situé à Merchich (route de Casablanca-Berchid), et dont la position a été déterminée avec le maximum de précision. On y a aussi mesuré l'azimut astronomique du côté de départ de la triangulation : on considère que l'ellipsoïde et le géoïde admettent en ce point la même normale.

Les bases géodésiques réparties tous les 250 à 300 km au voisinage des intersections des chaînes méridiennes et parallèles. Ces bases sont destinées à réajuster les dimensions des triangles. Des points de Laplace servent à réorienter les côtés des triangles à chaque base : l'orientation d'une base géodésique et la détermination de l'azimut d'un côté de triangle est faite par détermination astronomique.

- Le premier ordre de chaîne calculé sur l'ellipsoïde en coordonnées géographiques par fractions insérées entre deux bases. Ces triangles ont des côtés de 30 à 60 km.

- Le premier ordre complété est calculé dans le plan de projection en coordonnées rectangulaires par blocs insérés entre les points précédemment déterminés. L'ensemble du territoire est alors recouvert par un réseau de 1^{er} ordre homogène de 450 points qui va servir de base à l'établissement des points suivants.

Un réseau de deuxième ordre : 530 points,

Un réseau de troisième ordre : 1200 points

Un réseau complémentaire de quatrième ordre : 15000 points

Des réseaux de polygones géodésiques : 12000 points.

Ellipsoïde Clarke 1880

Le réseau géodésique horizontal au Maroc, date de 1924. Il se caractérise par son hétérogénéité qui est due à la diversité des systèmes de coordonnées et une géodésie locale surtout dans le sud. Ce réseau est fondé sur les paramètres Géodésique suivant:

- Ellipsoïde de référence: Clarke 1880 dont les paramètres sont les suivants :
 - Demi grand axe : $a = 6378249,145$ m
 - Demi petit axe : $b = 6356514,869$ m
 - Aplatissement : $f = 1/293,465$
- Point fondamental : Merchich (route de Casablanca-Berchid) ayant pour coordonnées :
 - $\lambda = 37^{\circ} 16' 54''$
 - $\phi = 8^{\circ} 39' 13''$
 - $h = 243,42$ m
- Orientation au point fondamental: direction Merchich-Berchid.
- Le Systèmes de projection en vigueur:
 - Projection conique conforme de Lambert en quatre zones.
 - Projection UTM dans le sud pour des fins cartographiques.

Des réseaux de polygones géodésiques : 12000 points.

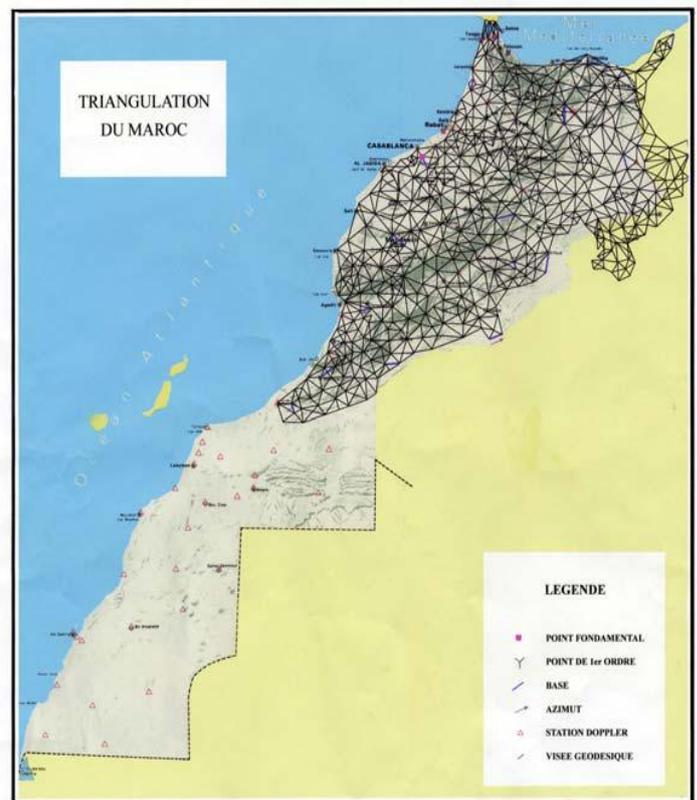


Figure 6: canevas marocain

Paramètres de la projection Lambert Nord-Maroc

(www.ensit.ma/biblio/GENIE%2520CIVIL/M03-Topographie-elementaire1-Initiation-BTP)

La projection utilisée pour la cartographie au Maroc est une projection Lambert Conique Conforme, qui a la propriété de maintenir une conservation des angles. Le principe du système Lambert est le suivant : Sur la surface de la terre, dont la forme est sensiblement celle d'un ellipsoïde ; on fait le choix d'un méridien d'origine OP et d'un parallèle OB, tel que O soit au centre de la région à représenter.

Le système est divisé en 4 zones (**fig.7**). Dans les environs de Marrakech, nous nous situons en zone 1, aussi appelée Nord-Maroc. La projection Nord-Maroc était originalement décrite comme une projection sécante, et exprimée en grades par rapport au méridien de Greenwich. Dans les outils modernes (ArcGis), ou les références internationales de projection (EPSG), la projection est plus souvent définie comme une Lambert Conique Conforme Tangente et exprimé en degrés par rapport au méridien de Greenwich.

Ce tableau résume les différents paramètres de :

<p>Nom du système de référence géodésique Merchich Point fondamental : Merchich Latitude du point fondamental : 33°26'59.6719" Nord Longitude du point fondamental : 7°33'27.2950" Ouest Greenwich Longitude du méridien origine – : 6,0 grades Zone d'application : de 34,5 à 39,5 grades Nord</p>	<p>Définition de la projection tangente dans la référence EPSG (#21692), PROJCS: Merchich / Nord Maroc , GEOGCS: Merchich , DATUM: Merchich , SPHEROID: Clarke 1880 (IGN) , 6378249.2,293.4660212936269 , AUTHORITY: EPSG , 7011 , TOWGS84: 31 146 47 0 0 0 0 , AUTHORITY: EPSG , 6261 , PRIMEM: Greenwich 0 , AUTHORITY: EPSG , 8901 , UNIT: degree 0.01745329251994328 , AUTHORITY: EPSG , 9122 , AUTHORITY: EPSG , 4261 , PROJECTION: Lambert_Conformal_Conic_1SP , PARAMETER: latitude_of_origin 33.3 , PARAMETER: central_meridian -5.4 , PARAMETER: scale_factor 0.999625769 , PARAMETER: false_easting 500000 , PARAMETER: false_northing 300000 ,</p>
<p>Nom de la projections Lambert Nord-Maroc X0 : 500000 Y0 : 300000 Unité linéaire Mètre : (système international) Longitude origine : 0 grade Latitude origine : 37 grades Nord Facteur d'échelle : 0.999625769 Latitude du premier parallèle automécoïque : 38,74050849 grades Nord Latitude du deuxième parallèle automécoïque : 35.24880627 grades Nord Unité angulaire : Grades</p>	

b. Le système de référence mondial WGS84 (World Geodetic System 1984)

(<http://math.15873.pagesperso-orange.fr/WGS84Notice.html>)

La modélisation de la terre a abouti à un volume mathématique appelé ellipsoïde de révolution. Dans un ellipsoïde normal les trois axes ont des longueurs différentes, dans l'ellipsoïde de révolution deux axes ont des longueurs égales, ainsi dans notre cas les deux axes contenus dans le plan de l'équateur ont les mêmes longueurs, alors que l'axe qui passe par les pôles est plus petit. Ce volume est en fait une sphère aplatie.

Les paramètres de l'ellipsoïde du Datum mondiale WGS 84 sont :

Le demi-grand axe	a= 6 378.137 km
Le demi-petit axe	b= 6 356.752 314 km
L'excentricité	0,081 8191 89.
La circonférence à l'équateur	40 075.017 km.
La circonférence polaire	40 007.863 km

Cet ellipsoïde de révolution d'axe Nord Sud qui est censé représenter au mieux la surface de notre planète est appelé le système géodésique WGS84 et les récepteurs GPS fournissent des points dans ce système sous forme d'angles α pour la latitude et λ pour la longitude.

Paramètres de transformation entre le système Merchich et WGS84

Il est possible d'effectuer une transformation simple entre Merchich et WGS84 avec un écart type de l'erreur de positionnement variant de 3 à 5 m. Cependant, il sera préférable d'effectuer la transformation complète par calcul ou avec des outils dédiés.

T_x: 31 m ;

T_y: 146 m ;

T_z: 47 m ;

Ecart-type (en X) : 5 m ;

Ecart-type (en Y) : 3 m ;

Ecart-type (en Z) : 3m ;

Zone d'application : Maroc ;

Origine des données : NIMA, calcul sur 9 points Doppler en 1989

Remarques : Précision évaluée à 5 mètres

Ce tableau présente la projection conique conforme du Maroc :

Zon e	Ellipsoïde	Méridien central (°)	Latitude référ. (°)	1^{er} parallèle standard (°)	2^{ème} parallèle standard (°)	Faux Est (m) (X)	Faux Nord (m) (Y)
1	Clarke 1880	-5.4	33.3	31.7279	34.8717	500000	300000
2	Clarke 1880	-5.4	29.7	28.1063	31.2933	500000	300000
3	Clarke 1880	-5.4	26.1	24.5075	27.6921	1200000	400000
4	Clarke 1880	-5.4	22.5	20.9076	24.0921	1500000	400000

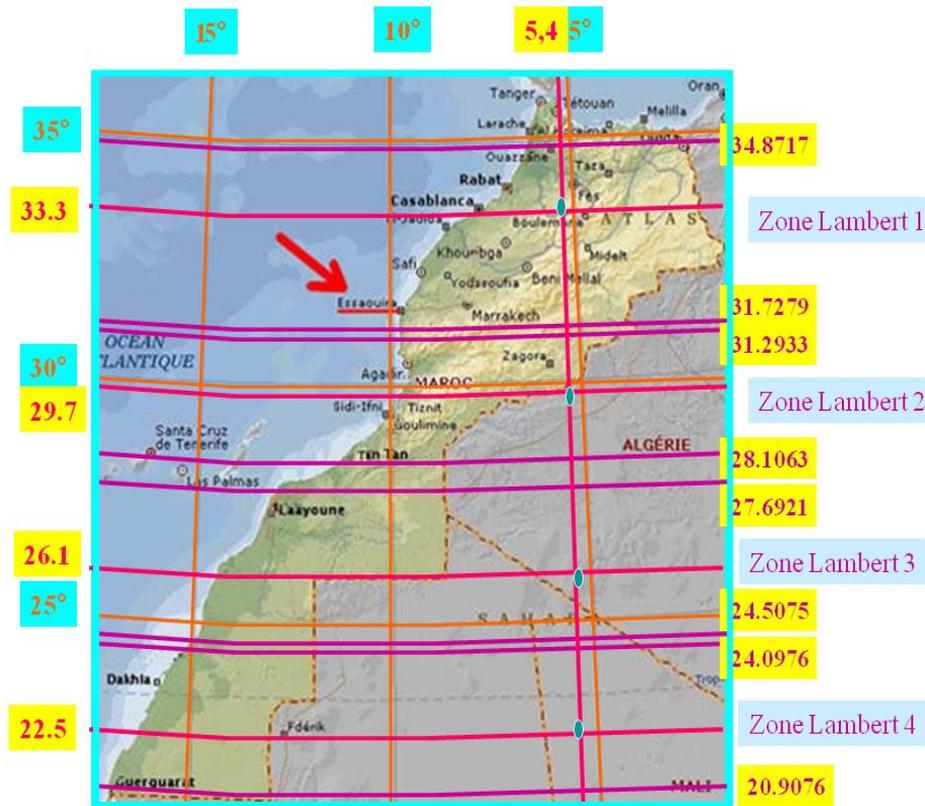


Figure 7: la projection conique conforme du Maroc

II. Généralités sur le GPS (Global Positioning System)

1. Définition

Le GPS (Global Positioning System) est un système de navigation à base de satellites conçu pour fournir instantanément des informations de position, de vitesse et de temps pratiquement à n'importe quel endroit sur terre, n'importe quelle heure et par n'importe quelles conditions météorologiques.

2. Historique

Le GPS est à l'origine un système de navigation par satellites inventé par l'armée américaine de DOD (Department Of Defense), qui contrôle et finance totalement le projet. Le GPS a été développé dans le contexte de la guerre froide et donc à la base d'une utilisation militaire mais qui est très vite apparu sur le marché des civils.

Les principales étapes dans le développement du système GPS ont été :

- **1958** : Début du programme militaire américain qui visait à obtenir la position d'un mobile terrestre à partir d'émission radio en provenance d'un satellite ;
- **1960** : Les ingénieurs de l'US Navy mettent au point le système transition qui permet de positionner un point fixe avec une précision métrique ;
- **1974-1985** : Essai des premiers récepteurs et lancement des premiers satellites « Block I » ;
- **1986** : Explosion de la navette challenger qui a interrompu la procédure du lancement ;
- **1989** : Reprise du lancement des satellites ;

- **1989-1994** : Mise en place de la deuxième constellation et de ces variables « Block 2/ 2A/ 2R » ;
- **2000** : Arrêt de la dégradation intentionnelle du signal GPS civil, appelé Selective Availability (SA) par le gouvernement américain.

Autres systèmes concurrents du GPS

- **GLONASS** (zogg-jm.ch/Dateien/GPS_CompndiumGPS-X-02007.pdf)

GLONASS est une abréviation du système GNSS (système global de navigation par satellites) actuellement opéré par le ministère de défense russe. Le programme a commencé d'abord par l'ex Union soviétique. Les trois premiers satellites test ont été lancés en 1982.

Les caractéristiques du système GLONASS sont :

- 24 satellites prévus (21 standards+ 3 réserves), Ce nombre n'a jamais été atteint. Au début de 2008, on comptait 14 satellites en fonctionnement. La courte durée de vie de chaque satellite (3 à 4 ans) a entravé l'achèvement du système.
- 3 niveaux orbitaux avec un angle de 64,8° par rapport à l'équateur, elle est le plus grand angle de tous les systèmes GNSS et permet une bonne réception des régions polaires.
- L'altitude de l'orbite est de 19100 Km et la période orbitale est de 11h15min.
- Chaque satellite GLONASS transmet deux codes C/A et P code sur deux fréquences. Chaque satellites transmet le même code, mais à des fréquences différentes dans le voisinage de 1602 MHz L1 bande et 1246 MHz L2 bande, les fréquences peuvent être déterminés à travers la formule suivante (K : le canal de fréquence du satellite en cours d'examen) :
 - Fréquence de la bande L1 : $f_1 = 1602 \text{ MHz} + K \cdot (9/16) \text{ MHz}$
 - Fréquence de la bande L2 : $f_2 = 1246 \text{ MHz} + K \cdot (7/16) \text{ MHz}$

- **BEIDOU** (http://french.china.org.cn/china/archives/aerospatialechine/2011-08/23/content_23264115.htm)

Beidou est le système chinois, ses satellites 01 et 02 ont été lancés respectivement le 31 octobre, le 21 décembre 2000, le 25 mai 2003 depuis le Centre de lancement des satellites de Xichang et ont été mis en position sur orbite avec succès, marquant la constitution du système Beidou propre à la Chine.

- **GALILEO** (zogg-jm.ch/Dateien/GPS_CompndiumGPS-X-02007.pdf)

GALILEO est le système GNSS européen en cours d'élaboration par l'union européen (UE) en coopération avec l'agence spatiale européen (ESA). GALILEO sera composé d'une constellation de 30 satellites sur trois orbites circulaires à une altitude de 23222Km au dessus de la terre. Ces satellites doivent être pris en charge par un réseau mondiale de stations terrestres.

Les principaux arguments du point de vue de l'UE pour introduire GALILEO sont les suivants :

- Pour atteindre l'indépendance des états unis.

- disposer d'un système de navigation précis. Le service ouvert (OS) est prévu pour fournir une précision approximative de 4 à 6m. L'erreur due aux multitrajets sera aussi réduite.
- Pour avoir un système de navigation purement civil. GALILEO est conçu et mis en œuvre selon des critères civils. Pour certains services GALILEO offrira une garantie de la fonction.
- offrir plus de services, GALILEO offrira cinq fonctions différentes

3. Domaine d'application du GPS

Il existe deux champs d'application GPS principales :

Applications militaires

Applications civiles (fig.8) :

- ✓ navigation aérienne.
- ✓ navigation maritime (en particulier dans le secteur halieutique).
- ✓ navigation ferroviaire.
- ✓ navigation routière (taxis, secours, particuliers).
- ✓ géodésie et géographie.
- ✓ cartographie



Figure 8: Quelques domaines d'application du GPS

4. Composantes du GPS

Le système GPS est composé de trois parties distinctes, appelées encore segments :

Le segment spatial (fig.9) : constitué d'une constellation de 27 satellites, dont 24 sont actifs à l'heure actuelle et les autres servent des satellites de secours. En réalité, il y a aujourd'hui 29 satellites opérationnels ceci s'explique par le fait que certains des plus anciens modèles fonctionnent toujours parfaitement, bien qu'ayant dépassé leur durée de vie prévue. Ces satellites évoluent sur 6 plans orbitaux ayant tous une inclinaison d'environ 55° sur l'équateur. Ils suivent une orbite quasi circulaire à une altitude de 20200 à 25000 Km qu'ils parcourent en 12H à une vitesse de 13000 Km /h.

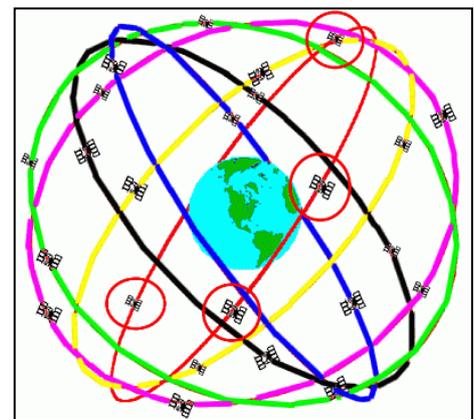


Figure 9: Le segment spatial du Système GPS

Le segment de contrôle : C'est une partie qui permet de piloter et de surveiller le système, constitué de 5 stations terrestre (fig.10) dont leur disposition tout autour de la terre permet de suivre chaque satellite pendant 92% du temps. En fait, il y a quatre stations automatiques de surveillance et une seule station principale de contrôle. Les stations automatiques reçoivent constamment des données provenant des satellites et renvoient ces informations à la station principale de contrôle. La station principale de contrôle corrige et met à jour les données reçues puis renvoie les informations aux satellites via deux antennes situées sur deux autres sites différents.

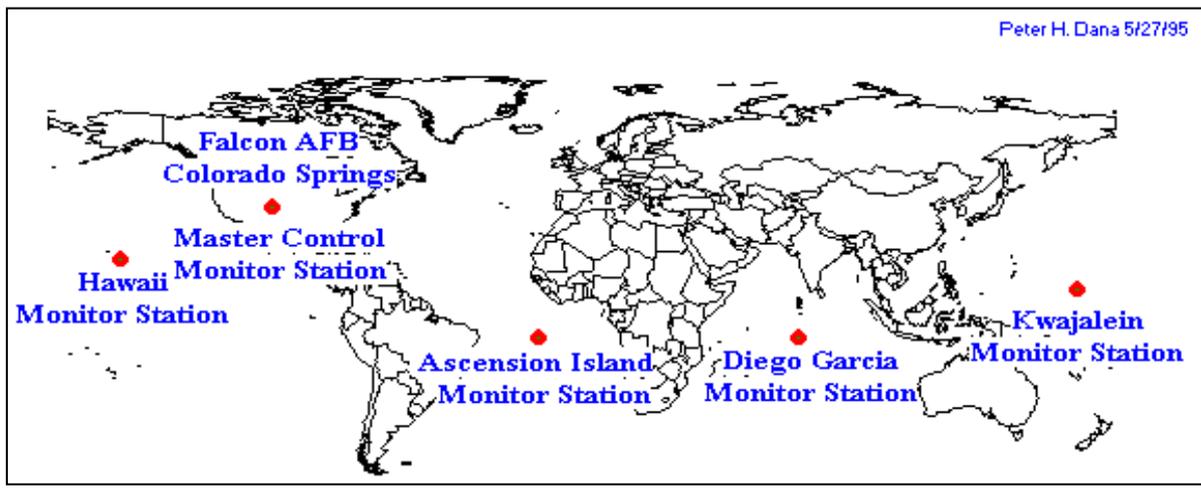


Figure 10: Les cinq stations terrestres du contrôle du GPS

<http://eduscol.education.fr/localisation/pedago/geologie/GPS.htm>

Le segment d'utilisateur : constitué par l'ensemble des récepteurs susceptibles de décoder les signaux de navigation transmis par les satellites. Plusieurs types de récepteurs GPS existent dans diverses gammes d'application, de prix, de précision et de difficulté de mise en œuvre (**fig.11**). On peut distinguer deux catégories :

A- Les appareils grand public que l'on peut trouver dans les magasins de sports et loisirs. La catégorie des appareils grand public travaille en mono-fréquence (L1), par mesure de pseudo-distance. Actuellement, une grande majorité dispose d'une entrée/sortie au format NMEA qui leur permet soit d'exporter leurs données vers un outil externe (PC avec module d'intégration GPS par exemple), soit de recevoir des corrections différentielles d'une station fixe émettrice (mode DGPS, souvent utilisé en navigation maritime pour laquelle beaucoup de signaux sont équipés d'une antenne GPS et d'un canal d'émission radio) :

- Récepteur de navigation simple.
- Récepteur de navigation avec outils cartographiques.

B- Les appareils ou récepteurs professionnels.

Quant aux appareils professionnels, ils peuvent travailler sur les deux fréquences, en mesurant les pseudos-distances et la phase:

- Récepteur géodésique mono-fréquence.
- Récepteur géodésique bi-fréquence.



Figure 11: exemples de récepteurs GPS

5. Principe de fonctionnement du système GPS

La distribution des satellites GPS a été conçue de telle manière que partout sur Terre on puisse atteindre à vue (par des moyens radios) au moins 4 satellites à tout moment afin de déterminer une position dans l'espace (à la surface du sol et en élévation).

La localisation d'un lieu se réalise en mesurant la distance entre l'utilisateur et plusieurs satellites GPS dont les positions sont connues en temps réel. Le récepteur GPS identifie le satellite grâce à un signal pseudo aléatoire (une réplique) émis par chaque satellite. Comme le montre les schémas suivants, le système dispose ainsi de 3 ou 4 sphères centrées sur les satellites dont l'intersection donne la position du récepteur GPS dans l'espace.

$$\rho_r^s = \sqrt{(X_s - X_r)^2 + (Y_s - Y_r)^2 + (Z_s - Z_r)^2}$$

Si les positions, X_s , Y_s et Z_s des 3 satellites sont connus, la solution X_r , Y_r , Z_r peut-être résolue itérativement.

<http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>

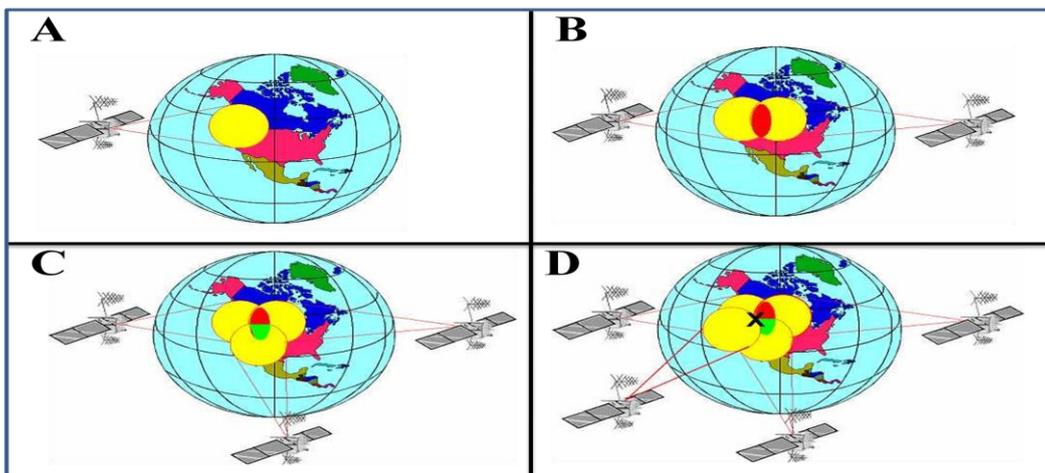


Figure 12 : le nombre de satellite perçu par le récepteurs : 1 (A) , 2 (B) ; 3 (C) ou 4 satellites (D)

Les satellites NAVSTAR (des générations précédentes, blocs I, II, IIA et IIR) transmettent leur information sur 2 ondes porteuses appelées L1 à 1.6 GHz et L2 à 1.2 GHz (GHz = 10⁹ Hz) , dont les longueurs d'onde sont de 19 et 24 cm, respectivement. L'onde porteuse L1 est modulée par 2 codes et par un message contenant entre autres les éphémérides. Ces codes sont: le code C/A (*Clear/Access* ou *Coarse/Acquisition*) accessible par le grand public et le code P (Precise) qui est crypté et seulement utilisables par les militaires. Pour sa part, l'onde porteuse L2 n'est pas modulée par le code C/A. La fréquence des ondes porteuses et la séquence des codes sont régies par des horloges atomiques à bord des satellites.

Il existe deux possibilités principales pour calculer la distance entre le récepteur et le satellite :

- **La mesure de pseudodistance** est, en termes simples, une mesure du temps de propagation requis pour qu'une marque horaire transmise par un satellite atteigne le récepteur sur Terre. Ces marques horaires sont codées sur les ondes porteuses par la technique de modulation de phase. Afin

qu'un récepteur puisse reconnaître le satellite observé, chaque satellite transmet un code qui lui est propre. Une réplique de la séquence du code est générée par le récepteur en même temps qu'au satellite. Le décalage que doit subir la réplique afin de coïncider avec le code reçu correspond au temps de propagation qu'a pris le signal pour parcourir la distance satellite-récepteur. L'ordre de grandeur de la résolution de la mesure de pseudodistance effectuée avec le code C/A est d'environ ± 3 m, celle avec le code P est d'environ ± 0.3 m.

- **La mesure de phase** de l'onde porteuse consiste à comparer la phase de l'onde reçue au récepteur avec la phase d'une onde générée à l'intérieur du récepteur. Théoriquement, cette différence de phase oscille entre 0 et 2π . Cette mesure de phase peut être convertie en mètres puisque l'on connaît la longueur d'onde de l'onde porteuse (λ). Malheureusement, le nombre entier de longueur d'onde initial contenu dans la distance récepteur-satellite n'est pas mesurable par le récepteur. Cette inconnue est appelée **l'ambiguïté de phase initiale**. Par contre, le récepteur est à même de compter le nombre entier de cycles (ainsi que la partie fractionnaire) cumulé depuis l'époque (ou le temps d'observations initiale, s'il n'y a pas d'interruption dans la réception du signal). Les interruptions provoquent des **sauts de cycles** et sont principalement causées par les obstructions (édifices, montagnes, arbres,...) entre les satellites et le récepteur. La mesure de phase peut être interprétée comme une mesure précise de la variation de la distance récepteur-satellite depuis l'époque initiale. Si l'ambiguïté de phase initiale peut être résolue, la mesure de phase ainsi corrigée représente une mesure précise de la distance récepteur-satellite. La résolution d'une mesure de phase est de quelques millimètres.

6. Erreurs et imprécisions du système GPS

La technique GPS mesure donc le temps que met un signal à parcourir la distance entre un satellite situé à 20000km d'altitude pour rejoindre la terre. Hors cette durée ou la mesure de cette durée peut-être altérée pour plusieurs raisons.

En dehors de la dégradation volontaire du signal par les militaires américains, il y a un certain nombre de facteurs naturels qui limitent la précision du GPS. On peut citer dans l'ordre de leur influence : la réfraction dans l'ionosphère, la réfraction dans la troposphère, la précision du positionnement des satellites GPS et les phénomènes de multi-trajets. Certains de ces phénomènes sont à peu près connus, d'autres le sont moins, voire pas du tout.

L'expression mathématique peut être exprimée par cette équation simplifiée avec ρ étant la position calculée dans l'expression précédente :

$$\ell_P = \rho + c(dT-dt) + T_r + \varepsilon_P \quad (1)$$

$$\ell_\phi = \rho + c(dT-dt) + T_r + N\lambda + \varepsilon_\phi \quad (2)$$

Dont :

$\ell_P(P3)$: La combinaison ionosphérique libre de P1 et P2 pseudo-distance (2.546 P1 – 1.546 P2)

$\ell_\phi(L3)$: La combinaison ionosphérique libre de P1 et P2 phase porteuse (2.546 $\lambda_1\phi_1$ -1.546 $\lambda_2\phi_2$).

dT : Décalage de l'horloge du récepteur par rapport à l'heure du GPS

dt : Décalage de l'horloge du satellite par rapport à l'heure du GPS

c : La vitesse de la lumière dans le vide

T_r : Le temps du parcours due à l'atmosphère neutre (troposphère)

N : L'ambiguïté non entière de la combinaison ionosphérique de la phase porteuse

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda$: sont les phases porteuses L1, L2 et L3 associé (10.7 cm) longueur d'onde

$\varepsilon_P, \varepsilon_\phi$: Les composantes de mesure du bruit, y compris les trajets multiples (multipath)

Erreurs due à l'atmosphère

• La réfraction dans l'ionosphère

Comme son nom l'indique, l'ionosphère est une enveloppe constituée de particules chargées (ions) qui orbitent autour de la terre au-delà de 20 Km d'altitude. L'onde porteuse du signal GPS doit donc traverser cette couche sur son trajet entre le satellite et la station. Le fait que cette couche ne soit pas électriquement neutre entraîne une perturbation de la vitesse de toute onde électromagnétique qui se propage dedans. L'amplitude de cette perturbation 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 de propagation de l'onde GPS va donc être modifié d'une quantité inconnue, nommée délai ionosphérique, et pour finir l'évaluation de la distance entre le satellite et la station sera donc erronée.

La solution consiste à émettre deux ondes sur deux fréquences différentes (**fig.13**) Chacune d'elle sera donc affectée d'une quantité différente et la comparaison donnera une évaluation raisonnable du délai ionosphérique pour chaque longueur d'onde. C'est pour cette raison que le système GPS est « bicolore », c'est-à-dire qu'il émet sur deux fréquences légèrement différentes (1.575 GHz et 1.228GHz). Il n'en reste pas moins que dans le cas d'une ionosphère très agitée, en cas d'une tempête solaire par exemple, l'évaluation du délai ionosphérique ne sera qu'approximative et la mesure moins précise.

• La réfraction dans la troposphère

De la même façon, le temps de propagation de l'onde GPS est affecté par la teneur en vapeur d'eau de la couche basse de l'atmosphère (de 0 à 10 Km d'altitude) : la troposphère. Il serait donc nécessaire de connaître cette quantité avec précision tout le long du trajet suivi par l'onde. En pratique cela se révèle très difficile, sinon impossible, même avec l'aide des deux fréquences. En effet, le retard introduit est plus compliqué qu'un simple rapport de proportionnalité avec le pourcentage de vapeur d'eau. La différenciation entre les deux fréquences n'apporte donc pas l'information souhaitée : le délai troposphérique. Il existe plusieurs techniques pour contourner cette difficulté, aucune n'apportant de solution vraiment satisfaisante. La plus simple consiste tout

simplement à introduire une nouvelle inconnue dans les calculs : le délai troposphérique de chaque station. Toutefois, comme ce paramètre évolue en fonction de la météorologie locale, il est nécessaire de modifier ce paramètre au cours du temps (toutes les deux heures par exemple). Cela finit par introduire beaucoup d'inconnues, ce qui rend les calculs instables et les solutions moins fiables.

En pratique, ce problème prend d'autant plus d'importance que les conditions météorologiques et les épaisseurs troposphériques sont différentes entre deux stations.

La ligne de base entre une station située en bord de mer avec un degré d'hygrométrie important et une station située en haute montagne avec un air très sec, sera particulièrement affectée. Enfin, cette erreur se retrouvera plus particulièrement sur la composante verticale de la ligne de base, les erreurs horizontales se compensant plus ou moins du fait que les satellites couvrent à peu près toutes les directions de l'horizon. Du point de vue théorique, des instruments permettant de mesurer directement la teneur en vapeur d'eau le long du trajet suivi par l'onde GPS sont en phase expérimentale. Il est encore trop tôt pour savoir si la précision de ces mesures, basées sur la température de brillance du ciel, sera suffisante.

La précision des orbites des satellites GPS

Il est évident que si l'on se trompe d'une certaine quantité sur la position du satellite émetteur, cette erreur va se répercuter directement sur la position de la station réceptrice. La distance entre deux stations (ligne de base) sera moins affectée, la plus grosse partie de l'erreur étant éliminée par différenciation. Néanmoins, l'arithmétique veut que l'erreur proportionnelle sur l'erreur proportionnelle sur l'orbite soit égale à l'erreur proportionnelle sur la 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 200m. Sur 20000Km cela donne une erreur proportionnelle de 10^{-5} (10ppm), soit une erreur de 10cm sur une ligne de base de 10Km, cette erreur est totalement inacceptable pour le positionnement précis. Il est donc nécessaire de recalculer les orbites des satellites GPS à l'aide de programmes informatiques d'orbitographie. Ce faisant, on arrive à contraindre l'erreur d'orbite à environ 20 cm, soit 10^{-9} (1ppm), ce qui ne donne plus qu'une erreur de 1 mm pour une ligne de base de 1000 Km de long.

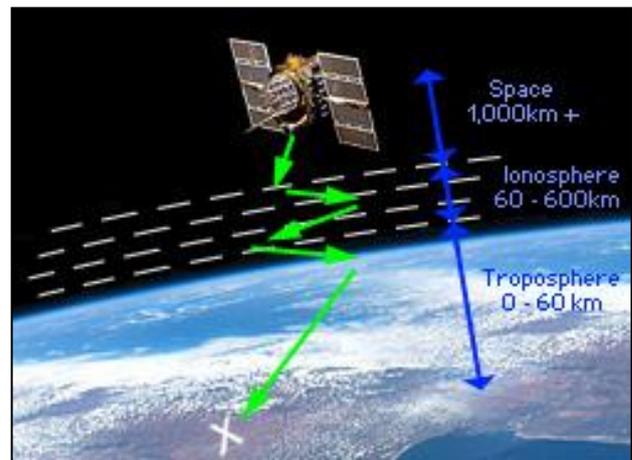


Figure 13 : Diffusion du signal des satellites du GPS, due à la troposphère et l'ionosphère.

(http://mayerwin.free.fr/gnss_clip_image001_0002.jpg)

Les multitrajets

Ces phénomènes sont parmi les plus difficiles à appréhender. Il est clair que tout objet réflecteur placé dans le voisinage de l'antenne de la station GPS, peut renvoyer une partie du signal provenant du satellite sur cette antenne. Tout comme un miroir crée une image de soi même lorsque l'on se regarde dedans, le réflecteur crée une image de l'antenne GPS (**fig.14**). C'est la position de cette antenne virtuelle que l'on risque alors de mesurer en lieu et place de la véritable antenne. Au fur et à mesure que le satellite se déplace sur son orbite, l'angle d'incidence sur le réflecteur change, et l'image se déplace d'autant. C'est donc finalement la position d'une antenne virtuelle mobile que l'on mesure.

Compte tenu de la complexité des calculs correctifs qu'il faudrait effectuer, il n'y a pas vraiment de remèdes aux problèmes des multitrajets. Un blindage des antennes contre les réflexions parasites est toujours possible, mais celui-ci ne peut être que partiel puisqu'il faut bien que le vrai signal parvienne à l'antenne. La seule solution consiste donc à essayer d'éviter les multitrajets (c'est-à-dire les objets parasites), ce qui n'est pas si facile quand on considère que le sol lui-même est un réflecteur potentiel.

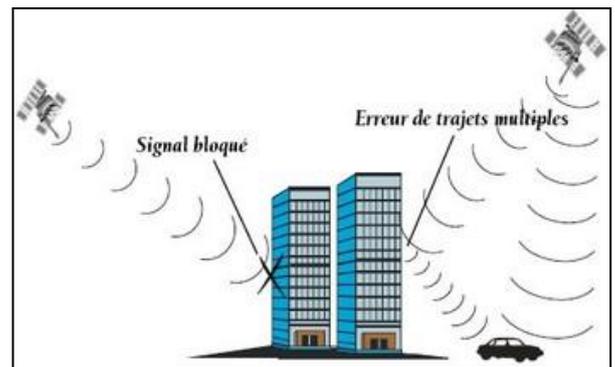


Figure 14: Schéma montrant les erreurs dues aux multi-trajets issus des réflexions parasites

7. Correction de GPS

DGPS : Le GPS différentiel

Pour augmenter encore la précision, une technique de post-traitement appelée correction différentielle peut être effectuée pour éliminer les erreurs. Le GPS différentiel (ou DGPS) est réalisé en utilisant deux récepteurs GPS simultanément. Une unité appelée la base, est placée sur un emplacement connu avec précision, et elle est fixée à recueillir en continu des données. Le second récepteur, appelé le mobile, est utilisé dans le domaine de recueillir les données souhaitées par l'utilisateur. Les erreurs dans les positions recueillies par le récepteur mobile peuvent être retirées parce que l'emplacement de l'unité de base est déjà connu et les erreurs collectées par la base et le récepteur mobile sont identiques pour un moment donné dans le temps (**fig.15**). Bien que des précisions de positionnement varie en fonction des récepteurs utilisés, dans la plupart des cas le DGPS améliore la précision de la position horizontale entre deux et cinq mètres.

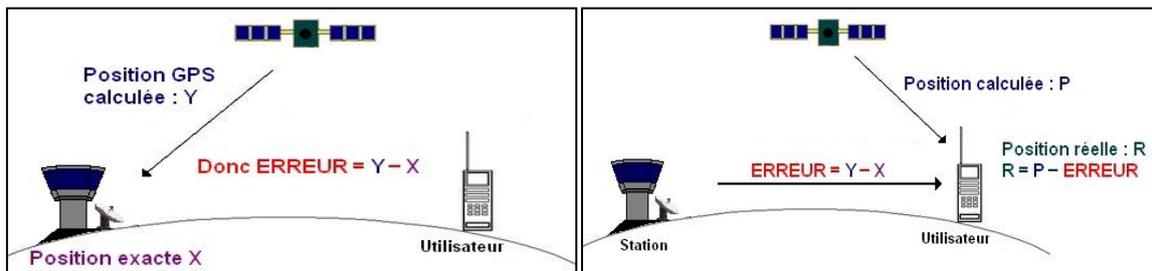


Figure 15: Schéma montrant le principe du GPS différentielle

SBAS : Système de renforcement spatial (Space-based augmentation system)

Le SBAS incorpore une architecture modulaire, semblable à celle du GPS, incluant une composante terrestre, une composante spatiale et une composante utilisateur :

- La composante terrestre comprend les stations de référence, les centres de traitement, un réseau de communication et une station terrestre de navigation (NLES - Navigation Land Earth Station).
- La composante spatiale comprend les satellites géostationnaires
- La composante utilisateur comprend l'équipement de l'utilisateur,

L'architecture logicielle du SBAS se base sur l'état. Cela signifie qu'une correction distincte est disponible pour chaque source d'erreur plutôt que pour l'effet total sur la portée de mesure de l'équipement de l'utilisateur. Ceci permet de gérer plus efficacement les problèmes de décorrélation spatiale qu'avec certaines autres techniques, résultant en une performance plus stable du système peu importe l'emplacement géographique par rapport aux stations de référence. Plus particulièrement, le SBAS calcule les erreurs distinctes suivantes :

- Erreur ionosphérique
- Erreurs de chronométrage du GPS
- Erreurs d'orbite des satellites GPS

PPP : Le positionnement précis du point

Le positionnement précis du point (PPP) est une méthode qui effectue la détermination de position précise en utilisant un seul récepteur GPS.

Cette approche de positionnement née de l'avènement des précises orbites GPS et des horloges de données produits avec une précision centimétrique. Ces données peuvent être appliquées pour réduire les erreurs les plus importantes dans le positionnement du GPS.

En combinant la position précise des stations et des horloges avec une récepteur GPS bi-fréquence (pour enlever l'effet de 1^{er} ordre de l'ionosphère), le PPP peut fournir des solutions de position d'ordre centimétrique et décimétrique, ce qui est attrayant pour de nombreuses applications telles que la cartographie aérienne. Le PPP est différent de double fréquence RTK (real time Kinematic) positionnement qui nécessite l'accès à des observations d'un ou plusieurs stations de base dont les coordonnées sont connues.

8. Techniques de saisie

On distingue trois modes de saisies par GPS :

Le mode statique (static)

Il s'agit de la première méthode à avoir été développée pour la topographie GPS. Elle peut être utilisée pour la mesure de très longues lignes de base (parfois >1000km) et avec de grandes précautions. L'un des capteurs (la référence) est disposée sur un point dont les coordonnées sont connues avec précision en WGS84. L'autre (le mobile) est mis en station à l'autre extrémité de la base. Les données sont ensuite enregistrées simultanément en chacune des deux stations. Il est important que la fréquence d'enregistrement des données soit identique pour les deux capteurs.

Caractéristique en GPS statique monofréquence:

- mesure de phase sur L1,
- durée d'observation: 15 mn + 5 mn par km de base
- distances: jusqu'à 20km en zone tempérée, 10 km en équatoriale
- orbites radiodiffusées,
- précision: $\pm 2\text{mm} (+ 2 \text{ ppm})$

Le mode statique rapide (rapid-static)

Le mode statique rapide est semblable au mode statique, mais avec des périodes d'observation plus courtes (environ 5 à 10 min).

Le mode Cinématique (kinematic)

Le mode cinématique utilise deux ou plusieurs stations GPS, au moins une station GPS avec des coordonnées connues reste stationnaire pendant une autre station (rover) est déplacée. Tous les lignes de base (niveau de référence) sont produites à partir des stations de référence jusqu'à les stations mobiles. Le mode cinématique peut être continu ou « stop and go ». Les stations d'observation « stop and go » sont de courtes durées, généralement moins de deux minutes.

Deuxième partie :
**Estimation de l'erreur
verticale avec un dispositif
GPS économique par les
méthodes différentielles et
Precise Point Positioning**

I. Choix du sujet et problématique

La mesure d'altitude avec précision devient une nécessité dans plusieurs disciplines (hydrologie, cartographie, la conservation foncière...etc). On cite ici à titre d'exemple le niveau piézométrique de la nappe au niveau des puits variable dans intervalle entre 10 et 20 mètre, dans ce genre de situation le GPS grand public et le moins chers donne des mesures avec une marge d'erreurs de plus au moins 10 mètre donc ce type de GPS reste inefficace devant ce genre de situation et ne peut offrir aucune précision dans ce sens!

Pour plus de précision il faut soit un GPS professionnel qui coute cher, soit un théodolite qui n'est pas aussi pratique lourd et encombrant et nécessite plus de temps pour prendre la mesure.

On se propose donc de contribuer dans le cadre de ce travail (projet de fin d'étude) par une tentative d'amélioration de la précision en altitude par des traitements post acquisition des données brutes de GPS relativement économiques.

II. Objectifs de l'étude

L'objectif de ce travail est d'estimer la précision verticale que l'on peut obtenir avec des GPS économiques (<3000 DH) par post-traitement avec des outils logiciels gratuits en utilisant la méthode de la phase porteuse en mode de saisie statique. Deux techniques sont examinées : Le DGPS et le PPP.

Pour la méthode DGPS, l'impact de la durée et la distance est examiné. Pour le PPP l'intégralité de la mesure a été examinée.

La précision du positionnement est comparée à des points côtés aimablement mis à notre disposition par les travaux topographiques de Mr. Najib SAID.

III. Matériel et Méthode

1. Matériel

Il existe très peu de GPS de bas prix qui permettent de lire les données brutes. C'est la raison pour laquelle on a choisit le GPS UBLOX.

Pour réaliser les objectifs cités ci-dessus on doit se munir d'un matériel bien spécifique à savoir :

- Deux kit GPS **UBLOX** LEA-6T en connexion avec un ordinateur portable et une antenne ANM-MS capable de recevoir des données brutes sur ordinateur (**fig.16**),
- Le logiciel **U-CENTER**,
- Un logiciel de post traitements ; celui choisi dans ce travail est le **RTKLIB**,
- Deux points géodésiques séparés d'une distance connue et dont les coordonnées (X, Y, et Z) sont aussi connues avec précision,
- Le logiciel **GEOTRANS** pour la conversion des coordonnées.

U-CENTER 6.1: u-centre est un puissant logiciel pour l'évaluation du récepteur GPS UBLOX et aussi un outil de visualisation qui peut être téléchargé gratuitement.

RTKLIB 2.4.1: est un package open source du programme pour le positionnement standard et précis avec le GNSS. RTKLIB se compose d'une bibliothèque de programmes portables et plusieurs programmes d'application (AP) en utilisant la bibliothèque, ce logiciel peut être téléchargé gratuitement.

GEOTRANS 3.2: une application qui permet de convertir facilement les coordonnées géographiques parmi une grande variété de systèmes de coordonnées, les projections cartographiques et systèmes de référence, ce logiciel peut être téléchargé gratuitement.

Le coût total du dispositif est inférieur à 10000 DH (2 ordinateurs portables et 2 kits UBLOX).



Figure 16:Photo de UBLOX LEA-6T

2. Méthodes

Après s'être muni du matériel cité ci-dessus, une méthodologie de travail doit être suivie. Il s'agit donc de prendre des mesures de position par les deux kits GPS au même temps sur les deux points géodésiques pendant des périodes de temps différentes qui peuvent aller jusqu'à une heure de prise de données. Ensuite faire des essais à une distance plus grande entre les deux GPS, dans ce travail une mesure est prise en même temps avec une distance d'environ 87 km.

Après la prise de données, des traitements post acquisition vont être effectués par le logiciel RTK pour pouvoir atteindre l'objectif qui est la précision du positionnement des points.

Aspect pratique de l'étude :

Afin de réaliser les objectifs cités ci-dessus, nous avons choisi deux points géodésiques situés à une douzaine de Km de Marrakech sur la route de Tahanaout, les points dont les coordonnées sont connues ont été déterminées par théodolite avec une précision de quelques cm, il s'agit d'un point de référence AK13 et un deuxième point de référence (station mobile). Les données ont été récupérées sur les deux points pendant presque une heure.

Pour vérifier la précision du GPS, on a essayé de faire des prises à plus grande distance, pour cela, on a choisi un point géodésique situé à el Kelâa à environ 87Km de Marrakech, gardant toujours le même point de référence.

a. La prise des données

Le récepteur U-BLOX 6 est composé d'une antenne branchée sur un boîtier qui est connecté à un ordinateur portable, et pour recevoir un fichier de données captées par l'antenne on fait appelle au logiciel U-CENTER. Ce dernier doit être configuré sous des conditions bien définies pour que le récepteur puisse enregistrer le maximum de données émises par les satellites, les étapes de cette configuration se présentent comme suit :

☞ **Connecter le récepteur**

Une fois le récepteur branché à l'ordinateur il faut le connecter à l'U-CENTER en allant à la barre de menu du logiciel et choisir (fig.17) :

Receiver /port ; en suite sélectionner le port COM convenable

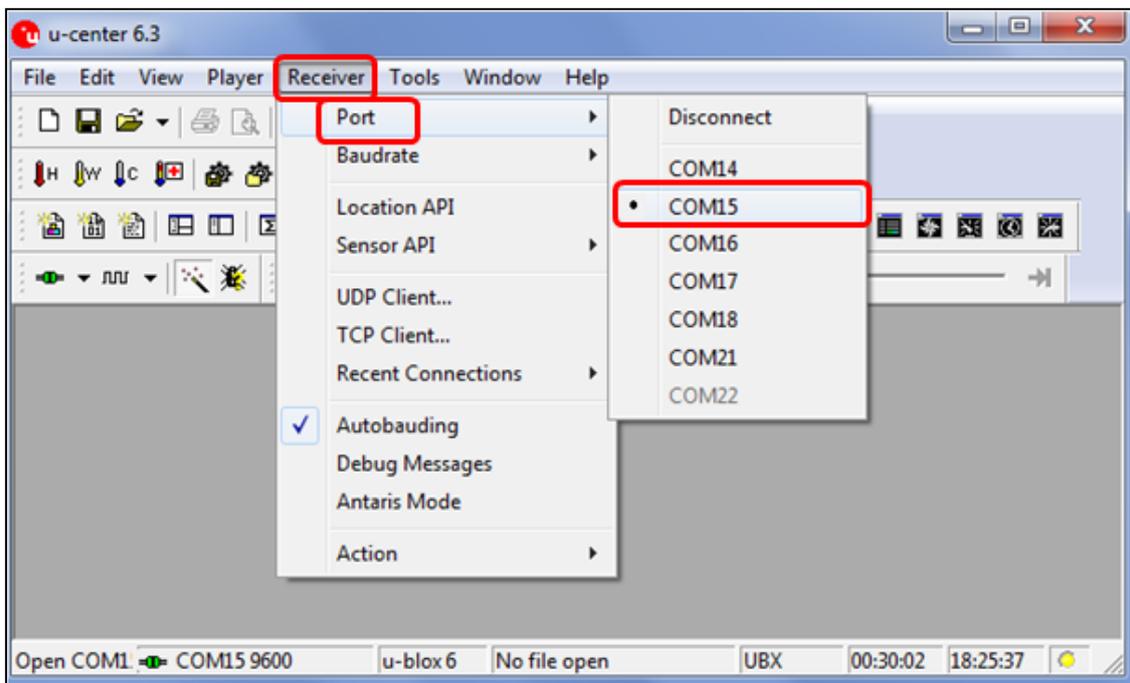


Figure 17 : fenêtre du logiciel montrant comment connecter le récepteur du GPS

☞ **Régler la vitesse**

Le récepteur GPS UBLOX LEA-6T est capable d'enregistrer à une fréquence de 5Hz. Afin que l'ordinateur puisse enregistrer l'ensemble de ces données, il faut indiquer une vitesse élevée du port de connexion. Donc choisir une vitesse de 38'400 bauds, d'après la documentation, pour ne pas avoir beaucoup de perte de données.

En pratique aller à la barre de menu du logiciel et choisir le chemin suivant (fig. 18) :

Receiver / Baudrate puis il faut **Sélectionner la vitesse 38'400** bauds.

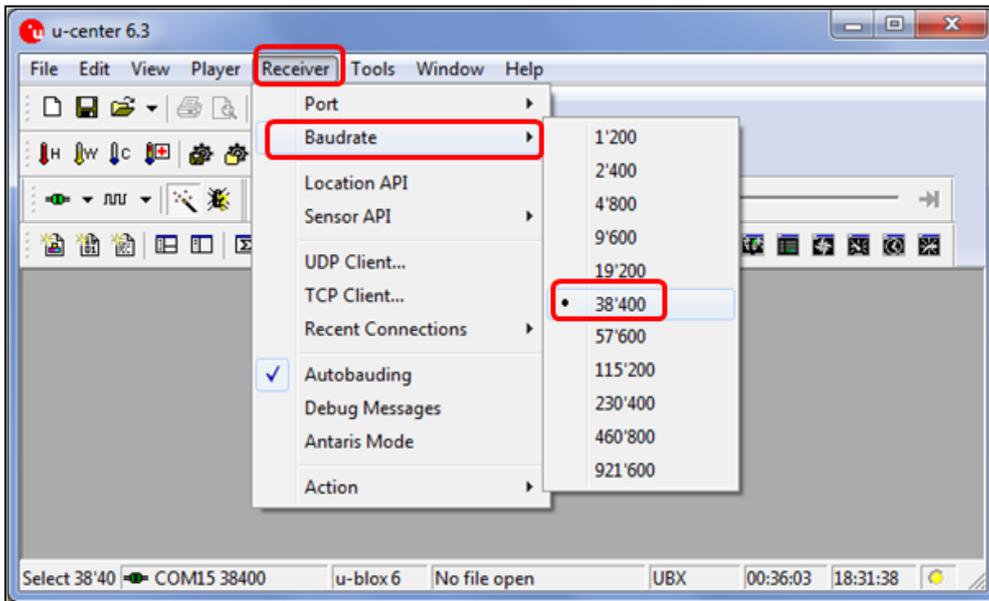


Figure 18 : Capture d'écran de la fenêtre du logiciel U-Center montrant le réglage de la vitesse

☞ **Appliquer les protocoles UBX et NMEA.**

En suite deux protocoles de réception de données sont nécessaire à être fixés en même temps, il s'agit d'une part du protocole **NMEA** qui permet de recevoir les données finales après certaines corrections telle que celle des Marrées (NMEA), et d'autre part du protocole **UBX** qui permet d'enregistrer les données brutes du récepteur, et notamment celles qui concernent la phase porteuse. Pour cela, il faut choisir, à partir de la barre de menu, les deux actions qui permettent le fonctionnement des deux protocoles en même temps (**fig. 19**) :

View / Message View au ce niveau : Sélectionner **NMEA**, clique droit et sélectionner « **Enable Child Messages** » puis Sélectionner **UBX**, clique droit et sélectionner « **Enable Child Messages** ».

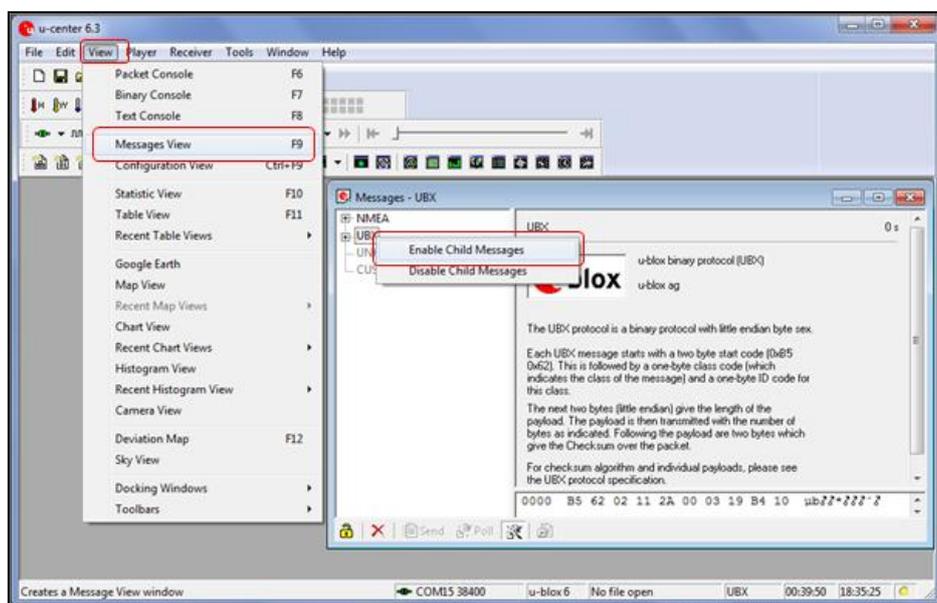


Figure 19 : Application des protocoles UBX et NMEA

Après l'application des protocoles, il faut configurer celui de UBX pour recevoir le maximum des données brutes. Pour cela, il faut choisir (fig. 20) :

View / Message View / UBX / CFG :

1. MSG (Message) :

Message : sélectionner « **02-10 RXM-RAW** »

Cocher **USB**

2. PRT (Ports) :

Target : sélectionner « **3-USB** »

Protocol in : sélectionner « **0+1+2 UBX+NMEA+RTCM** »

Protocol out : sélectionner « **0+1 UBX+NMEA** »

3. RATE (Rates):

Measurement Period : entrer la valeur « **200 [ms]** »

Enfin, cliquer sur « **Send** » pour enregistrer les modifications de la configuration choisie.

Remarque : cette configuration est la plus favorable d'après la documentation.

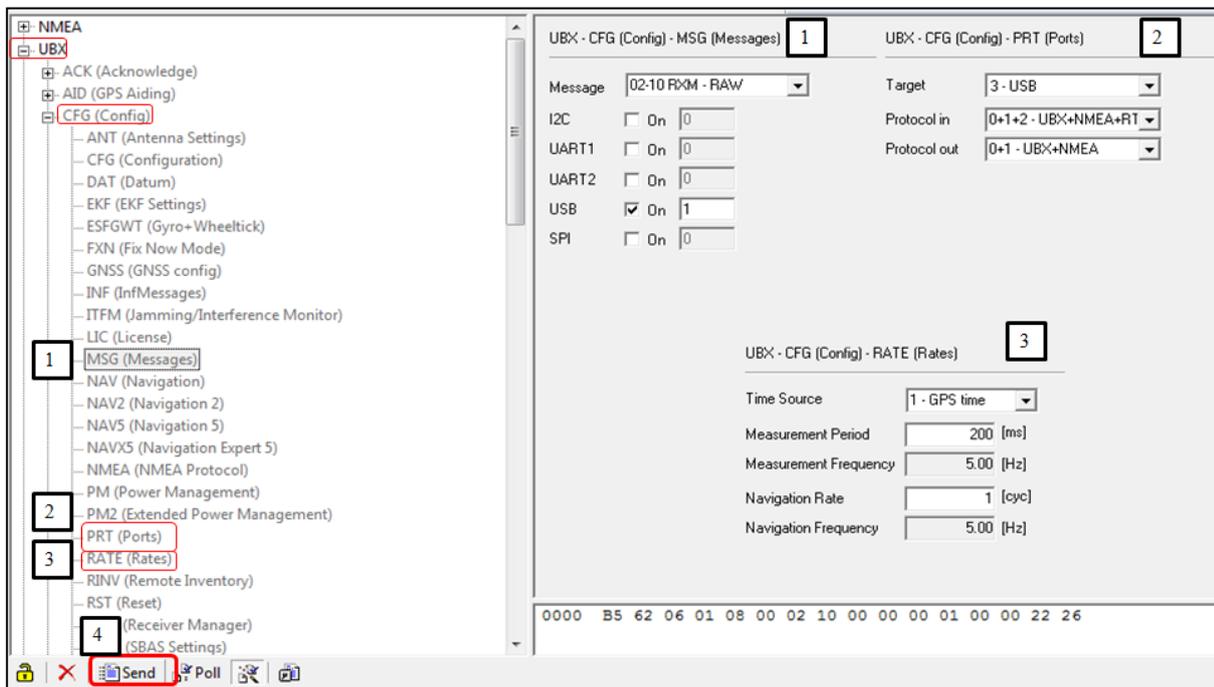


Figure 20 : Fenêtre montrant la configuration du protocole UBX

Lancer la prise des données brutes

Dans cette étape on démarre la prise et l'enregistrement, des données sur l'U-CENTER ; en procédant comme suite (fig. 21) :

Player / record donner un nom pour le fichier / **Enregister**

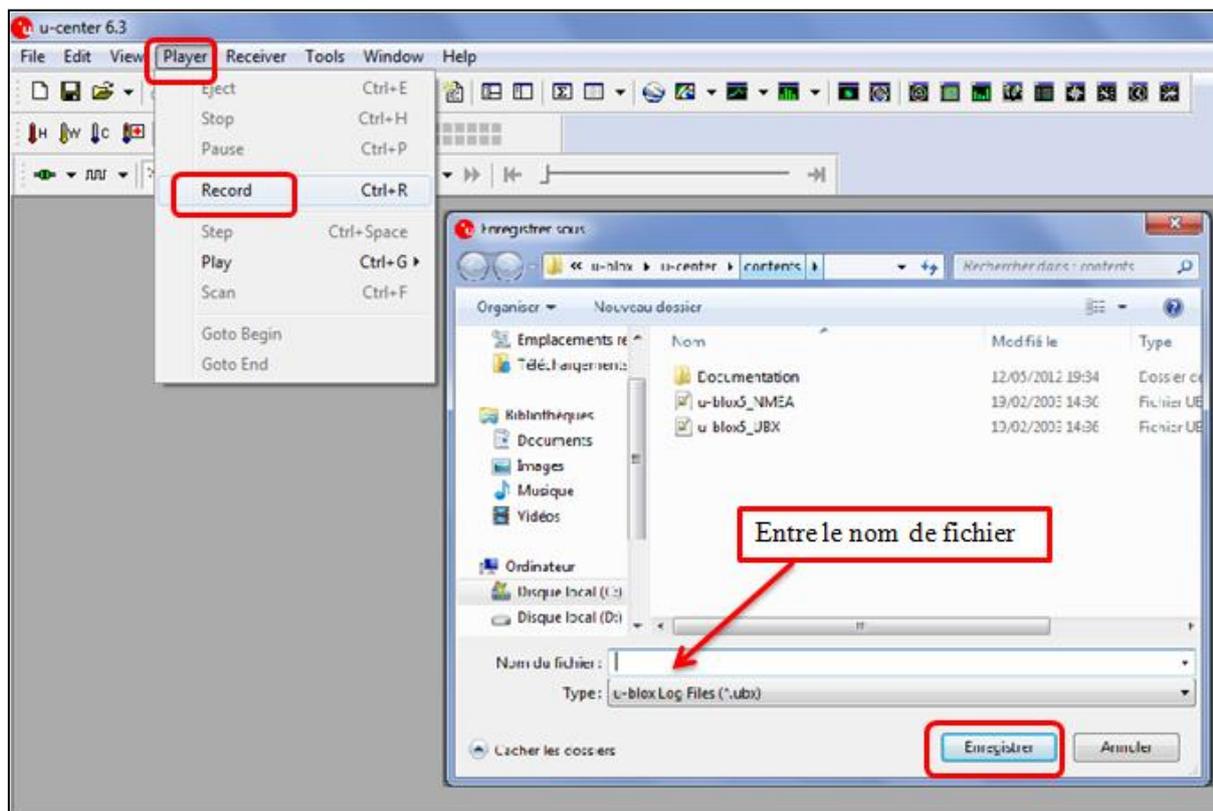


Figure 21: procédure de Lancement de la prise des données brutes

Après avoir lancé la prise de données brutes, plusieurs fenêtres à différentes fonctionnalités vont être affichées à savoir (**fig. 22**) :

- 1 : Sky View** : est un excellent outil pour analyser la performance des antennes ainsi que les conditions de l'environnement d'observation par satellite. Le tracé polaire affiche graphiquement la force relative moyenne du signal satellite, la position des satellites dans le ciel, identifie les satellites en nombre, et indique quels satellites sont utilisés dans le calcul du récepteur.
- 2 : World position View** : montre l'emplacement actuel envoyé par le récepteur GPS
- 3 : Compass View** : indique l'orientation de récepteur GPS
- 4 : Data View** : un tableau qui montre les informations les plus importantes notamment longitude, latitude et altitude.
- 5 : Packet console** : c'est un répertoire de toutes les informations reçues par le récepteur GPS
- 6 : Information Protocol (Protocol information)** : Cette zone indique l'ensemble de messages actuels qui est utilisé pour communiquer avec le récepteur GPS. Cela peut être le NMEA-0183 ou le protocole UBX. U-center peut gérer les deux protocoles comme notre cas.
- 7 : Durée de fonctionnement (Operating time)** : Le temps écoulé dès le commencement de la mesure.
- 8 : Heure UTC (UTC Time)** : L'heure actuelle envoyée par le récepteur GPS

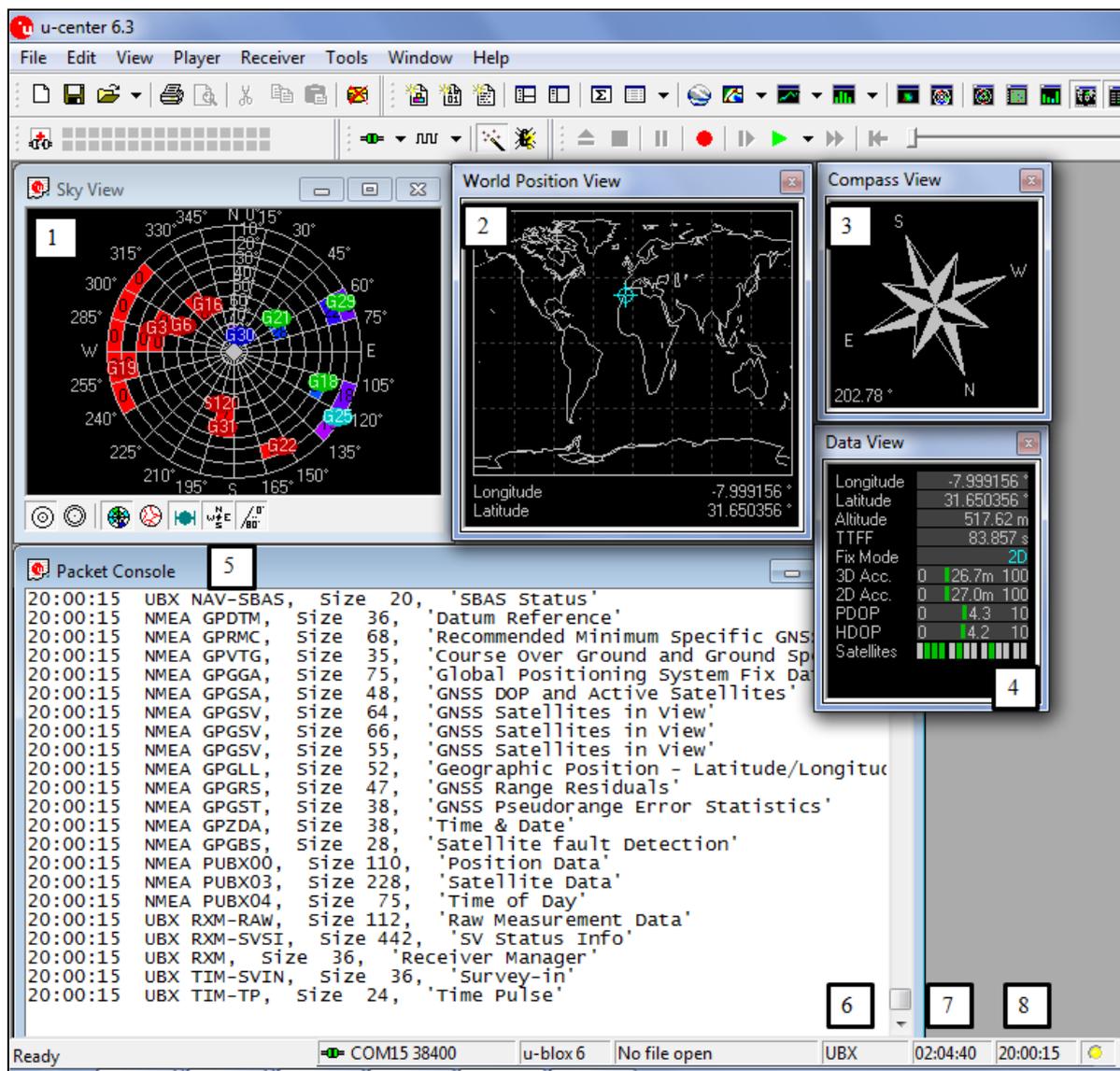


Figure 22 : interface de Fonctionnement d'U-CENTER pendant la prise de données

b. Traitement des fichiers bruts

Avec les deux fichiers qu'on a récupéré pendant la prise des données brutes pour la station de base et mobile, et en utilisant le logiciel RTKLIB on peut faire le post-traitement à condition qu'on ait déjà les coordonnées exactes de la station de base. Ce traitement se fait en plusieurs étapes qui se présentent comme suit :

☞ Conversion des coordonnées Lambert

Les coordonnées de la station de base ne peuvent pas être utilisées dans le post-traitement avec RTKPOST sans les convertir, car elles appartiennent au système géodésique de référence du Maroc « Merchich » et le RTKPOST fonctionne avec des coordonnées appartenant au système géodésique de référence mondial WGS84 et avec l'altitude ellipsoïdale.

Pour cela on va se baser sur le logiciel GEOTRANS 3.2 qui permet cette conversion :

- Premièrement on transforme les coordonnées du Lambert conforme conique en coordonnées géodésique dans le même Datum de Merchich.

Pour cette étape on va choisir :

Datum: «MER MERCHICH, MOROCCO »

« Lambert Conformal Conic (1 standard Parallèle)

On va entrer par défaut pour :

Central Meridian : -5.4

Origin Latitude: 33.3

Scale Factor: 0.999625769

False Easting (m): 500000

False Northing (m): 300000

Puis on va entrer dans :

Easting / X (m): longitude Lambert en mètre

Northing / Y (m): latitude Lambert en mètre

La dernière étape est de choisir pour le format

De sortie :

Datum : « MER: MERCHICH, MOROCCO »

« Geodetic »

Cliquer sur « **Convert Upper > Lower** » pour

Ensuite on transforme les coordonnées géographiques du Datum de Merchich en coordonnées géographiques du Datum de WGS84.

The screenshot shows the MSP GEOTRANS 3.2 software interface. The top menu bar includes File, Edit, Options, Datum, Ellipsoid, Convert, and Help. The main window is divided into two sections. The top section is for setting up the source projection (Lambert Conformal Conic) with the following parameters: Datum: MER: MERCHICH, Morocco; Ellipsoid: CD: Clarke 1880; Central Meridian: -5.4; Origin Latitude: 33.3; Scale Factor: 0.999625769; False Easting (m): 500000; False Northing (m): 300000. The bottom section is for setting up the target projection (Geodetic) with the following parameters: Datum: MER: MERCHICH, Morocco; Ellipsoid: CD: Clarke 1880; Geodetic; No Height. The output fields show Longitude: 0 0 0.0E, Latitude: 0 0 0.0N, and Height (m): 0. The interface also includes buttons for 'Convert Upper -> Lower' and 'Convert Lower -> Upper'.

Pour cette étape on va choisir pour :

Datum: «MER MERCHICH,MOROCCO »

Geodetic

MSL-EGM2008-2.5M-BCS Height

Puis on va entrer dans :

Longitude : longitude Merchich

Latitude : latitude Merchich

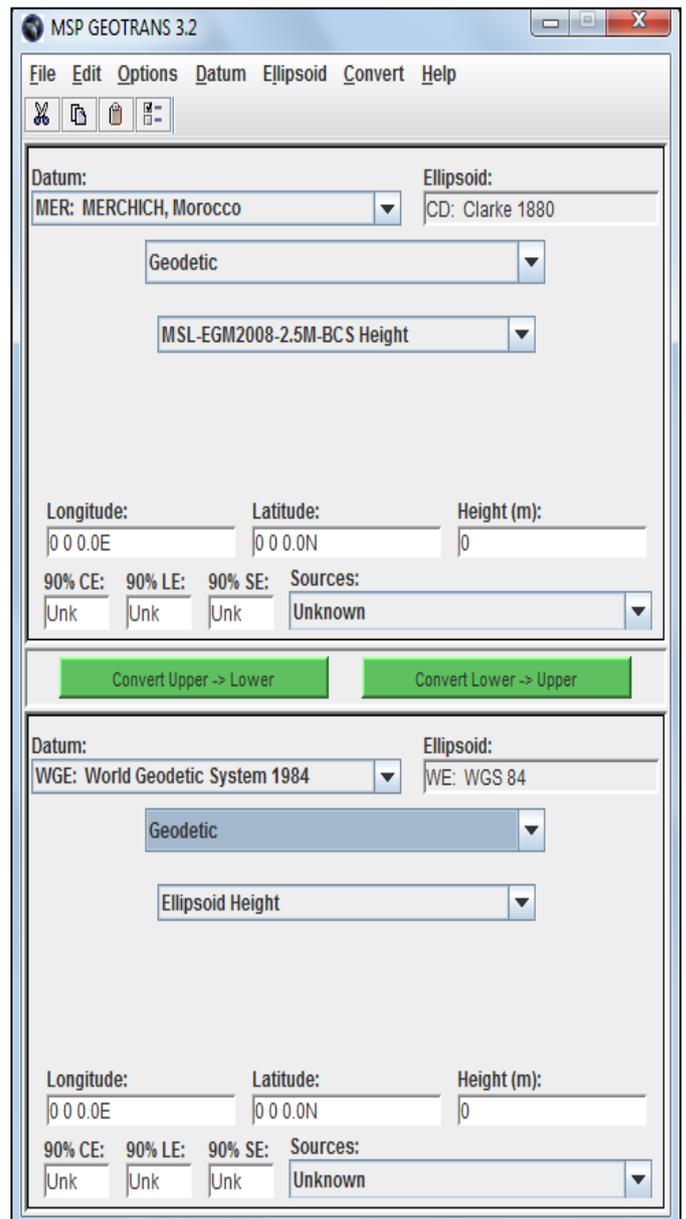
Enfin choisir le format de sortie :

Datum : « WGS: World Geodetic System 1984 »

Geodetic

Ellipsoid Height

Cliquer sur « **Convert Upper > Lower** » pour



☞ Conversion des fichier UBX

Le fichier des données brutes obtenu est sous forme UBX, ainsi le RTKPOST ne peut faire le post-traitement que pour les données sous format RINEX. Pour cela, on doit transformer les données brutes qui sont UBX sous format RINEX à l'aide de RTKCONV selon la procédure suivante (fig. 23) :

RTKCONV :

Dans **RTCM**, **RCV RAW** or **RIXEM OBS** / parcourir et ouvrir le fichier de données / sur **Format** choisir « **U-blox** » / Cocher les cases suivantes: **.obs ; .nav ; .hnav ; .sbs** /Cliquer sur « **Convert** ».

Cette conversion permet d'obtenir quatre fichiers RINEX (OBS, NAV, HNAV, SBS) dans le même emplacement que le fichier de départ.

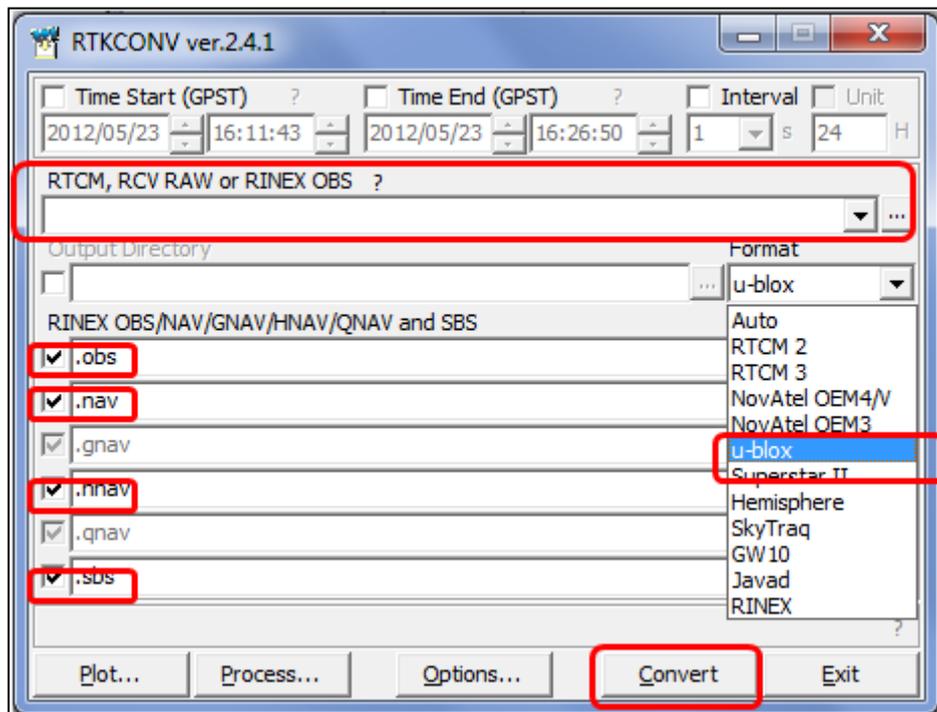


Figure 23 : fenêtre du logiciel RTKCONV montrant la conversion des fichiers UBX en fichier RINEX

☞ Configuration de RTKPOST :

Avant de procéder au post-traitement avec le logiciel RTKPOST, il est nécessaire de réaliser la configuration adéquate.

Tout d'abord choisir le mode « **Static** » car il permet de produire une position corrigée d'après la moyenne des données soumises. Le récepteur GPS U-BLOX 6 reçoit une seule fréquence L1 qu'elle faut aussi choisir dans la configuration. Les démarches pour cette configuration sont :

RTKPOST / Option :

Setting1 (fig. 24) / Positioning Mode: « Static » / **Frequencies:** « L1 » / Cocher « GPS »

Setting2 (fig. 25) / Solution format: « Lat/ Long / Height » / **Datum ; Height :** « Ellipsoid » .

/ **Solution for static Mode:** « All » .

Position (fig.26) / Base station : « Lat/Long/height » / Entrer les coordonnées de la station de base Converties en WGS84, et l'altitude par rapport à l'ellipsoïde.

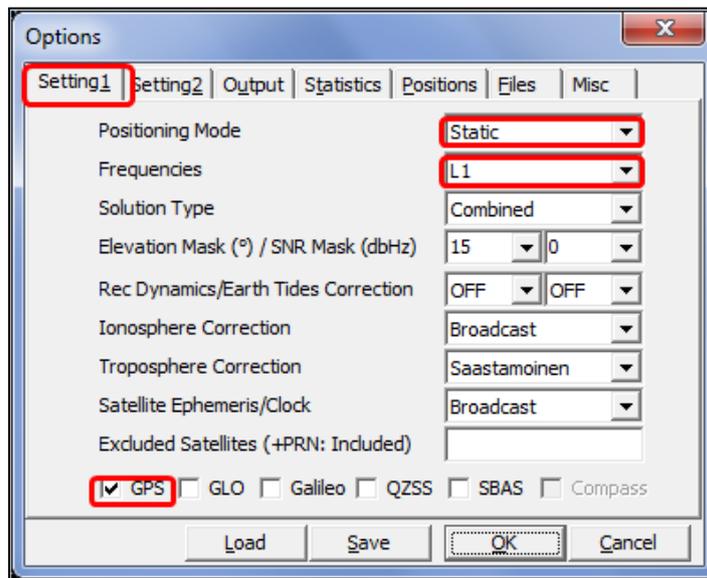


Figure 24 : fenêtre du logiciel RTKPOST montrant l'option Setting 1

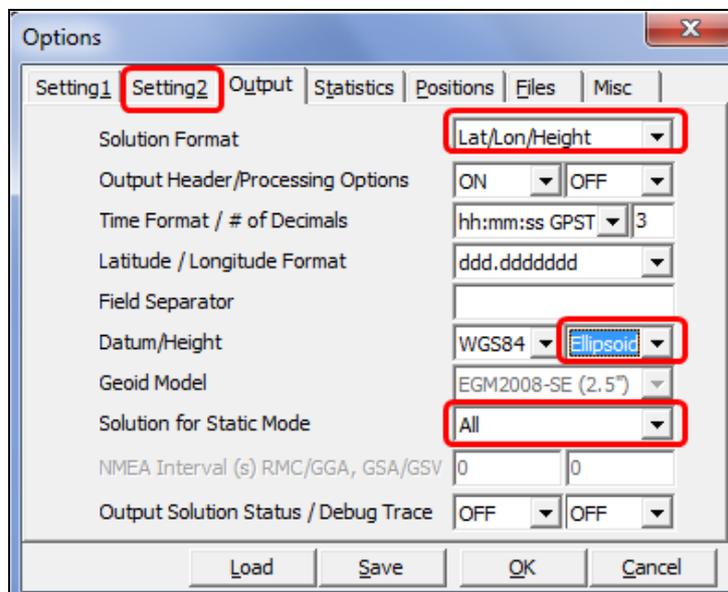


Figure 25 : fenêtre du logiciel RTKPOST montrant l'option Setting 2

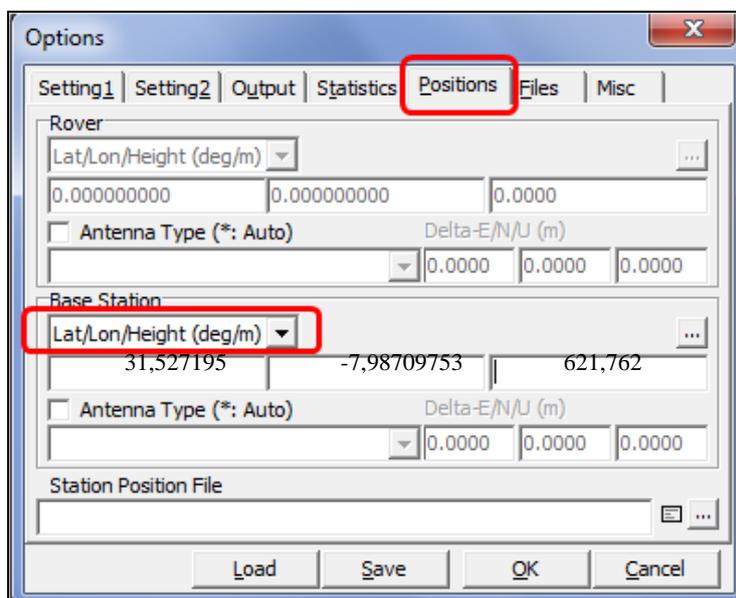


Figure 26 : fenêtre du logiciel RTKPOST montrant l'option Positions

☞ le post-traitement avec RTKPOST

Après la configuration de RTKPOST et la conversion des fichiers bruts, il faut entamer le post-traitement avec RTKPOST.

En suivant les étapes suivantes :

RTKPOST :

Time Start (GPST) : entrer la date et l'heure de départ de prise des données

Time End (GPST) : entrer la date et l'heure de fin de prise des données

Sachant que l'intervalle du temps pris doit être en commun des deux stations de base et mobile.

RINEX OBS : Rover : entrer le fichier des données brutes de la station mobile sous format RINEX OBS.

RINEX OBS : Base Station : entrer le fichier des données brutes de la station de base sous format RINEX OBS.

RINEX*NAV/CLK, SP3, IONEX or SBS/EMS:

Entrer dans la première case le fichier des données brutes de la station de base Sous format RINEX NAV.

Entrer dans la troisième case le fichier des données brutes de la station de base sous format RINEX SBS.

Cliquer sur « **Exécute** »

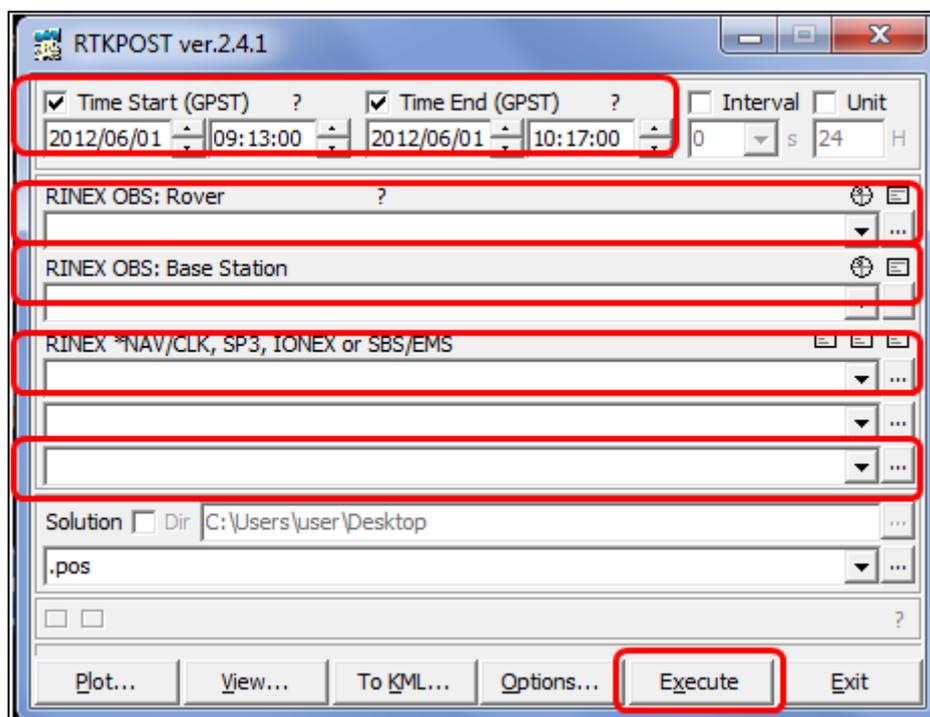


Figure 27 : le post-traitement avec RTKPOST

Le résultat est sous forme d'un seul fichier sous format RINEX, l'affichage du contenu de ce fichier se fait en cliquant sur le bouton **View**, une fenêtre s'ouvre et montre les informations décrites dans le tableau (1) ci-dessous.

Le fichier est séparé des dossiers ou des lignes par CR / LF. Chaque registre est constitué de champs. Le tableau suivant montre le format du fichier de solution de positionnement. Le suivi de l'évolution du post traitement sous formes des graphes est possible en cliquant sur la commande **Plot** qu'on va les interpréter dans la partie Application.

	Enregistrement / champ
tête de fichier	<p>Les lignes commençant par % sont des lignes d'en-tête. Les lignes d'en-tête contiennent des informations supplémentaires ou des options de traitement comme suit :</p> <p>Programme%: la version du programme Fichier inp%: chemin du fichier d'entrée % Obs commencer: données d'observation de l'heure de début dans le temps GPS % Obs fin: heure de fin d'observation des données en temps GPS % Pos mode: option de mode de positionnement Freqs%: option de Fréquences % De solution: l'option Type de solution % Elev masque: l'option Angle d'élévation masqué % IONOS HNE: ionosphérique option de l'estimation des paramètres % Tropos HNE: troposphérique option de l'estimation des paramètres % Res amb: Intègre options de résolution de l'ambiguïté % Val Seuil: Intègre option de validation d'ambiguïté % Ref pos: position de l'antenne de la station de base</p>
Temps	<p>Le temps de l'époque de la solution en indiquant le signal du récepteur vrai temps de réception (pas indique le temps par l'horloge du récepteur . Le format fait varier les options. aaaa / mm / jj HH: MM: ss.sss: Calendrier du temps dans GPST, UTC ou JST, le système temps est indiqué en afficheur de terrain SSSSSSS.SSS WWWW: GPS semaine et TOW (moment de la semaine en quelques secondes.</p>
récepteur position	<p>Le rover antenne de réception ou de la position du marqueur estimé variait selon les options de positionnement. + ddd.ddddddddd ddd.dddddddd hhhh.hhhh: Latitude, longitude en degrés et la hauteur en m. Moins la valeur signifie de latitude sud ou l'ouest de longitude. La hauteur indique ellipsoïdale ou géodésiques, selon les options de positionnement. + ddd mm ss.sss + ddd mm ss.sss hhhh.hhhh: Latitude, longitude en degrés, minutes et secondes et la hauteur en m. + + eeeeeeeee.eeee nnnnnnnnn.nnnn + uuuuuuuuu.uuuu: E / N / U composantes du vecteur de base en m. Le repère local est rapport à la position rover.</p>
qualité de drapeau (Q)	<p>Le drapeau qui indique la qualité de la solution. 1: fixe, la solution par le transporteur basé sur le positionnement relatif et l'ambiguïté entière est correctement réglé. 2: Float, une solution par le transporteur de positionnement relatif, mais la ambiguïté entière n'est pas résolu. 3: Réservee 4: DGPS, la solution par des solutions basées sur du code DGPS ou un point positionnement avec corrections SBAS 5: simple, solution par le positionnement par point unique</p>
nombre de satellites valides (ns)	Le nombre de satellites valides pour l'estimation de la solution.
standard écarts (SDN, sde, SDU, sdne, sdeu, sdun)	<p>Les écarts-types estimés de la solution en supposant a priori le modèle d'erreur et des paramètres d'erreur par les possibilités de positionnement. La SDN, sde ou sdu moyen N (nord) , E (est) ou U (haut composante des écarts-types de m. La valeur absolue de sdne, sdeu ou sdun signifie racine carrée de la valeur absolue de la NE,</p>

	Composante de l'UE ou des Nations Unies de la matrice de covariance estimée. Le signe représente le signe de la covariance. Avec toutes les valeurs, l'utilisateur peut reconstruire la matrice de covariance pleine.
Âge de différentiel (l'âge)	La différence de temps entre les époques de données d'observation de la récepteur mobile et de base.
facteur de rapport (rapport)	Le facteur de rapport de test pour l'ambiguïté entiers standard stratégie de validation. La valeur, le rapport de la somme quadratique des l résidus avec le second vecteur meilleure entier avec le meilleur vecteur entier

Tableau 1 : Signification des différents paramètres de fichier post obtenu par le RTKPOST

```

% program : RTKLIB ver.2.3.0b
% inp file : G:\rtklibtest\20090831\omre196a.09o
% inp file : G:\rtklibtest\20090831\tevc196a.09o
% inp file : G:\rtklibtest\20090831\omre196a.09n
% obs start : 2009/07/15 07:10:00.0 GPST (week1540 285000.0s)
% obs end : 2009/07/15 07:59:50.0 GPST (week1540 287990.0s)
% pos mode : kinematic
% freqs : L1+L2
RTKLIB ver. 2.4.1 Manual
74
% solution : forward
% elev mask : 15.0 deg
% snr mask : 0.0 dBHz
% ionos est : on
% tropo est : on
% amb res : continuous
% val thres : 3.0
% ref pos : 32.574831620 -117.126551777 -28.1471
%
% (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,4:dgps,5:single,ns=# of satellites)
% GPSTlatitude(deg) long (deg) heght(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdne(m) sdeu(m) sdun(m) age(s) ratio

2009/07/15 07:10:00.000 32.560273272 -116.953525346 118.6783 1 10 0.0186 0.0202 0.0899 -0.0072 0.0089 -0.0249 0.00 4.5
2009/07/15 07:10:10.000 32.560273266 -116.953525340 118.6877 1 10 0.0144 0.0154 0.0776 -0.0058 0.0082 -0.0199 0.00 5.3
2009/07/15 07:10:20.000 32.560273262 -116.953525365 118.6853 1 10 0.0124 0.0131 0.0720 -0.0051 0.0078 -0.0173 0.00 5.3
2009/07/15 07:10:30.000 32.560273251 -116.953525345 118.6825 1 10 0.0111 0.0117 0.0686 -0.0046 0.0075 -0.0157 0.00 5.6
2009/07/15 07:10:40.000 32.560273275 -116.953525412 118.6827 1 10 0.0103 0.0108 0.0662 -0.0043 0.0073 -0.0146 0.00 4.7
2009/07/15 07:10:50.000 32.560273277 -116.953525429 118.6812 1 10 0.0097 0.0102 0.0644 -0.0041 0.0071 -0.0138 0.00 4.1
2009/07/15 07:11:00.000 32.560273249 -116.953525449 118.6817 1 10 0.0092 0.0097 0.0630 -0.0039 0.0069 -0.0132 0.00 4.2
2009/07/15 07:11:10.000 32.560273271 -116.953525464 118.6729 1 10 0.0088 0.0093 0.0618 -0.0038 0.0067 -0.0127 0.00 5.2
2009/07/15 07:11:20.000 32.560273246 -116.953525468 118.6772 1 10 0.0085 0.0089 0.0607 -0.0037 0.0066 -0.0123 0.00 6.1
2009/07/15 07:11:30.000 32.560273219 -116.953525461 118.6733 1 10 0.0083 0.0087 0.0598 -0.0036 0.0065 -0.0119 0.00 7.9
2009/07/15 07:11:40.000 32.560273216 -116.953525478 118.6771 1 10 0.0081 0.0085 0.0590 -0.0035 0.0064 -0.0117 0.00 9.0
2009/07/15 07:11:50.000 32.560273206 -116.953525489 118.6726 1 10 0.0079 0.0083 0.0582 -0.0035 0.0062 -0.0114 0.00 8.6
2009/07/15 07:12:00.000 32.560273201 -116.953525497 118.6744 1 10 0.0078 0.0081 0.0575 -0.0034 0.0061 -0.0112 0.00 7.5
2009/07/15 07:12:10.000 32.560273212 -116.953525455 118.6731 1 10 0.0077 0.0080

```

Figure 28 : Un extrait de fichier post du logiciel RTK

a. Analyse des résultats

L'analyse des résultats se fait en fonction de la valeur d'un paramètre noté Q, qui signifie la qualité des solutions des données pour le positionnement calculé :

Q =1 : la meilleure solution possible;

Q =2 : solution avec ambiguïté;

Q =5 : manque de prise de données brutes de la station de base ou impossibilité de trouver une solution DGPS.

Enfin il faut analyser les résultats statistiquement pour chercher la moyenne des solutions Q=1 afin d'obtenir le positionnement calculé.

TROISIEME PARTIE :
APPLICATION
PRATIQUE

Introduction :

Afin de tester la méthodologie citée ci-dessus, dans la deuxième partie, une mission de trois jours séparés a été réservée à la prise de données sur des points dont les coordonnées sont connues. Le lieu de prise des données se situe dans la région de Marrakech.

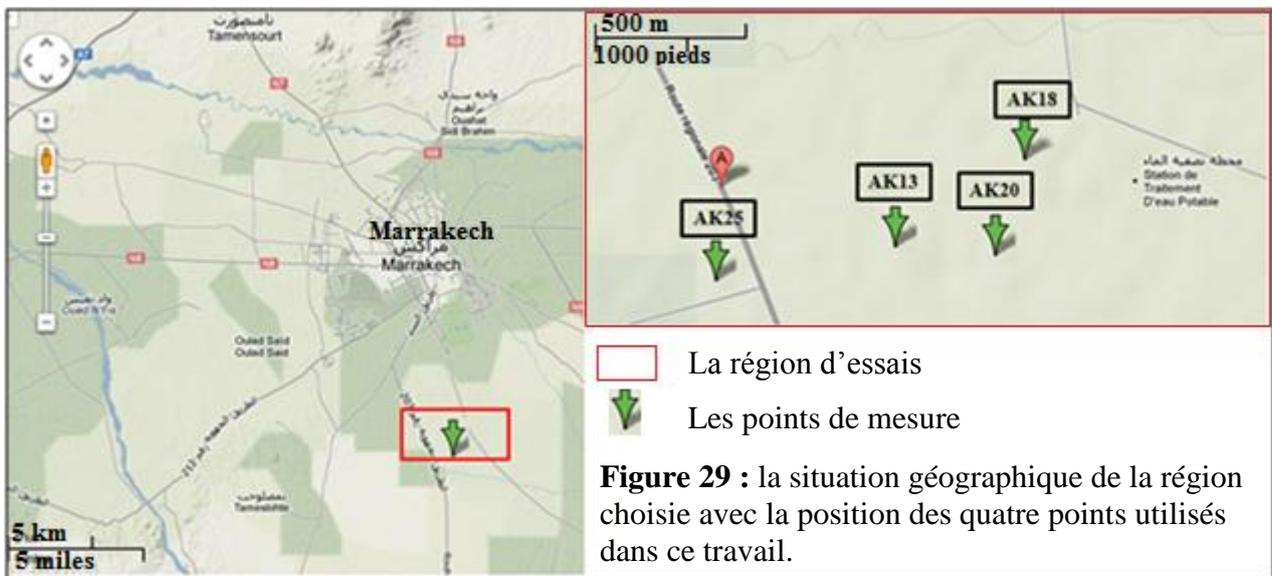
I. Situation géographique du site et conditions de prise des données

Pour l'application de la méthode décrite ci-dessus on a choisit une région située à 12 Km de Marrakech sur la route de Tahanaout (**fig.29**), le choix de cette région n'était pas au hasard mais parce qu'elle présente plusieurs points dont les coordonnées (X, Y, Z) sont connues suite à des travaux topographiques.

La région est complètement dégagée (peu de végétation, pas de construction), il n'y aura donc pas ou peu d'erreur induite par des multi-trajets. La météo est claire ($T^{\circ}=26.2^{\circ}$), Pression atmosphérique : 1014 HPa, pas de pluie pour le 25/05/2012), et conditions équivalentes pour les autres prises, il y a sans doute peu de perturbation troposphérique.

On a effectué trois essais dans cette région en faisant augmenter à chaque fois la distance entre la station de base AK13 qui est maintenue fixe durant les trois essais et les différentes stations mobiles (**fig.30**).

Pour vérifier la performance de notre méthode on a essayé de choisir une longue distance en gardant toujours la même station de base AK13 alors que la station mobile est située à Kelâa Essraghna.



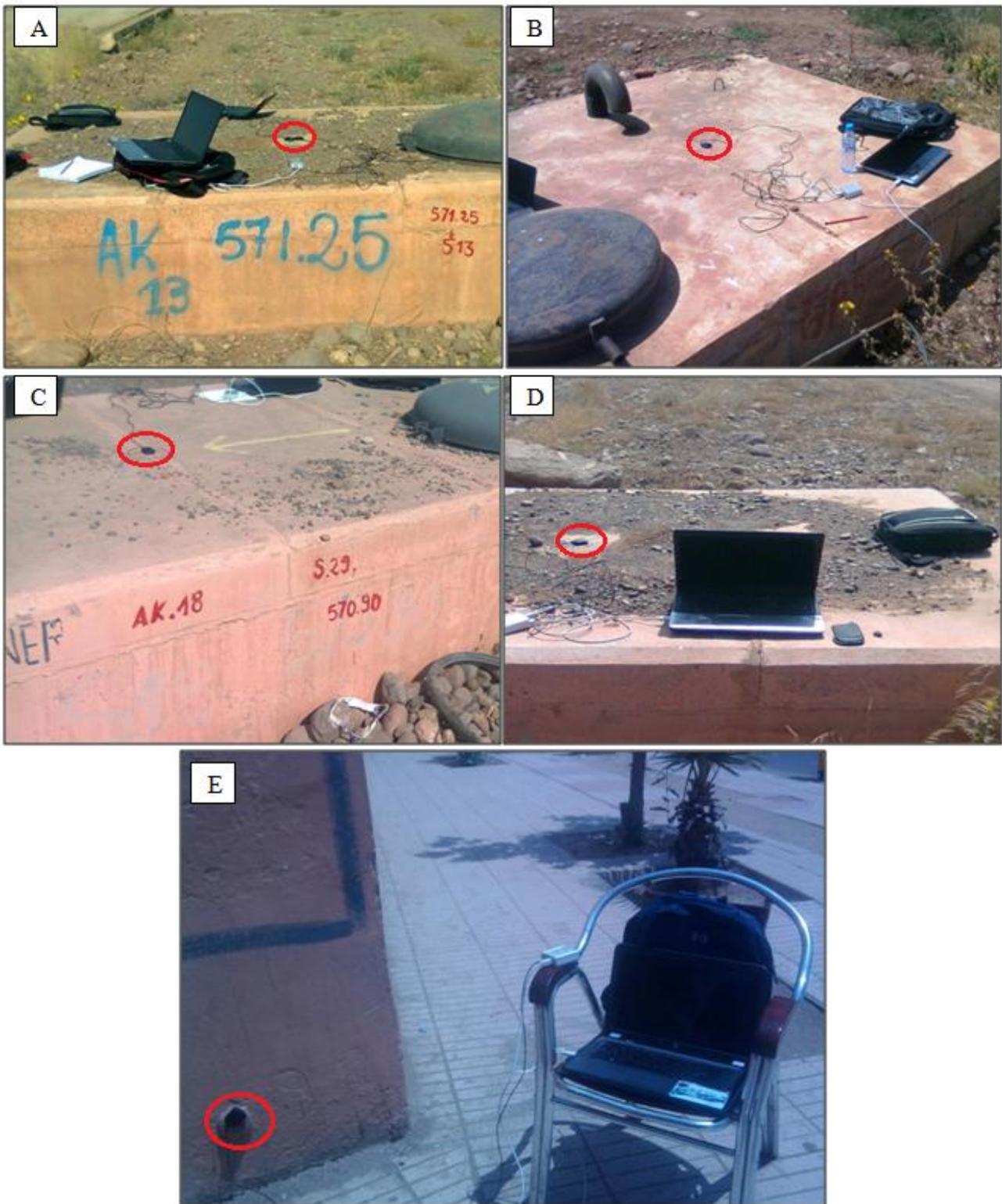


Figure 30 : A : photo de AK 13 station de base ;B : photo de AK20 loin de la station de base de 546m ; C : photo de AK18 lois de la station de base de 1600 m ;D :photo de AK25 lois de la station de base de 2000 m ; E : photo de La station de Kelàa est loin de la station de base de 87km

II. Analyse des résultats

a. Méthode de DGPS (GPS Différentiel)

1^{er} essai :

Pour cet essai on a choisi deux points espacés de 546 m, la station de base est attribuée au point AK13 dont les coordonnées sont les suivant :

Datum	X	Y	Z
Merchich(m)	254141.774	106783.775	571.26
Merchich (Deg)	31.527195736	-7.987097374	571.26
WGS 84 (Deg)	31.52719518N	-7.98709753	621.76

La station mobile le point AK20 dont les coordonnées sont :

Datum	X	Y	Z
Merchich(m)	254685.583	106823.720	570.884
Merchich (Deg)	31.53017	7.98295	570.884
WGS 84 (Deg)	31.52767667	-7.98138442	621.392

Après avoir lancé la prise des données brutes pendant une durée d'une heure, et après la conversion du format du fichier UBX en format RINEX on obtient (**fig.31**) :

A partir de ces figures ci-dessous on peut remarquer que le nombre des satellites captés ainsi que leurs positionnement pour les deux stations sont les mêmes, et que la plupart du temps, 8 satellites étaient visibles.

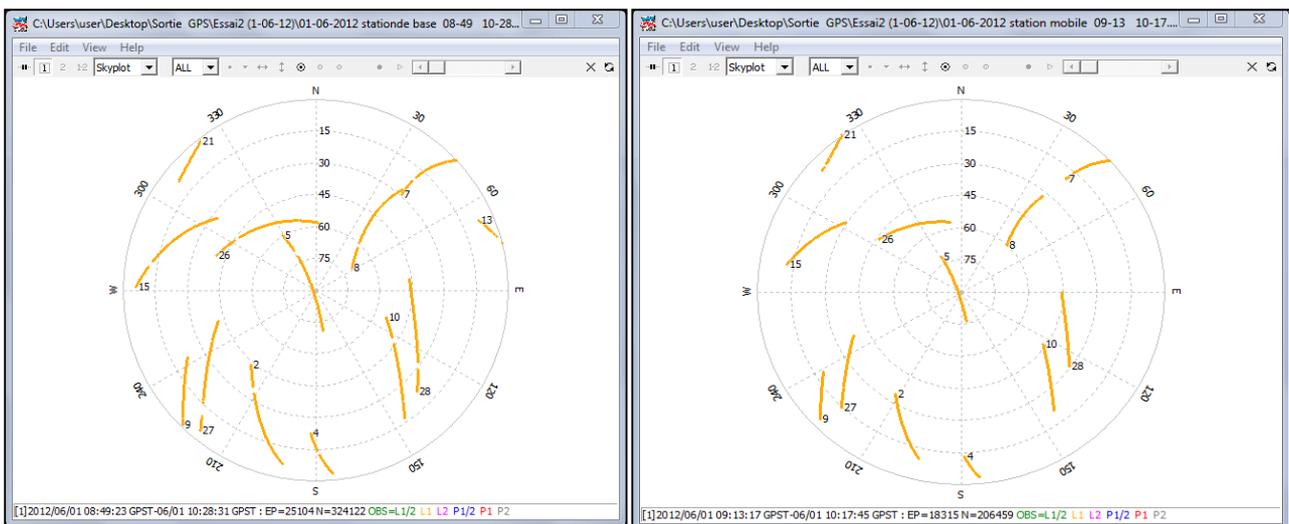


Figure 31 : Distribution des satellites captés à la station de base AK13 (gauche) et mobile AK 20 (droite)

Remarque : le trait orange signifie l'intensité de la fréquence L1 captée par le récepteur GPS

Après le post-traitement des fichiers convertis les résultats se présentent sous plusieurs formes:

- Le graphe (**fig.32**), présente le positionnement des résultats obtenu par le post-traitement, en deux dimension X, Y, on remarque qu'il existe deux types de solutions :

- En orange, les solutions « Float » $Q=2$ (2,2 %).
- En vert, les solutions « Fixed » $Q=1$ (97,8%).

On note que la majorité des points sont répartis dans un espace de 14Cm^2 .

La valeur élevée de $Q = 1$ (97,8%) (Sachant que $Q=1$ est la meilleure solution), signifie que 97,8% des données brutes ont été corrigées en retranchant l'erreur déjà établie dans la station de base alors que la valeur $Q=2$ signifie que 2,2 % des données brutes ont subi des perturbations dues à des ambiguïtés notamment la différence de l'intensité de la fréquence L1 pendant leurs corrections.

- Le graphe (**fig.33**) : d'après ce graphe on peut dire que les résultats sont meilleurs car la différence du maximum des coordonnées est presque de 1 à 2 cm dans la position horizontale (N-S / E-W), est presque de 3 à 4 cm dans la position verticale (U-D).

Une Analyse des données a permis de noter certaines remarques sur quelques des intervalles précis de temps de prise de données ainsi :

- Entre 9h:25mn et 9h:30mn, on note le paramètre $Q = 2$ (float) qui signifie qu'il y a quelque chose qui a perturbé la mesure. Cette perturbation peut s'expliquer par le point d'observation qui a bougé, ou bien, le signal émis par les satellites est distribué à cause de l'ombre ou du multipath.
- A 9h:38mn, on observe un décalage dans les coordonnées, surtout dans la composante du Nord-Sud et d'altitude (U-D), la même remarque peut se faire pour la période entre 10h:10mn et 10h:15mn.

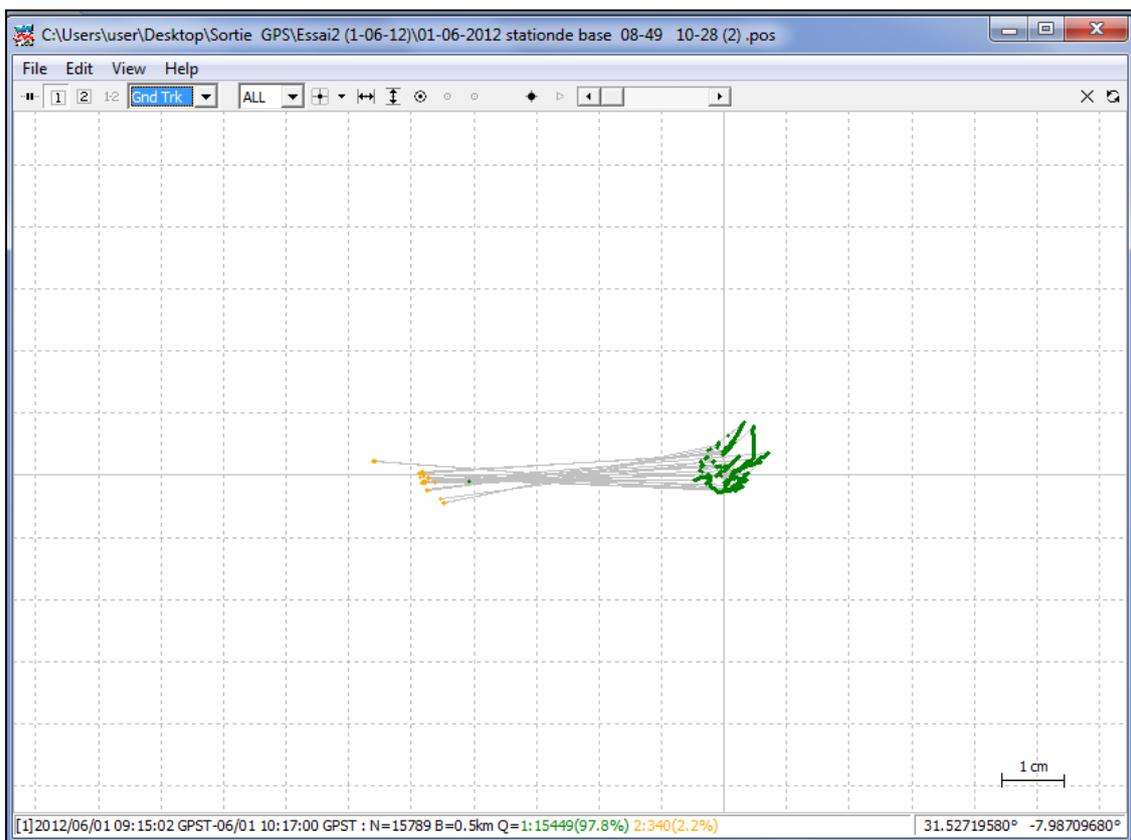


Figure 32 : Le positionnement des résultats obtenu par RTKPOST pour AK20 en deux dimension X,Y

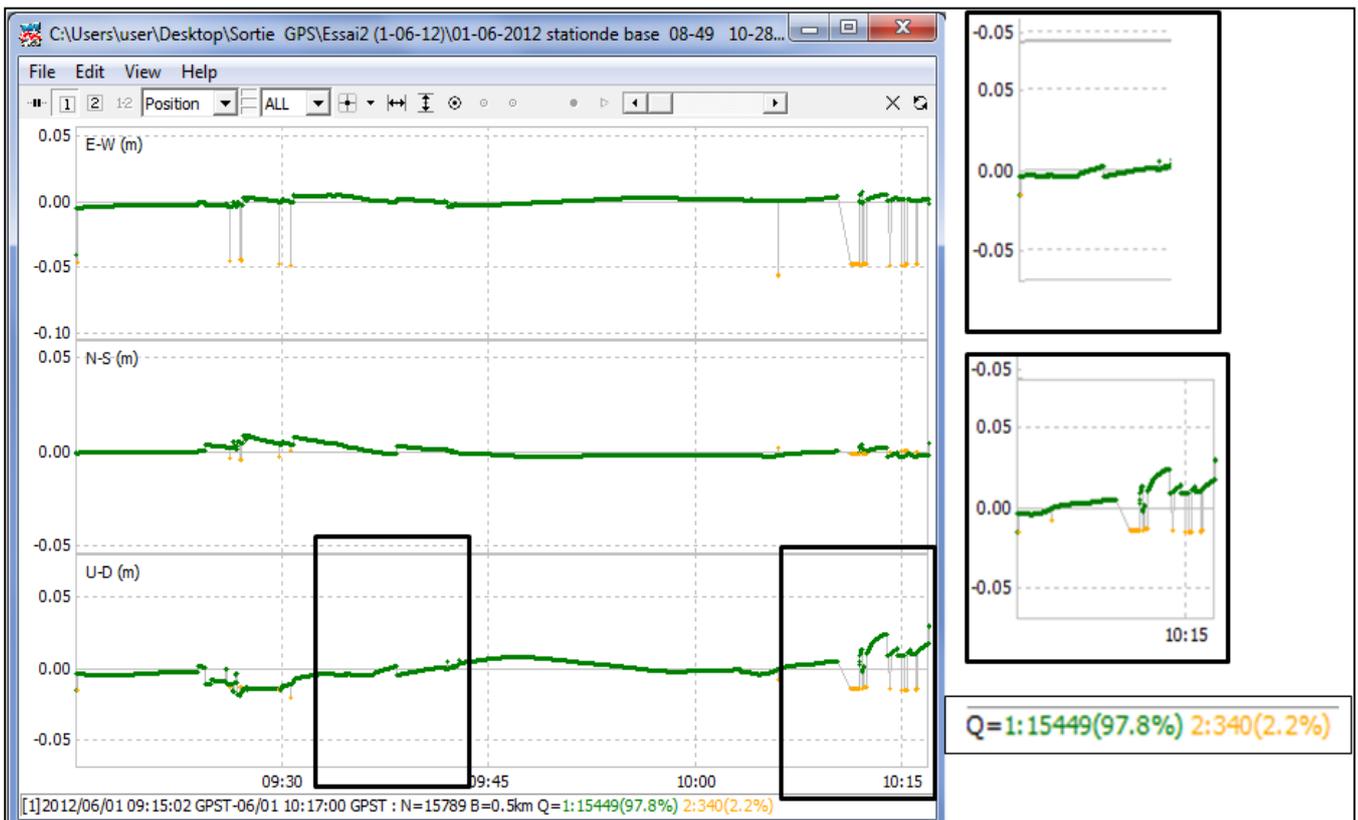


Figure 33 : La variation des résultats obtenus par RTKPOST dans le temps (abscisses) en fonction de la position horizontale et verticale (ordonnées).

Pour obtenir les coordonnées de positionnement de la station mobile on doit calculer la moyenne des résultats obtenus pour Q=1 en utilisant Excel.

Le tableau suivant résume ce calcul :

Coordonnée calculé	X= Calculé (deg).	Y= Calculé (deg).	Z= Calculé (m)
Moyenne Q =1	31,52719528	-7,987097427	621,740

Le tableau suivant compare l'altitude Z calculé avec celle connue :

Z= Calculé (m)	Z=Réel (m)	l'erreur (m)
621,7403615	621,762	0,021

D'après ce tableau on note que cet essai nous a donné comme résultat une précision de +/- 2,16 cm en altitude pour une distance de **0,546 Km**.

2^{ème} essai :

Pour cet essai la distance entre les deux stations est augmentée. Les deux points de prise de données sont espacés de 1600 m, on a choisi comme station de base toujours le point AK13, et comme station mobile le point AK18 dont les coordonnées sont :

Datum	X	Y	Z
Merchich (m)	254685,583	106823,720	570,884
Merchich (Deg)	31.53017	-7.98295	570.884
WGS 84 (Deg)	31.5262729	-7.9699141	621.380

Après traitement de données, l'examen du graphe de distribution des satellites (**fig.34**) on aboutie aux mêmes résultats que l'essai précédent (Fig.31) c'est-à-dire que le nombre des satellites captés ainsi que leurs positionnement pour les deux stations sont les mêmes et que l'intensité de la fréquence L1 est plus étendue dans la station de base que la station mobile.

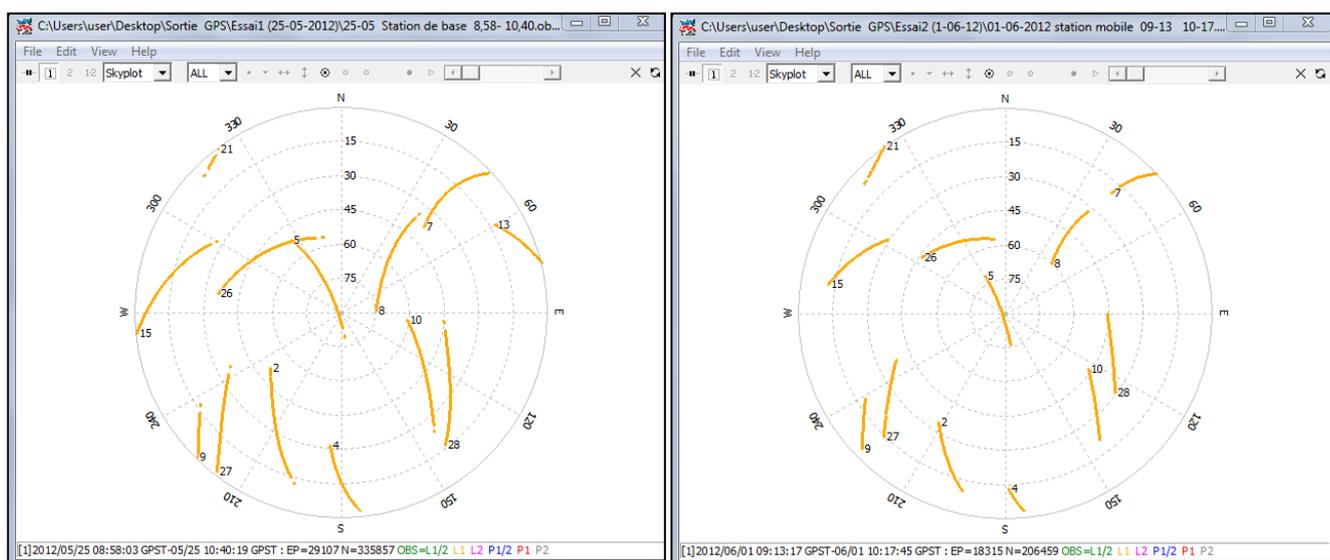


Figure 34 : Distribution des satellites captés à la station de base AK13 (gauche) et mobile AK 18 (droite)

Après le post-traitement des fichiers convertis on obtient les informations suivantes et représentées sur les figures (35et36) :

- Le graphe (**fig.35**) : montre qu'il existe deux types de solutions :
 - En vert, les solutions « Fixed » Q=1 (96,9%).
 - En orange, les solutions « Float » Q=2 (3,1 %).

On note que la majorité des points sont répartis dans un espace de 324 cm².

- Le graphe (**fig.36**) : montre que la différence de maximum des coordonnées est presque 2cm dans la position verticale alors qu'elle est égale à 1 cm dans la position horizontale. On peut noter aussi que :
 - Entre 09h:25mn -09:32 et 10 :10-10 :15 : on a l'apparition de la solution Q=2 qui est due à des ambiguïtés qui ont perturbé les mesures.

- A 9h:38mn, on voit un décalage dans les coordonnées, surtout dans la composante du Nord-Sud et d'altitude (U-D).

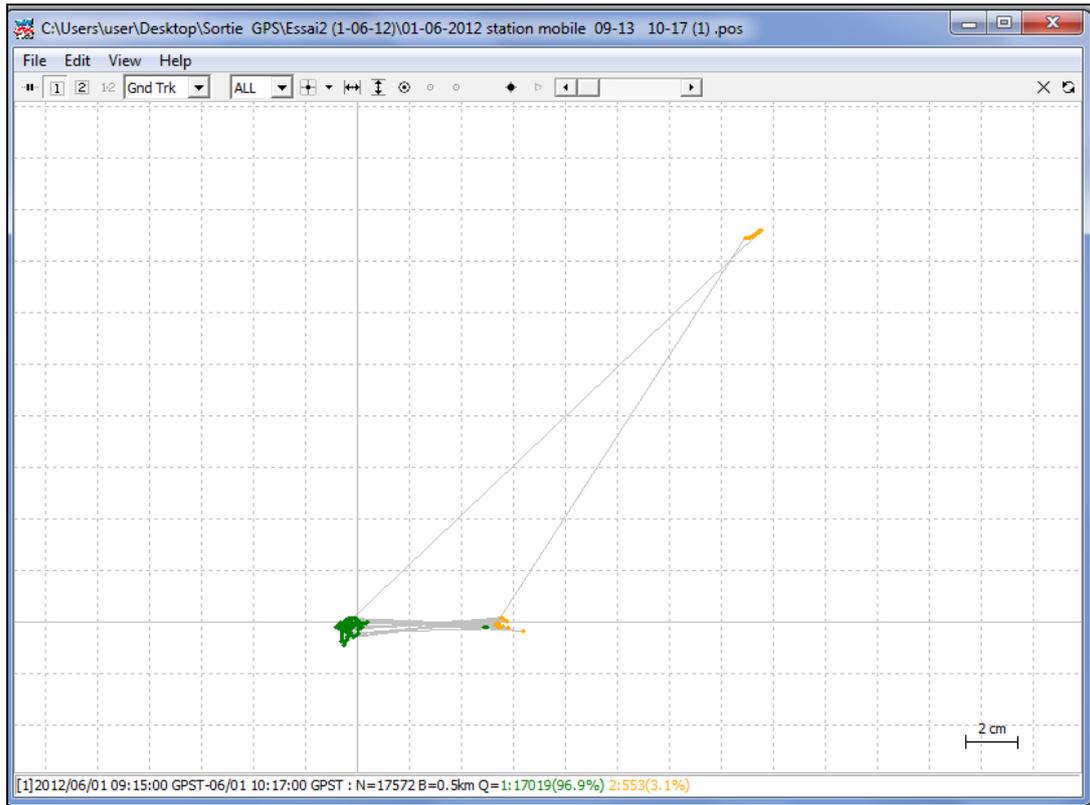


Figure 35 : Le positionnement des résultats obtenu par RTKPOST pour AK20 en deux dimension X,Y

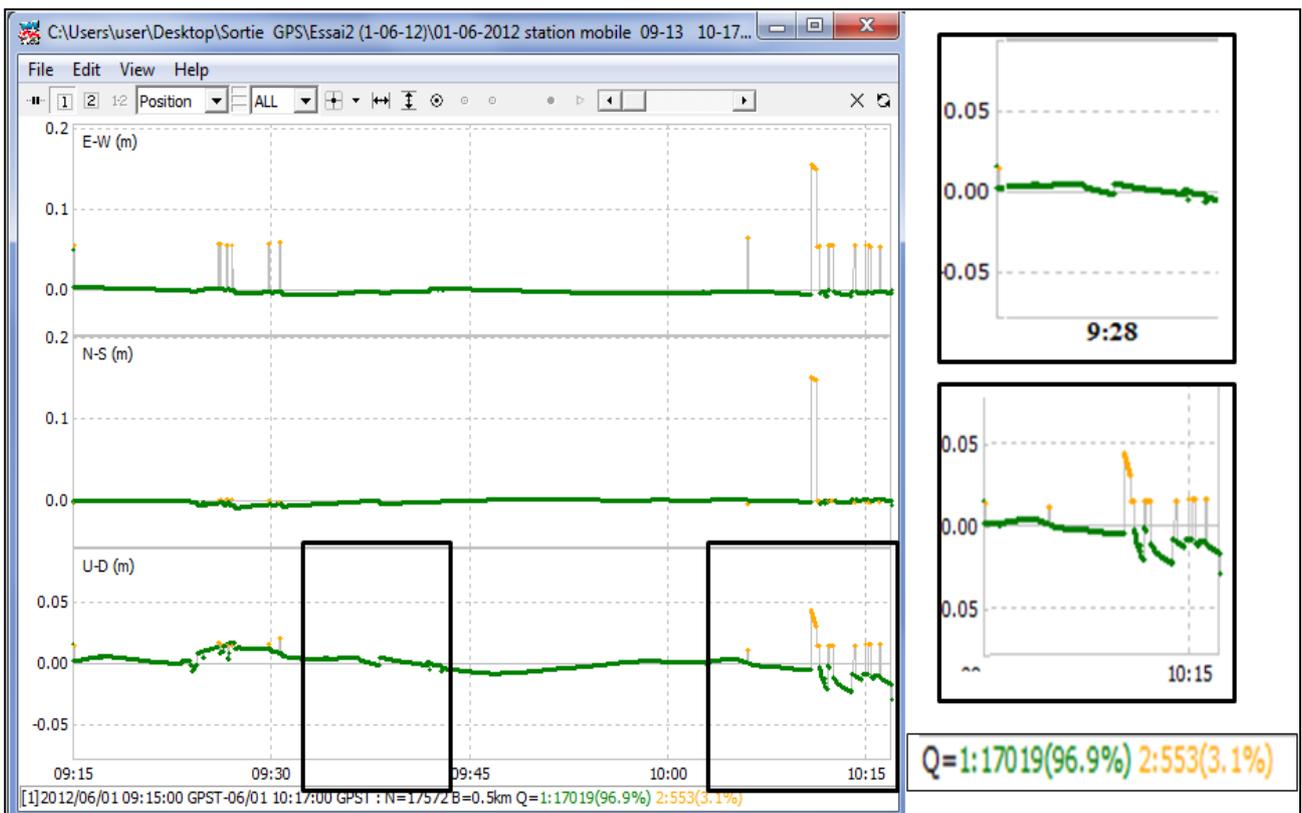


Figure 36 : La variation des résultats obtenus par RTKPOST dans le temps (abscisses) en fonction de la position horizontale et verticale (ordonnées)

Pour obtenir les coordonnées de positionnement de la station mobile on doit calculer la moyenne des résultats obtenus pour $Q=1$.

Le tableau suivant résume ce calcul :

Coordonnée calculé	X= Calculé (deg)	Y= Calculé (deg)	Z= Calculé (m)
Moyenne Q=1	31,5276766	-7,981384501	621,414

Le tableau suivant compare l'altitude Z calculé avec celle connue :

Z= Calculé (m)	Z=Réel (m)	l'erreur (m)
621,264	621,38	0,0340

Conclusion ; les résultats du traitement des données prise dans ce deuxième essai ont donné une précision de +/- 3,4 cm en altitude pour une distance de 1,6 Km entre la station de base et la station mobile.

3^{ème} essai :

Dans le troisième essai la distance entre deux points est de 2 km. La station de base reste AK13. La station mobile est située au point AK25 dont les coordonnées sont :

Datum	X	Y	Z
Merchich(m)	254685,583	106823,720	571,654
Merchich (Deg.)	31.53017	-7.98295	571,654
WGS 84 (Deg.)	31,5262729	-7,9699141	621,162

Après avoir lancé la prise des données brutes pendant une duré d'une heure, et après la conversion du format du fichier UBX en format RINEX on note une distribution des satellites visibles identiques aux essais précédents.

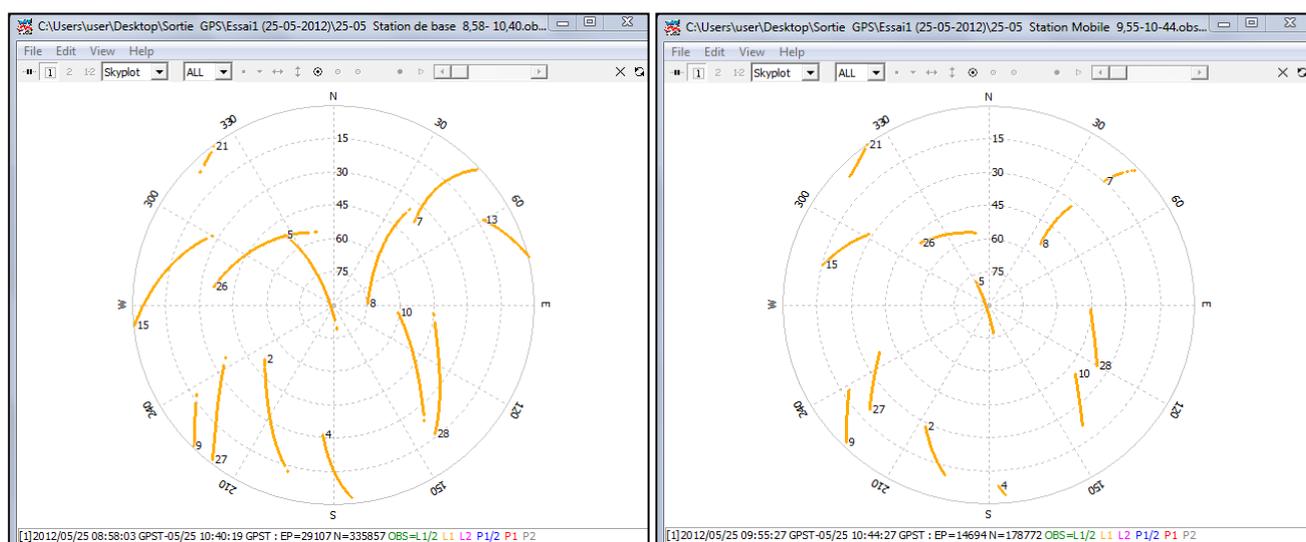


Figure 37 : Distribution des satellites captés à la station de base AK13 (gauche) et mobile AK 25 (droite)

Après le post-traitement des fichiers convertis du troisième essai on note l'existence de trois solutions dégagées de **la figure 38** :

- En vert, les solutions « Fixed » Q=1 (85,5%) .
- En orange, les solutions « Float » Q=2 (5,6 %) .
- En rouge, les solutions « single » Q=5 (8,9%)

On note que la majorité des points sont répartis dans un espace de $3,96 \text{ m}^2$. La solution Q= 5 apparait lorsqu'on reçoit les données de la station mobile sans recevoir celles de la station de base au même temps, dans cet essai on a 5,6% de ces données.

La proportion élevée de Q=1 (Sachant que Q=1 est la meilleure solution), signifie que 85,5% des données brutes ont été corrigé en résolvant l'ambiguïté de phase initiale alors que la valeur Q=2 signifie que 8,9% des données brutes ont subis des perturbations dues à des ambiguïtés notamment la différence de l'intensité de la fréquence L1 pendant leurs correction.

Sur le graphe de la figure 39 on remarque que la différence de maximum des coordonnées est presque nulle dans la position verticale alors qu'elle est égale à 1 cm dans la position horizontale.

On peut marquer aussi que :

- Au début de la mesure (9h:55mn), on a l'apparition de Q=2 (float), ce qui peut être due au fonctionnement du récepteur qui nécessite du temps pour être stabiliser pour détecter le maximum des satellites.
- Entre 10h:34mn et 10 :38, on a l'apparition du Q=5 (fixed), ce qui signifie qu'il y a un manque de réception des données par la station de base.
- Entre 10h:38mn et 10 :40, on a la solution Q=2, ce qui peut être due au commencement du récepteur à recevoir les données après être arrêté pendant une période de 10 :34 à 10 :38.

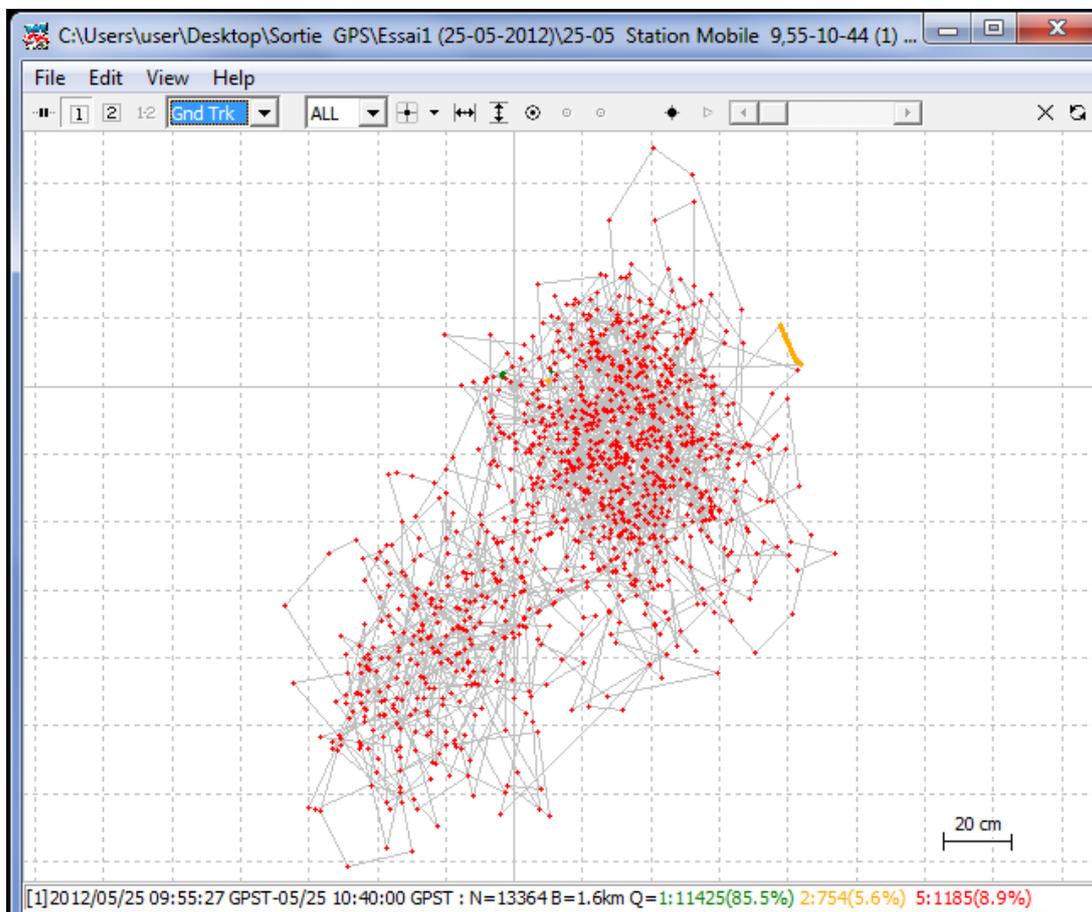


Figure 38: Le positionnement des résultats obtenu par RTKPOST pour AK25 en deux dimension X,Y

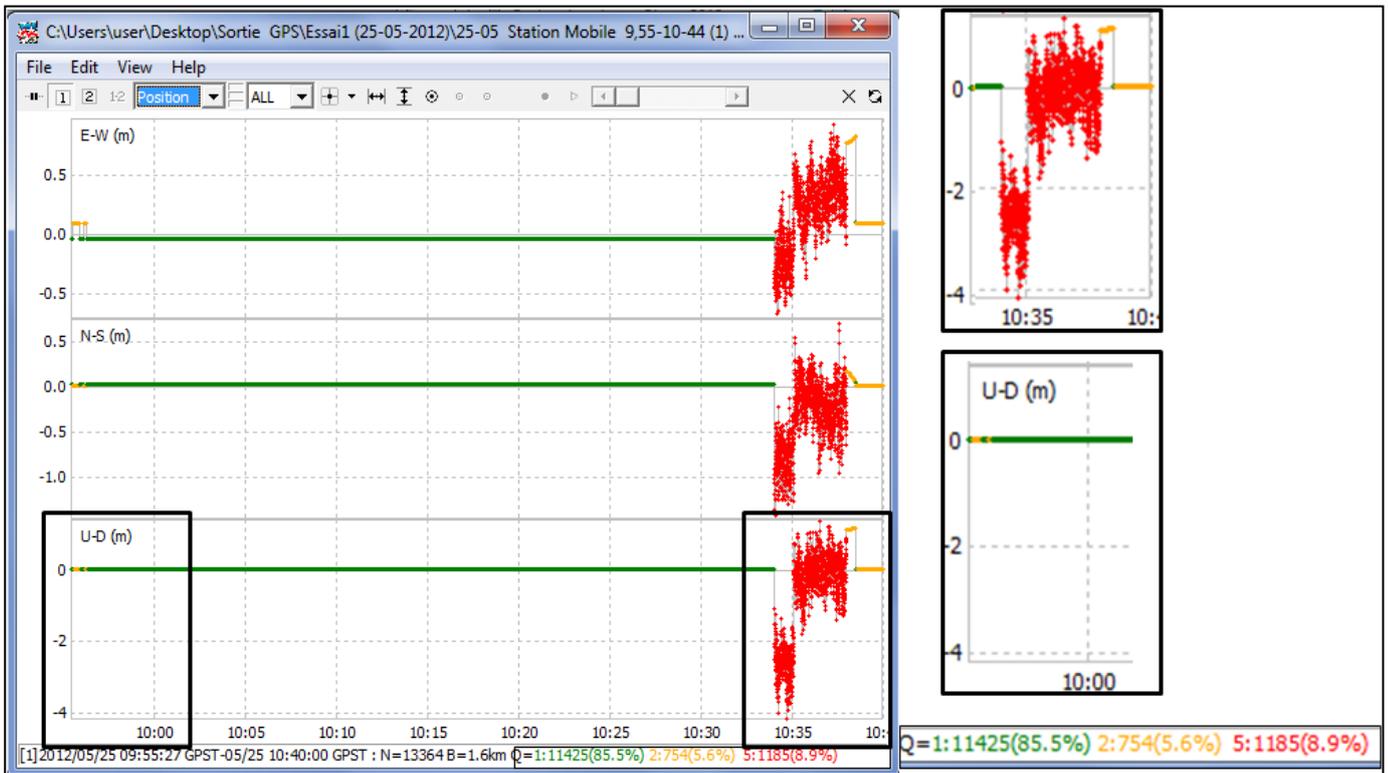


Figure 39 : La variation des résultats obtenus par RTKPOST dans le temps (abscisses) en fonction de la position horizontale et verticale (ordonnées).

4^{ème} essai :

Dans ce quatrième essai, la distance entre les deux points est de 87km, la station de base est toujours le point AK13, et la station mobile est représentée par un point situé à Kelâa El Sraghna, situé en Marrakech et Beni Mellal et dont les coordonnées sont :

Datum	X	Y	Z
Merchich(m)	311017.91	164618.12	465,396
Merchich (Deg)	31.53017	7.98295	465,396
WGS 84 (Deg)	32,062464	-7,401663	515.9

Après avoir lancé la prise des données brutes pendant une durée d'une heure, et après la conversion du format du fichier UBX en format RINEX contrairement aux essais précédant, on a que le nombre des satellites captés ainsi que leurs positionnements pour les deux stations sont largement différents.

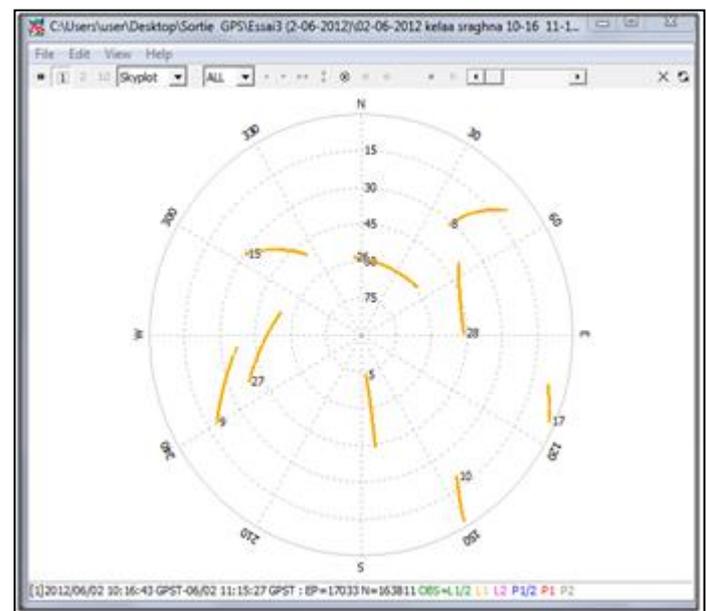
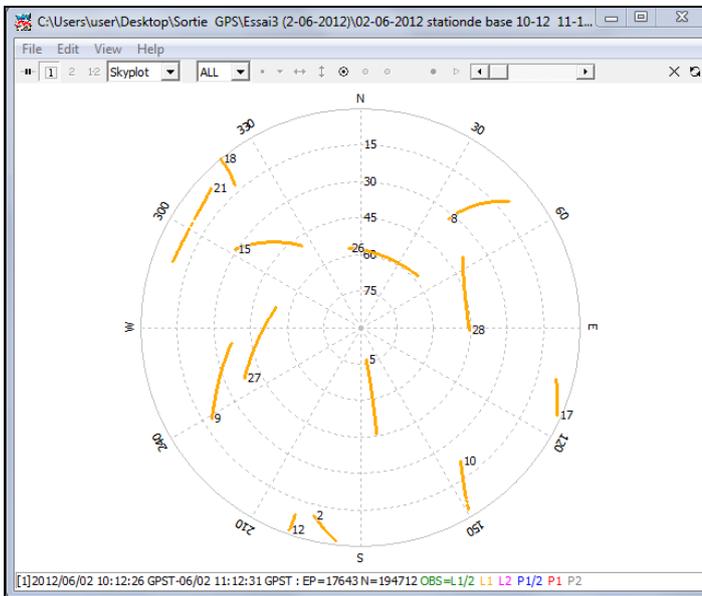


Figure 40 : Distribution des satellites captés à la station de base (gauche) et mobile Kelàa Sraghna (droite)

Après le post-traitement des fichiers convertis, trois types de solutions se présentent (**fig.41**)

- En vert, les solutions « Fixed » Q=1 (16,6%).
- En orange, les solutions « Float » Q=2 (79,4%).
- En rouge, les solutions « single » Q=5 (3,9%)

On note que la majorité des points sont répartis dans un espace de 1800 m². La solution Q = 5 apparaît lorsqu'on reçoit les données de la station mobile sans recevoir celles de la station de base au même temps, dans cet essai on a 3,9 % de ces données.

La valeur élevée de Q=1, signifie que 16,6% des données brutes ont été corrigées en retranchant l'erreur déjà établie dans la station de base, alors que la valeur Q=2 signifie que 79,4% des données brutes ont subies des perturbations dues à des ambiguïtés notamment la différence de l'intensité de la fréquence L1 pendant leurs correction.

Sur la figure du graphe (**fig.42**) : on peut marquer que Les résultats de cet essai sont moins importants vue le mélange des solutions Q=1, Q=2 et Q=5 dans le même intervalle du temps (qui ne dépasse pas quelques secondes).

Ceci qui peut être due à la grande distance prise entre les deux stations de base et mobile, ce qui peut favoriser l'influence du multipath.

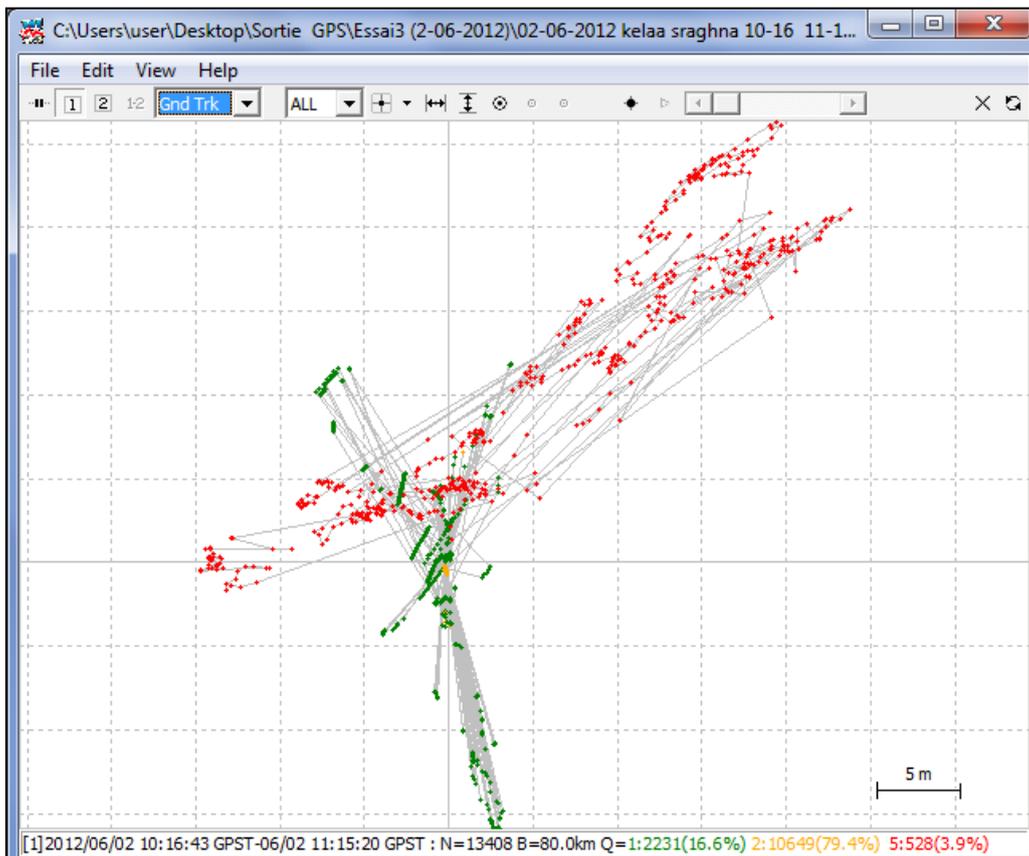


Figure 41 : Le positionnement des résultats obtenu par RTKPOST pour Kelaa Sraghna en deux dimension X,Y



Figure 42: La variation des résultats obtenus par RTKPOST dans le temps (abscisses) en fonction de la position horizontale et verticale (ordonnées).

Pour obtenir les coordonnées le positionnement de la station mobile on doit calculer la moyenne des résultats obtenus pour Q=1.

Le tableau suivant résume le résultat du calcul :

Coordonnée calculé	X= Calculé (deg)	Y= Calculé (deg)	Z= Calculé (m)
Moyenne Q=1	32,0523189	-7,4075597	527,321

Plusieurs services web existent sur internet permettant de faire du PPP. Le service gratuit du service canadien de géodésie CSRS (http://www.geod.nrcan.gc.ca/online_data_e.php) est le seul qui permet à ce jour d'effectuer le calcul en utilisant uniquement les données brutes de la phase porteuse L1.

Le calcul peut-être lancé soit à partir de leur site, soit en envoyant par email en utilisant le service <http://gge.unb.ca/Resources/PPP/>. Il suffit alors d'envoyer le fichier RINEX d'abord préparé avec RTKCONV. Le résultat est disponible une quinzaine de minute plus tard sous la forme d'un fichier PDF. La solution est donnée dans le référentiel ITRF08 qui est très proche de WGS84.

Les résultats obtenus pour la série complète de données brutes prise dans ce travail sont :

St. de base	St. mobile	distance	Z= Calculé (m)	Z=Réel(m)	l'erreur (m)	Précision
AK13	AK 18	1600m	621.093	621,38	0.30	30cm
AK13	kelâa	87000m	527.123	515,898	11.93	11,93 m

L'erreur sur AK18 est de seulement 30cm. L'erreur sur El Kalaa est du même ordre de grandeur avec les méthodes DGPS (11.4m) et PPP (11.9m). Etant donné que l'altitude de ce point sur le modèle numérique de terrain SRTM est de 523.6m, nous supposons que l'altitude du point de référence que nous avons utilisé est peut-être fausse.

Discussion et conclusion

L'objectif de l'étude consistait à étudier la possibilité d'utiliser des GPS low-cost pour les campagnes de terrain piézométriques, qui nécessitent une certaine précision verticale dans un temps restreint.

Nous avons utilisé un dispositif relativement économique (<10000 DH) en comptant les ordinateurs portables et uniquement des logiciels ou services gratuits. Les méthodes DGPS et PPP ont été testées.

La suite des traitements à réaliser et les configurations logicielles et matérielles qui ont été établies durant cette étude sont : prise de donnée, conversion Merichich-WGS84, conversion de l'altitude orthométrique à l'altitude ellipsoïdale, conversion au format RINEX, Post-traitement DGPS.

Le résultat du post-traitement DGPS a fourni des précisions verticales inférieures à 10 cm pour les points proches de la station de base (< 2km). Sur la station éloignée de Kelâa des Sraghna (87km), la marge est beaucoup plus grande (11m), mais la comparaison à la méthode PPP (50cm) et au modèle numérique de terrain SRTM (4.3m) laisse supposer que l'altitude de notre point de référence est fautive. L'erreur DGPS pour cette station éloignée est sans doute de l'ordre des 20cm.

Le post-traitement PPP, quant à lui, a donné une erreur de 30 cm pour la station de base. Il s'agirait cependant d'approfondir l'utilisation de cette méthode, notamment en ce qui concerne la durée de prise.

D'après les graphes de qualité de la solution, la durée de prise n'a pas besoin d'être très longue en DGPS. Après démarrage des GPS (2 minutes environ), une prise de 5 minutes semble suffisante pour résoudre les ambiguïtés. Cette durée augmente avec la distance entre les stations. Une prise de 30 minutes semble être raisonnable pour le point d'El Kelâa des Sraghna.

Au terme de ce travail nous concluons que la méthode DGPS est fonctionnelle : précision satisfaisante (< 10cm) et durée de prise courte (< 5min) si la ligne de base est courte. Pour des sites plus éloignés le temps de prise augmente et la précision semble diminuer. Dans le cas du DGPS, la position de la station de base doit être connue précisément. Ainsi, si une base doit être active en continu, il faudra préalablement établir un levé topographique de ce point.

Bien que cette courte étude n'a pas permis d'examiner un nombre important de situation (durée), distance entre base et rover, durée PPP et d'autres possibles configuration (utilisation des fichiers IGS), nos conclusions, sur les précisions d'altitude, rejoignent celles des documentations des GPS de qualité géodésique (Trimble, Leica...).

Recommandations

Vue la période du stage limitée, d'autres paramètres n'ont pas pu être examinés qui auraient pu améliorer la précision d'altitude, ainsi un certains nombres de recommandations sont nécessaires afin de continuer à augmenter la marge de précision d'altitude et à utiliser donc ces méthodes dans divers domaines :

Installer une base fixe sécurisée à coordonnées connues,

Tester des lignes de base croissantes, par exemple tout les 10 km,

Tester plusieurs antennes GPS pour choisir celle qui capte le plus,

Tester l'utilisation des fichiers IGS,

Chercher la durée minimale de prise des données pour les techniques DGPS et PPP.

Référence bibliographique

EL FETTAH .N: Vers une redéfinition du référentiel géodésique Marocain, 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003, 11 pages ;

François Cavayas: Introduction à la cartographie (GEO-1532) ; cours de l'Université de Montréal, Département de géographie, (2012), 171 pages;

Natural Resources Canada: GPS POSITIONING GUIDE ; Publié par l'autorité de Ressources naturelles Canada, (1995), 123 pages;

Jean –luc cosandier,: PRINCIPES GENERAUX DE LA LOCALISATION PAR GPS, Publié par l'autorité de Ressources naturelles Canada, (2003), 130 pages ;

Trimble Tutorial,: Tout sur le GPS, étape par étape..., traduit en français par Claude Lalande, (2000), 19 pages ;

Dr. Neil D. Weston, United States : Cost Effective GNSS Positioning Techniques, FIG Commission 5 Publication, 1999, 49 pages.

Site Web consulté :

http://terrageog.lemig2.umontreal.ca/donnees/geo1532/NOTES/GEO1532_Notes_2012.pdf

<http://support.esrifrance.fr/documents/generalites/projections/generalites/generalites.htm>

<http://zoumine.free.fr/tt/navigation/defellipsoide.gif>

<http://zoumine.free.fr/tt/navigation/defellipsoide.gif>

<http://zoumine.free.fr/tt/navigation/defellipsoide.gif>

http://www.sat-info.fr/page/infostechniques/syst_coord/cartesien.jpg

<http://rofmr.gratisim.fr/Images/3.3.1ProjEquiAzim.jpg>

www.scribd.com/doc/88299467/TS6-2-elfettah

www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS6/TS6_2_elfettah.pdf

www.ensit.ma/biblio/GENIE%2520CIVIL/M03-Topographie-elementaire1-Initiation-BTP

<http://math.15873.pagesperso-orange.fr/WGS84Notice.html>

zogg-jm.ch/Dateien/GPS_Compndium GPS-X-02007 .pdf

http://french.china.org.cn/china/archives/aerospatialechine/2011-08/23/content_23264115.htm

zogg-jm.ch/Dateien/GPS_Compndium GPS-X-02007 .pdf

<http://eduscol.education.fr/localisation/pedago/geologie/GPS.htm>

http://www.ccg-gcc.gc.ca/eng/CCG/DGPS_How_It_Works

http://www.3grt.fr/Comprendre_le_GPS.html

http://mayerwin.free.fr/gnss_controle_clip_image001_0002.jpg

http://www.geod.nrcan.gc.ca/online_data_e.php

[http://gge.unb.ca/Resources/PPP/.](http://gge.unb.ca/Resources/PPP/)