

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمّار تليجي بالأغواط

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT



كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الهندسة المدنية

DEPARTEMENT DU GENIE CIVIL

*Mémoire de projet de fin d'étude en vue de l'obtention*

*du diplôme Master 2 : Sciences et techniques  
topographiques*

Présenté par :

**Rahmani Mohamed El Amine**

Intitulé

---

**Uniformisation Des Données GPS  
(Application Zone D'étude TINDOUF)**

---

*Soutenu publiquement devant le jury composé de:*

Mr. BEN CHEHIDA Abd El Kadir

Maitre-Assistant –B-

Président

Mr. NAFTI Rodouane

Maitre-Assistant –A-

Examineur

Mr. GEURROUDJ Abd El Halim

Maitre-Assistant –B-

Examineur

Mr. KADRI Chadli Ben Djedid

Maitre-Assistant –A-

Encadreur

**Année Universitaire 2013/2014**

## REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, on remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné la patience courage et la volonté afin de rédiger ce modeste travail et je tiens expressément à remercier mes parents pour leur soutien, confiance et leurs encouragements tout au long de ces études.*

*Je tiens particulièrement à remercier monsieur KADRI Chadli maître-assistant A au niveau d'Université d'Amar Telidji pour son attention portée à notre travail, il encadré ce mémoire avec une grande rigueur scientifique.*

*J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur BEN CHEHIDA ABD EL KADIR maître assistant - B. pour avoir accepté être le président de jury de ce modeste travail ainsi que GEURROUDJ ABD EL Halim maître assistant -B et NAFTI Rodouane maître assistant -A. pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Enfin nous adressons nos meilleurs et chaleureux remerciements à toute personne qui nous a aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.*

## DEDICACES

*C'est avec un grand honneur que je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents.*

*A ma femme et mon fils TAMIME.*

*A mon frère fethi et sa femme et son fils Mohamed,*

*A mes frères Habib, Abd el hak et mes sœurs.*

*A toute ma grande famille.*

*A tous mes amis surtout mes frères Yahiaoui Mohammed et Sahnoune Allal  
Et mes amis au travail.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou loin à élaborer ce travail.*

## Résumé

Des campagnes GPS sont quotidiennement exécutées à travers le territoire national, chacune d'elles étant réalisée indépendamment des autres. Les différents points servant comme référence à ces campagnes ne sont pas tous issus de la même technique de positionnement, les erreurs s'accumulent au fil des campagnes qui se succèdent et qui sont dues à l'origine (point de référence) et aux erreurs accidentelles et systématiques (dû aux instruments de mesures).

Ainsi l'hétérogénéité des points de calage est une des sources d'un mauvais positionnement, d'où une uniformisation de toutes ces campagnes et leurs rattachements entre elles s'impose.

Cette uniformisation est nécessaire afin d'avoir une précision homogène sur l'ensemble des campagnes, c'est le but visé à travers ce mémoire.

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1 :</b> Décalages entre les latitudes du système Europe 50 et les latitudes correspondantes du système Nord.Sahara.....	4
<b>Figure I.2 :</b> Réseau astronomique.....	5
<b>Figure I.3 :</b> Configuration du réseau Axe 3000.....	6
<b>Figure I.4 :</b> Réseau de densification du parallèle nord.....	7
<b>Figure I.5 :</b> Réseau Doppler INCT.....	9
<b>Figure I.6 :</b> Réseau GPS Ordre Zéro.....	10
<b>Figure I.7 :</b> Réseau GPS 1 <sup>er</sup> ordre.....	11
<b>Figure I.8 :</b> Réseau de nivellement. En noir : INCT ; en rouge : IGN.....	13
<b>Figure I.9 :</b> Projection Lambert en Algérie. ....	14
<b>Figure I.10 :</b> Fuseaux de la projection UTM en Algérie.....	15
<b>Figure II.1 :</b> Mesures de phase et code en positionnement GPS.....	17
<b>Figure II.2 :</b> Détermination du retard par comparaison des codes émis et reçu.....	17
<b>Figure II.3 :</b> Comparaison des signaux émis et reçu issus du satellite et récepteur.....	18
<b>Figure II.4 :</b> Schéma illustrant les différentes erreurs et biais affectant le signal GPS entre sa transmission depuis le satellite jusqu'à sa réception au sol.....	20
<b>Figure II.5 :</b> Multi.Trajet.....	23
<b>Figure II.6 :</b> La simple différence.....	26
<b>Figure II.7 :</b> La double différence.....	26
<b>Figure II.8 :</b> La triple différence.....	27
<b>Figure III.1 :</b> L'ellipsoïde de révolution.....	31
<b>Figure III.2 :</b> L'ellipsoïde global et local, géoïde.....	32
<b>Figure III.3 :</b> Coordonnées cartésiennes.....	33
<b>Figure III.4 :</b> Coordonnées géographiques.....	34
<b>Figure III.5 :</b> Altitude Orthométrique.....	35
<b>Figure III.6 :</b> Changement de système de coordonnées.....	38
<b>Figure III.7:</b> Transformation sur la surface ellipsoïdique.....	45
<b>Figure III.8 :</b> Altitude Orthométrique et Hauteur ellipsoïdique.....	47
<b>Figure IV.1 :</b> Situation du réseau GPS.....	48
<b>Figure IV.2 :</b> Plan de position du réseau GPS .....	49
<b>Figure IV.3 :</b> Point GPS 2203079.....	50
<b>Figure IV.4 :</b> Point GPS TND 65.....	51
<b>Figure IV.5 :</b> Récepteur TRIMBLE R7 GNSS.....	51
<b>Figure IV.6:</b> Antenne GPS Zephyr Geodetic 2.....	51
<b>Figure IV.7:</b> Antenne GPS Zephyr . Model 2.....	51
<b>Figure IV.8 :</b> sessions d'observations.....	53
<b>Figure IV.9 :</b> Logiciel LEICA Geo office V.5.0.0.....	54

<b>Figure IV.10</b> : Configuration système géodésique.....	54
<b>Figure IV.11</b> : signal des Satellites .....	55
<b>Figure IV.12</b> : Résultat de traitement bases lignes.....	56
<b>Figure IV.13</b> : schéma d'observations du réseau GPS.....	56
<b>Figure IV.14</b> : schéma d'ajustement du réseau GPS.....	57
<b>Figure IV.15</b> : coordonnées des nouveaux points.....	58
<b>Figure IV.16</b> : résultats du test statistique F .....	59
<b>Figure IV.17</b> : résultats des caractéristiques générales de la boucle 03.....	59
<b>Figure IV.18</b> : Choix des systèmes A et B pour un calcul de transformation.....	61
<b>Figure IV.19</b> : Choix des modèles transformations.....	61
<b>Figure IV.20</b> : Paramètres de passage du WGS 84 au Nord Sahara.....	62
<b>Figure IV.21</b> : Ecart en x, y et z.....	63
<b>Figure IV.22</b> : Paramètres de passage du WGS 84 au Nord Sahara.....	64
<b>Figure IV.23</b> : Ecart en x, y et z.....	66

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b> : Missions de géodésie classique 1er ordre.....	8
<b>Tableau I.2</b> : Missions de géodésie classique 2ème ordre.....	9
<b>Tableau I.3</b> : Missions GPS.....	11
<b>Tableau I.4</b> : Missions d'unification par GPS.....	12
<b>Tableau I.5</b> : Missions de Nivellement de précision effectuées depuis 1976.....	13
<b>Tableau I.6</b> : Constantes de la projection Lambert Nord et Lambert Sud.....	15
<b>Tableau I.7</b> : Constantes de la projection UTM en Algérie.....	16
<b>Tableau II.1</b> : Correspondance Temps.Distance.TEC.....	23
<b>Tableau II.2</b> : Valeur absolue des différentes erreurs et biais influençant les mesures GPS.....	26
<b>Tableau II.3</b> : Comparaison entre les combinaisons linéaires (Lc) et (L1) observées.....	31
<b>Tableau III.1</b> : Éléments constitutifs d'un système de coordonnées.....	36
<b>Tableau IV.1</b> : informations sur les fiches d'observation GPS.....	54
<b>Tableau IV.2</b> : coordonnées des points d'origine en WGS84.....	58
<b>Tableau IV.3</b> : coordonnées des nouveaux points en WGS 84.....	59
<b>Tableau IV.4</b> : coordonnées des nouveaux points en locale calculé par les paramètres de transformation BURSA WOLF.....	63
<b>Tableau IV.5</b> : Ecart en x, y et z.....	65
<b>Tableau IV.6</b> : coordonnées des nouveaux points en locale calculé par les paramètres de transformation MOLODENSKY.BADEKAS .....	66
<b>Tableau IV.7</b> : Ecart en x, y et z.....	66

## TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Résumé.....	iii
Listes des figures.....	iv
Listes des tableaux.....	vi
Tables des matières.....	vii
Introduction.....	1

### Chapitre I SYSTEME GEODESIQUE EN ALGERIE

I.1 Les principales étapes de la géodésie en Afrique du nord.....	2
I.2 Systèmes géodésiques et cartographiques en Algérie.....	2
I.2.1 Système Voirol 1875.....	2
I.2.1.1 Chaîne primordiale.....	2
I.2.1.2 Elément de départ du système géodésique Voirol (1875).....	2
I.2.1.3 Valeur du réseau.....	3
I.2.2 Le système ED50.....	3
I.2 I.3 Le système Nord.Sahara .....	3
I.3 La géodésie saharienne .....	5
I.3.1 Le réseau astronomique.....	5
I.3.2 L'axe 3000.....	5
I.4 Densification du parallèle nord.....	6
I.4.1 Le premier ordre.....	7
I.4.2 Réseau 2ème ordre.....	8
I.5 Le réseau géodésique Doppler.....	8
I.6 Géodésie par GPS.....	9
I.6.1 Réseau GPS Ordre Zéro.....	9
I.6.2 Réseau GPS 1 <sup>er</sup> ordre (réseau de densification par GPS).....	10
I.6.3 Réseau géodésique d'unification par GPS.....	11
I.7 Le réseau de nivellement.....	11
I.8 Unification des travaux géodésiques sur le système Nord. Sahara.....	13
I.8.1 Le système Voirol 1875 en projection Lambert.....	13
I.8.2 Le système Nord.Sahara en Lambert.....	13
I.8.3 Le système Nord.Sahara en projection UTM.....	14
I.8.4 Le système Voirol unifié 1960.....	15

## Chapitre II

### MESURES GPS ET COMBINAISON LINEAIRE

II.1 Mesures GPS.....	17
II.1.1 Mesure de code.....	17
II.1.2 Mesure de Phase.....	18
II.2 Sources d'erreurs.....	19
II.2.1 Erreur d'orbite.....	20
II.2.2 Erreur troposphérique.....	20
II.2.3 Erreur ionosphérique.....	21
II.2.4 Multi.trajet.....	22
II.2.5 Bruit du récepteur.....	23
II.2.6 Les erreurs d'horloge .....	24
II.2.7 Centre de phase des antennes.....	24
II.3 Bilan d'erreurs de la mesure GPS.....	25
II.4 Observables différenciées.....	25
II.4.1 Simple différence.....	25
II.4.2 Double différence.....	26
II.4.3 Triple différence.....	27
II.5 Combinaisons linéaires de l'observation GPS.....	28
II.5.1 La combinaison Ionosphère.Free.....	28
II.5.2 La combinaison Geometry.Free.....	28
II.5.3 La combinaison Wide.Lane.....	29
II.5.4 La combinaison Melbourne.Wubben.....	29
II.5.5 Récapitulatif des combinaisons linéaires.....	30

## Chapitre III

### DIFFERENTS TYPES DE TRANSFORMATION

III.1 Ellipsoïde de révolution.....	31
III.2 Systèmes géodésiques.....	32
III.2.1 Les systèmes d'origine terrestre.....	32
III.2.1 Les systèmes d'origine spatiale.....	33
III.3 Types de coordonnées.....	33
III.3.1 Coordonnées cartésiennes géocentriques.....	33
III.3.2 Coordonnées géographiques.....	34
III.3.3 Coordonnées planes.....	34
III.3.4 Altitudes.....	35
III.4 Passages entre coordonnées cartésiennes et géographiques.....	36
III.4.1 Passage des coordonnées géographiques aux coordonnées cartésiennes.....	36

III.4.2	Passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées géographiques.....	36
III.5	Transformations des coordonnées.....	38
III.5.1	Transformations 3D tridimensionnelle.....	38
III.5.1.1	Transformation BURSA WOLF.....	39
III.5.1.2	Transformation MOLODENSKY.BADEKAS.....	39
III.5.1.3	Transformation GEOGRAPHIQUE DE MOLODENSKY.....	41
III.5.1.4	Transformation de VEIS.....	43
III.5.2	Transformations bidimensionnelle.....	44
III.5.2.1	La transformation par la ligne géodésique.....	44
III.5.3	Passage de h à H.....	47

## Chapitre IV

### TRAITEMENT DES DONNEES GPS

IV.1	Zone d'étude.....	48
IV.1.1	Position d'étude.....	48
IV.1.2	Nature de terrain.....	48
IV.1.3	Points GPS réalisés.....	49
IV.2	Planification.....	49
IV.2.1	Planification.....	49
IV.2.2	Choix de position des points du réseau GPS.....	50
IV.2.3	Document a préparé.....	50
IV.2.4	Matérialisations des repères.....	50
IV.3	Moyens Matériels.....	51
IV.4	Observation GPS.....	52
IV.4.1	Planification des sessions d'observations.....	52
IV.4.2	Sessions d'observations.....	53
IV.4.3	Traitement des lignes de base.....	54
IV.4.4	Ajustement.....	57
IV.4.5	Validation des résultats.....	59
IV.5	Paramètres de transformation.....	60
IV.5.1	Paramètre systèmes de référence.....	60
IV.5.2	Calcul Paramètres de transformation.....	60
IV.5.2.1	Calcul les paramètres de Transformation BURSA WOLF.....	62
IV.5.2.2	Calcul les paramètres de Transformation Molodensky.Badekas.....	64
	Conclusion .....	67
	Références bibliographiques .....	x
	Annexes.....	xii

**Chapitre I**  
**SYSTEME GEODESIQUE EN**  
**L'ALGERIE**

## I.1 Les principales étapes de la géodésie en Afrique du nord

Ce réseau primordial est constitué par deux chaînes parallèles et sept chaînes méridiennes.

### Chaînes parallèles

- Nord : de Casablanca à Tunis passant dans les régions de Mecnes, Oudjda, Oran, Alger et Constantine.
- Sud : d'Agadir à Gabès, jalonnée par Bou Dnib, Ain Safra, Laghouat et Biskra.

### Chaînes méridiennes

- Marrakech
- Mecnes
- Guercif
- Mechria
- Laghouat
- Biskra
- Gabés

Jusqu'en 1950, cet ensemble était divisé en deux tronçons distincts ayant leurs éléments de départ particuliers : la triangulation d'Algérie – Tunisie pour origine le point astronomique de Voirol (près d'Alger) et la triangulation du Maroc sur le point astronomique de Merchich (près de Casablanca).

En 1950, on a adopté pour la Tunisie un système géodésique indépendant ayant pour origine le point astronomique de Carthage (près de Tunis) [\[KADRI .C, 2003\]](#).

## I.2 Systèmes géodésiques et cartographiques en Algérie

### I.2.1 Système Voirol 1875

#### I.2.1.1 Chaîne primordiale

La triangulation d'Algérie a été commencée en 1854 :

- Deux chaînes parallèles : le parallèle nord dans la région du Tell et le parallèle sud sur les hauts plateaux.
- Trois chaînes méridiennes : celle de Mechria à l'ouest, de Laghouat au centre et de Biskra à l'Est, ces deux dernières chaînes se rejoignent dans la région d'Ouargla.

#### I.2.1.2 Élément de départ du système géodésique Voirol (1875)

- Point fondamental : point astronomique de Voirol (près d'Alger) avec des coordonnées géographiques déterminés en 1875.

$L = 40^{\text{G}} 8375 \text{ } ^{\text{N}}8 \text{ Nord.}$

$M = 0^{\text{G}} 7887 \text{ } ^{\text{E}}3 \text{ Est de Paris.}$

- Azimut de départ : est celui du coté Voirol → Melab El Kora dont la valeur adoptée fut : 358<sup>G</sup> 090324 gr.
- Base de départ (base de Blida) = 10000,286 m
- L'ellipsoïde de Clarke 1880A fut adopté comme surface de référence.

### I.2.1.3 Valeur du réseau

Cette triangulation primordiale a le caractère d'une géodésie de reconnaissance. Elle n'a pas été compensée (avant 1950), et de plus la base de Blida mesurée en 1854 a été reconnue fautive de 0.662 m à la suite de nouvelles mesures effectuées en 1910 et en 1913. Sa vraie longueur est 9.999624 m.

De sorte qu'en plus de ses imperfections de structure. Ce réseau comporte au départ une erreur d'échelle d'environ 1/15000.

### I.2.2 Le système ED50

D'après les documents originalement fournis par l'IGN, AMS (l'Army Map Service) a effectué un calcul d'ensemble des triangulations primordiales de toute l'Afrique du nord ; ce calcul a été conduit dans le cadre de la compensation européenne sur l'ellipsoïde international ; Nous l'appellerons Europe 50.

A la suite de ce calcul l'AMS a fourni à l'IGN les listes des coordonnées correspondantes.

Depuis longtemps l'IGN avait constaté qu'un nouveau calcul de triangulation d'Algérie n'aurait de véritable signification qu'à la condition de ré-observer les parties du réseau jugées défectueuses. Ce travail comporte la ré-observation et recalcul en y introduisant les bases et azimut astronomique de M'sabiah, d'Alger et de Navarin.

Les calculs, entrepris en 1955, ont été effectués sur l'ellipsoïde international. Ces calculs se trouvent ainsi incorporés dans le système Europe50 [\[KADRI.C, 2003\]](#)..

### I.2.3 Le système Nord-Sahara

En 1959, l'IGN était en possession d'un réseau de 1<sup>er</sup> ordre compensé dans le système Europe 50, sur l'ellipsoïde international de HAYFORD.

D'autre part, tout le système cartographique de l'IGN dans l'Afrique était basé sur l'ellipsoïde de Clarke 1880 recommandé à la conférence Internationale de Eukavu (Congo-Zaire) en 1953, et d'autre part, les cartes sahariennes étaient établies sur un canevas astronomique qui, arrivant au contact du réseau géodésique, présentait des hiatus ou des recouvrements variables, dont l'ordre de grandeur est appréciable pour la cartographie.

Pour concilier les deux canevas de triangulation avec les canevas astronomiques, l'IGN a établi sur l'ellipsoïde de Clarke un système de méridiens et parallèles tel que les discordances moyennes entre les coordonnées géographiques issues de la triangulation et les coordonnées géographiques issues de l'astronomie soient au minimum.

Le système de coordonnées sur l'ellipsoïde qui remplit ces conditions a été appelé "système géodésique Nord-Sahara" [KADRI .C, 2003].

Il est déduit du système Europe 50 par la transformation suivante :

$$M_c = M_i - 4.00 \text{ dmgr}$$

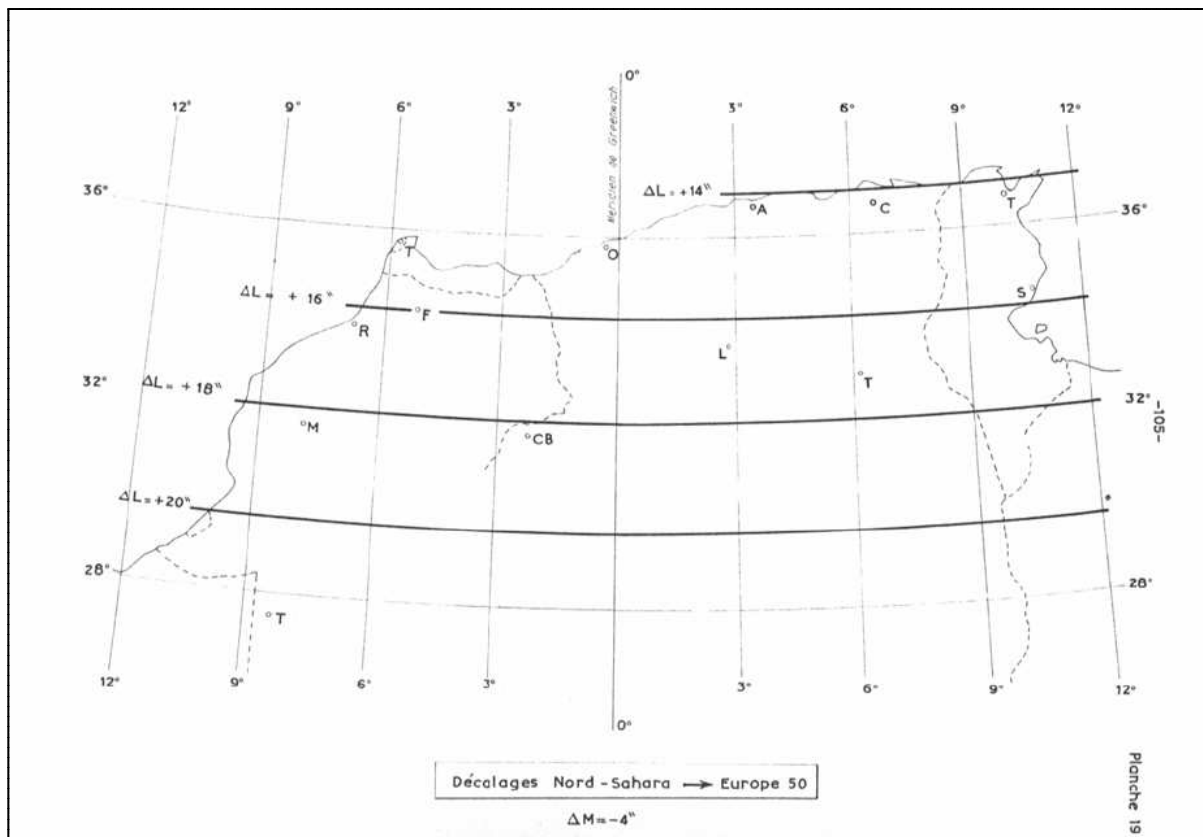
$$L_c = L_i - 48.400 \text{ dmgr}$$

$M_c$  et  $L_c$  : représentent la longitude et la latitude isométrique correspondante au système Nord Sahara sur l'ellipsoïde Clarke 1880.

$M_i$  et  $L_i$  : représentent la longitude et la latitude isométrique dans le système Europe 50 basé sur l'ellipsoïde international de Hayford.

$L_i$  : la latitude isométrique. 
$$L_i = \int_0^\varphi (\rho / N \cos \varphi) d\varphi$$

La planche suivante représente les décalages entre les latitudes du système Europe 50 et les latitudes correspondantes du système Nord-Sahara.



**Figure I.1** : Décalages entre les latitudes du système Europe 50 et les latitudes correspondantes du système Nord-Sahara.

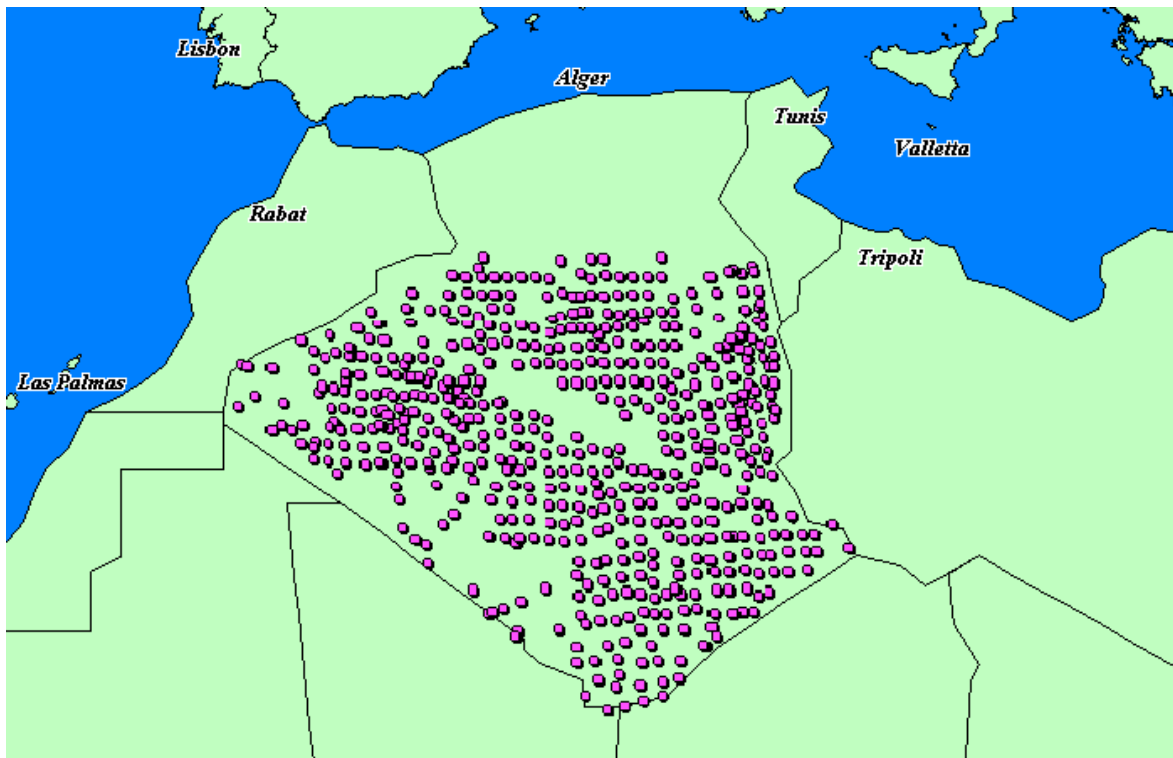
## I.3 La géodésie saharienne

### I.3.1 Le réseau astronomique

Au-delà de la limite sud du réseau géodésique algérien ancien, le territoire est équipé d'un canevas astronomique qui a principalement été mis en place pour appuyer les photos qui ont servi à la confection de la carte de base de la région à l'échelle 1/200000 type sud limité au nord par le parallèle 34°.

La plupart des observations astronomiques ont eu lieu entre 1954 et 1968. Ces observations ont été le plus souvent opérées au théodolite Wild T3, parfois au niveau NI 2 Zeiss transformé en astrolabe. Les observations étaient réparties sur deux soirées de 16 à 24 étoiles dans la même nuit par la méthode des hauteurs égales. Cette manière de procéder assurait une précision de 1 seconde de degré sur les coordonnées du point. Lorsque le point photo devrait être calculé par rayonnement, la mesure d'azimut était effectuée par observation de 6 à 8 couples sur la polaire.

La précision absolue de ce réseau constitué de 636 points déterminés sur Clarke 80 est de 30 m [\[INCT, 2007\]](#).



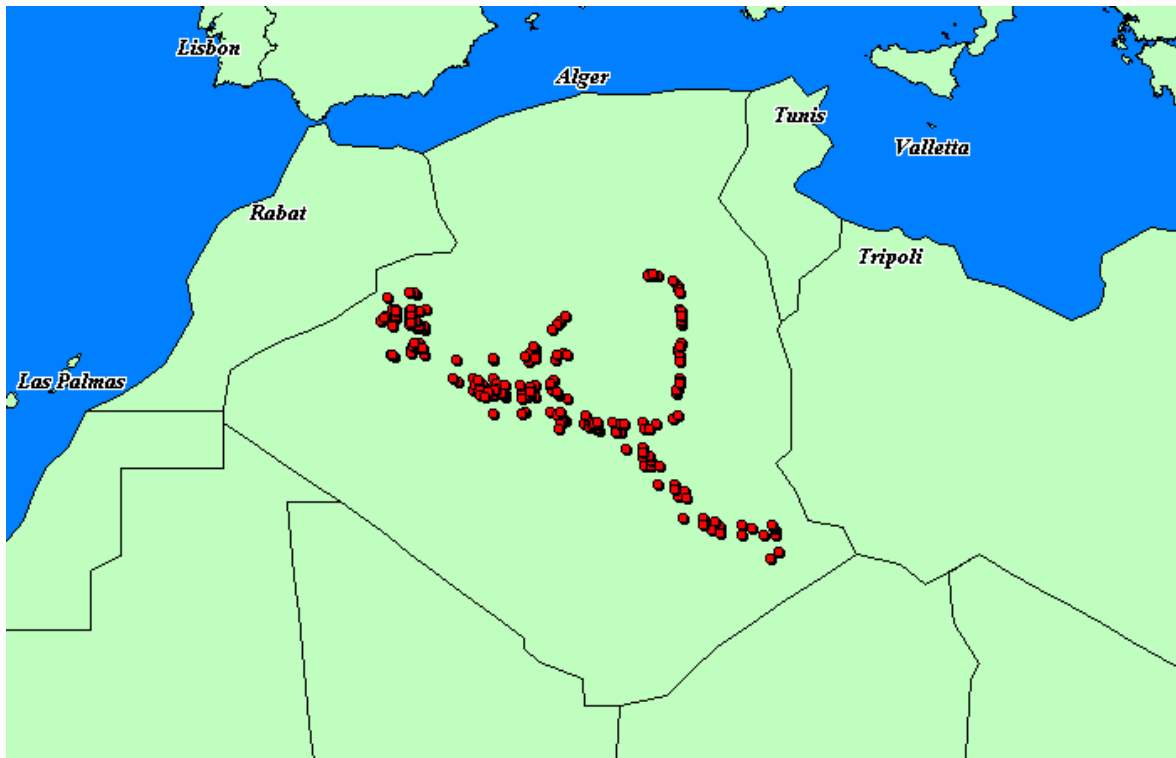
**Figure I.2 :** Réseau astronomique.

### I.3.2 L'axe 3000

De 1958 à 1962 l'IGN a poursuivi au Sahara l'observation d'un réseau de chaînes géodésiques primordiales, dans la perspective de préparer un canevas à la cartographie que les objectifs de développements économiques et stratégiques (exploitation des ressources du sous-sol, installation d'une base d'essais d'engins nucléaires, ...) rendaient nécessaires.

Ce réseau qui porte le nom de l'axe 3000 comprend :

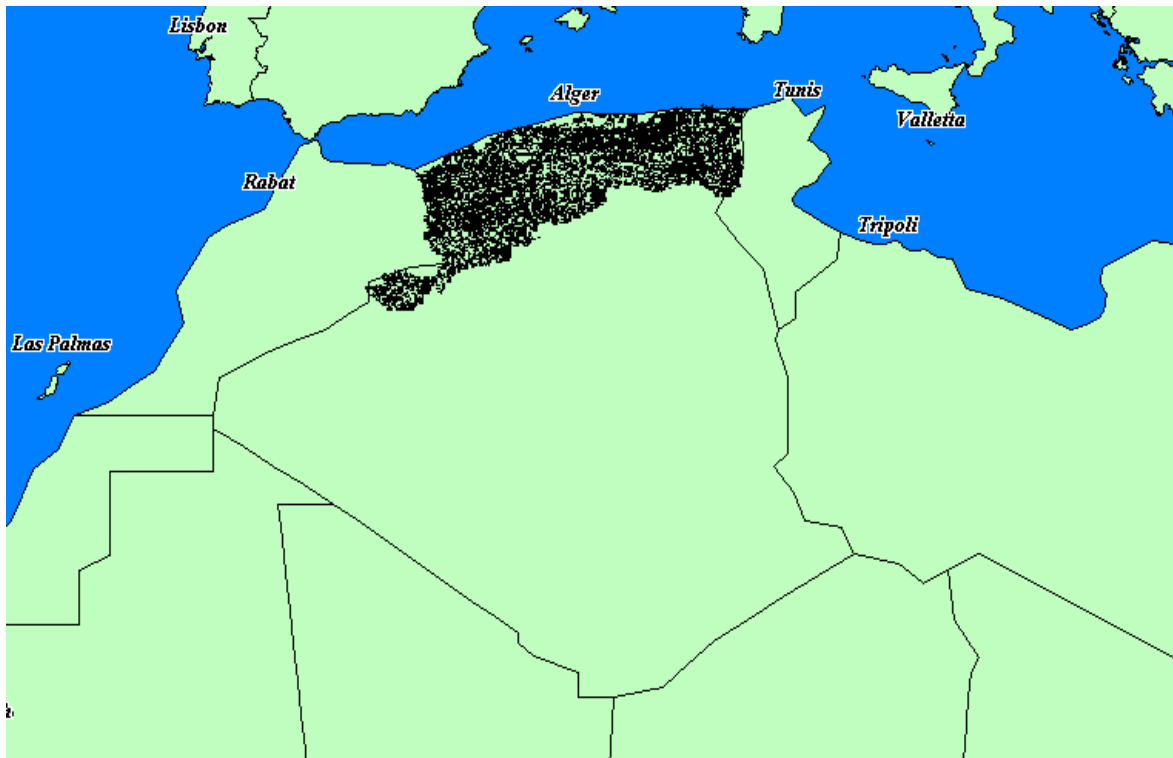
- Une grande chaîne diagonale de 1600 Km reliant Abadla près de Béchar à Djanet, composée de trois segments correspondants à des missions successives : Abadla-Adrar (1958-59), Adrar-Amguid (1959-60) et Amguid-Djanet (1960-61).  
Fort Miribel (Hassi Chebaba), In Salah et Timimoun y ont été rattachés par cheminement.
- Un cheminement méridien de 700 km joignant Amguid et Ouargla, composé par le tronçon nord entre les points numérotés T0 et T16 (1959-60) et tronçon sud entre les points numérotés 2T1 et 2T14 (1960-61).
- La triangulation d'In Belbel (1961-62) et le rattachement de Tabelbala (1960-61) [\[INCT, 2007\]](#).



**Figure I.3 :** Configuration du réseau Axe 3000.

#### I.4 Densification du parallèle nord

De 1975 à 1994 l'Institut National de Cartographie et de Télédétection a entrepris une importante opération de géodésie de détail sur la zone couverte par le parallèle nord. Cette géodésie de détail comporte un ensemble de points déterminés en planimétrie et en altimétrie par triangulation (procédé terrestre qui consiste à mesurer des angles de triangle et quelques distances pour la mise à l'échelle).



**Figure I.4 :** Réseau de densification du parallèle nord.

Une hiérarchie de couverture du territoire associée aux possibilités de calcul amène une succession de niveaux : premier ordre, deuxième ordre et complémentaire. L'ensemble des observations est organisé de manière homogène. En revanche, les calculs se succédant en blocs des points au fur et à mesure des missions de terrain [INCT, 2007].

### I.4.1 Le premier ordre

Il est composé de 450 points géodésiques régulièrement répartis et matérialisés sur la partie nord du territoire national. Les points sont distants de 30 à 45 km. La précision relative moyenne est de l'ordre de 6 cm [INCT, 2007].

Année	Mission	Nombre de points
1983	Ghazaouet - Tlemcen	03
1984	El Aricha - Mecheria	20
1985	Saida - El Kreider	29
1986	Constantine	24
1987	Aures	50
1988	Tiaret	33
1989	Msila	36
1990	El Bayedh	27
1991	Djelfa	28
1992	Ain Sefra	31
1993-94-95	Bechar- Tindouf	169

**Tableau I.1 :** Missions de géodésie classique 1er ordre.

## I.4.2 Réseau 2ème ordre

Il est composé de 3291 points géodésiques régulièrement répartis et matérialisés sur la partie nord du territoire national. Les points du 2ème ordre sont distants de 10 à 20 km. La précision relative moyenne est de l'ordre de 12 cm [\[INCT, 2007\]](#).

Année	Mission	Nombre de points
1974	Oran	135
1975	Mostaghanem	17
1976	Chlef	88
1976-77	Sour El Ghozlan - Tizi Ouzou	152
1977-78	Setif - Béjaia	225
1978-79	Alger - Medea	146
1981-82	Annaba - Skikda	149
1984	Ghazaouet - Tlemcen	172
1985	Saida - El Kreider	282
1986	Constantine	206
1987	Aures	255
1988	Tiaret	259
1989	Msila	183
1990	El Bayedh	114
1991	Djelfa - Laghouat	440
1992	Ain Safra	141
1993-94-95	Bechar	327

**Tableau I.2 :** Missions de géodésie classique 2ème ordre.

## I.5 Le réseau géodésique Doppler

Le système de positionnement par effet Doppler « Transit », était la première technique de géodésie spatiale utilisée à l'INCT dans les années 80.

Durant la période 1980-1990, 142 points ont été observés à l'aide de récepteurs JMR et matérialisés sur le terrain.

La méthode d'observation utilisée était le positionnement par point isolé, ainsi que par translocation avec enregistrement de 50 passages ou plus de satellites (une semaine d'observation par point).

La détermination des coordonnées de ces points Doppler dans le système géodésique WGS72, a été effectuée par le logiciel GeoDop sur ordinateur VAX 11/785. Les éphémérides utilisées pour le traitement sont uniquement les éphémérides opérationnelles. La précision obtenue est de l'ordre de 5 mètres.

Des éphémérides précises ont été utilisées pour le calcul de 8 points inclus dans le réseau ADOS (African Doppler Survey).

L'INCT a également traité 190 points sur 310 du réseau ADOS en collaboration avec l'Association Africaine de Cartographie (AAC). La précision sur la détermination de ces points est de 1 à 2 mètres [\[INCT, 2007\]](#).

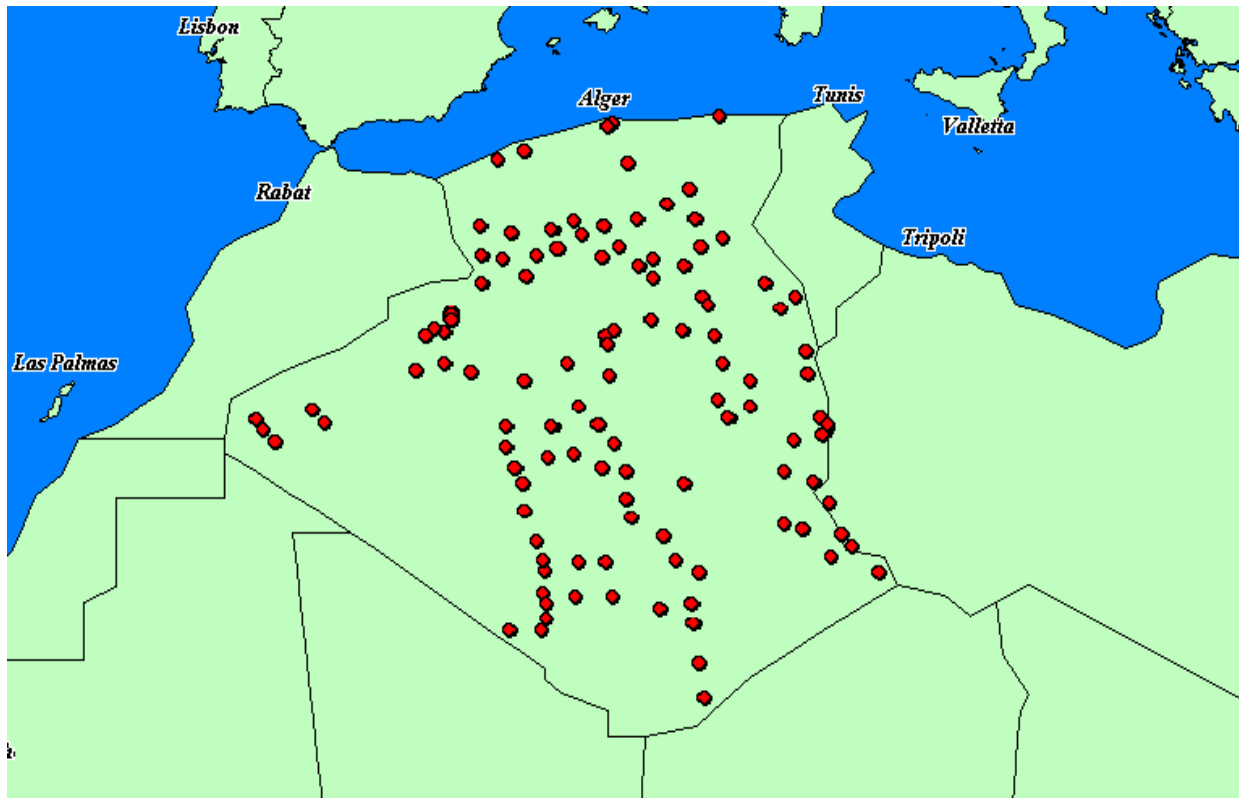


Figure I.5 : Réseau Doppler INCT.

## I.6 Géodésie par GPS

Conscient des avantages qu'offre le système GPS, notamment en précision et réduction considérable des délais de réalisation, l'INCT a introduit depuis 1997 cette technique pour la mise en place des réseaux GPS de base.

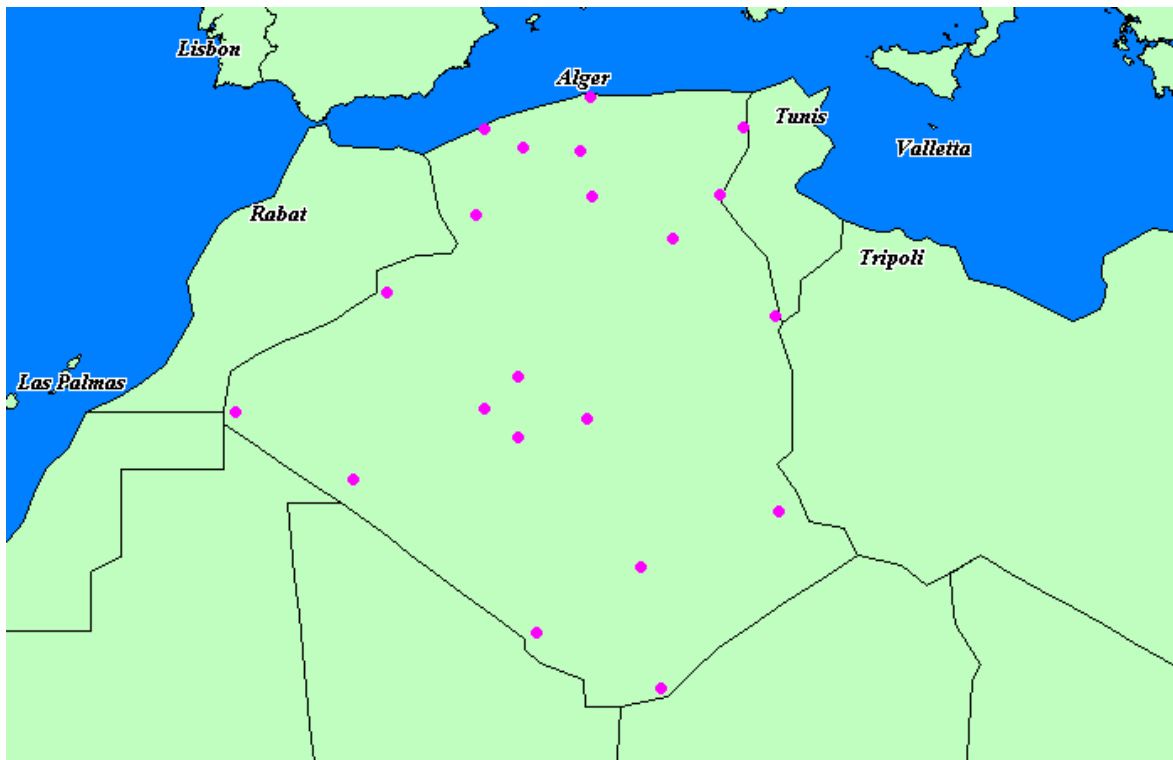
Le réseau de points GPS de base est subdivisé en trois réseaux de plus en plus denses dits réseau d'ordre zéro, réseau 1<sup>er</sup> ordre GPS et réseau d'unification [INCT, 2007].

### I.6.1 Réseau GPS Ordre Zéro

Saisissant l'opportunité technique du projet Tyreanean Geodetic NETwork, l'INCT a observé en 1998 son réseau simultanément avec la campagne d'observation TyrGeoNet.

Ainsi, douze points ont été observés pendant 72 heures et traités par la suite avec des éphémérides précises au moyen du logiciel Bernese. La précision obtenue sur la détermination de ces douze points est centimétrique.

Huit autres points ont été observés en juin 2000 pendant une semaine, mais cette fois-ci ils ont été traités par le logiciel WinPrism, en utilisant les éphémérides opérationnelles. La précision de ces huit points est de l'ordre décimétrique [INCT, 2007].



**Figure I.6 : Réseau GPS Ordre Zéro.**

En juin 2005, quinze points du réseau ordre zéro, ont été ré-observés pendant une semaine et traités par la suite avec des éphémérides précises au moyen du logiciel Bernese 5.0.

### I.6.2 Réseau GPS 1<sup>er</sup> ordre (réseau de densification par GPS)

Ce réseau venant compléter le réseau de géodésie classique Nord, servira à poursuivre l'équipement du territoire national. Ce réseau se compose de 1180 points dont les distances sont comprises entre 25 et 50 km, Les observations se font avec des récepteurs bi-fréquences sur une durée de deux heures. La précision relative de ce réseau est de l'ordre de 3 cm [\[INCT, 2007\]](#).

Le tableau ci-dessous illustre les différentes missions de densification par GPS effectuées et le nombre de points observés :

Année	Mission	Nombre de points
1997/98	Touggourt	143
1999	ohanet	136
2000	Djanet-Illizi	95
2001	Ouargla-Ghardaia	97
2002/2003	Bechar-Tindouf	152
2003/2004	Regane- Bordj Badji Mokhtar	133
2004/2005	Ouagla - In Salah -Tamanrasse	268
2005/2006	Tamanrasset -In Guezzam	156

**Tableau I.3 : Missions GPS.**

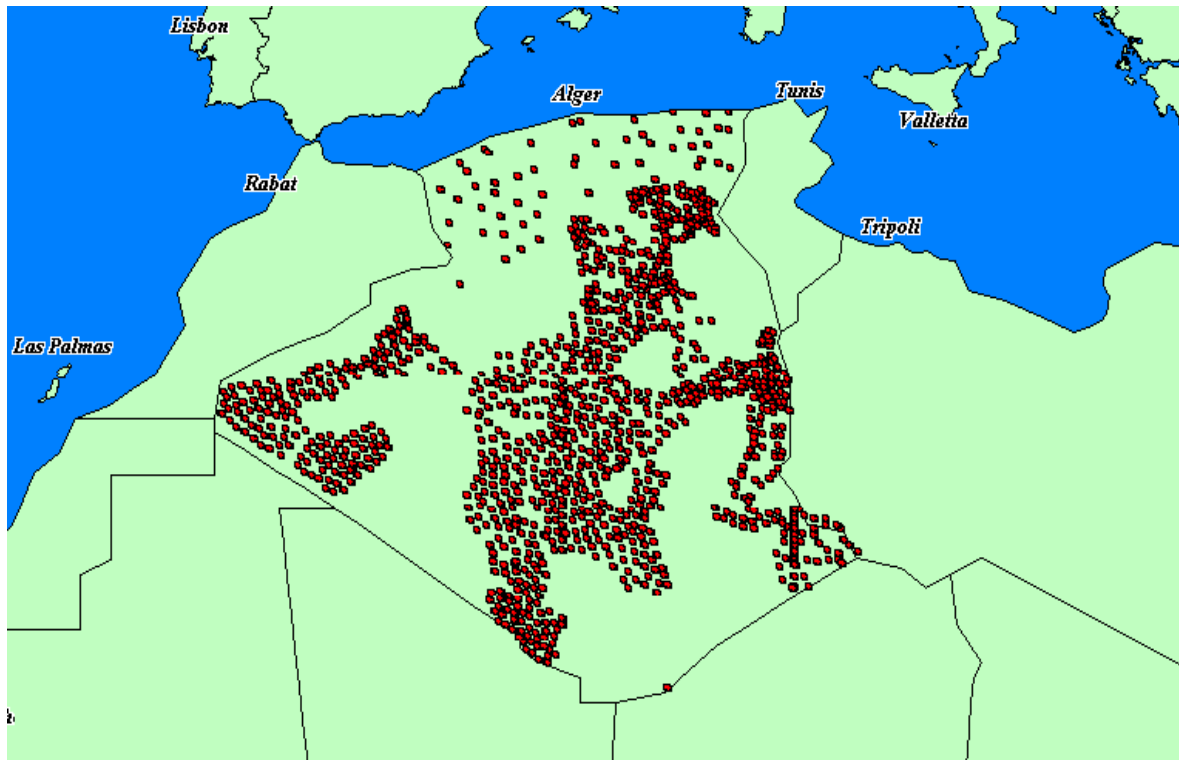


Figure I.7 : Réseau GPS 1<sup>er</sup> ordre.

### I.6.3 Réseau géodésique d'unification par GPS

C'est la ré-détermination d'un ensemble de points de grande précision appartenant au réseau de géodésie classique par la technique GPS. Ces points serviront à unifier les deux systèmes (WGS84 et Nord-Sahara) par la détermination de paramètres de passage le plus précisément possible d'une part et d'autre part et occasionnellement de points d'appui au réseau GPS 1<sup>er</sup> ordre. Il se compose de 42 points séparés par une distance comprise entre 50 et 150 km.

Les observations des points se font avec des récepteurs bi-fréquences Ashtech Z12, sur une durée de 18 heures réparties sur trois jours. La précision relative de ce réseau est de l'ordre de 2 cm [INCT, 2007].

Année	Mission	Nombre de points
1998	EST	07
2000	CENTRE-EST	25
2001	OUEST	10

Tableau I.4 : Missions d'unification par GPS.

## I.7 Le réseau de nivellement

L'origine du nivellement en Algérie remonte à l'époque coloniale française (1889). Il fut confié au Service Géographique de l'Armée (SGA) puis pris en charge par l'IGN. Munis d'un matériel semblable à celui du Service du Nivellement Général de France (NGF), ses opérateurs

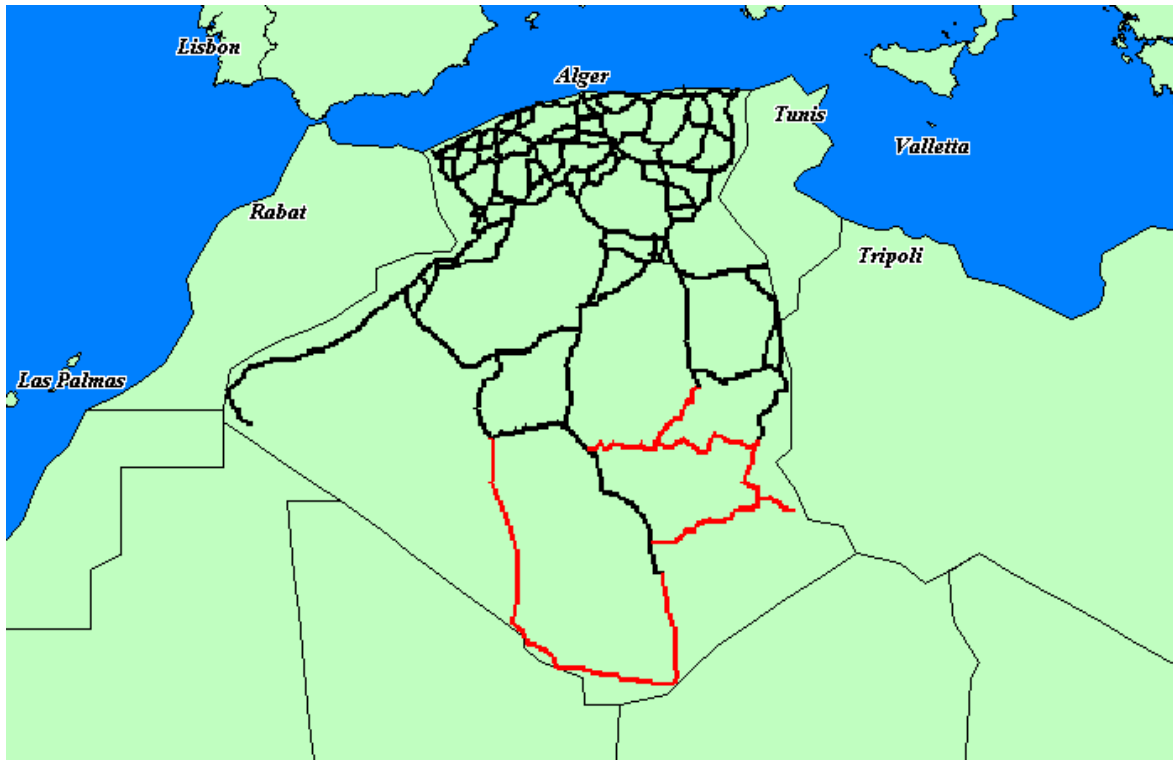
élaborèrent à partir de 1887 un réseau de nivellement géométrique de précision limité au premier et second ordre, basé sur le médimarémètre de la Goulette (Tunisie).

Entre 1953 et 1954, les travaux de nivellement furent menés en parallèle avec la ré-observation du parallèle Nord et du 1<sup>er</sup> ordre complémentaire du littoral [INCT, 2007].

Les lignes de nivellement de précision exécutées depuis 1976 l'Institut National de Cartographie et de Télédétection ont suivi en parallèle les travaux de la géodésie par la densification du parallèle Nord :

<b>Année</b>	<b>Mission</b>	<b>Nombre de</b>
1976	Chlef	1237
1977	Tizi-Ouzou	657
1978	Sour El Ghozlane	486
1978	Mostaganem	337
1979	Alger-Medea	996
1981	Skikda	710
1982	Annaba	975
1983	Tlemcen- Ghazaouet	1590
1984	Saida - Kreider	1453
1985	Tiaret - Frenda	1859
1986	Constantine – Souk Ahras -	1663
1987	Biskra-Tebessa-Batna	1636
1988	M'Sila-Barika	1622
1989	Ghardaia – Ouargla -	1188
1990	Beni Abbès - El Goléa -	1355
1991	Touggourt - Hadjira	1448
1992	El Bayadh – Naama – Adrar -	922
1993	Bechar - Oued Souf	658
1994	Tindouf – Abadla - Reggane	1110
1995	Tindouf – Abadla - Reggane	975
1996	Hassi Belgbour - In Aménas	753
1997	Hassi Messaoud - Illizi	1500
1998	Deb Deb - El Borma - In	620
1999	Deb Deb - In Aménas - Hassi	719
2000	2ème RM	520
2001	2ème RM	795
2002	Laghouat-Biskra	891
2003	2ème RM	680
2004	1ère et 5ème RM	921
2004/2005	6ème, 1ère et 2ème RM	897

**Tableau I.5** : Missions de Nivellement de précision effectuées depuis 1976.



**Figure I.8 :** Réseau de nivellement. En noir : INCT ; en rouge : IGN.

## I.8 Unification des travaux géodésiques sur le système Nord-Sahara

### I.8.1 Le système Voirol 1875 en projection Lambert

En 1942, le calcul de la triangulation d'Algérie a été effectué directement en coordonnées géographiques sur l'ellipsoïde de Clarke 1880.

Ce n'est qu'à partir de cette date qu'on a introduit dans ces territoires l'emploi d'une projection en géodésie, et c'est la projection conique de Lambert qui a été choisie [\[KADRI.C, 2003\]](#).

Lambert Nord-Algérie  $L_0 = 40^G$   $M_0 = 3^G$  Est de Greenwich

Lambert Sud-Algérie  $L_0 = 37^G$   $M_0 = 3^G$  Est de Greenwich

### I.8.2 Le système Nord-Sahara en Lambert

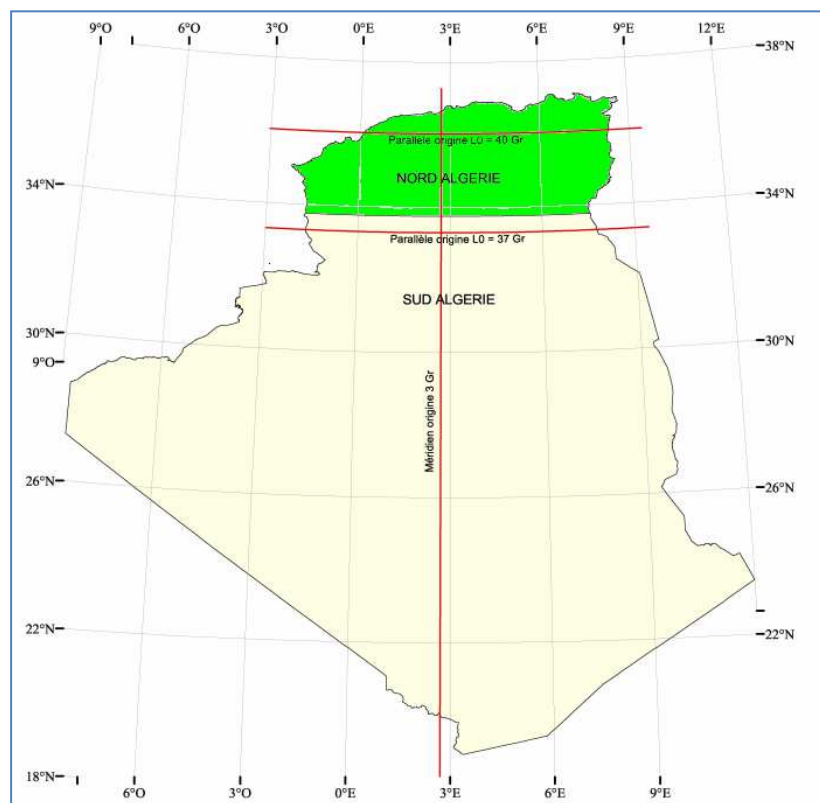
Dans les deux zones Lambert d'Algérie on peut obtenir de nouvelles coordonnées rectangulaires du système géodésique Nord-Sahara en appliquant les coordonnées géographiques de ce système, les formules classiques de transformation de Lambert.

Ce système "Lambert Nord-Sahara" n'est pas édité par IGN il ne sert que d'intermédiaire pour accéder aux coordonnées Lambert d'un nouveau système dit Voirol unifié 1960 dont nous allons donner la justification.

Les constantes de la projection Lambert sont :

Constantes	Lambert Nord	Lambert Sud
Mode de définition	Tangente	Tangente
Zone d'application	42,0 gr – 37,5 gr	34,5 gr - 39,5 gr
Latitude origine	40 gr = 36°	37 gr = 33° 18'
Longitude origine ou méridien central	3 gr Est Greenwich	3 gr Est Greenwich
Eo	500 135.000 m	500 135.000 m
No	300 090.000 m	300 090.000 m
Facteur d'échelle	0,999 625 544 000	0,999 625 769 000

**Tableau I.6:** Constantes de la projection Lambert Nord et Lambert Sud.



**Figure I.9:** Projection Lambert en Algérie.

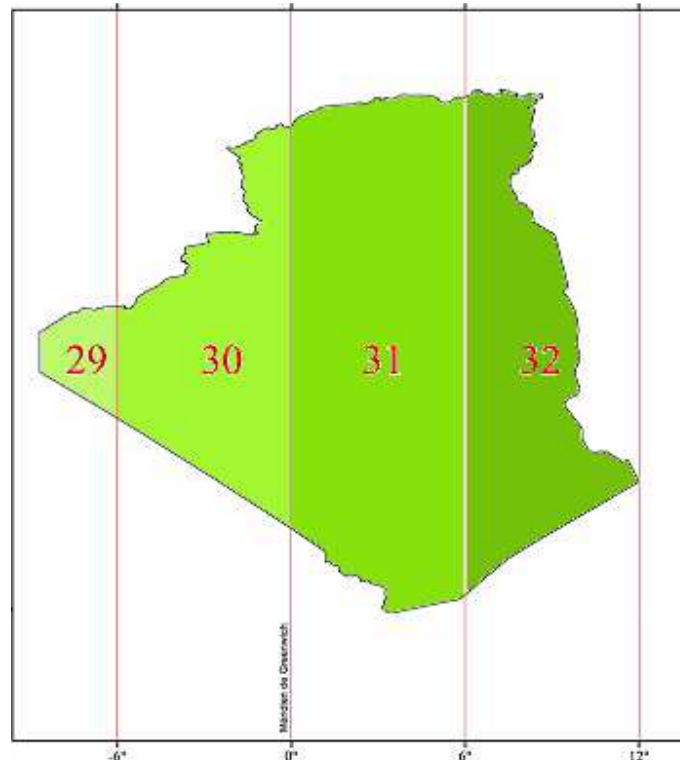
### I.8.3 Le système Nord-Sahara en projection UTM

La raison d'être du système Nord-Sahara étant d'harmoniser les canevas de triangulation avec les coordonnées astronomiques, il était logique d'adopter une même projection pour les deux réseaux. Depuis 1950 Les travaux astronomiques effectués en Afrique sont traduits en projection de Mercator Transverse Universelle (UTM) c'est donc cette représentation qui a été adoptée pour habiller le système géodésique Nord-Sahara [KADRI .C, 2003].

Les constantes de la projection UTM sont :

Constantes	UTM Nord fuseau n
Latitude origine	0°
Longitude origine ou méridien central de la	$6(Nf-31)+3$ °
Eo	500 000 m
No	0 m
Facteur d'échelle	0.9996 m

**Tableau I.7 :** Constantes de la projection UTM en Algérie



**Figure I.10 :** Fuseaux de la projection UTM en Algérie.

#### I.8.4 Le système Voirol unifié 1960

Toutes Les listes de coordonnées ainsi que toute la cartographie d'Algérie ont été établies jusqu'en 1960 sur le système Voirol 1875.

Mais nous avons vus que ce système était entaché d'une erreur d'échelle considérable (1/15000) et que de plus, ces points de détail présentaient d'un bloc à l'autre des cassures de 3 à 18 mètres.

Il est donc jugé indispensable de remplacer les listes de coordonnées anciennes par des listes nouvelles dans un système homogène, mais toutefois assez près du système ancien pour ne pas remettre en question le quadrillage de toutes les cartes existantes qui sont établies à partir d'un système Voirol 1875.

Le nouveau système dit Voirol unifié a été établi de la manière suivante :

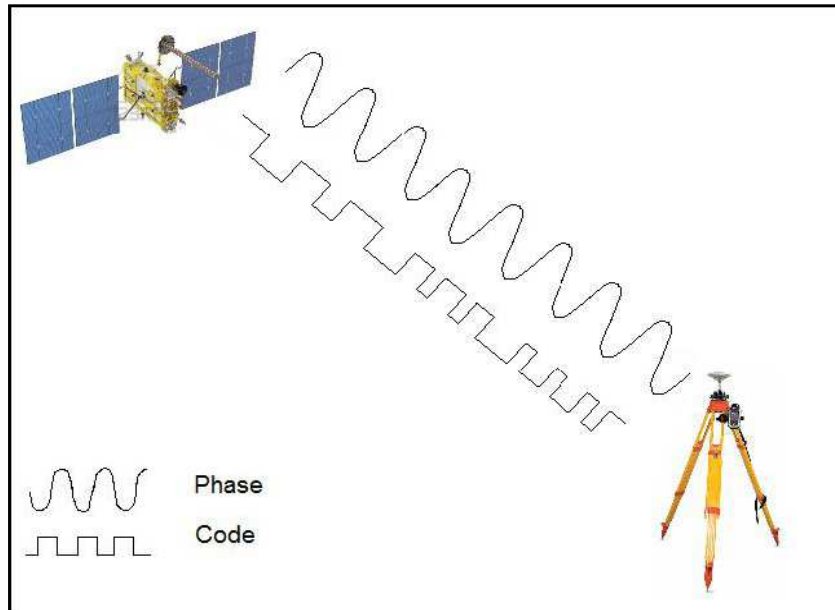
Lorsqu'on a comparé sur tous les points du réseau de premier ordre les coordonnées homogènes du système Lambert Nord-Sahara avec les coordonnées Lambert Voirol 1875, on a trouvé une discordance entre les deux systèmes. On a pris la moyenne ( $\Delta X = 135 \text{ m}$ ,  $\Delta Y = 90 \text{ m}$ ) de ces discordances et appliqué aux coordonnées Lambert Nord-Sahara une modification des constantes  $X$  et des constantes  $Y$  à cette moyenne.

De sorte que pour chacune des zones Lambert d'Algérie, on obtient les coordonnées Lambert Voirol 1960 en ajoutant au coordonnées Lambert Nord-Sahara les constantes ( $\Delta X = 135 \text{ m}$ ,  $\Delta Y = 90 \text{ m}$ ) [\[KADRI.C, 2003\]](#).

**Chapitre II**  
**MESURES GPS ET COMBINAISON**  
**LINEAIRE**

## II.1 Mesures GPS

Il y a deux observables principales en technique de positionnement GPS : les mesures de code et de phase, La figure 1 représente ces deux mesures [\[E.Henrion, 2013\]](#).

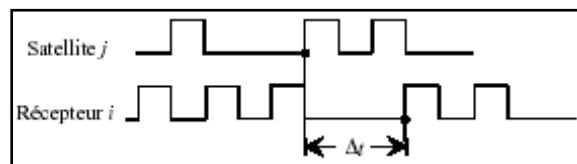


**Figure II.1:** Mesures de phase et code en positionnement GPS.

Les deux types de mesures sont schématisés entre satellite et récepteur (phase porteuse sous forme de sinusoïde et code sous forme de créneaux) sur la figure II.1.

### II.1.1 Mesure de code

Le satellite génère un code pseudo-aléatoire qui va arriver avec un certain retard au récepteur, ce dernier va à son tour générer un code. Le récepteur compare et synchronise les deux, cette comparaison va permettre de trouver ce retard qu'a mis le code pour aller du satellite au récepteur et ainsi en déduire la distance entre les deux, la figure II.2 illustre cette opération [\[E.Henrion,2013\]](#).



**Figure II.2 :** Détermination du retard par comparaison des codes émis et reçu.

L'équation d'observation de la mesure GPS de pseudo-distance s'écrit alors :

$$P_r^s = \rho_{r,g}^s + d\rho + c(dt_r + dt^s) + d_{r,ion}^s + d_{r,tro}^s + c(b_r + b^s) + \xi_p + \xi_{multi-trajet,P} \quad (II.1)$$

Avec :

$\rho_{r,g}^s$  : La distance géométrique entre le satellite  $s$  et le récepteur  $r$ ,

$d\rho$  : L'erreur de l'orbite.

$C$  : la vitesse de la lumière.

$dt^s$  : L'erreur d'horloge du satellite  $s$ .

$dt_r$  : L'erreur d'horloge du récepteur  $r$ .

$d_{r,ion}^s$  : Le délai ionosphérique.

$d_{r,tro}^s$  : Le délai troposphérique.

$\xi_p$  : Le bruit du récepteur.

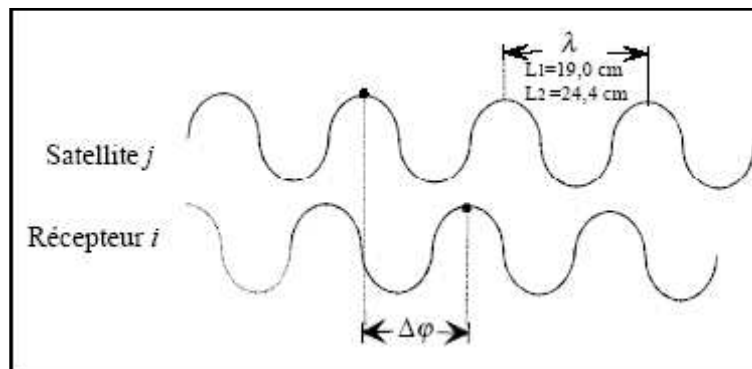
$\xi_{multi-trajet,P}$  : L'erreur due au multi-trajet.

$b^s$  et  $b_r$  : le biais électronique satellite et récepteur.

### II.1.2 Mesure de Phase

La mesure de phase se base sur les ondes porteuses L1 et L2 du satellite qui ont respectivement des longueurs d'onde de 19,0 et 24,4cm. Le principe est le même qu'étudié précédemment, le satellite va générer un signal et le récepteur va générer à son tour un signal homologue. Les signaux reçus et générés sont ensuite comparés, la figure II.3 présente la mesure de déphasage entre les signaux générés par le satellite et le récepteur

[\[E.Henrion, 2013\]](#).



**Figure II.3** : Comparaison des signaux émis et reçus issus du satellite et récepteur.

L'équation d'observation de la mesure GPS de phase s'écrit alors :

$$\Phi_r^s = \rho_{r,g}^s + d\rho + c(dt_r - dt^s) - d_{r,ion}^s + d_{r,tro}^s + \lambda B_r^s + \xi_\Phi + \xi_{multi\text{-}trajet,\Phi} \quad (\text{II.2})$$

Avec  $\lambda$ , la longueur d'onde de la porteuse,  $B_r^s$  regroupe les décalages dus à l'ambiguïté entière et aux biais électroniques,  $\xi_\Phi$  le bruit récepteur et  $\xi_{multi\text{-}trajet,\Phi}$  l'erreur due aux trajets multiples. Rigoureusement on a :

$$\lambda B_r^s = \lambda N_r^s + c(b_r + b_s) \quad (\text{II.3})$$

$N_r^s$  : est l'ambiguïté entière inconnue et constante pour chaque séquence continue,  $b_r$  et  $b_s$  sont les biais électroniques que l'on peut considérer comme constants sur la durée d'une séquence. Nous désignons par  $B_r^s$  l'ambiguïté réelle; cette valeur varie donc à chaque passage du satellite au-dessus de chaque station, mais est constante sur une séquence continue de données.

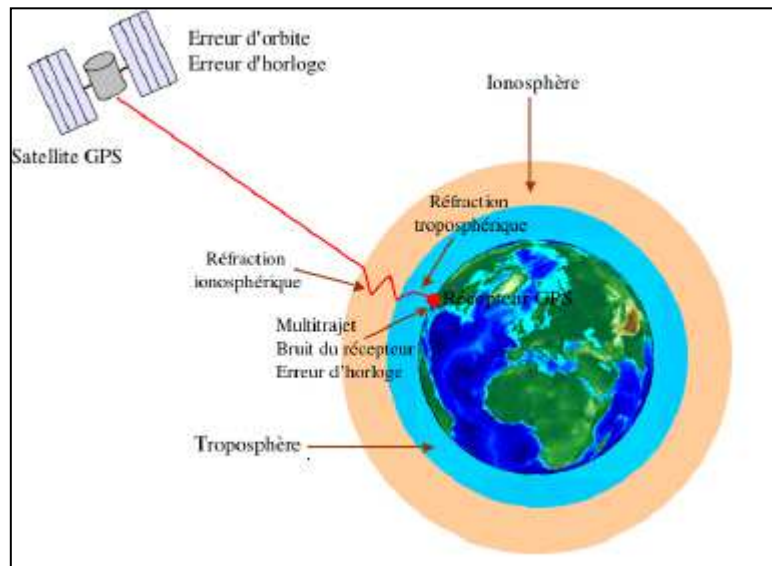
Les relations (II.1) et (II.2), représentant les équations fondamentales d'observation GPS, indiquent le potentiel multidisciplinaire du GPS. Le terme  $\rho_{r,g}^s$  contient l'information géométrique et permet d'obtenir ainsi la position du récepteur, l'orbite du satellite, l'excentrement d'antenne et ses variations. Les termes  $dt_r$  et  $dt^s$  contiennent l'information concernant les horloges du satellite et du récepteur permettant le transfert du temps sur des distances intercontinentales. Enfin, les termes  $d_{r,ion}^s$  et  $d_{r,tro}^s$  contiennent l'information concernant l'ionosphère et la troposphère.

## II.2 Sources d'erreurs

La figure II.4 montre l'existence de sept différentes sources d'erreurs affectant la mesure GPS. Ces erreurs peuvent être classées en trois catégories, selon leur corrélation spatiale et temporelle :

- Liées au satellite seulement : erreur de l'horloge du satellite, SA (avant mai 2000).
- Spatialement corrélées : erreur d'orbite, erreurs atmosphériques (troposphère et ionosphère).
- Erreurs indépendantes : bruit du récepteur et multi-trajet.

Le premier type d'erreurs peut être totalement éliminé par la différence simple entre deux récepteurs. Le second peut être réduit par la différence double; toutefois, les erreurs résiduelles augmentent lorsque la longueur de la ligne de base devient de plus en plus importante. Le troisième type d'erreurs ne peut être éliminé par aucune technique de différentiation; ces erreurs sont indépendantes de la longueur de la ligne de base.



**Figure II.4 :** Schéma illustrant les différentes erreurs et biais affectant le signal GPS entre sa transmission depuis le satellite jusqu'à sa réception au sol.

### II.2.1 Erreur d'orbite

L'erreur orbitale est due à l'incertitude des éphémérides transmises. Cette incertitude est le résultat des limitations associées à la technique de prédiction des éphémérides. L'erreur est généralement de quelques mètres, elle peut aller jusqu'aux dizaines de mètres.

En positionnement relatif, les techniques de différentiation entre récepteurs peuvent être considérées comme étant un moyen très efficace pour la réduction de l'effet de l'erreur orbitale.

Cette erreur se traduit sur le calcul de la ligne de base suivant la formule [\[Leick, 1990\]](#) :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{db}{b} \quad (\text{II.4})$$

Tel que :  $\rho$  et  $b$  représentent la distance antenne-satellite et la longueur de la ligne de base respectivement.

L'utilisation des orbites précises en post-traitement permet de pallier à ce problème. L'orbite précise est calculée à partir d'un réseau étendu de points de référence, sa précision peut atteindre les quelques centimètres [\[site web JPL\]](#). Toutefois, l'utilisation des orbites précises n'est pas possible pour les applications en temps réel.

### II.2.2 Erreur troposphérique

Le retard troposphérique causé par la réfraction du signal GPS dans la troposphère comprend deux parties. La partie la plus importante du retard est due à la composante sèche de la troposphère, laquelle est stable et prévisible. Le retard résultant de la vapeur d'eau est plus faible, mais varie rapidement dans le temps.

Pour des distances courtes entre la station de référence et le mobile et dès lors que la différence en altitude est plus ou moins faible, le retard troposphérique est fortement corrélé.

Cependant, quand la séparation ou la différence de hauteur est importante, les conditions atmosphériques locales sont différentes et donc, la corrélation devient faible [Leick, 1990].

Pour obtenir des estimations plus précises, le contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau le long du trajet de propagation peut être mesuré avec un radiomètre à vapeur d'eau [Ning Luo, 2001]. Cependant, les instruments sont très sophistiqués et onéreux. Actuellement, les réseaux GPS sont aussi utilisés pour la prédiction du retard troposphérique relatif à la composante humide [Zhang, 1999].

### II.2.3 Erreur ionosphérique

L'ionosphère est un milieu dispersif, constitué de particules chargées (ions) qui orbitent autour de la Terre au-delà de 60 Km d'altitude. L'onde porteuse du signal GPS doit donc traverser cette couche avant d'arriver à la station.

Le fait que cette couche ne soit pas neutre entraîne une perturbation de la vitesse de toute onde électromagnétique qui se propage en son sein. L'amplitude de cette perturbation est liée à la longueur d'onde et à la densité de particules chargées dans le milieu traversé. L'effet sur la distance peut varier de 150 mètres (à midi, pendant les périodes de grande activité solaire, avec un satellite proche de l'horizon) jusqu'à moins de 5 mètres (la nuit, pendant une période d'activité solaire faible, avec un satellite au zénith) [Congyu, 1993].

Le délai de propagation ionosphérique est donné alors, par la relation :

$$d_{r,ion}^s = c \delta t = \int_r^s (n_I - 1) ds \quad (II.5)$$

$n_I$  est l'indice de réfraction.

Où, l'intégrale porte sur le trajet suivi par le signal. L'approximation précédente introduit une erreur inférieure 0.25%. L'approximation due à la courbure du signal est inférieure à 1% [Vesna Ducic, 2004].

Le caractère dispersif de l'ionosphère permet avec une combinaison adéquate des deux fréquences, d'éliminer une grande partie de l'effet de ce milieu. Les coefficients de corrections transmis par les satellites ne peuvent éliminer que les 50% du retard ionosphérique aux latitudes moyennes [Ning Luo, 2001].

Le délai de propagation dû aux fluctuations de l'indice de réfraction se traduit alors par un retard sur les mesures de pseudo-distances ou une avance sur les mesures de phase (par rapport à la distance géométrique). Pour les deux fréquences  $f_1$  et  $f_2$ , la correspondance entre les décalages temporels, le contenu électronique total et l'erreur sur l'estimation de la distance est donnée dans le tableau II.1.

Fréquence(mhz)	Temps (s)	Distance (m)	TEC(e/m <sup>2</sup> )
f <sub>1</sub> = 1575.42	1*10 <sup>-9</sup>	0.299 m	1.841*10 <sup>16</sup>
	0.543*10 <sup>-9</sup>	0.267 m	1*10 <sup>16</sup>
f <sub>2</sub> = 1227.60	1*10 <sup>-9</sup>	0.300 m	1.119*10 <sup>16</sup>
	0.894*10 <sup>-9</sup>	0.162 m	1*10 <sup>16</sup>

**Tableau II.1** : Correspondance Temps-Distance-TEC [[Vesna Ducic, 2004](#)].

Les nouvelles recherches sur la prédiction du retard ionosphérique utilisant un réseau mondial ou régional de points GPS ont donné de bons résultats. L'utilisation des techniques d'interpolation ou la collocation par moindres carrés permet de corriger l'effet de cette erreur sur le positionnement [[Raquet, 1998](#)].

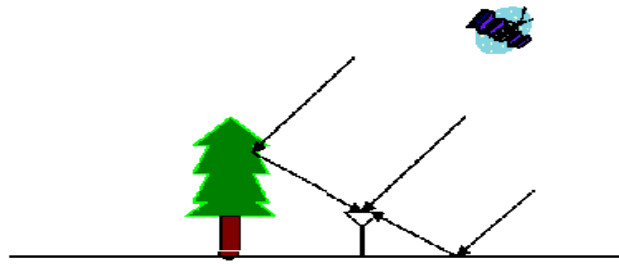
#### II.2.4 Multi-trajet

Le multi-trajet se produit lorsque le signal transmis par le satellite atteint l'antenne GPS après réflexion sur la surface avoisinante. La valeur de l'erreur induite par ce phénomène dépend des propriétés du réflecteur (environnement) , du type du récepteur et de l'antenne utilisés.

L'effet du multi-trajet sur la mesure de pseudo-distance (code) est généralement beaucoup plus important que sur la phase de la porteuse. Il peut atteindre jusqu'à la moitié de la longueur du code pseudo-aléatoire (PRN). Si on suppose un environnement dans lequel l'intensité du signal réfléchi ne dépasse jamais celle du signal direct [[Ning Luo, 2001](#)]. Par contre, dans le cas de la phase ; l'erreur due au multi-trajet est toujours inférieure au quart de la longueur d'onde de la porteuse [[Fotopoulos, 2000](#)].

Généralement, dans le cas du positionnement statique, le multi-trajet est de nature non-gaussienne et montre des oscillations sinusoïdales, avec une période de quelques minutes suite aux changements de la géométrie des satellites. Pour les applications cinématiques, il se comporte plus aléatoirement car le mouvement de l'antenne mobile (Rover) fait changer la géométrie d'une façon relativement aléatoire.

Pour la plupart des applications de positionnement de précision ; le multi-trajet est l'une des sources d'erreur les plus importantes car son effet est local et ne peut être réduit ni par différentiation ni par modélisation.



**Figure II.5 :** Multi-Trajet.

Néanmoins, afin de réduire l'effet du multi-trajet les précautions suivantes sont suggérées :

- Le choix d'un emplacement là où il y'a un minimum d'objets réfléchissants.
- L'utilisation d'une antenne ayant une réponse faible dans la direction de l'objet réfléchissant.

Le multi-trajet peut aussi être réduit par l'utilisation des récepteurs dotés d'algorithmes puissants, tels que : Narrow-Correlator [[Van Dierendonck et al, 1992](#)], Multipath Estimation Technology (MET) [[Townsend et al, 1995](#)], ou Multipath Mitigation Method (MMT) [[Weil et al, 2000](#)].

## II.2.5 Bruit du récepteur

La mesure GPS est affectée par un bruit lié au récepteur lui-même, ce bruit résulte du fait qu'il est impossible d'enregistrer les différents signaux issus des différents satellites GPS avec la même précision.

Le code  $C/A$  peut être mesuré avec une précision moyenne de 1.5 m, cette précision peut varier entre 0.2 et 3 mètres, selon l'intensité du signal reçu [[Varner, 2000](#)]. Pour un récepteur standard, le bruit affectant le code  $Y$  ou  $M$  est de 10 à 30 cm et est le même pour le code  $P$ , car les deux ont la même fréquence fondamentale.

La mesure de phase est moins bruitée que celle du code, l'erreur due au bruit est généralement de 1% de la longueur d'onde de la porteuse [[Seeber, 2003](#)]. Cette erreur peut varier entre 0.1% et 10%, selon le type du récepteur et l'intensité du signal [[Varner, 2000](#)].

Des tests ont été effectués par [[Raquet, 1998](#)] avec les récepteurs Ashtech Z-12, ils ont donné des résultats semblables : le bruit de la mesure du code (pseudo-distance) est de l'ordre du mètre, tandis que celui de la phase est millimétrique (<2mm).

## II.2.6 Les erreurs d'horloge

Les horloges du récepteur et du satellite ne sont pas parfaitement synchronisées.

### L'erreur d'horloge du satellite

L'erreur d'horloge satellite est la différence entre le temps absolu (temps GPS) et le temps du satellite dans le référentiel de l'horloge du satellite. Même si les horloges satellites sont suffisamment stables, elles peuvent dériver avec le temps. Les paramètres de correction de ces décalages d'horloges sont fournis à différentes époques dans le message de navigation. La précision des corrections d'horloges diminuera ainsi avec le temps avant qu'un nouvel ensemble de paramètres ne soit produit. L'erreur d'horloge résiduelle après correction à partir des paramètres radiodiffusés est de l'ordre de 11 ns.

Si deux stations GPS  $i$  et  $k$  observent le même satellite  $j$ , il est possible d'éliminer l'erreur de décalage d'horloge satellite par simple différence des mesures entre les deux stations (ou double différence lorsqu'il y a deux satellites en visibilité).

### L'erreur d'horloge du récepteur

L'erreur d'horloge du récepteur est la différence entre le temps absolu (temps GPS) et le temps du récepteur dans le référentiel de l'horloge du récepteur. La stabilité des horloges récepteurs est bien inférieure à celle des horloges satellites et il est nécessaire de l'estimer dans les calculs ou de l'éliminer par simple ou double différence.

## II.2.7 Centre de phase des antennes

Le cœur d'une antenne GPS présente un solénoïde qui transforme l'onde électromagnétique reçue en signale électrique. Le centre de phase de l'antenne est alors la position du point où s'opère. Cet emplacement virtuel dépend de l'incidence du signal GPS (azimuth et élévation) et de la fréquence mesurée ( $L_1$  ou  $L_2$ ).

L'erreur de positionnement sera d'autant plus faible que les décalages introduits se compenseront grâce à un temps de mesure long et une bonne répartition spatiale des satellites. En revanche, un décalage verticale sera inévitable puisque les satellites sont repartis sur l'hémisphère supérieure. L'effet de cette excentricité peut être fortement diminué pour un positionnement relatif en utilisant le même type d'antenne, toutes orientées dans la même direction (généralement le Nord). De plus, pour des types d'antennes différents, on utilise des tables de calibration du center de phase, réalisées en laboratoires. [\[Pierre BETTINELLI .2007\]](#)

## II.3 Bilan d'erreurs de la mesure GPS

Source d'erreur	Valeurs absolues (m)	Remarques
Orbite	5 - 10 5 cm (IGS)	Connaissance de la position du satellite
Horloge satellite $c.dt^S$	10	Stabilité en fréquence du satellite par rapport au temps GPS, variations d'accélération ...
Horloge récepteur $c.dt_r$	10	Décalage d'horloge du récepteur par rapport au temps GPS
Ionosphère	02 - 50	Dépend de l'angle d'élévation du satellite et de l'activité solaire
Troposphère	02 - 30	Dépend surtout du contenu en vapeur d'eau de la basse atmosphère
Multi-trajet (codes) $\xi$ Multi-trajet, P	0.2 - 3	Les signaux GPS peuvent être réfléchis par des objets situés à proximité
Bruit récepteur (codes) ( $\xi_p$ )	0.1 - 3	Dépend de l'électronique du récepteur et de son environnement
Multi-trajet (phases) $\xi$ multi-trajet, $\Phi$	0.001 - 0.03	Les signaux GPS peuvent être réfléchis par des objets situés à proximité du récepteur
Bruit récepteur (phases) ( $\xi_\phi$ )	0.0002 - 0.002	Dépend de l'électronique du récepteur et de son environnement
A.S (Selective Availability)	5 - 80	Dégradation volontaire des éléments d'orbite et d'horloge dans les messages de navigation et des performances des oscillateurs. S.A est supprimée depuis mai 2000.

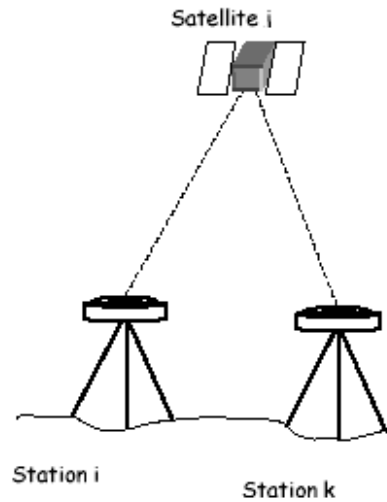
**Tableau II.2 :** Valeur absolue des différentes erreurs et biais influençant les mesures GPS  
[Ning Luo, 2001].

## II.4 Observables différenciées

L'utilisation des combinaisons linéaires (simple, double et triple) des observations de phase dans les traitements, permet d'éliminer certains systématismes (biais des horloges, ambiguïté ...etc.).

### II.4.1 Simple différence

Cette méthode est plus connue comme étant la différence des mesures de la phase (ou de code) entre une position satellite et deux stations observant simultanément le même satellite. Cette différence élimine l'effet de biais d'horloge du satellite et réduit les erreurs d'orbite et de propagation d'onde.



**Figure II.6 :** la simple différence.

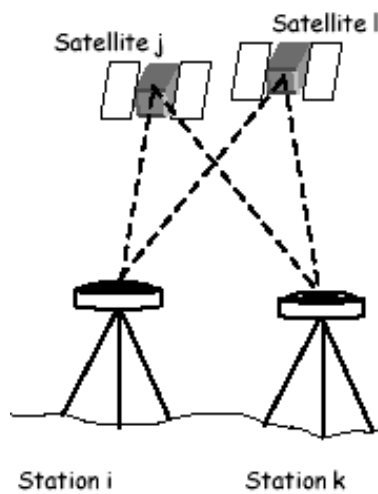
$$L_{Fkl}^i = L_{Fk}^i - L_{Fi}^i \quad (\text{II.6})$$

$i$  :représente l'indice du satellite.

$k,l$  :représentent les indices relatifs aux stations.

#### II.4.2 Double différence

C'est la différence de deux différences simple relatives à deux satellites différents à la même époque avec les mêmes récepteurs, Cette différence élimine les décalages d'horloges des satellites et des récepteurs.



**Figure II.7 :** La double différence.

$$L_{Fkl}^{ij} = L_{Fkl}^i - L_{Fkl}^j \quad (\text{II.7})$$

$i, j$  : représentent les indices relatifs aux satellites.

$k, l$  :représentent les indices relatifs aux stations.

Les équations qui suivent décrivent la relation de la double différence pour la mesure de phase et la mesure de code pour les deux fréquences  $f_1$  et  $f_2$ .

$$L_{1kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} - I_{kl}^{ij} + \Delta \rho_{kl}^{ij} + \lambda_1 n_{1kl}^{ij} \quad (\text{II.8})$$

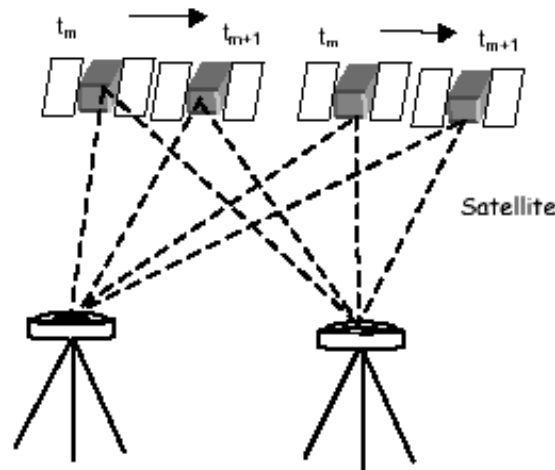
$$L_{2kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta \rho_{kl}^{ij} + \lambda_2 n_{2kl}^{ij} \quad (\text{II.9})$$

$$P_{1kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} - I_{kl}^{ij} + \Delta \rho_{kl}^{ij} \quad (\text{II.10})$$

$$P_{2kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta \rho_{kl}^{ij} \quad (\text{II.11})$$

### II.4.3 Triple différence

La triple différence (TD) est la différence de deux doubles différences pour deux époques directement consécutives. Cette différence élimine les ambiguïtés entières et elle est d'ailleurs utilisée principalement pour rechercher et éliminer les sauts de cycles.



**Figure II.8** : La triple différence.

## II.5 Combinaisons linéaires de l'observation GPS

Des nouvelles observations GPS peuvent être produites par la combinaison des deux mesures de phase  $L_1$  et  $L_2$  (ou code  $P_1$  et  $P_2$ ). Celles-ci sont utilisées pour des besoins différents à savoir, le calcul du TEC (Total Electronic Content), la résolution de l'ambiguïté, la détection et correction des sauts de cycles.

La combinaison linéaire des deux observations de phase  $L_1$  et  $L_2$  (ou code  $P_1$  et  $P_2$ ) peut être exprimée comme suit :

$$L = n_1 L_1 + n_2 L_2 \quad (\text{Phase}) \quad (\text{II.12})$$

$$P = n_1 P_1 + n_2 P_2 \quad (\text{Code}) \quad (\text{II.13})$$

Où  $n_1$  et  $n_2$  sont des nombres arbitraires.

### II.5.1 La combinaison Ionosphère-Free

La combinaison linéaire est décrite comme suit:

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (\text{II.14})$$

Cette combinaison est appelée souvent Ionosphère-Free car le délai ionosphérique est pratiquement éliminé [U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez .2001]. De la même manière, la combinaison de la mesure du code permet d'éliminer la quasi-totalité de l'effet ionosphérique.

Prenons en considération la double différence de la mesure de phase et négligeons le retard troposphérique  $\Delta \rho_{kl}^{ij}$  dans l'équation (II.8) et (II.9), la combinaison linéaire de l'Ionosphère-Free est écrite sous la forme suivante :

$$L_{3kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} + B_{3kl}^{ij} \quad (\text{II.15})$$

Où, le biais de l'Ionosphère-Free  $B_{3kl}^{ij}$  s'écrit sous la forme suivante :

$$B_{3kl}^{ij} = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \lambda_1 n_{1kl}^{ij} - f_2^2 \lambda_2 n_{2kl}^{ij}) \quad (\text{II.16})$$

### II.5.2 La combinaison Geometry-Free

L'équation d'observation de la combinaison linéaire Geometry-Free  $L_4$  est écrite comme suit :

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (\text{II.17})$$

L'équation suivante décrit la relation de la combinaison linéaire Geometry-Free  $L_4$  :

$$L_{4\ kl}^{ij} = L_{1\ kl}^{ij} - L_{2\ kl}^{ij} = \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right) I_{kl}^{ij} + (\lambda_1 n_{1\ kl}^{ij} - \lambda_2 n_{2\ kl}^{ij}) \quad (\text{II.18})$$

Dans cette combinaison ; les termes géométriques (la distance géométrique entre récepteur et satellite, l'erreur d'orbite) ainsi que l'erreur d'horloge, le délai troposphérique sont éliminés. Il reste seulement les termes relatifs aux délais ionosphériques et à l'ambiguïté.

Cette combinaison est utilisée pour la détermination des modèles ionosphériques [\[U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez .2001\]](#).

De la même manière, on peut déduire l'équation de la combinaison linéaire Geometry-Free par la mesure de code ; on utilise les équations (II.10) et (II.11).

### II.5.3 La combinaison Wide-Lane

La combinaison linéaire Wide-Lane est décrite de la manière suivante :

$$L_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) \quad (\text{II.19})$$

Cette combinaison est utilisée pour la détection des sauts cycle et la résolution de l'ambiguïté [\[Yongjin Moon .2004\]](#). On utilise les équations (II.8) et (II.9) et en négligeant la réfraction ionosphérique  $I_{kl}^{ij}$  et la réfraction troposphérique  $\Delta \rho_{kl}^{ij}$  on obtiendra :

$$L_{5\ kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} + \frac{c}{f_1 - f_2} (n_{1\ kl}^{ij} - n_{2\ kl}^{ij}) \quad (\text{II.20})$$

$\lambda_5 = \frac{c}{f_{L1} - f_{L2}} = 0.862\ m$  : Longueur d'onde de Wide-Lane.

$n_{5\ kl}^{ij} = n_{1\ kl}^{ij} - n_{2\ kl}^{ij}$  : est appelé ambiguïté de Wide-Lane.

L'inconvénient de la combinaison Wide-lane réside dans l'amplification du bruit de mesure par un facteur de six par rapport à l'utilisation de la phase originale  $L_1$  et  $L_2$  [\[Yongjin Moon .2004\]](#).

### II.5.4 La combinaison Melbourne-Wubbena

La combinaison  $L_6$  (Melbourne-Wubbena) est une combinaison linéaire des observations de phase ( $L_1$  et  $L_2$ ) et code ( $P_1$  et  $P_2$ ) (Melbourne, 1985-Wubbena, 1985).elle éliminé les effets de la ionosphère, de la géométrie, des décalages d'horloges et de la troposphère. Sa formule :

$$L_6 = \left\{ \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) \right\} - \left\{ \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 P_1 - f_2 P_2) \right\}$$

[\[Pierre BETTINELLI .2007\]](#).

### II.5.5 Récapitulatif des combinaisons linéaires

Les principales caractéristiques des combinaisons linéaires sont résumées dans la table II.3 :

Lc	Combinaison linéaire	Longueur d'onde en (cm)	Bruit relatif en distance (sur L <sub>1</sub> )	Effet Ionosphère relatif (sur L <sub>1</sub> )
L1	Phase de base	19	1.0	1.0
L2	Phase de base	24	1.0	1.6
L3	Ionosphere-Free Lc	0	3.0	0.0
L4	Geometry-Free Lc	∞	1.4	0.6
L5	Wide-Lane Lc	86	5.4	1.3
L6	Melbourne-Wubben	86	-	0

**Tableau II.3** : Comparaison entre les combinaisons linéaires (Lc) et (L1) observées

[\[Pierre BETTINELLI .2007\].](#)

**Chapitre III**  
**DIFFERENTS TYPES DE**  
**TRANSFORMATION**

### III.1 Ellipsoïde de révolution

L'ellipsoïde de révolution utilisé en géodésie est produit par la rotation d'une ellipse autour de son petit axe. C'est une surface mathématique bien définie dont la forme et les dimensions sont définies par deux paramètres, les longueurs du demi-petit axe (**b**) et du demi-grand axe (**a**). La forme d'un ellipsoïde de référence peut être également définie par son aplatissement :  $f = (a - b) / a$  ou son excentricité :  $e = (a^2 - b^2)^{1/2} / a$ .

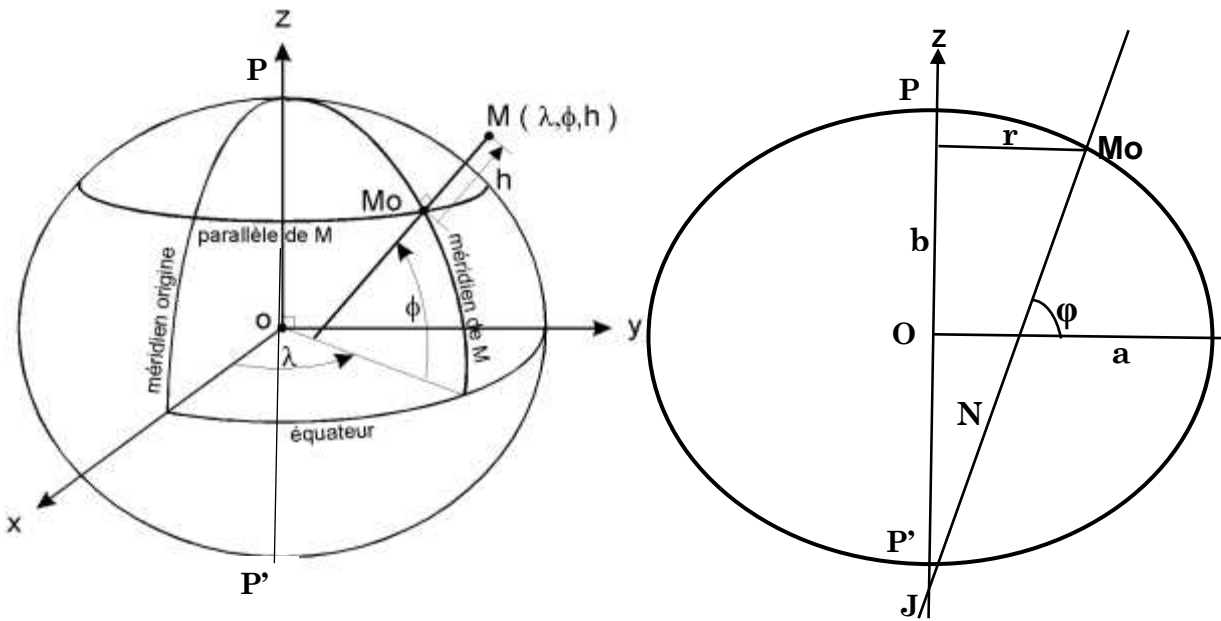


Figure III.1 : L'ellipsoïde de révolution.

**Parallèle** : cercle de rayon.

**Méridien** : demi ellipse (a, b), contenant (PP')

**Equateur** : grand cercle de rayon a.

**Azimut** : angle que fait une direction avec le méridien passant par le point (direction du Nord géographique : Pole P).

**Longitude  $\varphi$**  : angle dièdre compris entre la méridienne origine de GREENWICH et le méridien de lieu.

**Latitude** : angle contenue dans le plan du méridien compté depuis l'équateur et qui fait un angle avec la normale **N** (JMo).

$$N = JMo = r / \cos \varphi \quad (\text{III.1})$$

$$e^2 = 1 - (b/a)^2 \quad (\text{III.2})$$

$$W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} \quad (\text{III.3})$$

$$\rho = \frac{a(1-e^2)}{W^3} = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \quad (\text{III.4})$$

$$N = \frac{a}{W} = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad (\text{III.5})$$

$N$  : grande normale.

$\rho$  : Rayon de courbure moyenne au point de latitude  $\varphi$ .

$e$  : excentricité de l'ellipse définissant l'ellipsoïde de révolutions.

$a$  et  $b$  : demi grand et petite axe perspective [\[Ali Zeggai, 2004\]](#).

## III.2 Systèmes géodésiques

Ce sont les systèmes géodésiques dont l'origine est proche ou voisine du center des masses de la terre et sont liés à un ellipsoïde local ou mondial, appelé parfois datum géodésique [\[Ali Zeggai, 2004\]](#).

### III.2.1 Les systèmes d'origine terrestre

Ils sont basés sur l'utilisation des mesures de géodésie terrestre classique s'appuient notamment :

- sur le choix d'un point fondamental.
- sur le choix d'une (ou plusieurs) base origine.
- sur le choix d'un ellipsoïde.

L'ellipsoïde est choisi de sorte à négliger la déviation de la verticale au point fondamental, la surface de l'ellipsoïde est tangente à celle du géoïde en ce point. Le calage se réalise en pratique en fixant les coordonnées géodésiques du point fondamental et l'azimute de la base origine à des valeurs issues de mesures astronomiques. Enfin, on fixe la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde du point fondamental égale à son altitude

[\[S. Lannuzel, 2000\]](#).

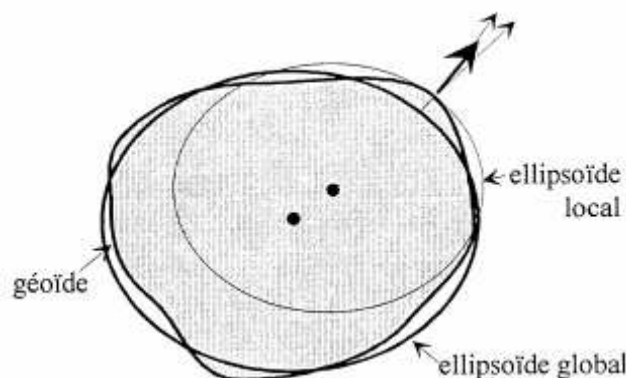


Figure III.2 : L'ellipsoïde global et local, géoïde.

### III.2.2 Les systèmes d'origine spatiale

Ce sont les systèmes définis par le traitement de mesures de géodésie spatiale suivant une méthode dynamique en considérant le champ de pesanteur terrestre et définie par :

**Origine O** : Center de masse de la terre obtenu en annulant les termes de degré un (01) dans le développement en harmoniques sphériques du potentiel terrestre.

**Echelle** : l'unité de longueur est donnée par le choix de la constante gravitationnelle.

**Orientation** : elle s'obtient par rotation à partir du système inertiel dans lesquels les équations dynamiques sont calculées et par l'introduction des phénomènes de précession, nutation, mouvement du pôle et rotation de la terre (Pole instantané) [\[Ali Zeggai, 2004\]](#).

### III.3 Types des coordonnées

La position d'un point dans l'espace peut être exprimée sous forme de coordonnées cartésiennes géocentriques (utilisant un repère tridimensionnel ayant son origine au centre des masses de la Terre, comme intermédiaire lors de calculs), soit sous forme de coordonnées géographiques (sous la forme : longitude, latitude et hauteur ellipsoïdale), soit en coordonnées planes (sur une représentation cartographique en projection).

#### III.3.1 Coordonnées cartésiennes géocentriques

Les coordonnées cartésiennes géocentriques (X, Y, Z) sont exprimées selon les trois 3 axes d'un repère ayant son origine au centre des masses de la Terre.

Nous supposons qu'elles sont toujours exprimées en mètres. Il est clair que les coordonnées cartésiennes sont tridimensionnelles.

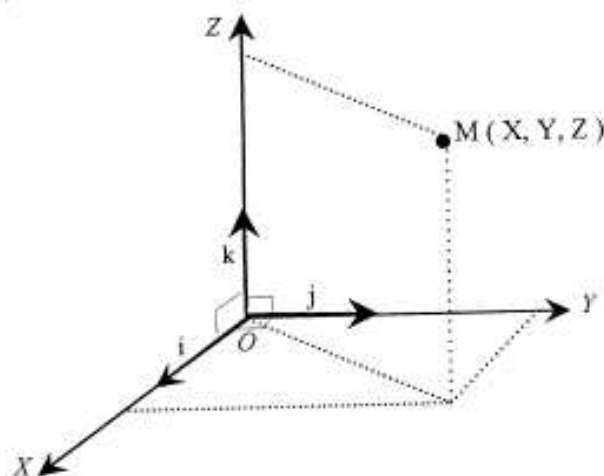


Figure III.3 : Coordonnées cartésiennes.

### III.3.2 Coordonnées géographiques

Si, de plus, on choisit un ellipsoïde comme surface de référence terrestre (on parle d'ellipsoïde géodésique) et un méridien origine (origine de la mesure des longitudes), on peut définir les coordonnées géographiques  $(\lambda, \varphi, h)$  d'un point  $M$  quelconque de l'espace.

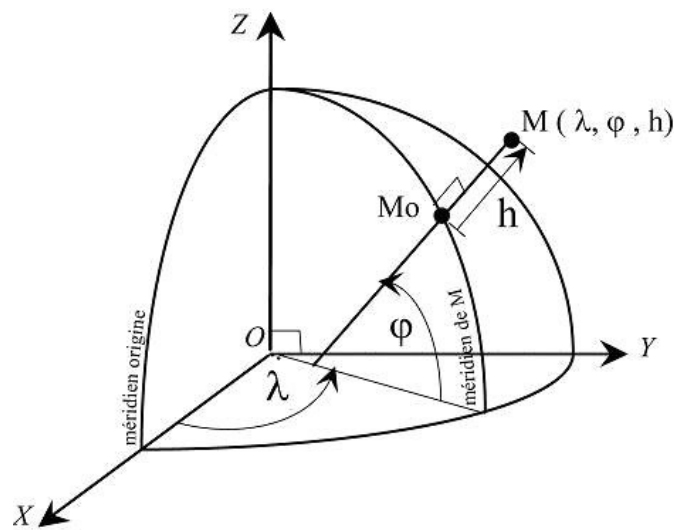
Les coordonnées  $(\lambda, \varphi, h)$  sont tridimensionnelles dans la mesure où elles permettent la description d'un point quelconque de l'espace. Mais les coordonnées  $(\lambda, \varphi)$  elles, sont bidimensionnelles ou planimétriques, elles constituent un paramétrage d'une surface

[\[Didier BOUTELOUP, 2002\].](#)

$\lambda$  : longitude géodésique

$\varphi$  : latitude géodésique.

$h$  : hauteur ellipsoïdique.



**Figure III.4 :** Coordonnées géographiques.

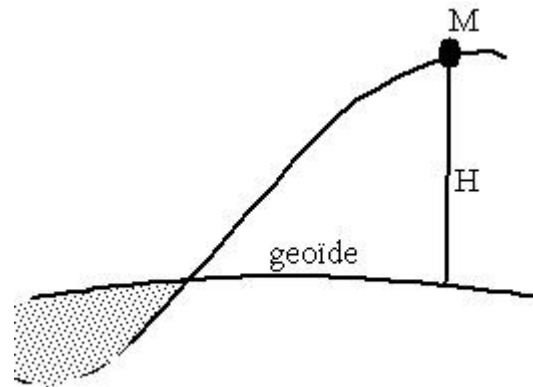
### III.3.3 Coordonnées planes

Les coordonnées planes sont utilisées sur les cartes et les plans, dont la réalisation nécessite un système de projection cartographique. Chaque point de la surface terrestre est d'abord projeté sur l'ellipsoïde selon la direction normale. Puis l'ellipsoïde est transformé en surface plane. Les coordonnées associées à cette surface plane sont des coordonnées cartésiennes bidimensionnelles : E (Easting) pour l'abscisse et N (Northing) pour l'ordonnée. Elles sont calculées en fonction de la longitude  $\lambda$  et de la latitude  $\varphi$ . Ces coordonnées sont également appelées coordonnées en projection ou coordonnées cartographiques.

### III.3.4 Altitudes

L'altitude d'un point de la surface topographique est, de manière très approchée, la distance entre le point et une surface de référence appelée géoïde.

Le géoïde est une équipotentielle du champ de pesanteur ( $W=W_0$ ) qui correspond approximativement au niveau moyen des mers.



**Figure III.5 :** Altitude Orthométrique.

Le tableau ci-dessous résume les éléments nécessaires à la description d'un type de coordonnées :

	Cartésiennes	Géographiques	Planes
Désignation	(X, Y, Z)	( $\lambda$ , $\phi$ , h)	(E, N)
Unité angulaire		x	
Unité linéaire	x	x	x
Projection			x
Méridien origine		x	x
Ellipsoïde		x	x
Système géodésique	x	x	x

**Tableau III.1 :** Éléments constitutifs d'un système de coordonnées.

## III.4 Passages entre coordonnées cartésiennes et géographiques

### III.4.1 Passage des coordonnées géographiques aux coordonnées cartésiennes

Pour transformer des coordonnées géographiques  $(\lambda, \varphi, h)$ , en coordonnées géocentriques  $(X, Y, Z)$ , on applique les formules suivantes :

$$\begin{cases} X = (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ Y = (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ Z = (N(1 - e^2) + h) \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$$N = \frac{a}{W} = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad (N : \text{normale a ellipsoïde au point M}).$$

$$e^2 = 1 - (b/a)^2$$

Les paramètres  $a$  (grand axe) et  $e$  (excentricité de ellipsoïde) sont dépendants de l'ellipsoïde de référence utilisé.

L'altitude  $h$  utilise dans la détermination des coordonnées géocentriques est la hauteur qui sépare le point à transformer de la surface de l'ellipsoïde (ne pas confondre avec au-dessus de la mer) [\[Ali Zeggai, 2004\]](#).

### III.4.2 Passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées géographiques

Le passage  $(x, y, z) \rightarrow (\lambda, \varphi, h)$  est un peu plus compliqué car la grandeur  $N$  est fonction de la latitude. Le triple  $(X, Y, Z)$  peut être converti ou transformé de la manière suivante :

#### a. Processus itératif

Détermination de la longitude :

$$\lambda = \arctg \frac{Y}{X} \quad (\text{III.7})$$

Détermination de la latitude :

La latitude est obtenue par des approximations successives, l'étape est la suivante :

$$P = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (\text{III.8})$$

$$\varphi_0 = \arctan \frac{Z}{P} \quad (\text{III.9})$$

$$N_0 = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}} \quad (\text{III.10})$$

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{Z + N_0 \cdot e^2 \cdot \sin \varphi_0}{P}\right) \quad (\text{III.11})$$

*Etc...*

$$N_i = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_i)^{1/2}} \quad (\text{III.12})$$

$$\varphi_{i+1} = \arctan\left(\frac{Z + N_i \cdot e^2 \cdot \sin \varphi_i}{P}\right) \quad (\text{III.13})$$

Jusqu'à ce que la condition soit vérifiée  $|\varphi_{i+1} - \varphi_i| \leq \text{critère d'arrêt}$ .

#### Hauteur ellipsoïdique :

Après calcul de la latitude par approximations successives, la hauteur ellipsoïdique est obtenue par la formule suivante [\[Ali Zeggai, 2004\]](#) :

$$h = \frac{P}{\cos \varphi} - N \quad (\text{III.14})$$

#### **b. Processus direct**

##### Détermination de la longitude :

$$\lambda = \arctg \frac{Y}{X} \quad (\text{III.15})$$

##### Détermination de la latitude :

$$f = 1 - \sqrt{1 - e^2} \quad (\text{III.16})$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (\text{III.17})$$

$$\mu = \arctan \left[ \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot \left( (1 - f) + \left( \frac{e^2 a}{R} \right) \right) \right] \quad (\text{III.18})$$

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{Z(1 - f) + e^2 a \cdot \sin^3 \mu}{(1 - f) \left[ \sqrt{X^2 + Y^2} - e^2 a \cdot \cos^3 \mu \right]} \right] \quad (\text{III.19})$$

#### Hauteur ellipsoïdique :

Après calcul de la latitude, la hauteur ellipsoïdique est obtenue par la formule suivante :

$$h = \left[ \sqrt{X^2 + Y^2} \cdot \cos \varphi \right] + \left[ Z \sin \varphi \right] - \left[ a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} \right] \quad (\text{III.20})$$

Les deux processus fournissent un résultat numérique identique

[\[Didier BOUTELOUP, 2003\]](#).

### III.5 Transformations des coordonnées

La transformation des données d'un système géodésique à un autre, nécessite la connaissance des paramètres de passage avec l'emploi d'un modèle adéquat.

Il n'existe aucune méthode théorique directe de passage d'un système à l'autre car chaque système géodésique (spatiale,..) repose sur le choix d'un modèle [\[Ali Zeggai, 2004\]](#).

#### III.5.1 Transformations 3D tridimensionnelle

La transformation ne peut s'effectuer que par la connaissance des coordonnées de certaines stations dans les deux systèmes on obtient une transformation tridimensionnelle à sept (07) paramètres à savoir :

- Trois (3) constances de translation.
- Trois (3) paramètres définissant la rotation générale dans l'espace.
- paramètre d'échelle, plus connu sous le nom de facteur d'échelle.

Cette transformation est appelée parfois transformations d'Helmert à sept (07) paramètres dont la forme générale :

$$X_1 = T + k \cdot R_{(Ex, Ey, Ez)} \cdot X_2 \quad (\text{III.21})$$

X : Vecteur position

T : Translation

R : Rotation autour des 3 axes

K : facteur d'échelle est proche de l'unité, on peut écrire que  $k=1+\delta k$  et que  $\delta k < 0.000001$ .

Nous obtenons un système de trois (03) équations à sept (07) inconnues .La solutions exige un minimum de trois points [\[Ali Zeggai, 2004\]](#).

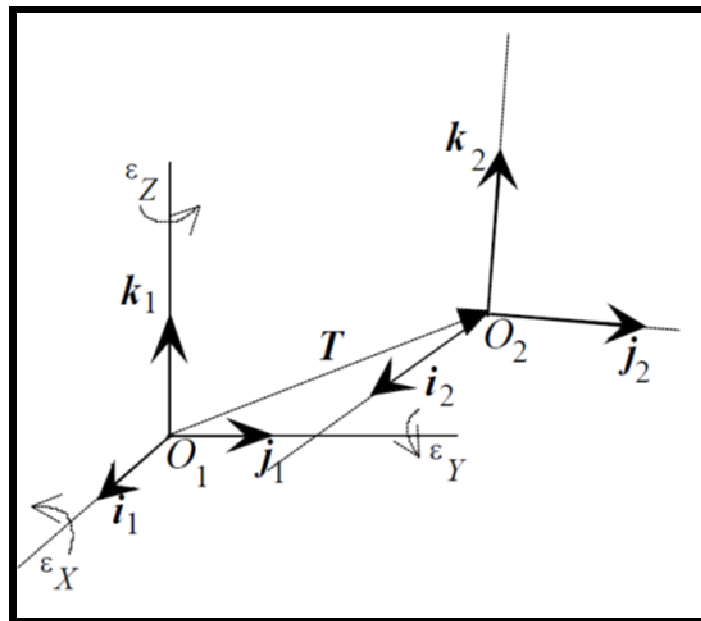


Figure III.6 : Changement de système de coordonnées.

### III.5.1.1 Transformation BURSA WOLF

Modélisation d'un changement entre deux repères affines orthogonaux R1 et R2 par 7 paramètres :

- Translations  $T \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix}$
- Facteur d'échelle  $k$  tel que :  $\|i_1\| = (1+k)\|i_2\|$ .
- Rotations  $(\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z)$  autour du 1er, du 2ème et 3ème axes.

Soient  $(X_1, Y_1, Z_1)$  et  $(X_2, Y_2, Z_2)$  les coordonnées de M dans respectivement R1 et R2. on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + (1+k) \begin{pmatrix} \cos\varepsilon_Y \cos\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_X \sin\varepsilon_Z & -\sin\varepsilon_Y \\ -\cos\varepsilon_X \sin\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_X \cos\varepsilon_Z & \sin\varepsilon_X \cos\varepsilon_Y \\ +\sin\varepsilon_X \sin\varepsilon_Y \cos\varepsilon_Z & +\sin\varepsilon_X \sin\varepsilon_Y \sin\varepsilon_Z & \\ \sin\varepsilon_X \sin\varepsilon_Z & -\sin\varepsilon_X \cos\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_X \cos\varepsilon_Z \\ +\sin\varepsilon_X \sin\varepsilon_Y \cos\varepsilon_Z & +\cos\varepsilon_X \sin\varepsilon_Y \sin\varepsilon_Z & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Lorsque  $k$  et  $(\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z)$  sont suffisamment petites, on peut négliger les termes d'ordres supérieurs à 1, la formule générale peut se linéariser en :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 1+k & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 1+k & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 1+k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Le passage d'un système géodésique à un autre est donc défini par les sept paramètres  $T = (T_X, T_Y, T_Z, k, \varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z)$  d'une similitude. T est a priori inconnue ; pratiquement, ces inconnues sont pratiquement estimées par moindres carrées à partir de  $n$  points connus ( $n > 3$ ) dans les deux systèmes, comme tout paramètre estimé, ils sont entachés d'incertitudes quantifiées par la matrice de variances-covariances sur  $\bar{T}$  et  $\bar{\Sigma}$  [Didier BOUTELOUP, 2002].

### III.5.1.2 Transformation MOLODENSKY-BADEKAS

Le modèle de MOLODENSKY-BADEKAS en formalisme cartésien est obtenu par l'introduction d'un vecteur définissant un point initial autour duquel s'effectuent les rotations  $(\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z)$ . Ce point est généralement pris comme centre de gravité ou iso barycentre dans les deux (02) systèmes de coordonnées. Le modèle est généralement utilisé pour les transformations locales du type cadastre [Ali Zeggai, 2004].

On prendra comme point initial. Le centre de gravité dans les deux systèmes :

$$\vec{X}_0 \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \\ \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \\ \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \end{pmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Système N°1

$$\vec{x}_0 \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \\ \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \end{pmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Système N°2

A la déference du modèle de BURSA-WOLF, MOLODENSKY-BADEKAS introduit dans son modèle, un point initiale tel que :

$$\vec{X} = \vec{X}_0 + \vec{T} + (1+k) \cdot \mathbf{R}_{(E_x, E_y, E_z)} \cdot (\vec{x} - \vec{x}_0) \quad (\text{III.26})$$

en posant  $(\vec{x} - \vec{x}_0) = \vec{x}$  et en ordonnant la matrice, le modèle de MOLODENSKY-BADEKAS devient pour n points :

$$\begin{pmatrix} X_1 - x_1 \\ X_2 - x_2 \\ \dots \\ X_n - x_n \\ \\ Y_1 - y_1 \\ Y_2 - y_2 \\ \dots \\ Y_n - y_n \\ \\ Z_1 - z_1 \\ Z_2 - z_2 \\ \dots \\ Z_n - z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \vec{x}_1 & 0 & \vec{z}_1 & -\vec{y}_1 \\ 1 & 0 & 0 & \vec{x}_2 & 0 & \vec{z}_2 & -\vec{y}_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \vec{x}_n & 0 & \vec{z}_n & -\vec{y}_n \\ \\ 0 & 1 & 0 & \vec{y}_1 & -\vec{z}_1 & 0 & \vec{x}_1 \\ 0 & 1 & 0 & \vec{y}_2 & -\vec{z}_2 & 0 & \vec{x}_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \vec{y}_n & -\vec{z}_n & 0 & \vec{x}_n \\ \\ 0 & 0 & 1 & \vec{z}_1 & \vec{y}_1 & -\vec{x}_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \vec{z}_2 & \vec{y}_2 & -\vec{x}_2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \vec{z}_n & \vec{y}_n & -\vec{x}_n & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ k \\ \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{pmatrix} \quad (\text{III.27})$$

### III.5.1.3 Transformation GEOGRAPHIQUE DE MOLODENSKY

Chaque système de référence géodésique lui est associé un ellipsoïde de révolution défini par ses composantes (a, b), (a, e) ou (a, f).

Avec : a : demi grand axe  
 b : demi petit axe  
 e : excentricité  
 f : aplatissement.

Les coordonnées géographiques (longitude et latitude) sont valeurs plus représentatives dans la pratique que les coordonnées (X, Y, Z).

La transformation mise en œuvre est alors neuf (09) paramètres dans laquelle s'ajoutent deux autres paramètres (Da et Df ou De).

$$\begin{aligned} \text{Ou} \quad D_a &= a_1 - a_2 \\ D_f &= f_1 - f_2 \\ D_e &= e_1 - e_2 \end{aligned}$$

Il existe des formules qui permettent de s'affranchir des coordonnées géocentriques liées à deux (02) ellipsoïdes et permettent d'aboutir à une transformation directe. Cette transformation est issue des équations différentielles de MOLODENSKY.

Le modèle obtenu est à neuf (09) paramètres. Les équations différentielles en formalisé géographique donnent finalement : le modèle géographique de MOLODENSKY.

**1°-pour 1 point :**

$$\begin{pmatrix} \lambda_2 - \lambda_1 \\ \varphi_2 - \varphi_1 \\ h_2 - h_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(1,1) & \dots & A(1,7) \\ A(2,1) & \dots & A(2,7) \\ A(3,1) & \dots & A(3,7) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ k \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B(1,1) & B(1,2) \\ B(2,1) & B(2,2) \\ B(3,1) & B(3,3) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} da \\ df \end{pmatrix} \quad \text{(III.28)}$$

- |   |   |
|---|---|
| $A(1,1) = -\sin \lambda / (N + h) \cdot \cos \varphi$                                 | $A(2,1) = -\sin \varphi \cdot \cos \lambda / (\rho + h)$                  |
| $A(1,2) = \cos \lambda / (N + h) \cdot \cos \varphi$                                  | $A(2,2) = -\sin \varphi \cdot \sin \lambda / (\rho + h)$                  |
| $A(1,3) = 0$  | $A(2,3) = \cos \varphi / (\rho + h)$                                      |
| $A(1,4) = 0$  | $A(2,4) = N \cdot e^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi / (\rho + h)$ |
| $A(1,5) = -(1 - (N \cdot e^2 / (N + h))) \cdot \text{tg } \varphi \cdot \cos \lambda$ | $A(2,5) = (a \cdot w + h) \sin \lambda / (\rho + h)$                      |
| $A(1,6) = -(1 - (N \cdot e^2 / (N + h))) \cdot \text{tg } \varphi \cdot \sin \lambda$ | $A(2,6) = -(a \cdot w + h) \cos \lambda / (\rho + h)$                     |
| $A(1,7) = 1$  | $A(2,7) = 0$  |

$$A(3,1) = \cos \varphi . \cos \lambda$$

$$A(3,2) = \cos \varphi . \sin \lambda$$

$$A(3,3) = \sin \varphi$$

$$A(3,4) = (a.w + h)$$

$$A(3,5) = N.e^2 . \sin \varphi . \cos \varphi . \sin \lambda$$

$$A(3,6) = N.e^2 . \sin \varphi . \cos \varphi . \cos \lambda$$

$$A(3,7) = 0$$

$$B(1,1) = 0$$

$$B(1,2) = 0$$

$$B(2,1) = e^2 . \sin \varphi . \cos \varphi / w . (\rho + h)$$

$$B(2,2) = a . (1 - f) . (2 - e^2 . \sin^2 \varphi) . \sin \varphi . \cos \varphi / w^3 . (\rho + h)$$

$$B(3,1) = -w$$

$$B(3,2) = a(1 - f) . \sin^2 \varphi / w$$

$$w = (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}$$

$$N = a / w$$

Et :

$$\rho = a(1 - e^2) / w^3$$

C'est l'écriture matricielle pour un seul point, pour le cas de n point, la solution est donnée par la méthode des moindres carrés [\[Ali Zeggai, 2004\]](#).

### 2°-pour n point (n>3) :

$$\begin{pmatrix} \lambda_2^1 - \lambda_1^1 \\ \lambda_2^2 - \lambda_1^2 \\ \dots \\ \lambda_2^n - \lambda_1^n \\ \varphi_2^1 - \varphi_1^1 \\ \varphi_2^2 - \varphi_1^2 \\ \dots \\ \varphi_2^n - \varphi_1^n \\ h_2^1 - h_1^1 \\ h_2^2 - h_1^2 \\ \dots \\ h_2^n - h_1^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1,1}^1 & A_{1,2}^1 & A_{1,3}^1 & A_{1,4}^1 & A_{1,5}^1 & A_{1,6}^1 & A_{1,7}^1 \\ A_{1,1}^2 & A_{1,2}^2 & A_{1,3}^2 & A_{1,4}^2 & A_{1,5}^2 & A_{1,6}^2 & A_{1,7}^2 \\ \dots \\ A_{1,1}^n & A_{1,2}^n & A_{1,3}^n & A_{1,4}^n & A_{1,5}^n & A_{1,6}^n & A_{1,7}^n \\ A_{2,1}^1 & A_{2,2}^1 & A_{2,3}^1 & A_{2,4}^1 & A_{2,5}^1 & A_{2,6}^1 & A_{2,7}^1 \\ A_{2,1}^2 & A_{2,2}^2 & A_{2,3}^2 & A_{2,4}^2 & A_{2,5}^2 & A_{2,6}^2 & A_{2,7}^2 \\ \dots \\ A_{2,1}^n & A_{2,2}^n & A_{2,3}^n & A_{2,4}^n & A_{2,5}^n & A_{2,6}^n & A_{2,7}^n \\ A_{3,1}^1 & A_{3,2}^1 & A_{3,3}^1 & A_{3,4}^1 & A_{3,5}^1 & A_{3,6}^1 & A_{3,7}^1 \\ A_{3,1}^2 & A_{3,2}^2 & A_{3,3}^2 & A_{3,4}^2 & A_{3,5}^2 & A_{3,6}^2 & A_{3,7}^2 \\ \dots \\ A_{3,1}^n & A_{3,2}^n & A_{3,3}^n & A_{3,4}^n & A_{3,5}^n & A_{3,6}^n & A_{3,7}^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ k \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{1,1}^1 & B_{1,2}^1 \\ B_{1,1}^2 & B_{1,2}^2 \\ \dots \\ B_{1,1}^n & B_{1,2}^n \\ B_{2,1}^1 & B_{2,2}^1 \\ B_{2,1}^2 & B_{2,2}^2 \\ \dots \\ B_{2,1}^n & B_{2,2}^n \\ B_{3,1}^1 & B_{3,2}^1 \\ B_{3,1}^2 & B_{3,2}^2 \\ \dots \\ B_{3,1}^n & B_{3,2}^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} da \\ df \end{pmatrix} \quad (\text{III.29})$$

### III.5.1.4 Transformation de VEIS

VEIS introduit, dans le modèle de MOLODENSKY-BADEKAS, une rotation présentée sous la forme suivante :

$$R_V = R(2,2).R(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z).R(1,1) \quad (\text{III.30})$$

$R(1,1)$  : Passage du système général 1 au système local 1 (repère lie à 1).

$R(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$  : Passage du système local 1 au système local 2 (repère lie à 2).

$R(2,2)$  : Passage du système local 2 au système 2.

$$\begin{aligned} x &\rightarrow x_0 \rightarrow X_0 \rightarrow X \\ (1) &\rightarrow (1) \rightarrow (2) \rightarrow (2) \end{aligned}$$

Le système local étant le repère topo centrique ou repère géodésique local. Le modèle de VEIS est quasiment identique au modèle de MOLODENSKY-BADEKAS sauf au niveau de la rotation :

$$\vec{X} = \vec{X}_0 + \vec{T} + (1+k).R_V.(\vec{x} - \vec{x}_0) \quad (\text{III.31})$$

Ou  $R_V$  : Rotations de VEIS.

$$R(2,2) = \begin{pmatrix} -\sin \lambda_0^2 & -\sin \varphi_0^2 \cdot \cos \lambda_0^2 & \cos \varphi_0^2 \cdot \cos \lambda_0^2 \\ \cos \lambda_0^2 & -\sin \varphi_0^2 \cdot \sin \lambda_0^2 & \sin \lambda_0^2 \cdot \cos \varphi_0^2 \\ 0 & \cos \varphi_0^2 & \sin \varphi_0^2 \end{pmatrix} \quad (\text{III.32})$$

$$R(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z) = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{III.33})$$

$$R(1,1) = \begin{pmatrix} -\sin \lambda_0^1 & \cos \lambda_0^1 & 0 \\ -\sin \varphi_0^1 \cdot \cos \lambda_0^1 & -\sin \varphi_0^1 \cdot \sin \lambda_0^1 & \cos \varphi_0^1 \\ \cos \varphi_0^1 \cdot \cos \lambda_0^1 & \sin \lambda_0^1 \cdot \cos \varphi_0^1 & \sin \varphi_0^1 \end{pmatrix} \quad (\text{III.34})$$

En prenant comme point  $x_0$  le centre de gravité du système n°1 et comme point  $X_0$  le centre de gravité du système n°2, il vient par approximation au premier ordre :

$$\begin{aligned} \lambda_0^1 &\approx \lambda_0^2 \approx \lambda_0 \\ \varphi_0^2 &\approx \varphi_0^1 \approx \varphi_0 \end{aligned}$$

L'écriture matricielle de la transformation utilisant le modèle de VEIS pour un point s'écrit finalement :

$$\begin{pmatrix} X - x \\ Y - y \\ Z - z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \vec{x} & u(1,1) & u(1,2) & u(1,3) \\ 0 & 1 & 0 & \vec{y} & u(2,1) & u(2,2) & u(2,3) \\ 0 & 0 & 1 & \vec{z} & u(3,1) & u(3,2) & u(3,3) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ k \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (\text{III.35})$$

$$\begin{aligned} u(1,1) &= \vec{z} \cdot \cos \lambda_0 \\ u(1,2) &= -\vec{y} \cdot \cos \varphi_0 - \vec{z} \cdot \sin \lambda_0 \cdot \sin \varphi_0 \\ u(1,3) &= \vec{z} \cdot \sin \lambda_0 \cdot \cos \varphi_0 - \vec{y} \cdot \sin \varphi_0 \\ u(2,1) &= \vec{z} \cdot \sin \lambda_0 \\ u(2,2) &= \vec{x} \cdot \cos \varphi_0 + \vec{y} \cdot \sin \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 \\ u(2,3) &= \vec{x} \cdot \sin \varphi_0 - \vec{z} \cdot \cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 \\ u(3,1) &= -\vec{x} \cdot \cos \lambda_0 - \vec{y} \cdot \sin \lambda_0 \\ u(3,2) &= \vec{x} \cdot \sin \lambda_0 \cdot \sin \varphi_0 - \vec{y} \cdot \sin \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 \\ u(3,3) &= \vec{x} \cdot \sin \lambda_0 \cdot \cos \varphi_0 - \vec{y} \cdot \cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 \end{aligned}$$

Pour un modèle surabondant ou  $n > 3$ , la solution est donnée par la méthode des moindres carrés [[Ali Zeggai, 2004](#)].

### III.5.2 Transformations bidimensionnelle

Les paramètres de transformation publiés par la *DMA* (Défense Mapping Agency) pour l'Algérie sont connus à  $\pm 25$  mètres, il est donc clair qu'elles ne permettent pas d'obtenir la précision exigée pour les applications à petites échelles ou à grandes échelles.

La méconnaissance de la hauteur du géoïde locale (N); nous oblige donc à adopter de nouvelles approches de transformation des coordonnées planimétriques GPS en coordonnées planimétriques locales.

La méthode de transformation adoptée pour l'uniformisation des données GPS est celle utilisant les lignes géodésiques.

#### III.5.2.1 La transformation par la ligne géodésique

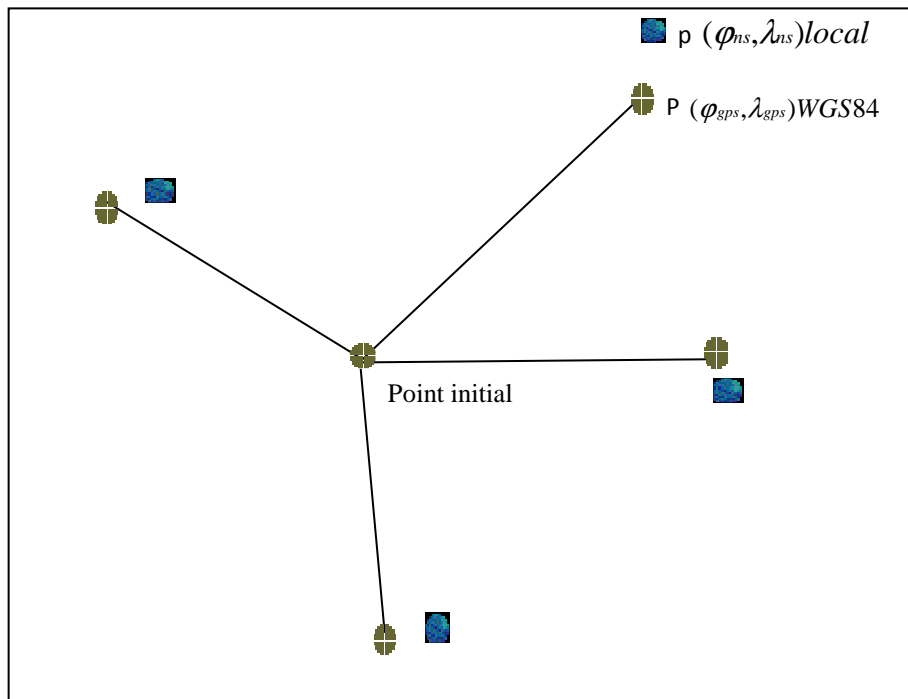
Le principe de cette transformation se base sur le transport de la ligne géodésique ellipsoïdique qui lie chaque point GPS au point double initial. Un point double initial est un point connu dans les deux systèmes (ex : WGS84 et Nord Sahara 1959). Le transport se fait de l'ellipsoïde WGS84 vers l'ellipsoïde Clarke 1880A. Elle est valable uniquement à l'intérieur d'une zone d'extension limitée ( $r < 50$  km). Même si l'on dispose dans cette zone limitée d'un seul point double on peut toujours transformer les coordonnées planimétriques GPS en coordonnées planimétriques locales.

### Principe de la transformation par la ligne géodésique :

Pour faire le transport de la ligne géodésique ellipsoïdique par exemple de l'ellipsoïde WGS84 à l'ellipsoïde Clarke 1880, on doit résoudre le problème *Inverse* et *Direct* de la ligne géodésique. Cette résolution doit être effectuée avec une extrême précision, au moins centimétrique. La résolution de cette transformation nécessite la connaissance d'un point double initial, et de trois à quatre points doubles bien répartis dans la zone à étudier (**Figure III.7**) [KADRI .C, 2003].

Les données à utiliser pour la transformation géodésique sont :

1. Les coordonnées  $(\lambda_A, \varphi_A)_{GPS}$  du point initial dans le système WGS84.
2. Les coordonnées  $(\lambda_A, \varphi_A)_{Local}$  du point initial dans le système Local.
3. Les coordonnées  $(\lambda_i, \varphi_i)_{GPS}$  des points d'appuis dans le système WGS84, avec  $i=1,4$ .
4. Les coordonnées  $(\lambda_i, \varphi_i)_{Local}$  des points d'appuis dans le système Local, avec  $i=1,4$ .
5. Les coordonnées  $(\lambda_i, \varphi_i)_{GPS}$  des points nouveaux GPS dans le système WGS84, avec  $i=1, n$
6. L'ondulation moyenne  $Nm$  du géoïde de la région (approchée à quelques mètres).
7. Les paramètres  $a$  et  $e$  des deux ellipsoïdes ( WGS84 et Clarke 1880A )



**Figure III.7** : Transformation sur la surface ellipsoïdique.

**TRAITEMENT :****Etape 1 : Résolution du problème Inverse**

La transformation géodésique nécessite la résolution du problème inverse et direct. Avant de résoudre le problème inverse on doit ajouter l'ondulation moyenne  $N_m$  au demi grand axe ( $a$  WGS) de l'ellipsoïde WGS84. Donc en premier lieu la résolution de ce problème se fait sur l'ellipsoïde qui a pour demi-grand axe ( $a_{WGS84+N_m}$ ). Dans l'exemple qui suit, le point A est un point double initial, et le point 1 est un point GPS nouveau à transformer dans le système locale [KADRI.C, 2003].

**Problème inverse**

**En entrée**  $(\lambda_A, \varphi_A)_{GPS}$  ,  $(\lambda_1, \varphi_1)_{GPS}$

**En sortie** Distance :  $D_{A-1}$ , Azimut :  $Az_{A-1}$  ,  $Az_{1-A}$

**Etape 2 : Résolution du problème Direct**

Une fois le problème inverse effectué, le traitement se poursuit sur l'ellipsoïde local en abordant le problème direct. A partir des coordonnées  $(\lambda_A, \varphi_A)_{Local}$  du Point initial A et en considérant invariant la distance  $D_{A-1}$  et  $Az_{A-1}$  déjà calculée dans l'étape 1, on commence par résoudre le problème direct. Les résultats de cette résolution sont les coordonnées  $(\lambda_1, \varphi_1)_{Local}$  du point 1 dans le système local.

**Problème direct**

**En entrée :**  $(\lambda_A, \varphi_A)_{Local}$

$D_{A-1}$  : Distance obtenue après traitement du problème inverse

$Az_{A-1}$  : Azimut obtenu après traitement du problème inverse.

(a,e) : Paramètres de l'ellipsoïde local .

**En sortie :**  $(\lambda_1, \varphi_1)_{Local}$

Les coordonnées planimétriques  $(\lambda_1, \varphi_1)_{Local}$  du point 1 obtenues sont affectées des erreurs qui dépendent de la localisation GPS. Si dans la région à étudier on dispose de 3 à 4 points doubles, le procédé consiste à recalculer les coordonnées planimétriques locales du point initial en suivant l'étape 1 et l'étape 2.

Pour cela on doit recalculer les coordonnées planimétriques locales de ces quatre points doubles, les écarts trouvés sont introduits en prenant leurs valeurs moyennes comme correction aux coordonnées locales du point initial. En répétant cette compensation empirique et après deux à trois itérations, presque toute erreur systématique est éliminée. Une fois les coordonnées initiales locales améliorées, on procède à transformer tous les points nouveaux GPS  $(\lambda_i, \varphi_i)_{GPS}$  en  $(\lambda_i, \varphi_i)_{Local}$  ( $i=1,n$ ), puis en coordonnées planes UTM.

### III.5.3 Passage de h à H

Pour déterminer H connaissant h (ou inversement), on utilise la formule approchée :

$$H_{\text{Orthométric}} = h_{\text{Height Ellipsoid}} - N_{\text{Andulations}} \quad (\text{III.36})$$

Le nivellement de précision fournit H à quelques millimètres près. Une méthode spatiale peut fournir h avec au mieux quelques centimètres d'exactitude. N est rarement connu à mieux que quelques centimètres près.

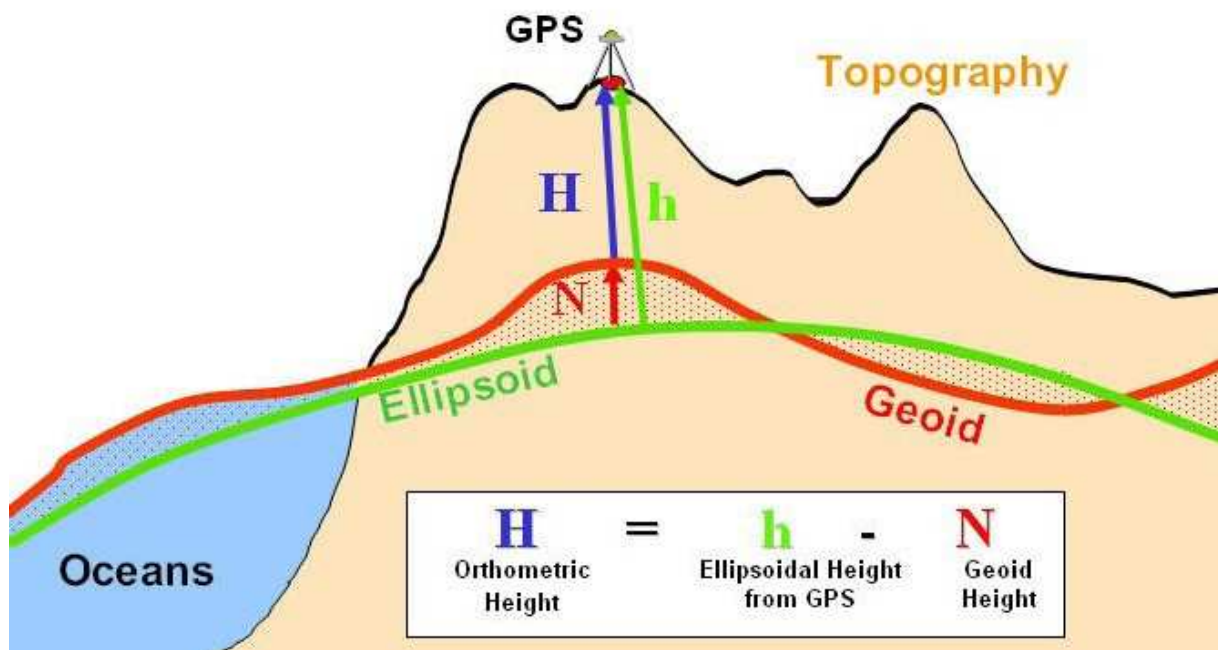


Figure III.8 : Altitude Orthométrique et Hauteur ellipsoïdique.

**Chapitre IV**  
**TRAITEMENT DES DONNEES GPS**

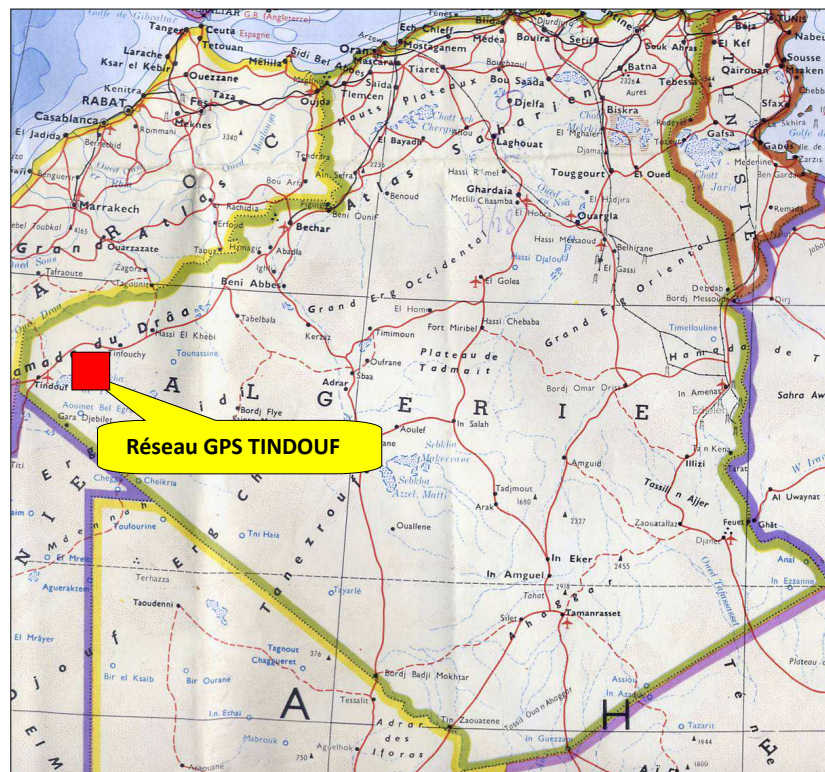
## IV.1 Zone d'étude

### IV.1.1 Position d'étude

Le réseau des points GPS est situé dans le territoire de la wilaya de TINDOUF, à environ 170 Km au Nord-Est de la ville de TINDOUF.

La parcelle en question est délimitée par les coordonnées géographiques suivantes :

Longitude :  $6^{\circ} 28' 08'' \text{ W} \longrightarrow 7^{\circ} 08' 52'' \text{ W}$  et Latitude :  $27^{\circ} 21' 08'' \text{ N} \longrightarrow 27^{\circ} 53' 28'' \text{ N}$



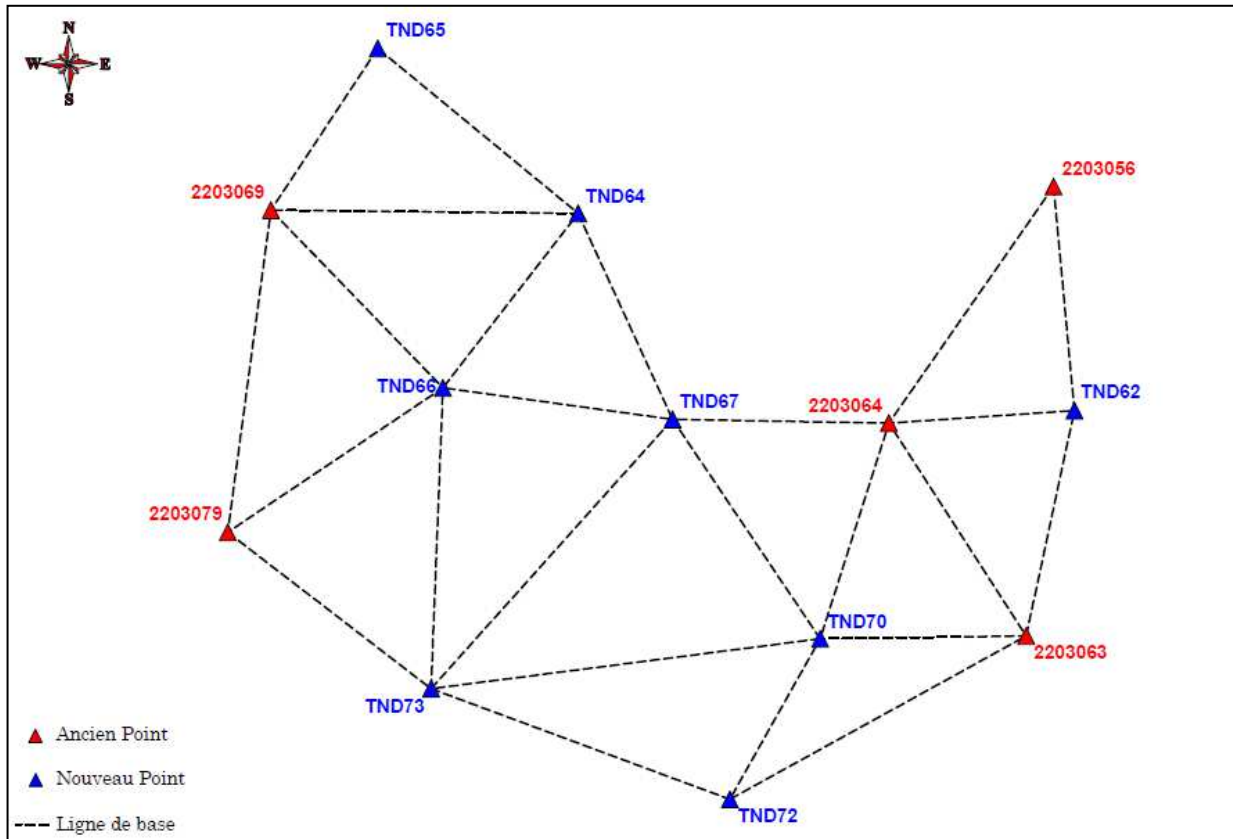
**Figure IV.1 :** Situation du réseau GPS.

### IV.1.2 Nature de terrain

Dans cette région, la nature du terrain est variée : au nord terrain assez régulier avec un reg rocailleux, et au sud une chaîne de petites montagnes entrecoupées par des oueds.

### IV.1.3 Points GPS réalisés

Le réseau GPS primaire est constitué de 05 points anciens 2203056, 2203063, 2203064, 2203069 et 2203079 connus dans les deux systèmes WGS84 et Locale « NORD SAHARA 1959 », crée au réseau GPS national de 1er Ordre de « I.N.C.T » année 2003 et huit (08) nouveaux points de TND62, TND64, TND65, TND66, TND67, TND70, TND72, TND73 observés en mode Statique.



**Figure IV.2 :** Plan de position du réseau GPS

Plusieurs contrôles ont été faits sur les différentes étapes de l'élaboration du réseau primaire.

## IV.2. Planification

### IV.2.1 Planification

La planification est la première étape du projet. Elle consiste à définir les bousions en considérant la superficie du territoire à équiper. Une étude technique sur carte, à une échelle appropriée, permet de montrer l'emplacement approximatif des nouveaux points géodésiques ainsi que les points existants qui serviront des points d'appui ou qui nécessitent un rattachement.

Quel que soit le niveau du réseau à étudier ; il doit s'appuyer sur un minimum de trois points de niveau supérieur ou équivalent dont les coordonnées tridimensionnelles sont connues (latitude, longitude et altitude géodésique). Les points d'appui doivent être uniformément répartis en périphérie et à l'intérieur du nouveau réseau, s'il y a lieu.

## IV.2.2 Choix de position des points du réseau GPS

Le choix du site est déterminé en considérant les caractéristiques générales qui suivent :

1. **Assise** : une assise stable assure la pérennité du repère. Il faut tenir compte du type de matérialisation prévue pour le niveau du réseau à implanter et éviter l'accotement des routes.
2. **Visibilité des satellites** : Pas d'obstacle supérieur à  $15^\circ$  pouvant gêner la réception du signal GPS
3. **Accessibilité** : le point géodésique doit être accessible en tout temps.
4. **Autres considérations** :

La sécurité de l'observation est primordiale. Tous les sites retenus doivent en tenir compte, il faut aussi s'assurer que la mise en station des instruments y soit facile.

Il faut localiser l'emplacement du nouveau repère avec le plus d'exactitude possible en y laissant des marques distinctives- par exemple une tige de métal, une trace de peinture.....etc.

Pas de surface réfléchissante autour du point GPS pouvant générer des multi-trajets.

Pas de sources radio ou TV (émetteur) ou pylône de haute tension pouvant perturber le signal GPS.

## IV.2.3 Document a préparé

Un plan finale montrant les points compris dans le projet doit être dresse sur un fond de carte a une échelle appropriée .Sur ce plan, tous les points doivent être identifiés par leur matricule respectif.

Dans un projet ou la méthode spatiale (GPS) est utilisé le formulaire d'observation GPS, doit être rempli pour chaque point du projet. En plus du croquis du dégagement, les faites ou les circonstances pouvant affecter la planification des observations.

## IV.2.4 Matérialisations des repères

La matérialisation des repères doit être faite conformément aux instructions relatives à jà matérialisations de repère.



**Figure IV.3** : Point GPS 2203079.



**Figure IV.4** : Point GPS TND 65.

### IV.3 Moyens Matériels

- 12 véhicules Toyota 4x4 pour les équipes.
- 08 récepteurs TRIMBLE R7 GNSS.
- 04 Navigation GPS (garmin map 76x).
- 02 Micro-ordinateur.



**Figure IV.5 :** Récepteur TRIMBLE R7 GNSS.



**Figure IV.6:** Antenne GPS Zephyr Geodetic 2.



**Figure IV.7:** Antenne GPS Zephyr - Model 2.

#### Logiciels :

- TBC Trimble Business Center (transfert et traitement des données GPS).
- LEICA Geo office V.5.0.0 (traitement des données GPS).
- Microsoft Excel, Word.
- Mapinfo11 pour les cartes.

## IV.4 Observation GPS

### IV.4.1 Planification des sessions d'observations

#### Phase bureautique :

- L'étape qui précède les observations est la planification des sessions d'observations, elle doit tenir compte de plusieurs éléments comme le nombre de récepteurs, les obstacles à chaque point et le niveau du réseau.
- Avant commencer la planification, il est recommandé de vérifier l'état présent et futur des satellites, ces renseignements sont disponibles sur le site Coast Guard Navigation Center des Etats-Unis ([www.navcen.uscg.gov](http://www.navcen.uscg.gov)). Cette vérification doit se faire avant chaque journée d'observation, car un changement dans la disponibilité des satellites peut modifier les périodes d'observations
- Les schémas d'observations sont généralement planifiés de façon à observer une série de vecteurs formant des figures le moins aplatis possible. Ainsi, de chaque point, il y aura au moins trois vecteurs dont les orientations se trouvent dans trois quadrants déférents.
- Les principaux facteurs déterminant le temps d'observation sont la précision recherchée.
- La géométrie des satellites très importante pour la résolution des ambiguïtés de phase ( $PDOP \leq 5$ ).
- Le nombre de récepteurs a une influence sur la forme de la figure. Pour les travaux géodésie, dans notre projet nous avons utilisé huit récepteurs pour des raisons économiques (rythme de productions) et de qualité des réseaux (meilleure structure).
- La planification des sessions se fait avec un angle d'élévations des satellites de  $15^\circ$  au-dessus de l'horizon.

#### Phase terrain :

Plusieurs critères de contrôle de qualité doivent être respectés lors des observations des points GPS sur terrain :

- Le point GPS doit être en bonne condition de préservation (Pas de trace de dégradation).
- la mise en station du récepteur GPS doit être effectuée par un topographe expérimenté.
- La hauteur d'antenne doit être mesurée au minimum trois (03) fois au début, milieu et à la fin de la session d'observation par deux personnes différentes si c'est possible et par deux différentes unités de mesure si l'équipement le permet (très recommandé).
- Rédaction de la fiche d'observation terrain (nom de la compagnie, nom du topographe, nom du point GPS, type et S/N de l'antenne GPS, type et S/N du récepteur GPS, Hauteur d'antenne, heure de début et fin d'observation, photo, coordonnées approchées et position du point GPS).
- Toutes les équipes terrain doivent être bien synchronisées.
- Les équipements doivent être vérifiés et les batteries bien chargées.
- Les déplacements entre les points GPS doivent être connus par toutes les équipes.

### IV.4.2 Sessions d'observations

Dans notre projet il ya deux sessions d'observations, la figure suivante identifie les sessions d'observations 1 et 2 :

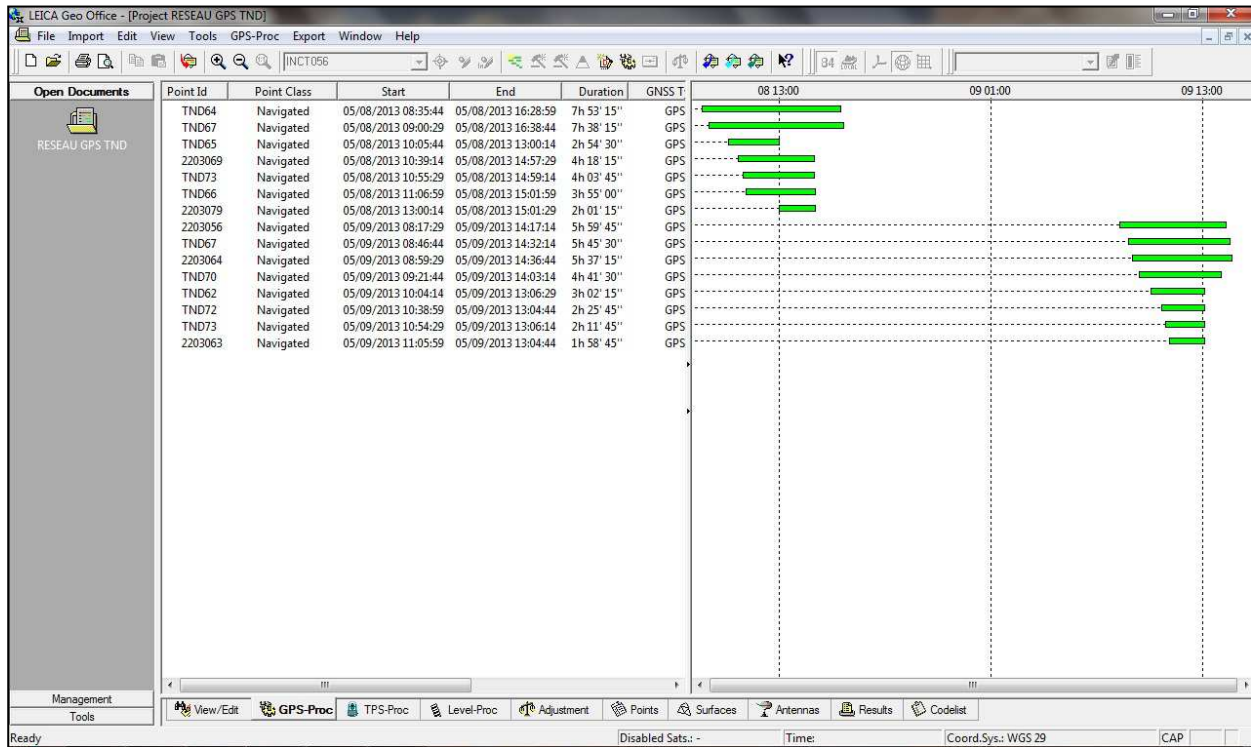


Figure IV.8 : sessions d'observations.

le tableau suivant identifie le type et la hauteur d'antenne, le début et la fin d'observations :

Sessions	GPS Point	Start Time	End Time	Antena Type	Receiver Type	Receiver S/N	Antena Height(m)
Sessions 1	TND67	09:00	16:38	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	4906K17644	1,347
	TND65	10:05	13:00	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	5105K20503	1,24
	2203069	10:38	15:00	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	5105K20501	1,152
	TND73	11:00	15:00	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	4906K34511	1,290
	2203079	13:00	15:00	Zephyr Geodetic 2	Trimble R7 GNSS	4906K34523	0,918
	TND66	11:10	15:00	Zephyr Geodetic 2	Trimble R7 GNSS	4906K46968	1,165
	TND64	08:35	16:30	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	5105K20878	1,215
Sessions 2	TND70	09:20	14:03	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	4906K17644	1,375
	TND72	10:35	13:05	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	4906K34256	1,363
	TND62	10:05	13:05	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	5105K20503	1,198
	2203056	08:20	14:16	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	5105K20501	0,934
	TND73	10:55	13:06	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	4906K34511	1,16
	TND67	08:45	14:32	Zephyr Geodetic 2	Trimble R7 GNSS	4906K34523	1,214
	2203064	09:00	14:35	Zephyr Geodetic 2	Trimble R7 GNSS	4906K46968	1,053
	2203063	11:05	13:05	Zephyr - Model 2	Trimble R7 GNSS	5105K20878	1.103

Tableau IV.1 : informations sur les fiches d'observation GPS.

### IV.4.3 Traitement des lignes de base

Il existe plusieurs logiciels de traitement des données GPS. Chaque fabricant de récepteurs fournit son logiciel. Le logiciel utilisé pour traitement les données GPS c'est LEICA Geo office V.5.0.0

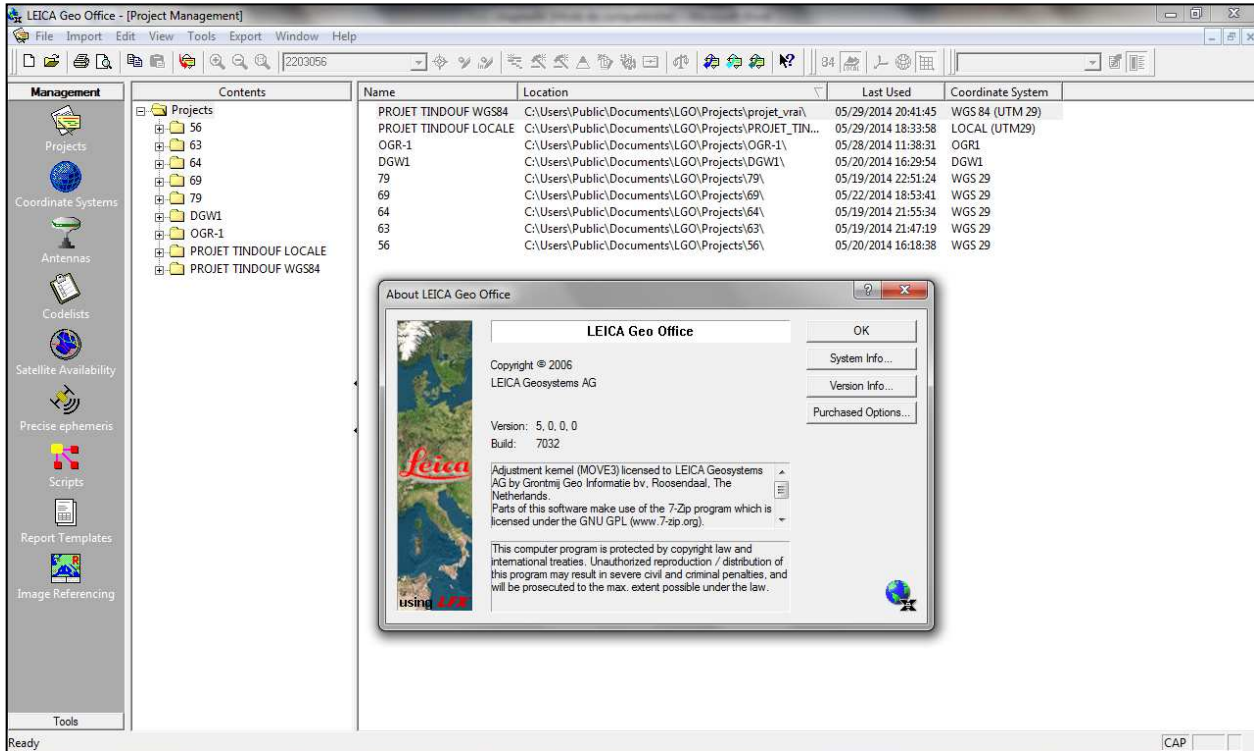


Figure IV.9 : Logiciel LEICA Geo office V.5.0.0.

Avant débuté toutes les opérations des traitements (traitement des lignes de base et ajustement) il faut d'abord définir le system géodésique sur lequel est faite le traitement des données GPS.

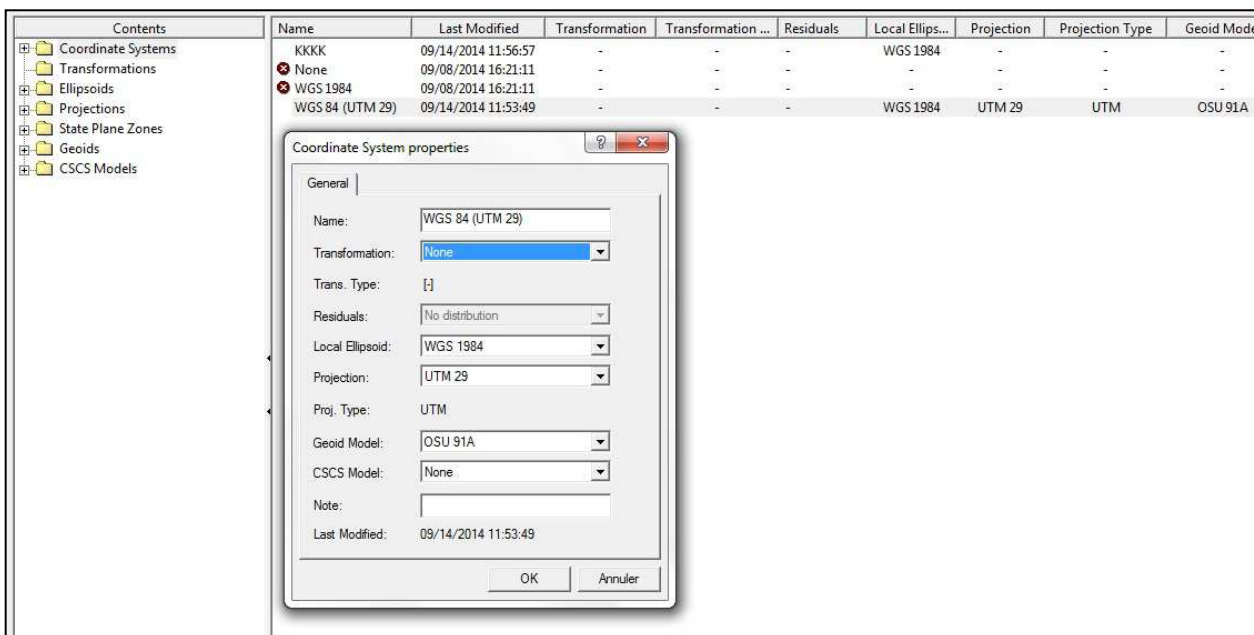
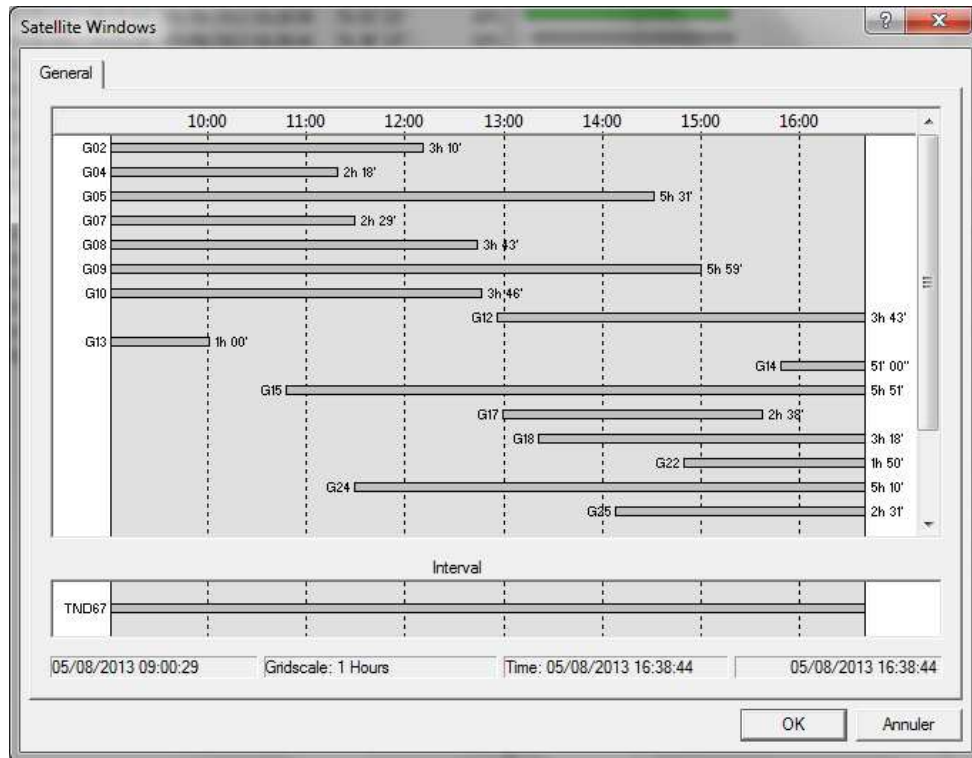


Figure IV.10 : Configuration système géodésique.

Après la création d'un nouveau projet sur LEICA Geo office, nous avons importé les données GPS et contrôlé la qualité des observations GPS mode statique (GDOP, hauteur d'antenne, nombre des satellites...etc).

Notez que le signal du satellite G13 se termine prématurément dans la session. Le satellite est sans doute allé au-delà de l'horizon à ce moment-là. Bien que dans ce cas cela ne soit pas nécessaire, vous désactiverez les données du satellite G13 pour cette ligne de base.



**Figure IV.11** : signal des Satellites.

Le logiciel utilisé pour le calcul doit produire des vecteurs sous forme de différences de coordonnées cartésiennes géocentriques ( $\Delta X, \Delta Y$  et  $\Delta Z$ ) et accompagnés de leur matrice de variances-covariances respective. Il doit également produire les informations pertinentes à l'analyse qualitative des vecteurs : nombre de satellites utilisés, angle de masquage, sauts de cycles, données rejetées, hauteur d'antenne, solution utilisée et critères de précision. Le calcul des vecteurs se fait avec un angle de masquage de  $15^\circ$  au-dessus de l'horizon.

La solution des vecteurs dépend du type de récepteur et de la longueur du vecteur. Dans tous les cas, le logiciel doit résoudre les ambiguïtés de phase, c'est-à-dire qu'il doit les fixer à leur valeur entière. Ces ambiguïtés sont fixées sur la fréquence L1 (solution communément appelée L1 FIXED) ou sur la combinaison des fréquences L1 et L2, qui élimine le délai ionosphérique (solution communément appelée IONO FREE FIXED L3).

Si les observations ont été saisies par des récepteurs à double fréquence et que tous les vecteurs du réseau sont de moins de 10 km, il est préférable d'utiliser la solution L1 FIXED. Mais dans le cas où tous les vecteurs ou certains vecteurs du réseau sont de 10 km ou plus, il faut alors utiliser seulement la solution IONO FREE FIXED L3.

Reference Id	Rover Id	Stored Status	Ambiguity Status	GNSS Type	Duration	Type	Solution type	Frequency	dX	dY	dZ	Posn. Qlty	Hgt. Qlty
TND64	TND67	Yes	yes	GPS	7h 28' 30"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	8414.7901	6208.7009	-14514.3071	0.0003	0.0005
TND64	TND65	Yes	yes	GPS	2h 54' 30"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-8073.9864	-14728.4359	11723.4084	0.0003	0.0006
TND67	TND65	Yes	yes	GPS	2h 54' 30"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-16488.77...	-20937.1371	26237.7149	0.0003	0.0007
TND64	2203069	Yes	yes	GPS	4h 18' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-3256.7598	-24031.5915	564.7568	0.0003	0.0006
TND67	2203069	Yes	yes	GPS	4h 18' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-11671.55...	-30240.2934	15079.0621	0.0003	0.0006
2203069	TND65	Yes	yes	GPS	2h 21' 00"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-4817.2272	9303.1549	11158.6504	0.0004	0.0007
TND64	TND73	Yes	yes	GPS	4h 03' 45"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	15673.6340	-14227.2232	-33082.7800	0.0004	0.0006
TND67	TND73	Yes	yes	GPS	4h 03' 45"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	7258.8425	-20435.9249	-18568.4742	0.0003	0.0006
2203069	TND73	Yes	yes	GPS	4h 02' 00"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	18930.3950	9804.3685	-33647.5369	0.0004	0.0006
TND64	TND66	Yes	yes	GPS	3h 55' 00"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	4960.7070	-11586.9677	-12028.6332	0.0004	0.0006
TND67	TND66	Yes	yes	GPS	3h 55' 00"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-3454.0845	-17795.6690	2485.6730	0.0005	0.0007
TND73	TND66	Yes	yes	GPS	3h 52' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-10712.92...	2640.2551	21054.1469	0.0005	0.0007
2203069	TND66	Yes	yes	GPS	3h 50' 30"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	8217.4683	12444.6229	-12593.3900	0.0005	0.0008
TND66	TND65	Yes	yes	GPS	1h 53' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-13034.69...	-3141.4685	23752.0404	0.0005	0.0010
TND64	2203079	Yes	yes	GPS	2h 01' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	7968.8209	-29262.4014	-21886.3894	0.0113	0.0175
TND67	2203079	Yes	yes	GPS	2h 01' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-445.9225	-35471.1187	-7371.9890	0.0085	0.0129
TND66	2203079	Yes	yes	GPS	2h 01' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	3008.0793	-17675.4319	-9957.8007	0.0079	0.0123
TND73	2203079	Yes	yes	GPS	1h 59' 00"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-7704.7386	-15035.2081	11196.5331	0.0094	0.0147
2203069	2203079	Yes	yes	GPS	1h 57' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	11225.5922	-5230.8159	-22451.1264	0.0081	0.0126
TND67	2203056	Yes	yes	GPS	5h 30' 30"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-4704.3437	31169.4970	15761.6018	0.0003	0.0005
TND67	2203064	Yes	yes	GPS	3h 32' 45"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	2269.1130	16917.7758	-542.4112	0.0002	0.0005
2203064	2203056	Yes	yes	GPS	5h 17' 45"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-6973.4566	14251.7211	16304.0134	0.0002	0.0004
TND67	TND70	Yes	yes	GPS	4h 41' 30"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	9320.4101	10306.6498	-15566.2171	0.0003	0.0005
2203064	TND70	Yes	yes	GPS	4h 41' 30"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	7051.2977	-6611.1261	-15023.8057	0.0002	0.0004
2203056	TND70	Yes	yes	GPS	4h 41' 30"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	14024.7534	-20862.8470	-31327.8197	0.0002	0.0004
TND67	TND62	Yes	yes	GPS	3h 02' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	3609.7868	31513.9016	79.5816	0.0003	0.0007
2203064	TND62	Yes	yes	GPS	3h 02' 15"	Static	Phase: fix all	L1 + L2	1340.6387	14596.1378	621.9643	0.0003	0.0005
2203056	TND62	Yes	yes	GPS	3h 02' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	8314.1306	344.4052	-15682.0197	0.0003	0.0005
TND70	TND62	Yes	yes	GPS	3h 02' 15"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	-5710.6247	21207.2522	15645.7987	0.0003	0.0005
TND67	TND72	Yes	yes	GPS	2h 25' 45"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	14161.0372	2321.5679	-26697.7691	0.0004	0.0008
2203064	TND72	Yes	yes	GPS	2h 25' 45"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	11891.9235	-14596.2092	-26155.3576	0.0004	0.0009
TND70	TND72	Yes	yes	GPS	2h 25' 45"	Static	Phase: fix all	L1 + L2	4840.6514	-7985.0789	-11131.5448	0.0003	0.0006
TND62	TND72	Yes	yes	GPS	2h 25' 45"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	10551.2541	-29192.3308	-26777.3480	0.0004	0.0008
TND67	TND73	Yes	yes	GPS	2h 11' 45"	Static	Phase: fix all	Iono free (L3)	7258.8485	-20435.9150	-18568.4594	0.0004	0.0009

Figure IV.12 : Résultat de traitement bases lignes.

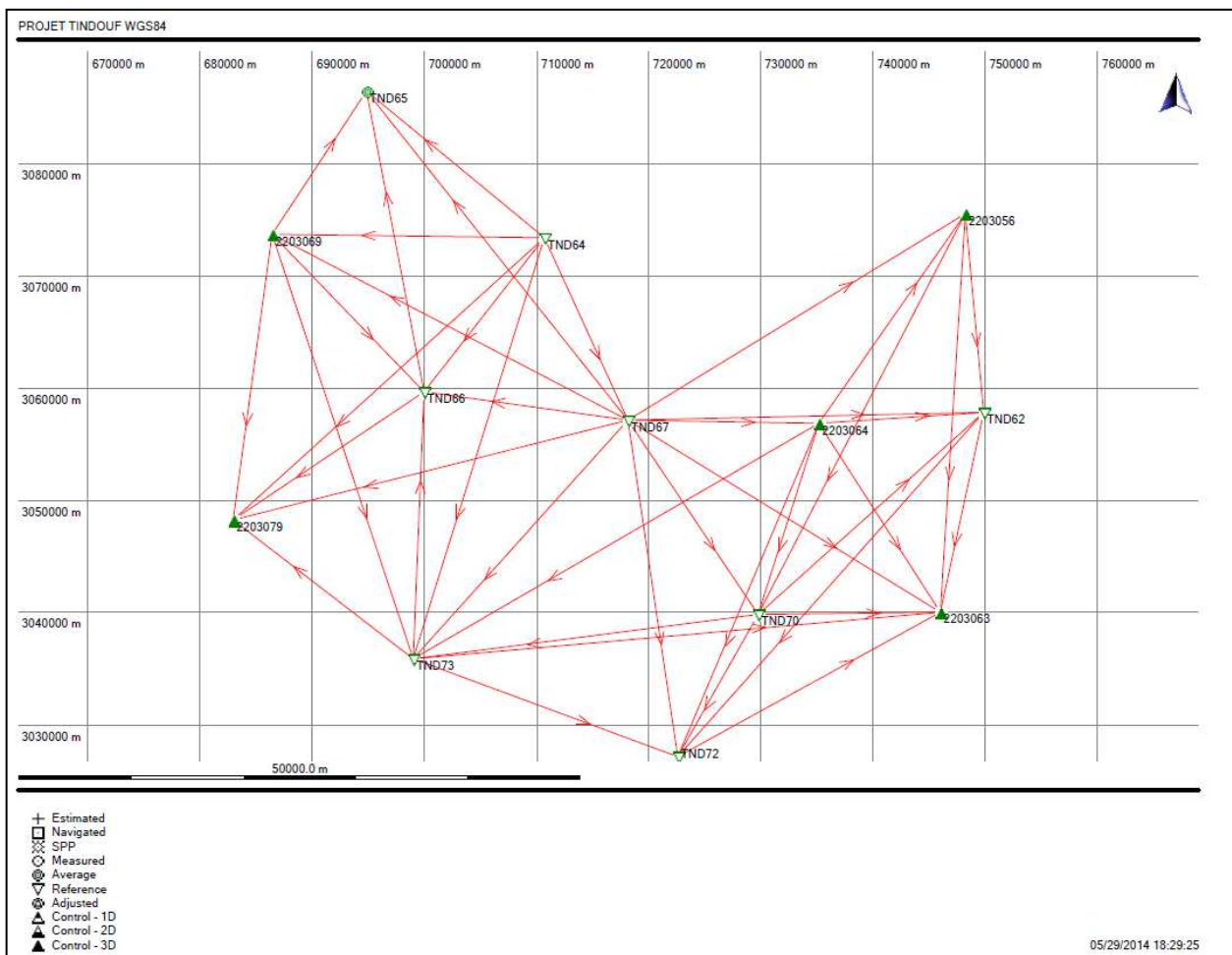


Figure IV.13 : schéma d'observations du réseau GPS.

#### IV.4.4 Ajustement

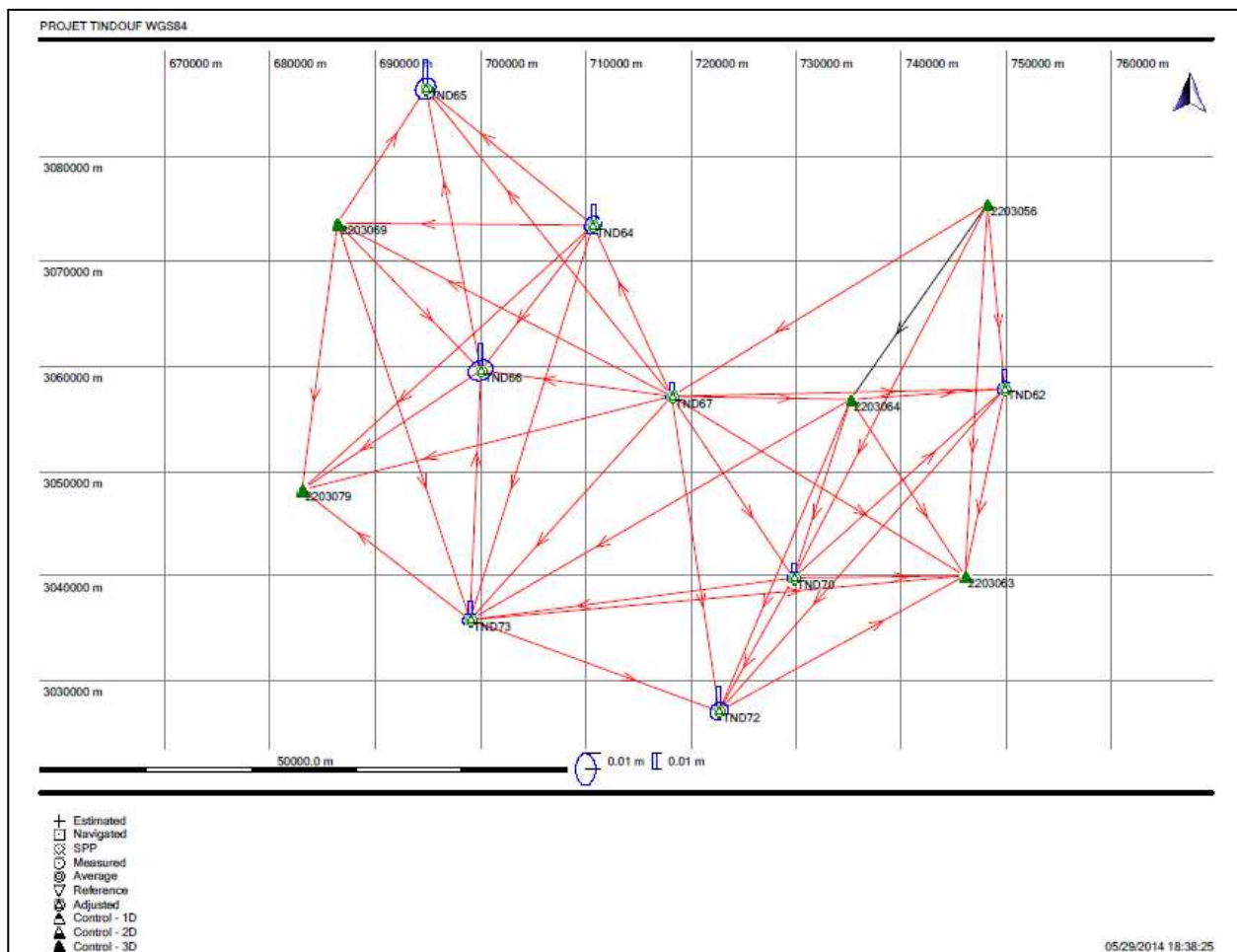
Après le traitement des lignes de base, nous avons lancé l'opération d'ajustement est fait dans le but de compenser tous les vecteurs d'un même réseau. Ces opérations permettent d'obtenir un réseau compensé dans le système WGS-84, dans notre projet nous avons fixé des coordonnées de Cinq (5) points d'origine dans le système global WGS84.

##### Point Origine :

Origine Planimétrique et Altimétrique dans le système WGS84 :

Points	Latitude	Longitude	Easting	Northing	Height(WGS 84)
2203056	6° 28' 55.38152" W	27° 47' 02.51111" N	748108.467	3075821.080	466.139
2203063	6° 30' 40.38918" W	27° 27' 52.08126" N	745947.033	3040345.511	416.771
2203064	6° 37' 03.09586" W	27° 37' 04.42563" N	735110.793	3057142.808	460.362
2203069	7° 06' 32.62606" W	27° 46' 37.62332" N	686322.125	3073946.148	456.081
2203079	7° 08' 51.16967" W	27° 32' 53.89373" N	682910.033	3048535.159	473.322

**Tableau IV.2 :** coordonnées des points d'origine en WGS84.



**Figure IV.14 :** schéma d'ajustement du réseau GPS.

<b>Adjustment Results</b>					
<b>Coordinates</b>					
<b>Station</b>		<b>Coordinate</b>	<b>Corr</b>	<b>Sd</b>	
2203056	Latitude	27° 47' 02.51111" N	0.000 m	-	fixed
	Longitude	6° 28' 55.38152" W	0.000 m	-	fixed
	Height	466.139 m	0.000 m	-	fixed
2203063	Latitude	27° 27' 52.08126" N	0.000 m	-	fixed
	Longitude	6° 30' 40.38918" W	0.000 m	-	fixed
	Height	416.771 m	0.000 m	-	fixed
2203064	Latitude	27° 37' 04.42563" N	0.000 m	-	fixed
	Longitude	6° 37' 03.09586" W	0.000 m	-	fixed
	Height	460.362 m	0.000 m	-	fixed
2203069	Latitude	27° 46' 37.62332" N	0.000 m	-	fixed
	Longitude	7° 06' 32.62606" W	0.000 m	-	fixed
	Height	456.081 m	0.000 m	-	fixed
2203079	Latitude	27° 32' 53.89373" N	0.000 m	-	fixed
	Longitude	7° 08' 51.16967" W	0.000 m	-	fixed
	Height	473.322 m	0.000 m	-	fixed
TND62	Latitude	27° 37' 27.31805" N	0.000 m	0.005 m	
	Longitude	6° 28' 08.66889" W	0.000 m	0.005 m	
	Height	455.126 m	0.000 m	0.013 m	
TND64	Latitude	27° 46' 16.70425" N	0.000 m	0.006 m	
	Longitude	6° 51' 47.01607" W	0.000 m	0.006 m	
	Height	466.905 m	0.000 m	0.015 m	
TND65	Latitude	27° 53' 28.02590" N	0.000 m	0.007 m	
	Longitude	7° 01' 16.91020" W	0.000 m	0.007 m	
	Height	426.771 m	0.000 m	0.020 m	
TND66	Latitude	27° 38' 55.30779" N	0.000 m	0.007 m	
	Longitude	6° 58' 25.04686" W	0.000 m	0.008 m	
	Height	469.071 m	0.000 m	0.019 m	
TND67	Latitude	27° 37' 24.23332" N	0.000 m	0.004 m	
	Longitude	6° 47' 25.52910" W	0.000 m	0.004 m	
	Height	464.951 m	0.000 m	0.010 m	
TND70	Latitude	27° 27' 54.98242" N	0.000 m	0.004 m	
	Longitude	6° 40' 32.66892" W	0.000 m	0.004 m	
	Height	402.138 m	0.000 m	0.011 m	
TND72	Latitude	27° 21' 08.10415" N	0.000 m	0.006 m	
	Longitude	6° 45' 00.74071" W	0.000 m	0.006 m	
	Height	374.321 m	0.000 m	0.017 m	
TND73	Latitude	27° 26' 04.32561" N	0.000 m	0.005 m	
	Longitude	6° 59' 13.10791" W	0.000 m	0.005 m	
	Height	446.776 m	0.000 m	0.013 m	

**Figure IV.15** : coordonnées des nouveaux points.

Après l'opération d'ajustement nous avons obtenu des coordonnées des nouveaux points GPS ont été observés en système WGS84.

<b>Points</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Easting</b>	<b>Northing</b>	<b>Height(WGS 84)</b>
TND62	6° 28' 08.66889" W	27° 37' 27.31805" N	749751.417	3058139.061	455.126
TND64	6° 51' 47.01607" W	27° 46' 16.70425" N	710579.061	3073699.553	466.905
TND65	7° 01' 16.91020" W	27° 53' 28.02590" N	694761.611	3086714.638	426.771
TND66	6° 58' 25.04686" W	27° 38' 55.30779" N	699904.686	3059928.548	469.071
TND67	6° 47' 25.52910" W	27° 37' 24.23332" N	718032.648	3057435.307	464.951
TND70	6° 40' 32.66892" W	27° 27' 54.98242" N	729681.561	3040119.582	402.138
TND72	6° 45' 00.74071" W	27° 21' 08.10415" N	722547.326	3027459.470	374.321
TND73	6° 59' 13.10791" W	27° 26' 04.32561" N	698973.031	3036176.331	446.776

**Tableau IV.3** : coordonnées des nouveaux points en WGS 84.

### IV.4.5 Validation des résultats

La plupart des logiciels de traitement de données GPS incluent un module de compensation par moindres carrés. Le logiciel utilisé par l'exécutant doit lui permettre de valider son travail.

Les données doivent être validées de deux façons différentes :

#### a. Par teste statistique F (ficher)

Le F-test est un test multi-dimensionnelle très couramment utilisé pour le contrôle de la H0 hypothèse nulle. Le test F est souvent appelé le test global du modèle, car il teste le modèle en général.

**Figure IV.16** : résultats du test statistique F.

Critical value F-test:	0.96	
F-test:	0.73	✓ (accepted)

Nous notons que dans la dernière ligne à la suite du teste statistique F applique par le logiciel LEICA Geo office donné de bons résultats.

#### b. Par des boucles

Cette étape montrer les résultats des caractéristiques générales des boucles du réseau, chaque boucles donne une valeur de erreur de fermeture et valeur du périmètre de la boucle et valeur d'erreur de fermeture relative, exemple boucle N°3 :

Loop 3					
	From	To	dX[m]	dY[m]	dZ[m]
	TND67	TND70	9320.410	10306.650	-15566.217
	TND70	2203064	-7051.298	6611.126	15023.806
	2203064	TND67	-2269.113	-16917.776	542.411
X:		-0.001 m	W-Test:	-0.01	
Y:		0.000 m		0.01	
Z:		0.000 m		-0.01	
Easting:		0.000 m	W-Test:	0.00	
Northing:		0.000 m		0.00	
Height:		-0.001 m		-0.01	
Closing error:	0.001 m		(0.0 ppm)	Ratio:	
Length:	55808.789 m			(1:91972295)	

**Figure IV.17** : résultats des caractéristiques générales de la boucle 03.

Les résultats des boucles doivent être vérifiés attentivement pour détecter la présence de toutes les erreurs importantes dans certains boucles.

## IV.5 Paramètres de transformation

### IV.5.1 Paramètre systèmes de référence

#### Système de Référence WGS84 :

- Nom du sphéroïde : WGS-84
- Axe Semi Major (a) : 6378137.000 m
- Aplatissement inverse  $1/f = 298.2572233$

#### Système de référence Locale :

- Nom du sphéroïde : Clarke 1880
- Axe Semi Major (a) : 6378249.145
- Aplatissement inverse  $1/f = 293.465$

#### Paramètre de la Projection :

- Nom de Projection : Universel transverse Mercator (UTM)
- Type de la Projection : cylindrique transverse
- Zone : Fuseau 29
- Méridien Central : 9° Ouest
- Latitude d'origine : 0° Nord
- Constante Est : 500000 m
- Constante Nord : 0
- Facteur d'échelle : 0.9996

#### Le model de géoïde :

Le model de géoïde utilisé dans ce projet pour transformer la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde en altitude est **OSU91A**.

Ainsi l'élévation (MSL) de chaque point est obtenue avec la formule suivante :

$$\text{Élévation (MSL)} = H(\text{Wgs84}) - \text{Ondulation}(\mathbf{OSU91A}).$$

### IV.5.2 Calcul Paramètres de transformation

La transformation des coordonnées issues du positionnement par GPS et donc exprimés dans le système WGS 84 au système locale Nord Sahara en vigueur, nécessite la connaissance des paramètres de passage.

La détermination de ces paramètres a été effectuée sur la base de la connaissance des coordonnées des points doubles déterminées dans les deux systèmes, (2203056, 2203064,

2203065, 2203069, 2203079), Le modèle de transformation tridimensionnel utilisé est celui dit modèle MOLODENSKY BADEKAS ou de BURSA WOLF à sept paramètres. Le logiciel LEICA -Geo- Office calcule alors, avec les points communs aux deux systèmes une transformation 3D des modèle BURSA WOLF et MOLODENSKY BADEKAS.

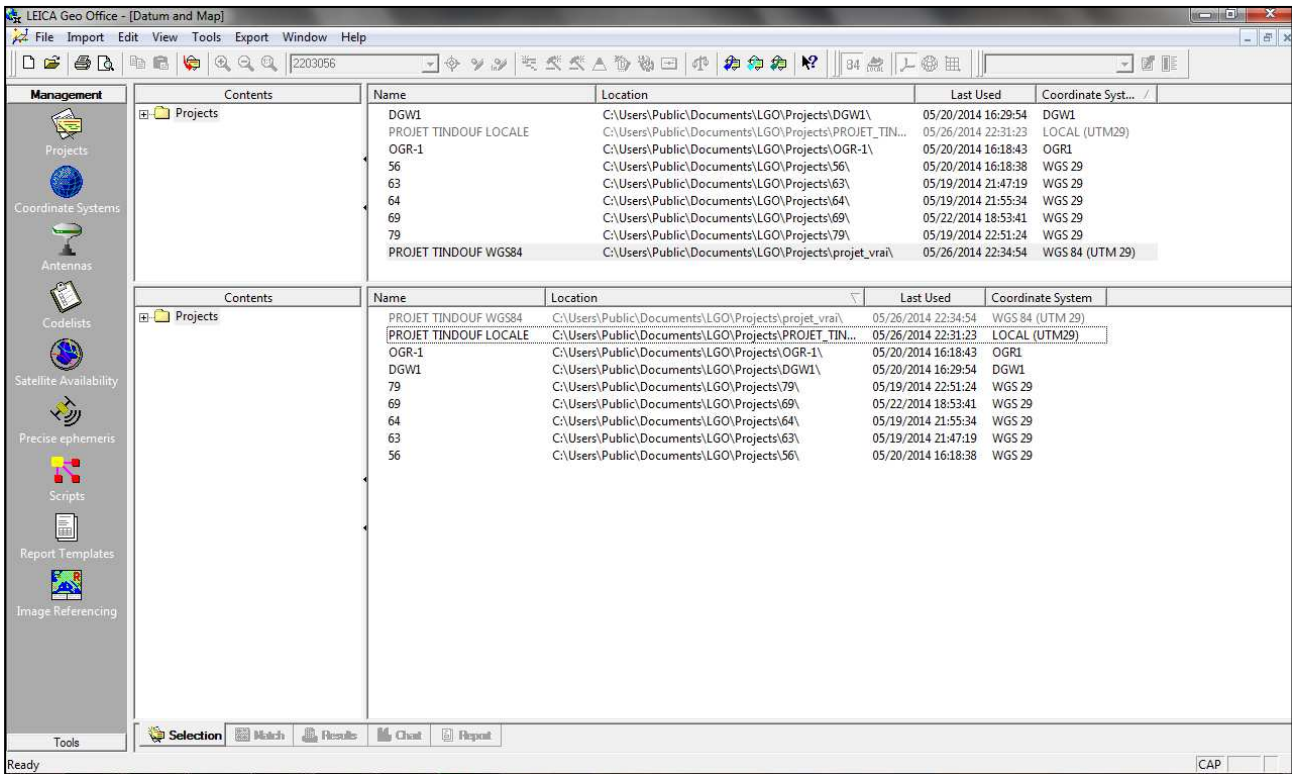


Figure IV.18 : Choix des systèmes A et B pour un calcul de transformation.

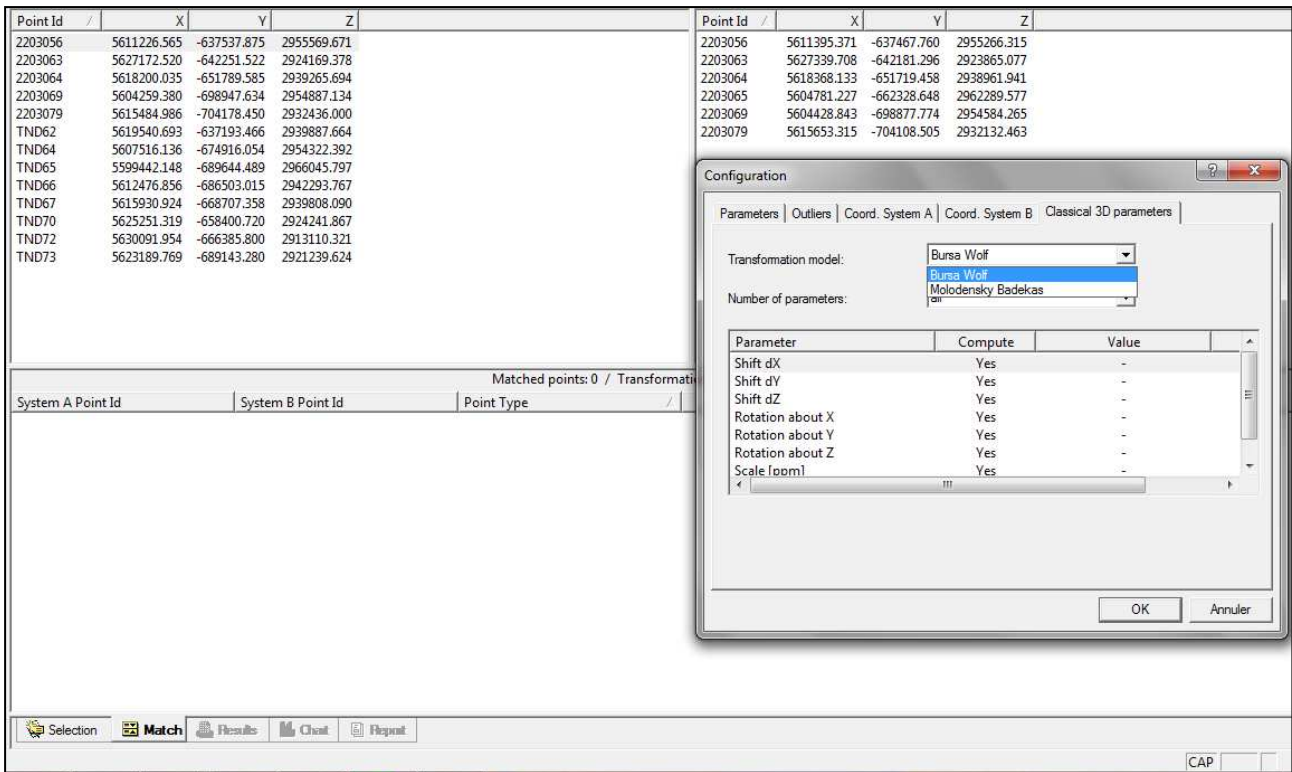


Figure IV.19 : Choix des modèles transformations.

### IV.5.2.1 Calcul les paramètres de Transformation BURSA WOLF

Le modèle Bursa Wolf, a 7 paramètres :

- 3 paramétrés de translation,
- 3 paramétrés de rotation,
- 1 facteur d'échelle

#### a) *Paramètres de Transformation*

Les paramètres calculés par le logiciel LEICA Géo Office sont les suivants :

Transformation details			
Height mode:	Ellipsoidal		
<b>3D-Helmert transformation</b>			
Number of common points:	5		
Sigma a priori:	1.0000		
Sigma a posteriori:	0.0028		
Transformation model:	Bursa-Wolf		
No.	Parameter	Value	rms
1	Shift dX	-15.183 m	0.336 m
2	Shift dY	1.519 m	0.277 m
3	Shift dZ	-5.972 m	0.515 m
4	Rotation about X	0.35261 "	0.00846 "
5	Rotation about Y	-11.26508 "	0.01818 "
6	Rotation about Z	-2.39892 "	0.00864 "
7	Scale	2.7025 ppm	0.0384 ppm

Figure IV.20 : Paramètres de passage du WGS 84 au Nord Sahara.

#### b) *Résultats*

Le tableau V.4 présenté les coordonnées des points dans le système locale Nord Sahara 1959 (UTM 29), après l'application d'une transformation aux points :

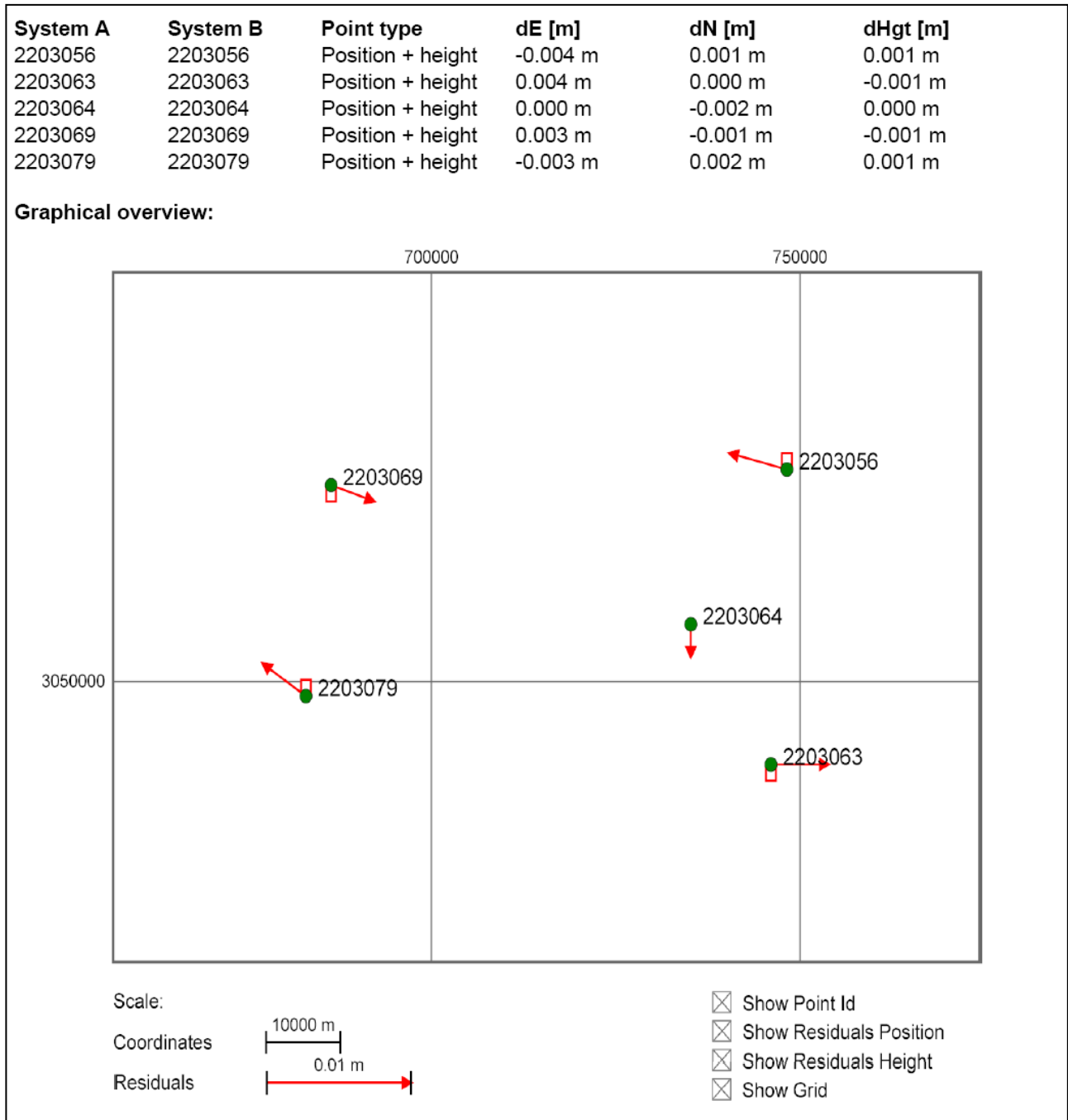
Points	Latitude	Longitude	Easting	Northing	Height clarke 1880	Z othometrique
2203056	06° 28' 52.14118" W	27° 47' 00.72156" N	748205,636	3075521,934	429,736	426.223
2203063	06° 30' 37.15763" W	27° 27' 50.21707" N	746044,115	3040046,047	378,766	377.880
2203064	06° 36' 59.84909" W	27° 37' 02.60083" N	735207,809	3056843,518	423,125	420.893
2203069	07° 06' 29.32827" W	27° 46' 35.85060" N	686418,738	3073647,115	419,647	415.984
2203079	07° 08' 47.87715" W	27° 32' 52.06815" N	683006,557	3048235,905	435,741	433.546
TND62	06° 28' 05.43547" W	27° 37' 25.49050" N	749848,569	3057839,751	417,920	415.732
TND64	06° 51' 43.74113" W	27° 46' 14.92275" N	710675.889	3073400.462	430.441	426.909
TND65	07° 01' 13.61613" W	27° 53' 26.27724" N	694858.327	3086415.700	390.910	386.566
TND66	06° 58' 21.76640" W	27° 38' 53.50071" N	700001.389	3059629.357	431.992	429.256
TND67	06° 47' 22.26633" W	27° 37' 22.41482" N	718129.509	3057136.054	427.743	425.338
TND70	06° 40' 29.42241" W	27° 27' 53.12314" N	729778.492	3039820.148	364.139	363.076
TND72	06° 44' 57.49159" W	27° 21' 06.22008" N	722644.165	3027159.936	335.759	335.519
TND73	06° 59' 09.83433" W	27° 26' 02.46813" N	699069.671	3035876.927	408.625	407.445

Tableau IV.4 : coordonnées des nouveaux points en locale calculé par les paramètres de transformation BURSA WOLF.

**c) Analyse des résultats**

Les résultats obtenus après l'application d'une transformation aux points remesures ont été comparés avec les valeurs des points correspondants dans le système de coordonnées locales planes Nord Sahara (UTM 29).

La figure et Le tableau présent les écarts en x, y et z.



**Figure IV.21 : Ecart en x, y et z.**

points	Valeurs Calculées			Valeurs Données			Ecart		
	Easting	Northing	Height clarke 1880	Easting	Northing	Height clarke 1880	dx	dy	dz
2203056	748205,636	3075521,934	429,736	748205,640	3075521,933	429,735	-0,004	0,001	0,001
2203063	746044,115	3040046,047	378,766	746044,111	3040046,047	378,767	0,004	0	-0,001
2203064	735207,809	3056843,518	423,125	735207,809	3056843,520	423,125	0	-0,002	0
2203069	686418,738	3073647,115	419,647	686418,735	3073647,116	419,648	0,003	-0,001	-0,001
2203079	683006,557	3048235,905	435,741	683006,560	3048235,903	435,740	-0,003	0,002	0,001

Tableau IV.5 : Ecart en x, y et z.

#### IV.5.2.2 Calcul les paramètres de Transformation MOLODENSKY-BADEKAS

Le modèle Molodensky-Badekas, a 10 paramètres :

- 3 paramétrés de translation,
- 3 paramétrés de rotation,
- 1 facteur d'échelle
- 1 point initial ( $X_0, Y_0, Z_0$ ).

##### ***d) Paramètres de Transformation***

Les paramètres calculés par le logiciel LEICA Geo Office sont les suivants :

<b>3D-Helmert transformation</b>			
Number of common points:		5	
Sigma a priori:		1.0000	
Sigma a posteriori:		0.0028	
Transformation model:		Molodensky-Badekas	
Rotation origin:	X0:	5615268.697 m	
	Y0:	-666941.013 m	
	Z0:	2941265.576 m	
No.	Parameter	Value	rms
1	Shift dX	168.377 m	0.001 m
2	Shift dY	70.054 m	0.001 m
3	Shift dZ	-303.564 m	0.001 m
4	Rotation about X	0.35261 "	0.00846 "
5	Rotation about Y	-11.26508 "	0.01818 "
6	Rotation about Z	-2.39892 "	0.00864 "
7	Scale	2.7025 ppm	0.0384 ppm

Figure IV.22 : Paramètres de passage du WGS 84 au Nord Sahara.

### e) Résultats

Le tableau V.5 présenté les coordonnées des points dans le système locale Nord Sahara 1959 (UTM 29), après l'application d'une transformation aux points :

Points	Latitude	Longitude	Easting	Northing	Height clarke 1880	Z othometrique
2203056	06° 28' 52.14118" W	27° 47' 00.72156" N	748205,636	3075521,934	429,736	426.223
2203063	06° 30' 37.15763" W	27° 27' 50.21707" N	746044,115	3040046,047	378,766	377.880
2203064	06° 36' 59.84909" W	27° 37' 02.60083" N	735207,809	3056843,518	423,125	420.893
2203069	07° 06' 29.32827" W	27° 46' 35.85060" N	686418,738	3073647,115	419,647	415.984
2203079	07° 08' 47.87715" W	27° 32' 52.06815" N	683006,557	3048235,905	435,741	433.546
TND62	06° 28' 05.43547" W	27° 37' 25.49050" N	749848,569	3057839,751	417,920	415.732
TND64	06° 51' 43.74113" W	27° 46' 14.92275" N	710675.889	3073400.462	430.441	426.909
TND65	07° 01' 13.61613" W	27° 53' 26.27724" N	694858.327	3086415.700	390.910	386.566
TND66	06° 58' 21.76640" W	27° 38' 53.50071" N	700001.389	3059629.357	431.992	429.256
TND67	06° 47' 22.26633" W	27° 37' 22.41482" N	718129.509	3057136.054	427.743	425.338
TND70	06° 40' 29.42241" W	27° 27' 53.12314" N	729778.492	3039820.148	364.139	363.076
TND72	06° 44' 57.49159" W	27° 21' 06.22008" N	722644.165	3027159.935	335.759	335.519
TND73	06° 59' 09.83433" W	27° 26' 02.46813" N	699069.671	3035876.927	408.625	407.445

**Tableau IV.6 :** coordonnées des nouveaux points en locale calculé par les paramètres de transformation MOLODENSKY-BADEKAS.

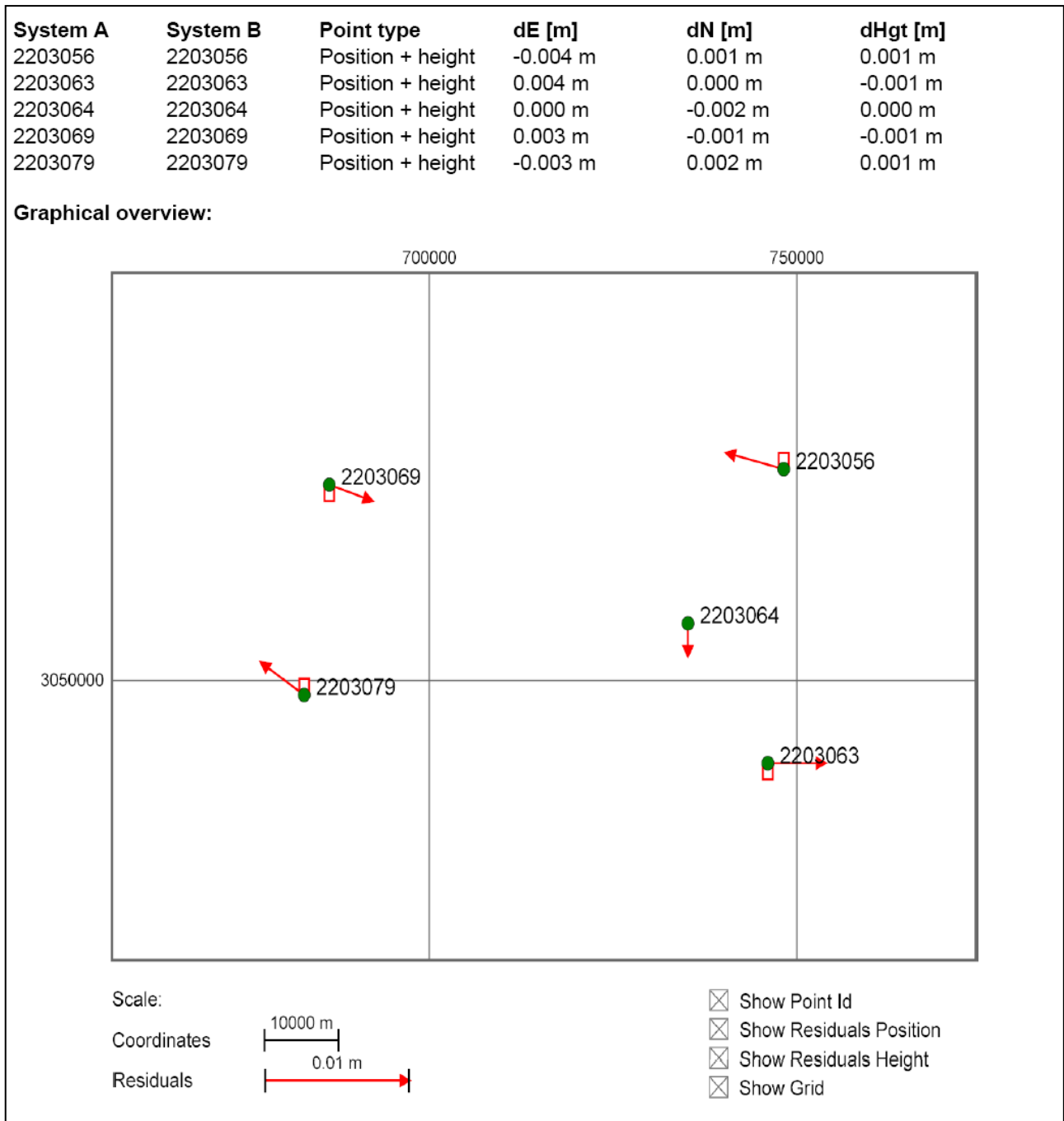
### f) Analyse des résultats

Les résultats obtenus après l'application d'une transformation aux points remesures ont été comparés avec les valeurs des points correspondants dans le système de coordonnées locales planes Nord Sahara (UTM 29).

Le tableau et La figure présent les écarts en x, y et z.

points	Valeurs Calculées			Valeurs Données			Ecart		
	Easting	Northing	Height clarke 1880	Easting	Northing	Height clarke 1880	dx	dy	dz
2203056	748205,636	3075521,934	429,736	748205,640	3075521,933	429,735	-0,004	0,001	0,001
2203063	746044,115	3040046,047	378,766	746044,111	3040046,047	378,767	0,004	0	-0,001
2203064	735207,809	3056843,518	423,125	735207,809	3056843,520	423,125	0	-0,002	0
2203069	686418,738	3073647,115	419,647	686418,735	3073647,116	419,648	0,003	-0,001	-0,001
2203079	683006,557	3048235,905	435,741	683006,560	3048235,903	435,740	-0,003	0,002	0,001

**Tableau IV.7 :** Ecart en x, y et z.



**Figure IV.23 :** Ecart en x, y et z.

Nous avons remarqué Le même résultat obtenu après l'application d'une transformation les deux méthodes Molodensky-Badekas et Bursa Wolf.

## Conclusion :

Les travaux géodésiques réalisées dans le SAHARA sont basées sur des observations astronomiques (exemple mesures des hauteurs égales) qui ont une précision de dizaines de mètre alors que les travaux de prospection pétrolière et leurs attachement entre elles ; nécessite une précision de l'ordre de centimètre.

L'arrivées de la technologie GPS dans les années 90 permettre de réduire les erreurs et améliorer la précision d'observation.

L'objectif dans ce mémoire dans le début c'était premièrement mettre un organigramme de traitement d'un réseau GPS et deuxièmement de lier des travaux géodésiques locaux bien espacées (calculer dans le système NORD SAHARA) par l'utilisation des mesures GPS et voir le comportement de ces réseaux en matière de précision après la transformation du WGS84 vers le locale. Malheureusement, on n'a pas pu avoir des données de plusieurs chantiers. La seule données qu'on essaye de l'avoir c'était le réseau de TINDOUF (WGS84 et NORD SAHARA). Le canevas général de ce réseau est composé de 05 points anciens connus dans les deux systèmes, le système mondial WGS84 et le système local « NORD SAHARA », crée en 2003 par l'organisme du « I.N.C.T » (1<sup>er</sup> Ordre) et huit (08) nouveaux points observés en mode Statique, et les observations ont été saisie par des huit récepteurs GPS de type TRIMBLE R7 GNSS bi-fréquence L1&L2.

Le software utilisé pour traitement des données GPS c'est LEICA Geo office V.5.0.0, ce logiciel utilise La solution des vecteurs ou les ambiguïtés sont fixées sur la combinaison L1+L2 ou sur la combinaison IONO FREE FIXED L3 et L'ajustement est fait dans le but de compenser tous les vecteurs d'un même réseau. Ces opérations permettent d'obtenir un réseau compensé dans le système WGS84.

Le résultat obtenus dans le système mondial WGS84 et de l'ordre de millimètre et après avoir convertir les coordonnées de ce réseau dans le système locale (NORD SAHARA) par l'utilisation des modèles de transformation (Bursa-wolf et Molodensky-badekas), on a trouvé que le résultat obtenue est de l'ordre de millimètre que ce soit par l'utilisation Bursa-wolf ou Molodensky-badekas donc on a déduit que exploitation de l'un de ces deux type de transformation est valable car sa donne le même résultat.

En ce qui concerne l'étendu du réseau, ce genre de transformation est valable uniquement à des zones inférieures à un périmètre de 100\*100 km.

Cela est expliqué par l'hypothèse que la variation de la hauteur de géoïde est très petite (densité locale homogène).

Pour des zones de surface plus grande que celle de la zone traité il est conseillé de chercher d'autre type de transformation (ligne géodésique) car la méconnaissance de la hauteur de géoïde on Algérie ne permette pas de déterminer les coordonnées dans le réseau locale (NORD SAHARA).

## Références Bibliographiques

- Ali Zeggai.** (2004). Transformation entre systèmes de références géodésiques.
- Congyu Liu.** (1993). Precise GPS positioning in the marine environment. Master thesis. UCGE Reports Number 2055, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Didier.Bouteloup.** (2002). systemes geodesiques transformations des coordonnees. Cours de Géodésie.
- Didier.Bouteloup.** (2003).geometrie de l'ellipsoïde. Cours de Géodésie.
- E.Henrion,** (2013). Retrouver le déplacement rapide des stations géodésiques : expériences et calculs.
- Fotopoulos.** (2000). Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations. Master thesis. UCGE Reports Number 20142, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Hugentobler. U, Schaer. S, Fridez. P.** ( February 2001). Bernese GPS Software Version4.2.
- INCT.** (2007). Rapport national de l'algerie iugg 2007 Perugia, réalise par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection.
- Kadri .C.** (2003). Mémoire fin d'étude (Uniformisation des données GPS).
- Leik. Alfred.** (1990). GPS Satellite Surveying, John Wiley & Sons, 1990, pp.218-220.
- Ning Luo.** (January 2001). Precise Relative Positioning of Multiple Moving Platforms Using GPS Carrier Phase Observables. Ph.D. Thesis, Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Pierre Bettinelli.** (2007).Deformation intersismique de l'himalaya du nepal a partir de données GPS.These de Doctorat de l'Institut de Physique du Globe de Paris.
- Raquet, J.F.** (1998). Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers. Ph.D. Thesis, UCGE Report 20116, Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Site web JPL.** <http://igschb.jpl.nasa.gov/>.
- Seeber. G.** (2003). Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications, de Gruyter, Berlin.
- S. Lannuzel,** (2000). Référentiels géodésiques- coordonnées// EPSHOM/Centre d.Hydrographie/Section Géodésie – Géophysique.
- Townsend. B.P, Fenton. P, Van Dierendonck. K and Van Nee. R.** (1995). Performance evaluation of the multipath eliminating delay lock loop, NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 42, no 3, pp 503-514.

**Varner Christopher C.** (February 2000). DGPS carrier phase networks and partial derivative algorithms. Ph.D. Thesis, UCGE Reports Number 20129. Geomatics Engineering, The university of Calgary.

**Van Dierendonck, A. J., P. Fenton and T. Ford** (1992). Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver, NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 39, no 3, pp 265-283.

**Vesna Ducic.** (Mars 2004). Tomographie de l'ionosphère et de la troposphère à partir des données GPS denses. Applications aux risques naturels et amélioration de l'interférométrie SAR, Thèse de doctorat de l'université de Paris 7 - DENIS DIDEROT.

**Weil.L and Fisher. B.** (Feb 29, 2000). Method of mitigation of multipath effects in radio ranging systems, U.S Patent No. 6,031,88.

**Yongjin Moon.**(April 2004). Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National And Regional GPS Networks in Canada. Master thesis. UCGE Reports Number 20192, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.

**Zhang. J.** (1999). Investigations into the Estimation of Residual Tropospheric Delays in a GPS Network. Master Thesis, UCGE Report 20132, Geomatics Engineering, the University of Calgary

# ANNEXES