



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

KEDDARI Mohamed & MECHRAOUI Taybe

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : SCIENCES ET TECHNIQUES TOPOGRAPHIQUES

Thème

**Intégration des données geopotential et GPS pour le calcul de
réseau de nivellement**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
BENCHEHIDA Abdelkader	Maitre-Assistant A	Président
GUERROUDJ Abdelhalim	Maitre-Assistant B	Examineur
KADRI Chadli	Maitre-Assistant A	Rapporteur

Promotion : 2017

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, on remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné la patience, le 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 maitre-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 BENCHEHIDA Abdelkader maître assistant – A. pour avoir accepté être le président de jury de ce modeste travail ainsi que GEURROUDJ Abdelhalim maître assistant–B. 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

Au meilleur des pères

A ma très chère maman

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté

A qui je dois tout

A mes chères sœurs et mon frère AYOUB

A qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

A mes Amis

A tous ceux qui me sont chers

KEDDARI Mohamed

DEDICACES

A ma Chère Mère A mon Père
Dont le mérite, les sacrifices et les qualités
humaines
M'ont permis de vivre ce jour.
A mes Frères et mes sœurs
A tous les gens m'aiment

MECHRAOUI Tayeb

Résumé

La détermination des coordonnées précise d'un point est l'un des prérogatives de la géodésie.

L'un des grands problèmes qui affronte le géodésien est la méconnaissance de champs de pesanteur. L'intégration du GPS, le nivellement de précision et un modèle de géoïde (EGM2008) conjointement peut aider à trouver une solution pour extraire des altitudes orthométriques de précision de millimètre.

Dans ce travail, on discute l'utilisation de ces données pour le profit d'un mégaprojet de chemin de fer (Saida-Tiaret).la technique exploité est une similitude à quatre paramètres.

Les résultats trouvés sont intéressante d'un point de vue professionnel.

Une analyse statistique est présente aussi pour discuter la qualité des résidus de la méthode des moindres carrées.

Mots clé : GPS, EGM 2008, altitudes orthométriques, Moindre carrés.

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Résumé	iv
Table des matières	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
Liste des Acronymes	xi
Introduction.	1

Chapitre I : Notions géodésiques

I.1.Introduction.....	4
I.2.Sources d'erreurs	4
I.2.1.Erreur d'orbite.....	5
I.2.2 Erreur troposphérique.....	5
I.2.3 Erreur ionosphérique	6
I.2.4 Multi-trajet	7
I.2.5 Bruit du récepteur.....	8
I.2.6 Les erreurs d'horloge	8
I.2.7 Centre de phase des antennes	9
I.3. Notion générale de géopotential	10
I.3.1.Géoïde	10
I.3.2.Géoïde locale.....	11
I.3. 3.Modèles géopotentiels.....	11
I.3. 4. Les modelés géopotentiels dans l'Algérie.....	12
I.4.L'évaluation du Modèle de Gravité de Terre EGM2008 en Algérie.....	13
I.4.1 Introduction	13
I.4.2. Données de gravité	13
I.4.3 Données de GPS/ nivellement.....	14
I.4.4. comparaison avec les données GPS/nivellement	15

I.5.Conclusion	17
----------------------	----

Chapitre II : Nivellement

II.1. Introduction	19
II.2. Réseau points GPS nivelés	20
II.3. Réseau de gravimétrie	21
II.3.1. Réseau gravimétrique fondamental en 2001	21
II.3.2. Réseau gravimétrique 2ème Ordre	22
II.4. Système cartographique en Algérie	23
II.4.1. Système géodésique Nord Sahara 1959	23
II.4.2. Transformation entre le WGS 84 et le Nord-Sahara	25
II.4.3. Représentations cartographiques planes.....	27
II.4.3.1. La projection Lambert.....	27
II.4.3.2. La représentation cartographique UTM.....	28
II.5. Projets de géodésie en cours à l'INCT	29
II.5.1. Détermination du Géoïde National	29
II.5.2. Détermination d'un nouveau référentiel altimétrique national	30
II.5.3. Réseau GPS permanent	31
II.6. Perspectives	32
II.7. Méthode des Moindres Carrés	32
II.7.1. Définition	32
II.7.2.Problématique de Méthode des Moindres Carrés	33
II.8. Modélisation	33
II.8.1. Modèle mathématique	34
II.8.2.Modèle stochastique	34
II.8.3. Relation d'observation en nivellement	35
II.8.5.Principe de Traitement	35
II.8.5.1. Traitement des relations d'observations	35
II.8.5.2. Traitement des équations de condition	36

II.9. Traitement des relations d'observations et des équations de condition.....	37
--	----

Chapitre III : Ajustement des données par le Méthode de Moindre carrés et tests statistiques

III.1. Introduction	41
III.2. Test du Khi2	41
III.2.1. Domaine d'application du test.....	41
III.2.2.Principe	42
III.2.3 .Test du χ^2 d'homogénéité	42
III.3.Test de student.....	44
III.3.1.Principe	44
III.4.Test de Fisher	45
III.4.1.Principe du test	45
III.4.2. Les hypothèses du test	45
III.4.3. La statistique à calculer.	45
III.4.4. La règle du test	46
III.4.5. Fusion de deux écarts-types.....	46
III.4.6.Conclusion	46
III.5 zone d'étude	47
III.5.1 Position d'étude	47
III.5.2.Les données et les matériaux disponibles dans ce projet.....	48
III.5.3.Méthode de levée.....	52
III.5.4.Calcul de réseau altimétrique	52
III.6.Résultat.....	52
III.6.1.Phases du calcul.....	54
Conclusion Général	55
Référence-Bibliographique.....	56

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma illustrant les différentes erreurs et biais affectant le signal GPS entre sa transmission depuis le satellite jusqu'à sa réception au sol. [Rahmani Mohamed 2014].....	5
Figure.I.2. : Multi-Trajet.....	8
Figure.I.3. : Distribution géographique de mesures gravité BGI [Ben Amed dahou 2010]...14	14
Figure.I.4. : Distribution géographique de données de gravité GETECH [Ben Amed dahou 2010].....14	14
Figure.I.5. : La distribution géographique de stations GPS/ nivellement dans le Nord de l'Algérie [Ben Amed dahou 2010].....15	15
Figure II.1: Réseau de nivellement. En noir : INCT ; en rouge : IGN. [INCT, 2007]	20
Figure II.2: Répartition géographique des 35 points GPS nivelés. [INCT, 2007].....	21
Figure II.3: Répartition des douze points de gravimétrie absolue. [INCT, 2007].....	22
Figure II.4: Réseau gravimétrique INCT 2ème Ordre. [INCT, 2007].....	23
Figure II.5: Décalages entre les latitudes du système Europe 50 et les latitudes correspondantes du système Nord-Sahara. [INCT, 2007].....	24
Figure II.6 : Décalages des systèmes Merchich (Marroc) et Cartage (Tunisie) par rapport au système Nord-Sahara. [INCT, 2007].....	25
Figure II.7: Répartition géographique des points ayant servi au calcul des paramètres de passage. [INCT, 2007]	26
Figure II.8: Projection Lambert en Algérie. [INCT, 2007].	28
Figure II.9: Fuseaux de la projection UTM en Algérie.	28
Figure II.10: Répartition géographiques des données gravimétriques. Données BGI en noir, Données INCT en rouge. [INCT, 2007].....	29
Figure II.11: Configuration du projet réseau GPS permanent. [INCT, 2007].....	31
Figure.II.12. : Schéma général de la compensation par les moindres carrés.....	34
Figure .III.1: situation de zone d'étude	47
Figure III.2: schéma de distribution de réseau point d'appui.....	48
Figure .III.3: le repère de nivellement FNGA 18 de Saïda	49
Figure III.4 : le repère de nivellement FNGA 11de tiffrit.....	49

Figure III.5 : les fiches signalétiques du repère de nivellement FNGA 18 DE Saïda et le repère FNGA 11 de tiffrit.....	50
Figure III.6: Valeur des résidus	51
Figure III.7: niveaux numériques de leica (sprinter 150)	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Correspondance Temps-Distance-TEC [VesnaDucic, 2004].....	7
Tableau I.2: Valeur absolue des différentes erreurs et biais influençant les mesures GPS [NingLuo, 2001].....	10
Tableau.I.3. Comparaison des trois modèles géopotential existes en Algérie avec GPS/nivèlement hauteurs avant et après la partialité et l'inclinaison, raccord (m). La gamme spectrale. [Ben Amed dahou2010].....	16
Tableau II.1: Missions de Nivellement de précision effectuées depuis 1976.[INCT, 2007].	20
Tableau II.2: Missions de gravimétrie effectuées. [INCT, 2007].....	23
Tableau II.3: Paramètres de passage du WGS 84 au Nord Sahara. [INCT, 2007].....	26
Tableau II.4: Constantes de la projection Lambert Nord et Lambert Sud. [INCT, 2007].....	27
Tableau.II.5: Constantes de la projection UTM	29
Tableau III .1: propriétés desdonnées	43
Tableau III.2 : propriétés de réseau.....	45
Tableau III.3 : Tableau représente les points connus mesurés par station GPS.....	48
Tableau III.4: extrait des points mesurés par nivellement direct (non compensait)	50
Tableau III.5: Le résultat de calcule après déterminer les résidus 2.....	53
Tableau III.6 : les coefficients Obtenu à partir le tableau précédent	54

Liste des Acronymes

AFREF :AFrican REference Frame

BGI : Bureau Gravimétrique International.

Clarke 80 A : Ellipsoïde local appliquée au système Nord Sahara.

HAYFORD : est un ellipsoïde de référence géodésique, nommé d'après le géodésien américain John Fillmore Hayford (1868-1925).

IGN: Institut Géographique National.

INCT : Institut National de Cartographie et de Télédétection.

IGSN 71 : international gravity standardization net (1971).

GNSS : global navigation satellite system.

GRS 80 : Système de référence géodésique 1980. (Geodetic Reference System).

GPS : Global Positioning System.

MNT : modelé numérique de terrain.

NASA : national aeronautics and space administration.

RINEX :Receiver INdependent EXchange.

SRTM : shuttle radar topography mission.

UTM : Universel Traverse Mercator.

WGS 84 : World Geodetic System 1984.

Introduction

Introduction

La géodésie est la science qui détermine la forme, les dimensions et le champ de pesanteur de la terre, ce dernier est long temps resté un objet d'études scientifiques. Il est défini comme l'équipotentielle du champ de pesanteur ($W=W_0$) correspondant au mieux au niveau moyen des mers. Il était principalement utilisé pour des recherches sur les références verticales et le niveau moyen de la mer. Depuis l'apparition des techniques spatiales de positionnement, et plus particulièrement avec le développement rapide du système GPS, la situation a radicalement changé, le géoïde est devenu un outil indispensable pour convertir les hauteurs ou les différences de hauteurs au-dessus de l'ellipsoïde issues du GPS en altitudes ou en différences d'altitudes.

La détermination d'un modèle de géoïde utilise des données de différentes natures liées au champ de pesanteur :

- Déviation de la verticale par mesures astro-géodésiques (Θ)
- Intensité de pesanteur (g) par gravimétrie relative et absolue, terrestre et aéroportée
- Gradiométrie satellitaire
- Altimétrie satellitaire
- Dynamique orbitale (mesures sol-satellites, satellite-satellite)
- Mesures de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde (h) par GNSS et d'altitude (H) par nivellement de précision

Les méthodes de déterminations satellitaires fournissent des géoïdes globaux, précis (centimétrique) mais peu résolus. Les déterminations de la gravimétrie par exemple par la méthode de Stokes donnent des géoïdes précis et très résolus à condition d'utiliser des mesures denses et bien réparties. En général ces géoïdes recouvrent un pays, ou un continent.

Il est possible de réaliser des modèles locaux du géoïde en déterminant par GPS la hauteur ellipsoïdale de quelques repères de nivellement, ou, par nivellement, l'altitude de quelques points GPS. Pour les autres points, qui sont connus uniquement par GPS, on interpole la hauteur du géoïde en s'appuyant sur les points GPS nivelés environnants et on en déduit l'altitude. On peut prétendre à une précision d'un petit nombre de centimètres pour que :

Les points GPS nivelés soient suffisamment nombreux et bien répartis dans et autour de la zone de travail.

- les observations et traitements GPS soient de bonne qualité.
- les dénivelées ne soient pas trop fortes pour éviter des erreurs de troposphère sur les hauteurs ellipsoïdales.

- le géoïde présente peu de courbure. Avec cette technique, on maîtrise parfaitement et automatiquement les problèmes de systèmes de références géodésique et altimétrique. La méthode est d'un emploi délicat en zone accidentée.

La technique de nivellement direct étant très précise mais ne répondant pas aux besoins de travaux de grandes envergures à cause de la propagation des erreurs et des délais impartis à la mise en place de longs cheminements.

De plus, et si on se réfère à la distribution géographique des repères de nivellement à l'échelle nationale, on constate que la couverture est bonne au niveau de la partie nord du pays et devient quasi-inexistante au niveau du Sahara.

De ce fait, et vu l'étendue du territoire algérien, il va falloir trouver une autre alternative pour remédier à ces contraintes et projeter de couvrir, dans un avenir proche, l'ensemble du territoire national en points de nivellement afin de répondre aux besoins immédiats de plusieurs utilisateurs potentiels de cette information capitale.

L'apport des techniques spatiales comme le GPS, qui donne un positionnement relatif de l'ordre de 1 ppm dans la définition de lignes altimétriques, peut permettre de s'affranchir de ces contraintes.

Cependant, l'exploitation de ces mesures pour dériver les altitudes orthométriques exige en revanche un modèle de géoïde de même qualité. L'objectif de ce travail est d'appliquer une méthode d'adaptation (géoïde, nivellement, GPS) qui est faire transformer une altitude ellipsoïdique, purement géométrique, issue d'observations et de traitement de données GPS en altitude orthométrique pour le profit d'un projet de chemin de fer à une grandeur de plus de 200 km.

On a abordé ce mémoire avec une introduction sur les notions géodésiques, puis on voit dans la deuxième chapitre les modèles géopétontiel existent dans l'Algérie. Et après trouver dans la troisième chapitre les tests statistiques appliquées aux mesure physique dont on a réalisée des tests de Khi-2 et Student sur les résidus extraient de méthode des moindres carrées et dans la dernière partie on a essai de réaliser une application dont on a adapté les données GPS, nivellement et champ de pesanteur et mettre en valeur les résultats obtenues.

CHAPITRE I

Notions géodésiques

I.1.Introduction

La détermination d'une position par GPS permet d'atteindre l'un des objectifs fondamentaux de la géodésie, à savoir la détermination de positions absolues avec une précision uniforme en tout point de la surface terrestre.

Si l'on utilise les techniques classiques de la topographie et de la géodésie, la position est toujours déterminée par rapport au point initial du lever, la précision atteinte dépendant alors de la distance vers ce point.

De ce point de vue, le GPS présente des avantages considérables par rapport aux techniques classiques.

Bien que le GPS représente un outil indispensable de haute précision, il est cependant essentiel de connaître ses erreurs et leurs sources.

I.2.Sources d'erreurs

La figure I.1 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 différenciation; ces erreurs sont indépendantes de la longueur de la ligne de base.

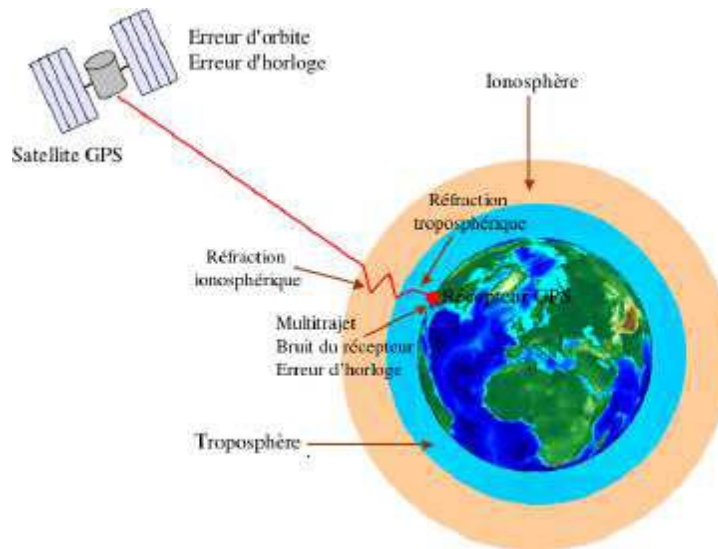


Figure I.1 : Schéma illustrant les différentes erreurs et biais affectant le signal GPS entre sa transmission depuis le satellite jusqu'à sa réception au sol. [Rahmani Mohamed 2014]

I.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]

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{db}{b} \quad (\text{I.1})$$

Tel que : ρ 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.

I.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].

I.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 :

$$d_{r,ion}^s = \int_r^s (n_I - 1) ds \quad (I.2)$$

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 [NingLuo, 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 I.1.

Fréquence (mhz)	Temp (s)	Distance (m)	TEC (e^-/m^2)
$f_1 = 1575.42$	$1*10^{-9}$	0.299 m	$1.841*10^{16}$
	$0.543*10^{-9}$	0.267 m	$1*10^{16}$
$f_2 = 1227.60$	$1*10^{-9}$	0.300 m	$1.119*10^{16}$
	$0.894*10^{-9}$	0.162 m	$1*10^{16}$

Tableau I.1 : Correspondance Temps-Distance-TEC [VesnaDucic, 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].

I.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 environnement dans lequel

L'intensité du signal réfléchi ne dépasse jamais celle du signal direct [NingLuo, 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 différenciation ni par modélisation.

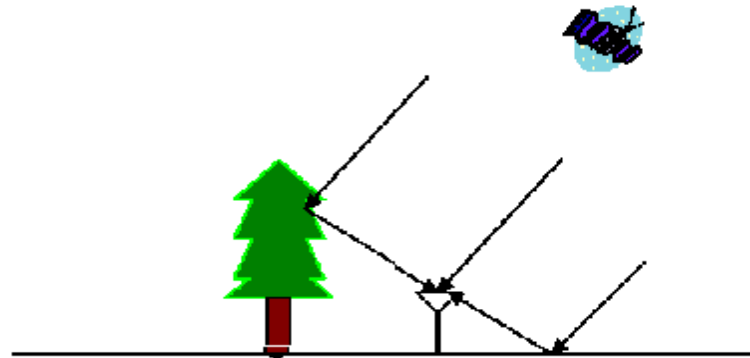


Figure I.2 : Multi-Trajet.

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 Méthode (MMT) [Weil et al, 2000].

I.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).

I.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 de l'horloge réceptrice 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.

I.2.7 Centre de phase des antennes

Le cœur d'une antenne GPS présente un solénoïde qui transforme l'onde électromagnétique reçue en signal 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 (azimut et élévation) et de la fréquence mesurée (L1 ou L2). 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 vertical 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 centre de phase, réalisées en laboratoires. [\[Pierre BETTINELLI .2007\]](#).

Bilan d'erreurs de la mesure GPS :

Source d'erreur	Valeurs absolues (m)	Remarques
Orbite	5 – 10 5cm (IGS)	Connaissance de la position du satellite
Horloge satellite $c \cdot dt^s$	10	Stabilité en fréquence du satellite par rapport au temps GPS .variations d'accélération ...
Horloge récepteur $c \cdot dt_r$	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) ζ Multi-trajet.P	0.2 - 3	Les signaux GPS peuvent être réfléchis par des objets situés à proximité
Bruit récepteur (codes) (ζ_p)	01 – 3	Dépend de l'électronique du récepteur et de son environnement
Multi-trajet (phases) ζ multi-trajet. ϕ	0.001 – 0.03	Les signaux GPS peuvent être réfléchis par des objets situés à proximité du récepteur
Bruit récepteur (codes) (ζ_ϕ)	0.0002 – 0.002	Dépend de l'électronique du récepteur et de son environnement

Tableau I.2: Valeur absolue des différentes erreurs et biais influençant les mesures GPS
[NingLuo, 2001]

I.3. Notion générale de géopotential

I.3.1.Géoïde

En apparence la Terre a la forme d'une sphère. En fait, elle est légèrement déformée par la force centrifuge induite par sa rotation autour de l'axe des pôles : la Terre n'est pas un corps rigide. Cette déformation est relativement faible : « tassement » de 11 km au niveau des pôles par rapport à un rayon moyen de 6 367 km et « renflement » de 11 km au niveau de l'équateur. Elle a donc l'aspect d'un ellipsoïde de révolution dont le petit axe est l'axe de rotation .**La Terre est une surface en équilibre.** La surface du niveau moyen des mers et océans au repos n'a pourtant pas une forme régulière et ne coïncide ainsi pas avec un ellipsoïde de révolution : elle n'est pas régulière mais ondulée, présente des creux et des bosses. Par exemple, la surface de la mer se bombe au-dessus d'un volcan et se creuse au-dessus des grandes fosses océaniques parce que les reliefs créent des excès ou des déficits de matière produisant ainsi des variations locales du champ de pesanteur. Or la surface d'un fluide en équilibre est en tout point normale aux forces de pesanteur : on dit qu'elle est **équipotentielle du champ de pesanteur**. La Terre, non rigide, peut être considérée comme un fluide ; la direction des forces de pesanteur varie d'un endroit à un autre en raison de la répartition hétérogène de la matière composant la Terre ; **sa surface n'est donc pas régulière.** [Topo .compil]

I.3.2.Géoïde locale

QGALG 2000 est un modèle de quasi-géoïde réalisé au Laboratoire de Géodésie du Centre National des Techniques Spatiales (Arzew/Algérie) à partir des données gravimétriques terrestres validées et fournies par le Bureau Gravimétrique International (B.G.I). Ces mesures dont la précision a priori est de l'ordre de 5mGals ont été rattachées au Système de Référence Géodésique GRS67 par le B.G.I.

Toutes ces données ont été transformées du système GRS67 au système GRS80. La répartition géographique de ces mesures.

On peut constater de graves lacunes dans la couverture gravimétrique du pays qu'il faudrait les combler pour satisfaire les besoins des géodésiens et des géophysiciens. Ce quasigéoïde de résolution 5'x5'a été calculé par la méthode de collocation rapide sur le territoire national entre les limites [20°, 37°] en Latitudes et [-10°, 7°] en Longitude en utilisant la technique de retrait-restauration.

Le modèle géopotential OSU91A développé jusqu'au degré et ordre 360 a été utilisé comme modèle de référence pour retirer et restaurer respectivement les contributions de grandes longueurs d'onde sur les anomalies de gravité et les ondulations du géoïde. Cependant, le calcul des effets de la topographie en accordant la réduction RTM est basé sur deux grilles d'élévations; un MNT de résolution 1km x 1km pour la partie Nord du pays, et le modèle topographique global ETOPO5 de résolution 10 km x 10 km pour la partie restante du territoire, lequel est utilisé jusqu'à une distance de 200 km.

La surface de référence de résolution 15' x 15' : nécessaire pour la réduction RTM, a été formée à partir de ETOPO5. Le logiciel GRAVSOFT (Tscherning, 1994) et des programmes développés au CNTS ont été mis en œuvre [Ben Ahmed Daho, 2000]

I.3. 3.Modèles géopotentiels

Les modèles géopotentiels Globaux se représentent comme termes d'une expansion du potentiel gravitationnel en harmoniques sphériques et se calculent sur la base des distorsions que les champs de pesanteur et de potentiel terrestre présentent relativement à ceux générés par l'ellipsoïde de référence.

Le calcul d'un modèle de potentiel est une entreprise de grande envergure, tant sur le plan de la collecte des données tant que des moyens de calcul mis en œuvre, mais il permet de condenser en deux ensembles de coefficients, et un volume de données extrêmement important qu'on ne pourrait manier autrement. , $C_{n,m}$, $S_{n,m}$

Le potentiel gravitationnel terrestre est alors défini par le développement en harmoniques sphériques comme suit [Mahdi HADDAD 2004] :

$$w(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left(1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right) + \varphi \quad (I.3)$$

où : (r, θ, λ) sont les coordonnées sphériques du point où W est déterminé : GM est la constante gravitationnelle géocentrique : a est le demi-grand axe de l'ellipsoïde de référence : $P_{nm}(\cos \theta)$ sont les fonctions de Legendre normalisées de première espèce : $C_{n,m}$, $S_{n,m}$ et sont les coefficients en harmoniques sphériques normalisés : $\Phi = (1/2) \omega^2 r^2 \sin^2 \theta$ est le potentiel de la force centrifuge tel que ω est la vitesse angulaire de la rotation de la terre.

Les coefficients de Potentiel $C_{n,m}$ et $S_{n,m}$ sont donnés par :

$$C_{n,m} = \frac{1}{4\pi\gamma(n-1)} \iint_{\sigma} \Delta g(\theta, \lambda) P_{n,m}(\cos \theta) \cos m\lambda \, d\sigma \quad (I.4)$$

$$S_{n,m} = \frac{1}{4\pi\gamma(n-1)} \iint_{\sigma} \Delta g(\theta, \lambda) P_{n,m}(\cos \theta) \sin m\lambda \, d\sigma \quad (I.5)$$

Une fois déterminés et ajustés, les coefficients de potentiel permettent d'affiner la connaissance du champ de pesanteur terrestre dont la finalité première est la définition de la surface du géoïde. Comme étape intermédiaire, il est indispensable de calculer le potentiel perturbateur et l'anomalie de pesanteur par rapport à l'ellipsoïde de référence. [Mahdi HADDAD 2004]

I.3. 4. Les modelés géopotentiels dans l'Algérie

- **OSU91A** : the ohio state 1991 geopotential and sea surface topography harmonic coefficient models .
- **EGM96** : (Earth Geopotential Model - 1996), développé jusqu'au degré et ordre 360. Il englobe les résultats définis à partir de l'analyse des orbites des satellites et les données gravimétriques de l'ancienne Union soviétique, l'Amérique du sud et l'Afrique. Il contient les coefficients harmoniques du potentiel et les erreurs moyennes correspondantes.
- **EGM 2008** : (Earth Geopotential Model 2008) L'anomalie de gravité est la différence entre la gravité mesurée et la gravité normale. La différence est donnée dans l'unité milligal (mGal) égale à 10^{-5} m/s^2 . Carte créée avec Generic Mapping Tools (GMT) à partir du fichier de données EGM2008

I.4.L'évaluation du Modèle de Gravité de Terre EGM2008 en Algérie

I.4.1 Introduction

Les modèles géopotentiels sont utilisés pour calculer les grandes longueurs d'onde des différentes quantités gravimétriques qui dépendent du potentiel de gravité de la Terre telles que les anomalies de pesanteur et l'ondulation du géoïde [Heiskanen and H. Moritz 1967].

Actuellement il existe plusieurs modèles géopotentiels dont les coefficients sont développés à partir d'informations gravimétriques, altimétriques, ainsi que des données dérivées de l'étude des perturbations d'orbite des différents satellites artificiels permettant de quantifier le potentiel gravitationnel terrestre. D'autre part, on trouve d'autres modèles géopotentiels qui sont définis seulement à l'aide des missions spatiales. Par ailleurs, avec l'apparition des modèles géopotentiels issus des missions spatiales :

CHAMP -CHAllenging Mini-satellite Payload (2000-2010) [C. Reigber, R. Bock,], GRACE - Gravity Recovery and Climate Experiment (2002) [GRACE] et GOCE -Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer (2009-2013) [ESA SP-1233,], destinées à l'amélioration du champ de pesanteur, la précision sur les quantités gravimétriques calculées ne cesse de s'améliorer.

I.4.2. Données de gravité

Deux ensembles de données d'anomalies de gravité libres ont été utilisés pour la comparaison comme les données de contrôle :

- Un ensemble de 12472 anomalies de gravité terrestres couvrant le territoire de l'Algérie, a été fourni par le B.G.I. Aucune information concernant l'exactitude des données n'est disponible. L'ensemble de données est renvoyé à la donnée de gravité IGSN71 et a traité l'utilisation de la formule de gravité GRS80. Toutes les données ont été vérifiées et copient des points enlevés dans une manière conséquente. La figure I.4 montre la distribution géographique des données de gravité BGI.

Un pré-traité 5'x 5' grille des anomalies aériennes libres couvrant la région et limité par les limites $16^{\circ} \leq \varphi \leq 40^{\circ}$ et $-10^{\circ} \leq \lambda \leq 14^{\circ}$. Cette grille contenant 289 x 289 points nous a été fournie par GETECH par l'accord entre le Centre national de Laboratoire de Techniques/Géodésie Spatial et d'Université de Leeds/GETECH sans n'importe quelles informations sur l'exactitude des différentes valeurs. La figure I.5 donne une représentation graphique de la couverture de données de gravité dans la région de compte. De cette figure il devient clair que la couverture avec les observations de gravité est non suffisant pour quelques régions de terrain particulièrement au sud des mesures Algériennes et nouvelles sont nécessaires pour accomplir une couverture homogène.

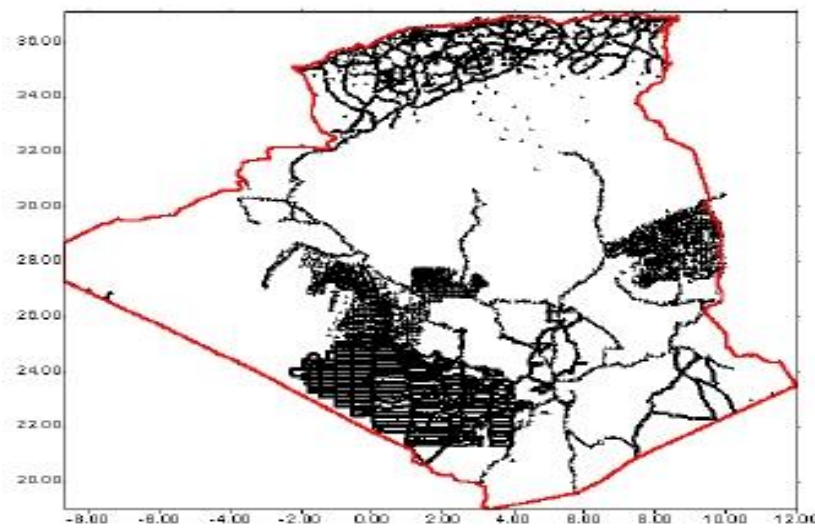


Figure.I.3.Distribution géographique de mesures gravité BGI [Ben Amed dahou2010]

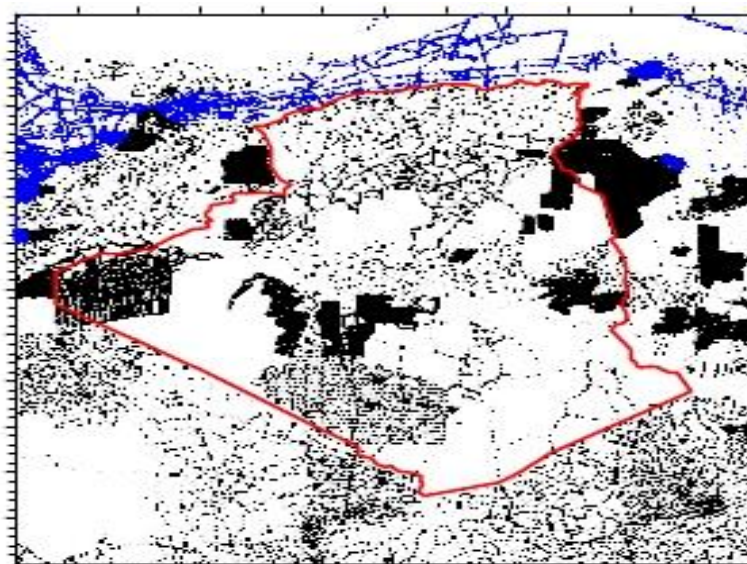


Figure.I.4.Distribution géographique de données de gravité GETECH [Ben Amed dahou2010]

I.4.3 Données de GPS/ nivellement

Il y a plusieurs points de GPS/ nivellement distribués sur quelques régions de l'Algérie, principalement dans la partie du Nord du pays. La distribution est passable mais le nombre total des stations GPS est trop petit par rapport à la région de la partie du Nord de l'Algérie. Pour cette enquête, 71 GPS précis se sont alignés les points ont été utilisés pour l'évaluation et la validation de nouveau gravimétrique géoïde dont 45 sont des points de référence du premier ordre rasant le réseau et les autres appartiennent au deuxième ordre rasant le réseau.

Tous ces points sont trouvés au nord de territoire algérien entre les limites $31^\circ \leq \varphi \leq 37^\circ$ et $-2^\circ \leq \lambda \leq 9^\circ$. La distribution géographique des données GPS/nivellement disponibles est montrée dans le Figure I.6. Les observations GPS ont été exécutées en utilisant ASHTECH Z-12 les récepteurs de fréquence doubles avec une période d'observation entre 3 et 12 heures et ont été traitées avec le Bernese GPS la version 4.2 de logiciel développée à l'Institut Astronomique de l'Université de Berne l'utilisation d'éphémérides précis fourni par IGS [Butler et d'autres. 2001].

On a renvoyé les hauteurs ellipsoïdal calculées au système WGS84 et leurs écart-types n'excèdent pas 3 centimètres Toutes les stations GPS ont été raccordées par le rasant traditionnel au réseau de rasant national, qui donne des hauteurs orthocentrique. L'exactitude des hauteurs s'alignant peut être estimée à environ 6 centimètres selon le type de mesures de connexion parce que quelques points de GPS utilisés dans ce travail comme les points de référence sont trouvés dans les régions montagneuses dans lesquelles l'esprit de s'aligner serait peu réaliste. Malheureusement, la non-disponibilité de GPS que le rasant des données dans tout le pays avec une distribution homogène et une densité suffisante ne permet pas d'évaluation plus sûre, à l'échelle nationale, de la qualité de modèle géopotential global EGM2008.

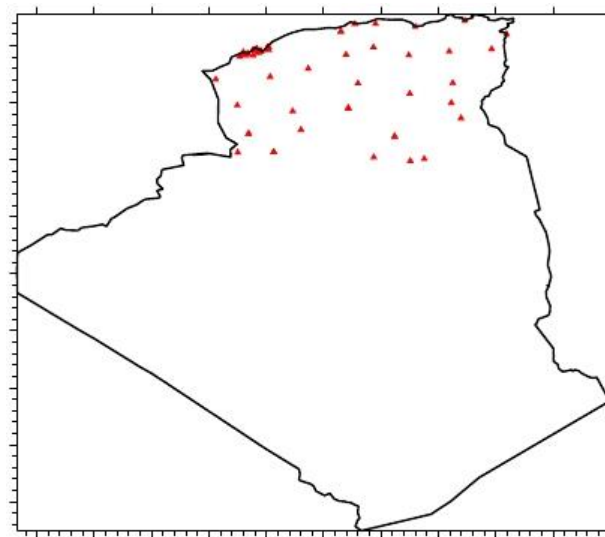


Figure.I.5. La distribution géographique de stations GPS/ nivellement dans le Nord de l'Algérie [BenAmed dahou 2010]

I.4.4. comparaison avec les données GPS/nivellement

Les modèles de géopotential global discutés ci-dessus ont également comparés avec un numéro de série de données GPS/nivelage disponible uniquement dans le nord de l'Algérie. Les comparaisons ont été effectuées avec ou sans filtrage à l'aide de la procédure décrite ci-dessus. À ces points 71, h (hauteur ellipsoïdale) et H (hauteur orthométrique) sont connus. La hauteur GPS/nivellement SPGN est le résultat de la différence entre la hauteur ellipsoïdale

obtenue par GPS et l'orthométrie une obtenu par informations mise à niveau et de la gravité d'esprit. Toutefois, l'ondulation du géoïde dérivée GPS/nivellement se réfère à l'ellipsoïde GRS80 et leurs valeurs correspondantes calculées à partir de GGM font référence à un moyen ellipsoïde de la terre qui n'a pas les mêmes dimensions que l'ellipsoïde WGS84 et par les présentes, il est nécessaire de prendre en compte l'effet du rayon équatorial différent dans le calcul de l'ondulation du géoïde en utilisant l'expansion harmonique sphérique pour chaque modèle. Les statistiques des différences de points de repère avant et après avoir monté le biais systématiques et s'incline à l'aide d'un modèle à quatre paramètres pour les deux cas (sans et avec filtrage) sont résumées dans le tableau.I.3. Dans tous les cas, les statistiques présentées se référer aux valeurs sans raccord, considérant que les statistiques données entre parenthèses se réfèrent aux valeurs des résidus obtenus après le montage du modèle quatre paramètres de transformation suivants [Heiskanen et Moritz, 1967] :

$$N_i^{EGM} - N_i^{GPS} = \cos \varphi_i \cos \lambda_i .x_1 + \cos \varphi_i \sin \lambda_i .x_2 + \sin \varphi_i .x_3 + x_4 + v_i \quad (I.6)$$

où (N_i^{EGM}) est une interpolation de géoïde interpolée à un réseau de repères GPS de modèles géopotentiels, (N_i^{GPS}) est la hauteur de géoïde dérivée GPS / nivellement correspondante, x_4 est le paramètre de décalage entre la donnée verticale impliquée par les données GPS / nivellement et gravimétrique datum, x_1 , x_2 , et x_3 , sont les paramètres de décalage entre deux datums 'parallèles' et désigne un terme de bruit aléatoire résiduel.

Le vecteur des paramètres inconnus est résolu en minimisant la quantité. Les valeurs ajustées pour les résidus v_i donnent une image réaliste du niveau d'accord absolu entre les géoïdes basés sur les modèles géopotentiels testés et les données GPS / nivellement. [Ben Amed dahou 2010]

Geopotential modèles	Minimum	Maximum	Mean	Σ
OSU91A	-3.006 (-1.500)	1.747 (1.400)	0.202 (0.000)	1.194 (0.491)
EGM96	-0.896 (-0.750)	0.779 (0.520)	-0.028 (0.000)	0.340 (0.294)
EGM2008	-0.666 (-0.558)	0.610 (0.517)	-0.077 (0.000)	0.212 (0.196)

Tableau.I.3. Comparaison des trois modèles géopotential existes en Algérie avec GPS/nivèlement hauteurs avant et après la partialité et l'inclinaison, raccord (m). La gamme spectrale. [Ben Amed dahou 2010]

De le tableau I.3, nous pouvons voir que le modèle gravité terrestre (EGM2008) s'ajoute mieux que les autres modèles aux hauteurs GPS / nivellement.

Les ondulations de géoïdes calculées à partir de ce modèle ont été significativement améliorées par rapport à d'autres modèles testés.

I.5.Conclusion

Le modèle communément admis comme référence, largement utilisé dans le cadre des applications nécessitant Ce type de données, est l'EGM2008 (Earth Gravitational Model), délivré à la communauté scientifique par l'équipe de développement de l'EGM de la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Il remplace le modèle EGM96 et son exactitude globale est estimée par la NGA à environ 15 cm. L'EGM2008 est complet jusqu'à l'ordre et degré 2159 du développement en harmoniques sphériques et comprend des coefficients supplémentaires allant jusqu'à l'ordre et degré 2190 et l'ordre. [\[N.K. Pavlis 2008\]](#)

Chapitre II

Nivellement

II.1. Introduction

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 1er ordre complémentaire du littoral.

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 : [\[INCT, 2007\]](#).

Année	Mission	Nombre de Kilomètres
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 -Khenchela	1663
1987	Biskra-Tebessa-Batna	1636
1988	M'Sila-Barika	1622
1989	Ghardaia – Ouargla - Touggourt	1188
1990	Beni Abbès - El Goléa - Timimoun	1355
1991	Touggourt - Hadjira	1448
1992	El Bayadh – Naama – Adrar - Taghit	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 Aménas	620
1999	Deb Deb - In Aménas - Hassi Mess.	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 II.1: Missions de Nivellement de précision effectuées depuis 1976. [INCT, 2007].

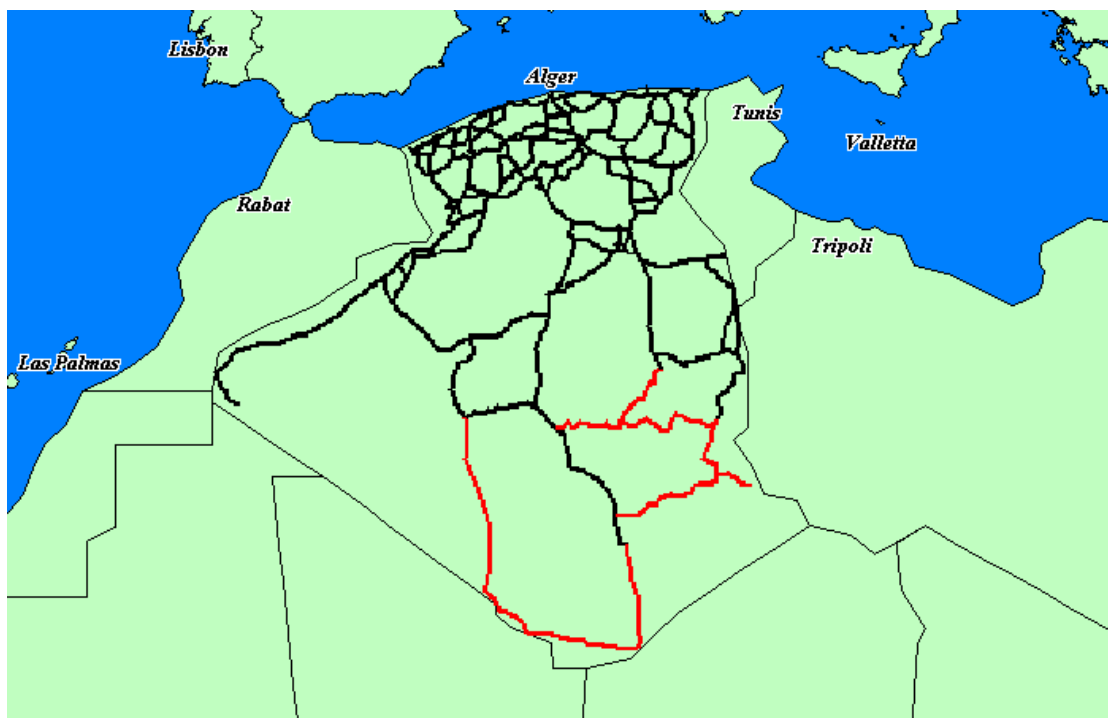


Figure II.1: Réseau de nivellement. En noir : INCT ; en rouge : IGN. [INCT, 2007].

II.2. Réseau points GPS nivelés

En 2003, l'INCT a mis en place un réseau de 35 points GPS nivelés par le procédé de nivellement de précision.

La durée des observations GPS effectuées varie entre 2h 30mn et 6h. Le traitement des données GPS a été effectué par le Logiciel Ashtech/Solution en utilisant les éphémérides radiodiffusées «broadcast». La précision de positionnement de ces points est de l'ordre centimétrique. [INCT, 2007].

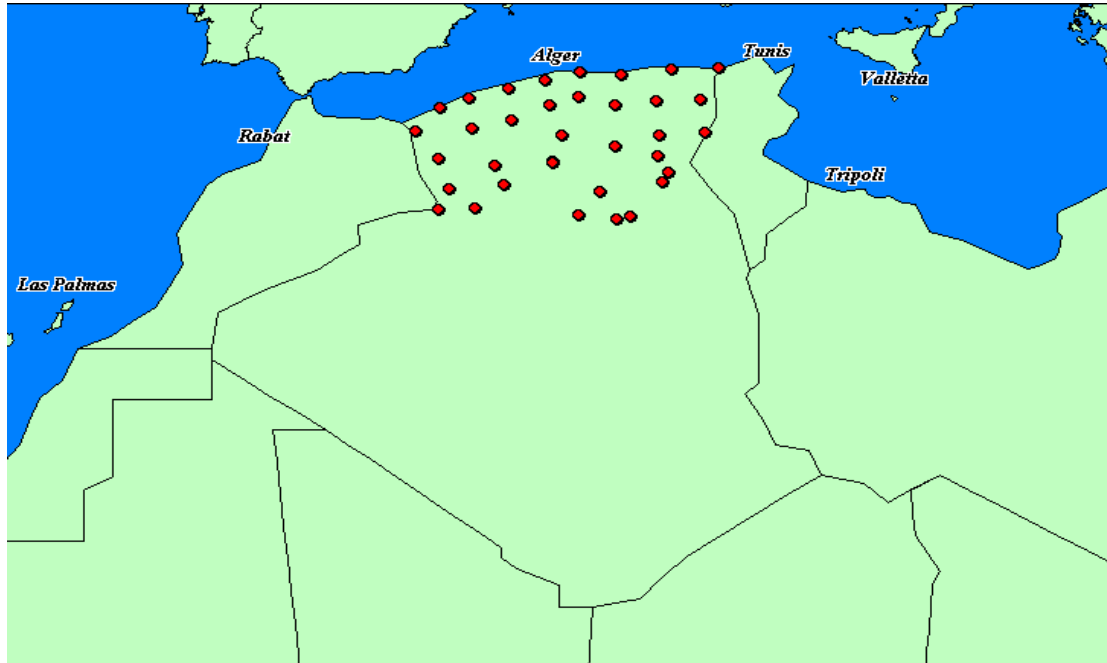


Figure II.2: Répartition géographique des 35 points GPS nivelés. [INCT, 2007].

II.3. Réseau de gravimétrie

Le Réseau Algérien de Gravimétrie est un ensemble de points matérialisés sur terrain et déterminés en gravité «g». Une hiérarchie de couverture du territoire associée aux possibilités de calcul amène une succession de niveaux : réseau d'ordre fondamental et réseau deuxième ordre.

II.3.1. Réseau gravimétrique fondamental en 2001

Au cours de l'année 2001, l'INCT a mis en place un réseau gravimétrique absolu bien réparti sur le territoire national. Ainsi, douze points ont été observés avec le gravimètre FG5-111 de la National Science Fondation des Etats Unies.

Toutes les observations ont été traitées avec le software fourni par la compagnie Micro-g solution Inc. en suivant à la lettre les conventions internationales en usage dans le domaine. La précision moyenne de ce réseau est de 1.5 microgal.

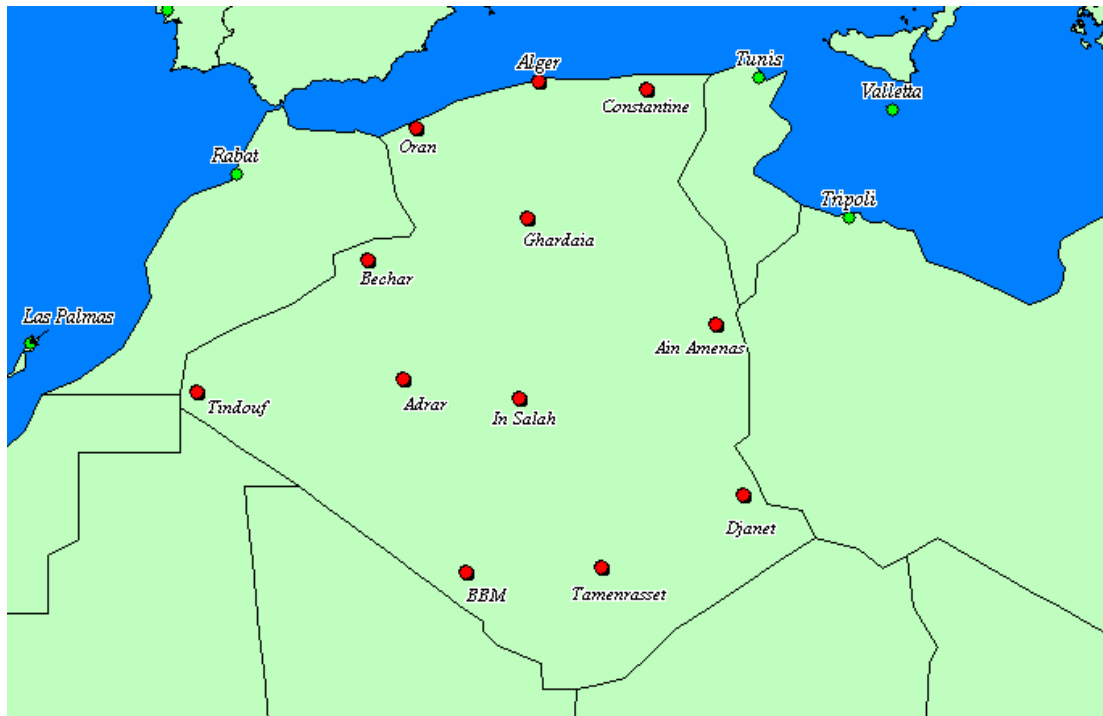


Figure II.3: Répartition des douze points de gravimétrie absolue. [INCT, 2007].

II.3.2. Réseau gravimétrique 2^{ème} Ordre

Dans le cadre de ses activités, l'INCT observe et entretient un réseau de gravimétrie 2^{ème} Ordre par des mesures de gravité relatives effectuées à l'aide des gravimètres La coste & Romberg. Actuellement, ce réseau comporte 908 points matérialisés, distants de 30 Km environ et nivelés par le procédé de nivellement de précision. La précision de ce réseau est de 0.02 mGal. [INCT, 2007].

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

Année	Mission	Nombre de Points
1990-91-92	Oran – Mostaghanem - Chlef	83
1993	Tiaret	56
1994	Tebessa	31
1995	Constantine	52
1996	Batna	37
1997	Bousaada	47
1998	Djelfa - Medea	39
1999	Biskra - El Oued	24

2000	Biskra - El Oued	45
2001	Laghouat	46
2002	El Bayadh	39
2003	El Bayadh - Naama	72
2004	Bechar – Tindouf - Adrar	140
2005	Ouargla - Illizi	133
2006	Skikda – Mila – Setif -Bejaia	64

Tableau II.2: Missions de gravimétrie effectuées. [INCT, 2007].

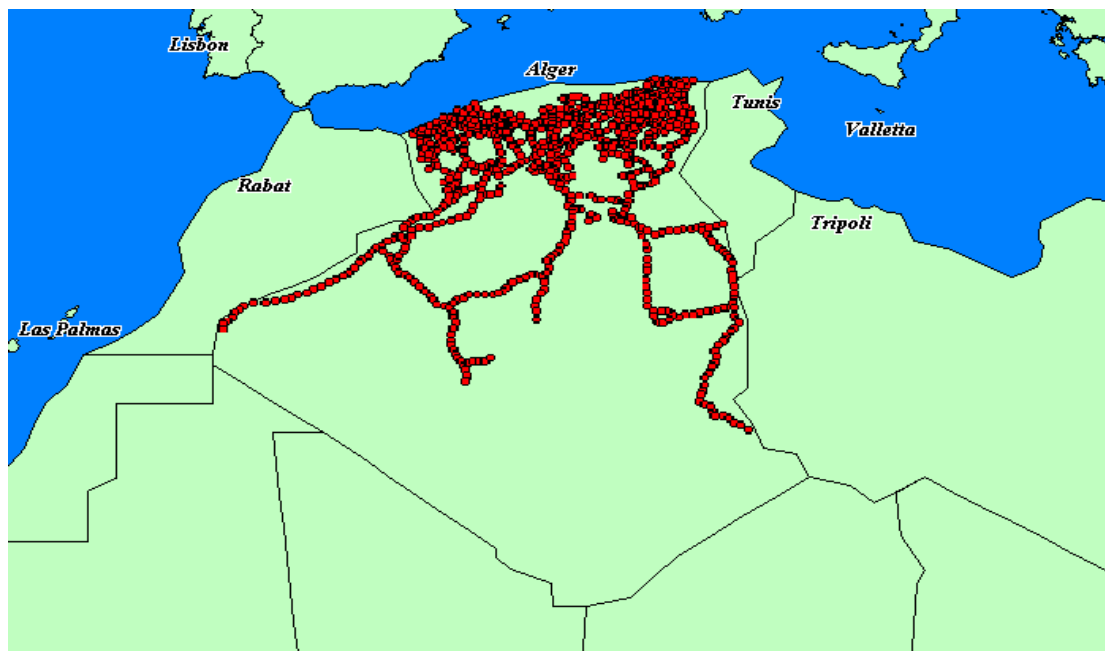


Figure II.4: Réseau gravimétrique INCT 2ème Ordre. [INCT, 2007].

II.4. Système cartographique en Algérie

II.4.1. Système géodésique Nord Sahara 1959

En 1959, l'IGN était en possession d'un réseau de 1er 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".

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

$$M_c = M_e - 4 \text{ dmgr} \quad (\text{II.1})$$

$$L_c = L_e - 48.4 \text{ dmgr} \quad (\text{II.2})$$

ou : M_c et L_c représentent la longitude et la latitude isométrique correspondants au système Nord Sahara sur l'ellipsoïde Nord-Sahara, et M_e et L_e représentent la longitude et la latitude isométrique dans le système Europe 50 basé sur l'ellipsoïde international de Hayford.

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

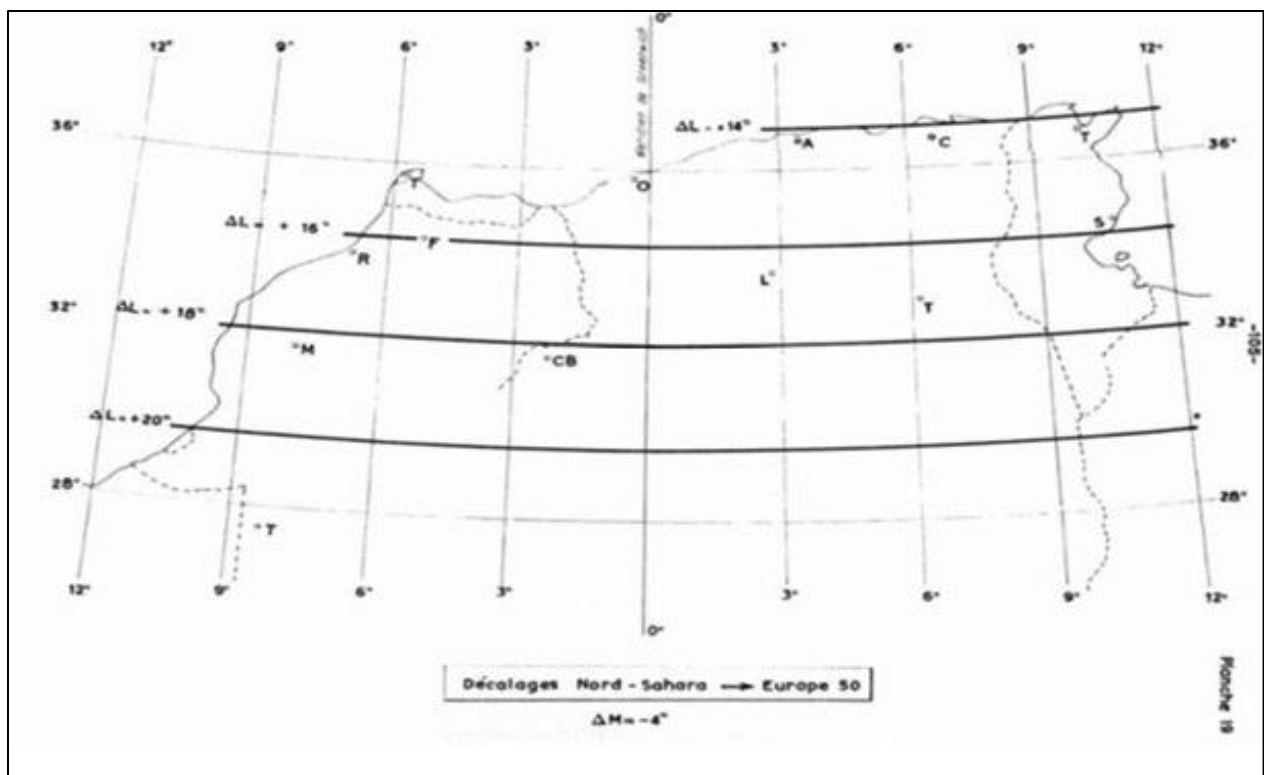


Figure II.5: Décalages entre les latitudes du système Europe 50 et les latitudes correspondantes du système Nord-Sahara. [INCT, 2007].

Les décalages des systèmes Merchich (Marroc) et Cartage (Tunisie) par rapport au système Nord-Sahara sont illustrés dans la figure suivante :

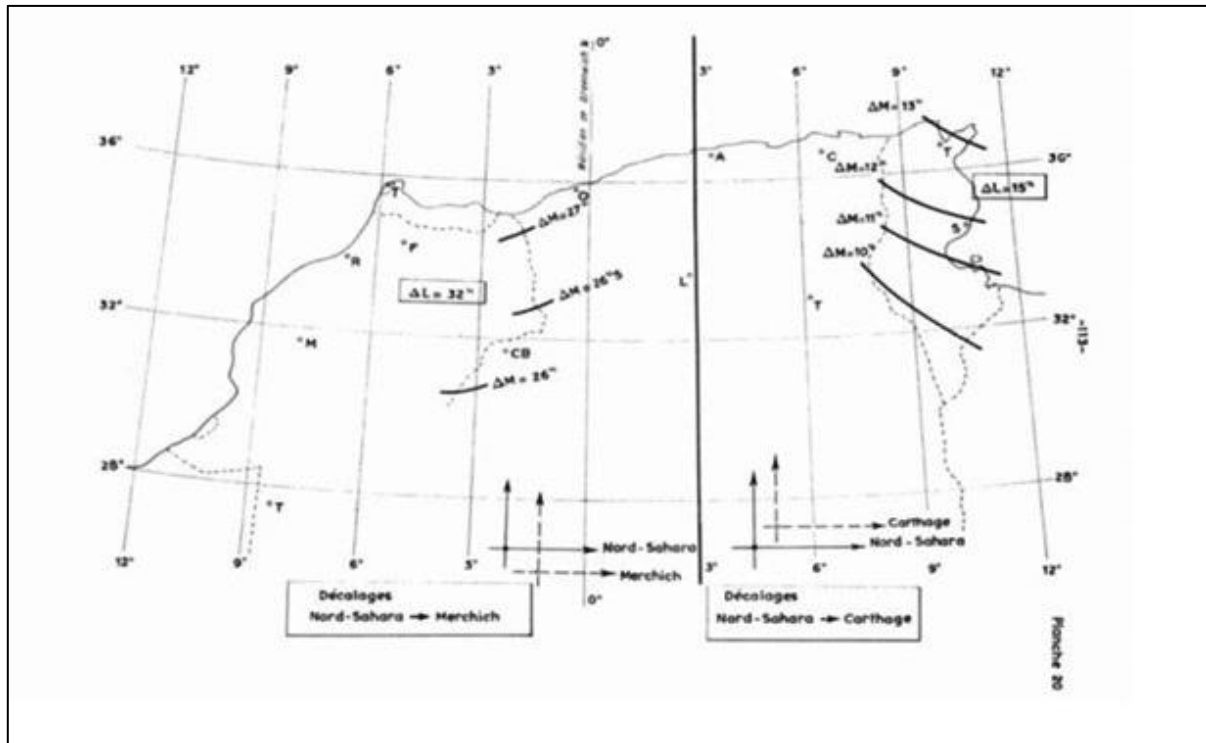


Figure II.6 : Décalages des systèmes Merchich (Marroc) et Cartage (Tunisie) par rapport au système Nord-Sahara. [INCT, 2007].

II.4.2. Transformation entre le WGS 84 et le Nord-Sahara

La transformation des coordonnées issues du positionnement par GPS et donc exprimés dans le système WGS 84 au système local 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. Le modèle de transformation tridimensionnel utilisé est celui dit modèle d'Helmert ou de Bursa Wolf à sept paramètres.

Sur un ensemble de 79 points géodésiques doubles connus dans les deux systèmes, 45 points ont servi à cette détermination, et dont la répartition géographique est illustrée dans la figure (II.7) suivante :

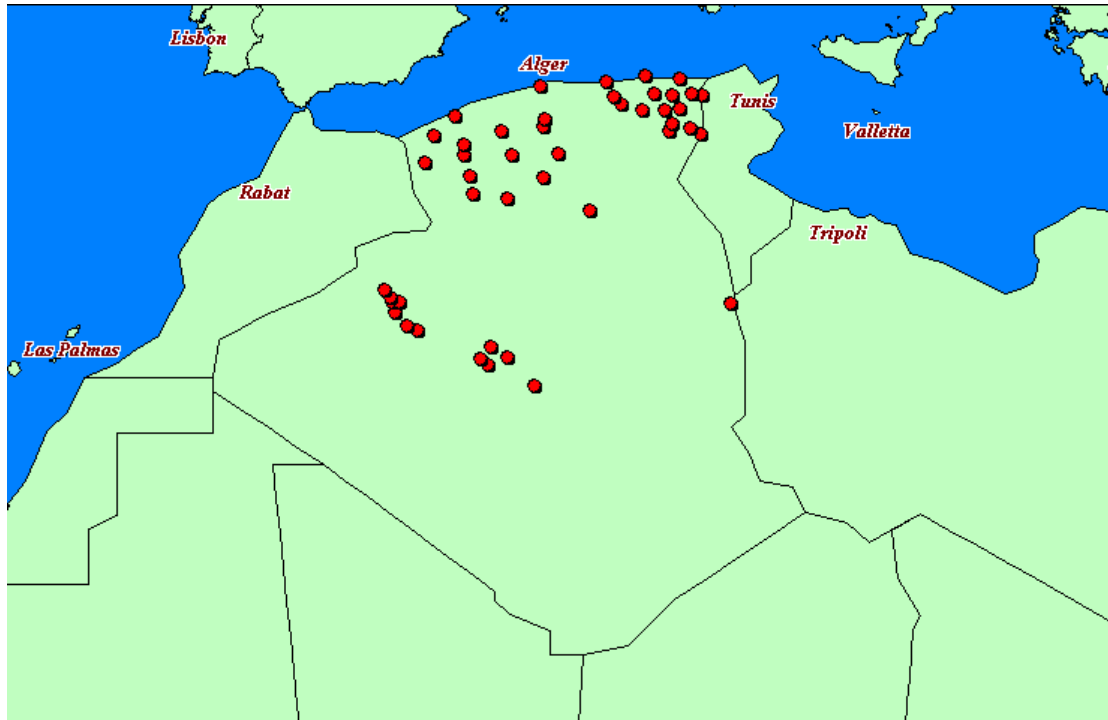


Figure II.7: Répartition géographique des points ayant servi au calcul des paramètres de passage. [INCT, 2007].

Ainsi, les paramètres de passage du WGS 84 au Nord Sahara obtenus sont :

Translation en X [m]	209.362198
Translation en Y [m]	87.816200
Translation en Z [m]	-404.619830
Rotation en X [sec]	-0.00461215
Rotation en Y [sec]	-3.47842207
Rotation en Z [sec]	-0.58048472
Correction sur le facteur d'échelle [ppm]	1.4547220

Tableau II.3: Paramètres de passage du WGS 84 au Nord Sahara. [INCT, 2007].

L'écart type de cette détermination étant de 0.9288 m est jugé acceptable pour les travaux de cartographie.

II.4.3. Représentations cartographiques planes

II.4.3.1. La projection Lambert

Durant la période coloniale, l'Algérie a utilisé la projection Lambert qui se caractérise par les points suivants :

a- Caractéristiques de la projection Lambert :

C'est une projection conique conforme tangente de Lambert. Dans le but de minimiser les déformations (altérations linéaires), l'Algérie a été découpée en deux zones :

- Une projection appelée "Lambert Nord" qui couvre le nord de l'Algérie
- Une projection appelée "Lambert Sud" qui couvre le sud de l'Algérie.

b- Les constantes de la projection Lambert :

Les valeurs suivantes permettent le calcul des coordonnées en projection Lambert sur l'ellipsoïde de Clarke 1880.

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 de la projection	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 (valeur calculée)	0,999 625 769 000 (valeur calculée)

Tableau II.4: Constantes de la projection Lambert Nord et Lambert Sud. [INCT, 2007].

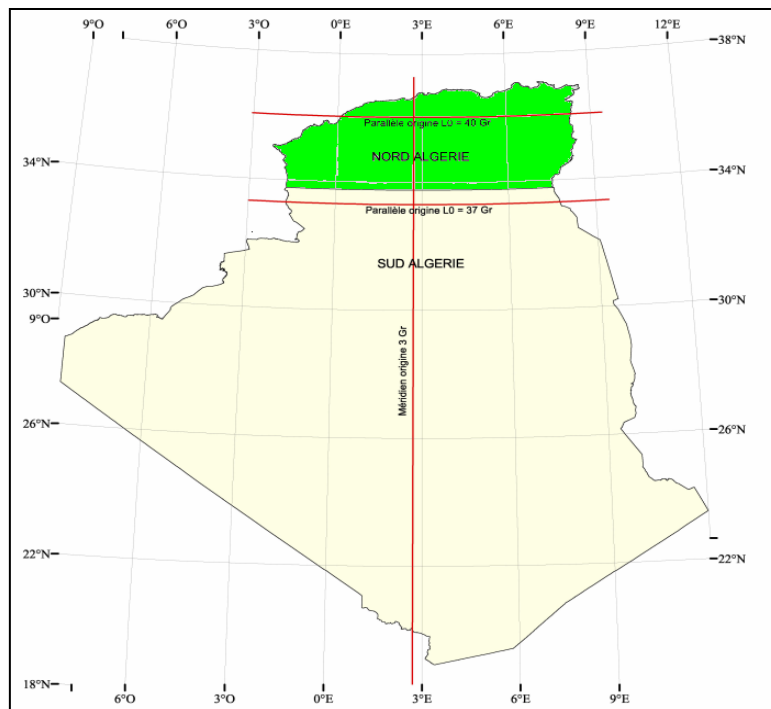


Figure II.8: Projection Lambert en Algérie. [INCT, 2007].

II.4.3.2. La représentation cartographique UTM

La représentation cartographique plane en vigueur adopté par l'Algérie en 2003 est l'UTM (Universel Transverse Mercator). L'Algérie s'étale de l'Ouest à l'Est sur quatre fuseaux : le 29, 30, 31 et 32 soit de 9° à l'Ouest du méridien d'origine et à 12° à l'Est du méridien d'origine.

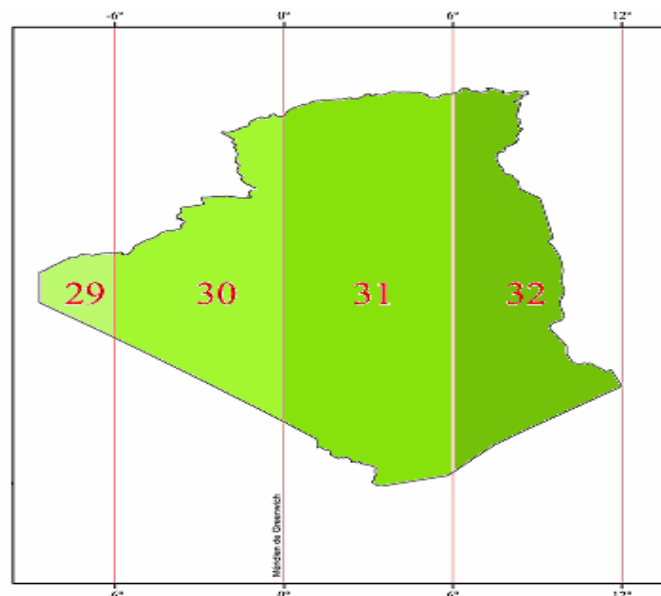


Figure II.9: Fuseaux de la projection UTM en Algérie. [INCT, 2007].

Les constantes de la projection UTM sont	UTM Nord fuseau n
Constantes	
Latitude origine	0°
Longitude origine ou méridien central de la Projection	6(Nf-31) +3 ° /Greenwich Nf: numéro de fuseau.
Eo	500 000 m
No	0 m
Facteur d'échelle	0.9996 m

Tableau.II.5.: Constantes de la projection UTM [INCT, 2007].

II.5. Projets de géodésie en cours à l'INCT

II.5.1. Détermination du Géoïde National

Le domaine choisi pour la détermination du géoïde gravimétrique s'étend de -9° à 12° en longitude, 19° à 37° en latitude. La démarche de calcul repose sur la technique de Retrait-Restauration et la technique de terrain résiduel.

Les données gravimétriques utilisées sont ceux fournies par le BGI (10244 points avec une précision de 5 mgal) et ceux de l'INCT (581 avec une précision de 0.02 mgal).

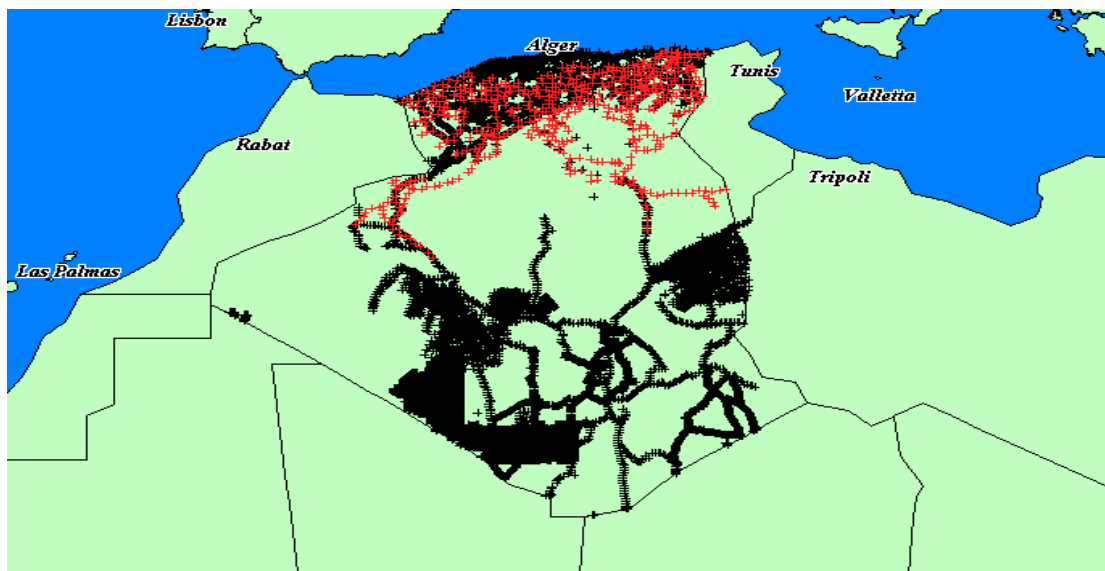


Figure II.10: Répartition géographiques des données gravimétriques. Données BGI en noir, Données INCT en rouge. [INCT, 2007].

Le modèle géopotentiel utilisé est l'EGM96 (Earth Geopotential Model - 1996) développé jusqu'au degré et ordre 360. Il est généralement admis comme potentiel de référence pour ce genre d'application.

Le calcul des effets de la topographie nécessite l'existence d'un Modèle Numérique de Terrain de haute résolution. A cette fin et par manque d'un MNT précis sur l'Algérie, un modèle de résolution 30''x 30'' a été généré à partir de 442 coupures du relevé topographique mondial SRTM d'une précision absolue (théorique) de 16 m, mis à disposition par la NASA.

Les programmes utilisés lors des calculs sont essentiellement de l'ensemble Gravsoft et de la collection de programmes réalisés au LAREG - Institut Géographique National, France.

L'adaptation du géoïde obtenu s'est effectuée par rapport à 35 points GPS nivelés répartis sur la partie nord du territoire national.

La solution du géoïde obtenue présente après adaptation des écarts compris entre -1.100 m et 1.082 m, avec un écart type de 0.553 m.

II.5.2. Détermination d'un nouveau référentiel altimétrique national

Conscient de l'intérêt de doter la côte algérienne de sites marégraphiques et dans le cadre de ses activités, l'Institut National de Cartographie et de Télédétection a inscrit un projet visant l'installation de nouveaux marégraphes à acquisition automatique le long de la côte, en vue de la détermination d'un nouveau référentiel altimétrique national en remplacement de la référence actuellement utilisée (se trouvant en Tunisie). [INCT, 2007].

Au port d'Alger, le marégraphe à acquisition automatique (électronique) installé en mai 2003 n'a commencé à produire des données exploitables qu'après son réinstallation (fixation du puit marégraphique) en mai 2004, soit une année après.

Le marégraphe à acquisition automatique installé près du marégraphe à enregistrement analogique au niveau du port d'Alger est un prototype conçu par le Dr. Michel Van Ruymbeke de l'Observatoire Royal de Belgique (ORB). Ce prototype enregistre toutes les minutes le niveau de la mer sous forme de fréquence engendrée par le capteur.

Les différents composants de cet appareil prototype de mesure sont un capteur capacitif à base d'une capsule anéroïde; un module d'enregistrement électronique (nDAS), une alimentation électrique et un flotteur.

Un autre marégraphe électronique a été installé en mars 2005 à Jijel situé à 350 km à l'Est d'Alger. Comme ce fut le cas à Alger, l'équipement est couplé avec un marégraphe analogique afin de pouvoir confronter les observations produites par les deux sources.

Le niveau moyen préliminaire de la mer au port d'Alger, déterminé à partir de la série du marégraphe électronique de la période mars 2004 – février 2006 a fait ressortir un décalage de 4.1 cm par rapport à la référence du Zéro Hydrographique actuelle. [INCT, 2007].

II.5.3. Réseau GPS permanent

Vu l'intérêt d'équiper le territoire national par un réseau GPS permanent, l'INCT a planifié l'installation d'un réseau de neuf stations.

Les principaux objectifs visés à travers ce projet sont :

- la détermination des sites GPS permanent dans le système AFREF.
- la définition d'un nouveau système géodésique national,
- la définition d'un réseau d'appui de très grande précision aux travaux GPS des différentes institutions nationales.
- l'étude géodynamique de l'Algérie du Nord.
- le développement des applications scientifiques qu'offrent les techniques de positionnement spatiales, telles que mesure de la quantité de vapeur atmosphérique et prévision météorologique, positionnement cinématique différentiel de véhicules et navires, mesures géodésiques régionales (routes, chantiers, cadastres, ouvrages d'art), surveillance de l'ionosphère, etc..

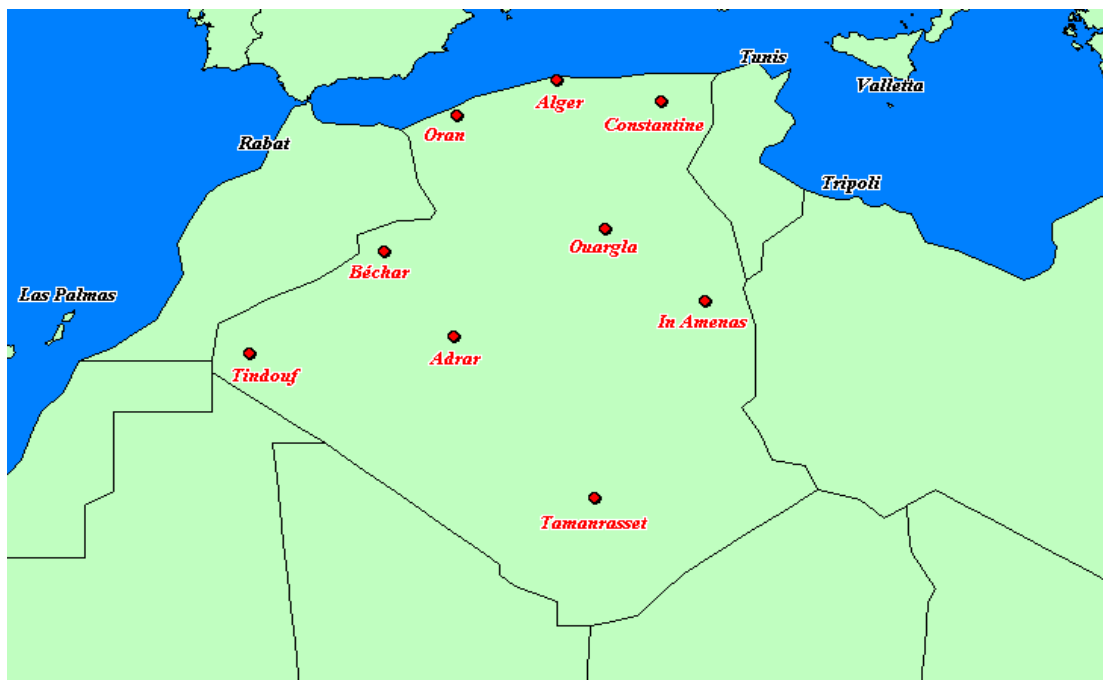


Figure II.11: Configuration du projet réseau GPS permanent. [INCT, 2007].

Dans ce contexte, entre novembre 2006 et janvier 2007, l'INCT a installé les trois stations GPS permanent d'Alger, d'Oran et de Constantine. L'équipement GPS utilisée comporte un récepteur de type (Ashtech UZ-12) et une antenne de type (Chokering).

Le logiciel de gestion du récepteur utilisé est (Ashtech Micro Manager).

Ces trois stations produisent des sessions d'observations journalières de 24 heures avec une cadence de 30 secondes. Les fichiers d'observations sont régulièrement téléchargés et transformés au format d'échange standard RINEX .

Une première détermination des coordonnées de la station d'Alger sur la base du traitement du fichier d'observations GPS du 5 octobre 2006 a été effectué et ce en utilisant le logiciel scientifique Bernese version 5.0 en mode interactif et automatique (utilisation du module Bernese Processing Engine). Les stations IGS (Service International GNSS) utilisées comme stations de référence lors du traitement sont : Matera (Italie), Villa franca (Espagne), Graz (Autriche), Maspalomas (Espagne). [INCT, 2007].

II.6. Perspectives

En plus des objectifs visés à travers les projets suscités, notamment en ce qui concerne la détermination du nouveau référentiel altimétrique national, la définition du géoïde national et la définition du nouveau système géodésique national sur la base de la technique GPS permanent, l'INCT prévoit dans un proche avenir une opération d'envergure pour la valorisation de l'infrastructure géodésique nationale.

En effet, l'INCT envisage :

- La compensation de toutes les données issues de la géodésie classique en un seul bloc, tout en renforçant les points de liaisons entre les deux chaînes Nord et Sud afin de minimiser les distorsions entre ces deux dernières chaînes.
- Retraiter des données des différentes campagnes GPS par l'utilisation du logiciel de recherche Bernese 5.0 en utilisant les éphémérides précises et les autres fichiers de corrections des biais atmosphériques, d'horloges et de marées océaniques.
- La décompensation des données de nivellement de précision et l'analyse des boucles non fermées éventuelles.

II.7. Méthode des Moindres Carrés

II.7.1. Définition

C'est une méthode statistique qui permet d'estimer au mieux toute grandeur mesurée et entachée d'erreurs. En géodésie, elle est souvent utilisée pour l'obtention d'un réseau aussi proche que possible du réseau réel. [B. Si Tayeb (1995)]

Elle est basée sur l'hypothèse mathématique du minimum de l'erreur moyenne quadratique des résidus ($\sum v_i^2 = \min$ ou $\sum p_i v_i^2 = \min$; avec v_i le i ème résidu et p_i le poids de la i ème observation),

Dans le deuxième cas on parle des moindres carrés pondérée. La méthode des MC est applicable si et seulement si:

- La redondance est suffisante.
- Le système des relations d'observations soit linéaire.
- Les observations soient convenablement faites.

L'observateur qui connaît la précision des mesures effectuées est alors amené à répondre aux deux questions suivantes :

- A partir de l'ensemble des mesures, quelle valeur faut-il choisir pour la quantité à déterminer ?
- Quelle est la précision adoptée pour le résultat final ?

II.7.2.Problématique de Méthode des Moindres Carrés

Soit un problème défini par un nombre de valeurs x liées par des relations L . Dans la pratique, le nombre d'observations m est toujours supérieur au nombre d'inconnues (paramètres) n . on a $L=f(x)$, soit l_i une mesure quelconque et soit à déterminer les valeurs $(x_1, x_2, \dots x_n)$ qui sont liées à la valeur vraie L_i par la fonction f :

$$L_i = f(x_1, x_2, \dots x_n) \quad (\text{II.3})$$

En mesurant L_i on obtient une valeur l_i , telle que:

$$l_i = L_i + V_i \quad i=1m. \quad (\text{II.4})$$

(Valeur mesurée = Valeur théorique + Ecart)

Les écarts v_i , appelés aussi résidus, entre les éléments compensés et les éléments observés sont traités comme étant des erreurs accidentelles.

II.8. Modélisation

Il s'agit d'un système théorique, sur lequel il est possible de représenter des situations réelles ou des phénomènes existants. En effet, un modèle vise un but précis et sa formulation diffère selon ce but. [B. Si Tayeb (1995)]

L'ajustement par moindres carrés comporte deux parties importantes: le modèle mathématique (fonctionnel) et le modèle stochastique (statistique). Ces deux modèles sont indispensables pour l'ajustement (voir figure II.12).

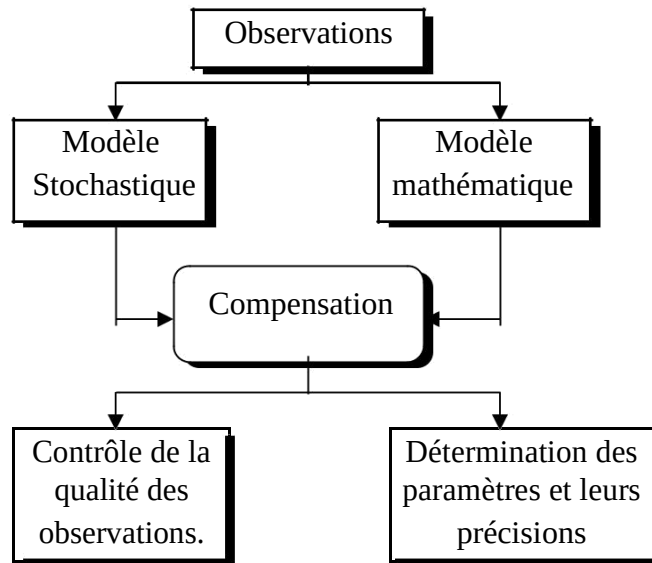


Figure.II.12. Schéma général de la compensation par les moindres carrés.

II.8.1. Modèle mathématique

Dans toute expérience, chaque donnée mesurée décrit la condition géométrique d'où elle est exprimée en termes de relation intrinsèque avec d'autres paramètres qui peuvent être ou non mesurés. Cette relation peut être représentée par une fonction mathématique (modèle mathématique) liant les observations et les inconnues de l'ajustement.

II.8.2. Modèle stochastique

Les mesures effectuées sur des grandeurs soumises à des perturbations, sont souvent difficiles à synthétiser et l'information qu'elles contiennent est difficilement utilisable, sans une technique de représentation algébrique de ces données. Cette représentation simple permet d'utiliser l'essentiel de l'information sous une forme compatible avec les opérations de l'analyse statistique.

Dans notre cas, on fait des hypothèses sur les résidus, à savoir:

- Les erreurs de mesures sont centrées et réduites (modèle de GAUSS MARKOV).
- La somme des carrés des résidus est minimale.
- L'erreur moyenne quadratique (EMQ) de l'unité de poids est calculé par

$$\tilde{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m p_i V_i^2}{m-n}} \quad (\text{II.5})$$

II .8.3. Relation d'observation en nivellement

Entre deux points A et B, on fait une observation de dénivelée h_{AB} , on cherche les estimations H_A et H_B des altitudes de A et B.

a) si on n'a pas de valeurs approchées des altitudes, la relation d'observation s'écrit:

$$V = H_{AB} - h_{AB} \quad (\text{II.6})$$

H_{AB} est l'estimation de la dénivelée inconnue.

Avec:
$$H_{AB} = H_B - H_A \quad (\text{II.7})$$

Donc, on a à résoudre:

$$V = H_B - H_A - h_{AB} \quad (\text{II.8})$$

$$\sum V^T P V = \text{minimum}; \quad P = 1/\sigma^2_{AB}. \quad (\text{II.9})$$

b) si on a des valeurs approchées H_0^A et H_0^B des altitudes des points A et B, on écrire:

$$H_A = H_A^0 + d_{ha} \quad (\text{II.10})$$

$$H_B = H_B^0 + d_{HB} \quad (\text{II.11})$$

Par conséquent, l'équation (II.9) devient :

$$V = d_{HB} - d_{HA} + (H_B^0 - H_A^0) - h_{AB} \quad (\text{II.12})$$

II.8.4. Pose des équations de conditions

L'aboutissement à la connaissance aussi précise que possible des positions mutuelles des points géodésiques n'est pas une fin pour la compensation, néanmoins son but est d'avoir un réseau géométriquement plus voisin du réseau observé.

La géométrie du réseau est exprimée par un certain nombre de relations mathématiques écrites entre les estimations des grandeurs mesurées. Ces relations sont dites équations de conditions.

II.8.5.Principe de Traitement

II.8.5.1. Traitement des relations d'observations

La méthode consiste à choisir une matrice P (m,n) symétrique diagonale est définie positive, dite matrice poids et à définir l'estimateur des moindres carrés X comme étant la solution unique du problème d'optimisation, tel que :

On a le système suivant :
$$A.X = L + V \quad (\text{II.13})$$

A : matrice de coefficient

X : vecteur des inconnues

V : vecteur des résidus

L : vecteur d'observation

(La somme des résidus au carré = minimum) $\Leftrightarrow \sum V_i^2 = \min$

Notation matricielle: $\varphi(X) = V^T \cdot V = \min$ (II.14)

donc: $\varphi(X) = (AX-L)^T \cdot (AX-L)$ (II.15)

$$\varphi(X) = (X^T A - L^T) \cdot (AX-L) = X^T A^T AX - L^T AX + L^T L + X^T A^T L \quad (II.16)$$

$$\varphi(X) = X^T A^T AX - 2 \cdot X^T A^T L + L^T L \quad (II.17)$$

On a:

$$d\varphi(X) = 0 \quad (II.18)$$

$$d\varphi(X) = 2 \cdot A^T AX - 2 \cdot A^T L = 0 \quad (II.19)$$

$$\Leftrightarrow A^T AX - A^T L = 0 \quad (II.20)$$

$$\Rightarrow X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (II.21)$$

Les indices T et -1 désignent, la transposée et l'inverse d'une matrice, respectivement.

L'introduction de la matrice diagonale du poids P dans l'équation (II.13), on trouve:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (II.22)$$

d'où les résidus sont obtenus par:

$$V = A \cdot X - L \quad (II.23)$$

$$V = A (A^T P A)^{-1} A^T P L - L \quad (II.24)$$

On multiplie les deux parties de l'équation par $A^T P$:

$$A^T P V = (A^T P A) \cdot (A^T P A)^{-1} \cdot (A^T P L) - A^T P L \quad (II.25)$$

$$A^T P V = A^T P L - A^T P L = 0 \quad (II.26)$$

Donc, les résidus vérifient la condition (contrôle de la normalisation):

$$A^T P V = 0 \quad (II.27)$$

II.8.5.2. Traitement des équations de condition

On considère l'ensemble des observations directes qui déterminent le réseau et l'on se propose de calculer des corrections ($V_1, V_2, \dots, V_m$) qui ajoutées aux observations, fournissent un ensemble compensé satisfaisant rigoureusement toutes les conditions métriques ou géométriques imposées au problème. [B. Si Tayeb (1995)]

Les équations de conditions sont de la forme :

$$F = 0 \quad (II.28)$$

Ou, sous forme matricielle:

$$B(r,m) \cdot V(m, 1) + W(r, 1) = 0 \quad (\text{II.29})$$

Avec,

B: matrice des coefficients.

V: vecteur des résidus à déterminer.

W: vecteur des observations.

r, m: respectivement, le nombre des équations de conditions et le nombre des observations.

Pour rendre minimum la somme $\sum v_i^2$, en satisfaisant les r conditions du système (II.16), on attribue à chacune des équations de conditions un terme λ_i de LAGRANGE.

Les conditions de minimum liées à la fonction $\sum v_i^2 - (2\lambda_1 F_1 + 2\lambda_2 F_2 + \dots + \lambda_R F_R)$ et la fonction $\sum v_i^2$ sont les même, car les v_i vérifient les F_i .

On doit avoir:

$$\frac{\partial \sum v_i^2}{\partial v_1} - (2 \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial F_1}{\partial v_1} + \dots + 2 \cdot \lambda_r \cdot \frac{\partial F_r}{\partial v_r}) = 0$$

On aura le système :

$$V = B^T \lambda \quad (\text{II.30})$$

Ce système est appelé système des équations corrélatives. En reportant les valeurs v_i dans les quantités F_i , équation (II.29), on aura le système des équations normales suivant :

$$B \cdot B^T \cdot \lambda + W = 0 \quad (\text{II.31})$$

Le vecteur des termes λ de LAGRANGE est déterminé par:

$$\lambda = -(B \cdot B^T)^{-1} \cdot W \quad (\text{II.32})$$

Ainsi, Les éléments du vecteur résidu V seront calculés par substitution des valeurs λ dans l'équation (II.30).

II.9. Traitement des relations d'observations et des équations de condition

Le système des relations d'observations a la forme suivante:

$$A(m,n) \cdot X(n, 1) - L(m, 1) = V(m, 1) \quad (\text{II.33})$$

A: matrice des coefficients.

X: vecteur des inconnues.

V: vecteur des résidus.

L: vecteur des observations.

n et m: respectivement, nombre d'inconnues et nombre d'observations. Le système des équations de conditions s'écrit :

$$C(r,n) \cdot X(n, 1) + D(r, 1) = 0 \quad (\text{II.34})$$

C: matrice des coefficients.

X: vecteur des inconnues.

D: vecteur des observations.

r: nombre des équations de conditions.

Le traitement consiste à résoudre le système (II.33) des relations d'observations sous les contraintes du système (II.34) des équations de conditions. La méthode choisie pour le traitement est celle de la substitution.

Les systèmes (II.33) et (II.34) s'écrivent respectivement, sous la forme:

$$A_1(m,n-r) \cdot X_1(n-r, 1) + A_2(m,r) \cdot X_2(r, 1) - L(m, 1) = V(m, 1) \quad (\text{II.35})$$

$$C_1(r,n-r) \cdot X_1(n-r, 1) + C_2(r,r) \cdot X_2(r, 1) + D(r, 1) = 0 \quad (\text{II.36})$$

Ou,

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \\ 0 \end{bmatrix}$$

De l'équation (II.36), on tire le vecteur X2 tel que :

$$X_2 = -C_2^{-1} \cdot (C_1 \cdot X_1 + D) \quad (\text{II.37})$$

On remplace l'équation (II.37) dans l'équation (II.35), on aura :

$$A_1 \cdot X_1 - A_2 \cdot C_2^{-1} \cdot (C_1 \cdot X_1 + D) - L = V \quad (\text{II.38})$$

Qui est équivalent au système linéaire suivant :

$$G \cdot X_1 - E = V \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$$G = A_1 - A_2 \cdot C_2^{-1} \cdot C_1 \quad (\text{II.40})$$

$$E = A_2 \cdot C_2^{-1} \cdot D + L \quad (\text{II.41})$$

La normalisation du système (II.39), donne :

$$G^T \cdot A \cdot X_1 - A^T \cdot E = 0 \quad (\text{II.42})$$

Qui a pour solution :

$$X_1 = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot E \quad (\text{II.43})$$

Par substitution de la solution X_1 dans l'équation (II.37), la solution X_2 s'écrit alors:

$$X_2 = -C_2^{-1} \cdot (C_1 \cdot (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot E + D) \quad (\text{II.44})$$

Chapitre III

Ajustement des données par la Méthode de Moindre carrés et tests statistiques

III.1. Introduction

La Statistique de test est une fonction qui résume l'information sur l'échantillon (ou la valeur) qu'on veut tester. On la choisit de façon à pouvoir calculer sa loi sous H_0 .

On peut alors définir une région de rejet dont dépendra la décision d'accepter ou de rejeter H_0 :

On rejette H_0 si la valeur observée de la statistique, calculée à partir des données, appartient à la région de rejet.

Suivant le problème posé, il faut choisir la latéralité du test, qui définit la forme de la région de rejet :

Test bilatéral : On veut savoir si le paramètre étudié est trop grand ou trop petit, sans a priori. La région de rejet est alors de la forme $]-\infty, a] \cup [b, +\infty[$.

Test unilatéral : On veut savoir si le paramètre est trop petit, ou si le paramètre est trop grand, sans se soucier de l'autre cotée. La région de rejet est alors de la forme $]-\infty, a]$ ou $[b, +\infty[$.

* Conditions d'application des tests

Les tests statistiques sont basés sur des lois de distribution théorique (loi normale, loi de Student, loi du X^2)

Ces lois sont strictes et nécessitent la vérification de conditions d'application :

- Indépendance des observations
- Spécifie qu'à chaque test (Z, t, X^2 ...)

III.2. Test du Khi2

Le test du Khi2 (khi deux ou khi carré) fournit une méthode pour déterminer la nature d'une répartition, qui peut être continue ou discrète.

Ce test permet de vérifier si un échantillon d'une variable aléatoire Y donne des observations comparables à celles d'une loi de probabilité P définie *a priori* dont on pense, pour des raisons théoriques ou pratiques, qu'elle devrait être la loi de Y. L'hypothèse nulle (H_0) d'un test du χ^2 d'adéquation (dénommé aussi test du χ^2 de conformité ou test du χ^2 d'ajustement) est donc la suivante : la variable aléatoire Y suit la loi de probabilité P.

En termes de valeur-p, l'hypothèse nulle (l'observation est suffisamment proche de la théorie) est généralement rejetée lorsque $p \leq 0.05$.

III.2.1. Domaine d'application du test

- Données qualitatives
- 2 ou plusieurs échantillons

- Dépendants ou indépendants
- Comparaison d'échantillons
- Recherche de liaison entre les données
- Recherche de l'influence d'une donnée autre que celle étudiée. [Zarrouk Fayçal-2012]

III.2.2.Principe

À la base d'un test de statistique classique, il y a la formulation d'une hypothèse appelée hypothèse nulle, notée H_0 . Elle suppose que les données considérées proviennent de variables aléatoires suivant une loi de probabilité donnée, et l'on souhaite tester la validité de cette hypothèse.

Ces données ayant été réparties en classes, il faut :

- calculer algébriquement la distance entre les données observées et les données théoriques attendues.
- se donner a priori un risque d'erreur, celle consistant à rejeter l'hypothèse, alors qu'elle est vraie (la valeur 5 % est souvent choisie par défaut ; il s'agit plus souvent d'une coutume que du résultat d'une réflexion).
- déterminer le nombre de degrés de liberté du problème à partir du nombre de classes, et à l'aide d'une table de χ^2 , déduire, en tenant compte du nombre de degrés de liberté, la distance critique qui a une probabilité de dépassement égale à ce risque.

Si la distance calculée entre les données observées et théoriques est supérieure à la distance critique, on conclut que le résultat n'est pas dû seulement aux fluctuations d'échantillonnage, et que l'hypothèse nulle H_0 doit être rejetée. Le risque choisi au départ est celui de donner une réponse fausse lorsque les fluctuations d'échantillonnage sont seules en cause. Le rejet est évidemment une réponse négative dans les tests d'adéquation et d'homogénéité mais il apporte une information positive dans les tests d'indépendance. Pour ceux-ci, il montre le caractère significatif de la différence, ce qui est intéressant en particulier dans les tests de traitement d'une maladie. [Site web 2]

III.2.3 .Test du χ^2 d'homogénéité

Il s'agit ici de se demander si deux listes de nombres de même effectif total N peuvent dériver de la même loi de probabilité.

L'hypothèse nulle (H_0) est la suivante : les deux échantillons proviennent de deux variables aléatoires suivant la même loi.

En termes de valeur-p, l'hypothèse nulle est généralement rejetée lorsque $p \leq 0.05$.

Le terme n'_i relatif à la seconde liste et le χ^2 est donné par.

$$\sum_{i=1}^j \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} \quad (\text{III.1})$$

Cette notation s'inspire de celle utilisée pour le test d'adéquation, elle-même déduite de la notation classique de la loi multinomiale. Ici, comme dans le test d'indépendance, la notion de probabilité n'apparaît plus de manière explicite. De nombreux utilisateurs préfèrent donc adopter la notation qui utilise les symboles O_i pour les valeurs observées et E_i pour les valeurs espérées, ce qui conduit à l'expression .

$$\sum_{i=1}^j \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (\text{III.2})$$

Dans le cas où l'on dispose de plusieurs listes de nombres, chacune d'effectif différent, et qu'on veuille tester si ces listes suivent une même loi de probabilité, on appliquera le test d'indépendance, décrit ci-après. Il s'agit en effet de tester si les diverses modalités Y de la loi de probabilité sont indépendantes des listes X en présence. [\[Site web 2\]](#)

$$V = 7 - 1 = 6 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

V= degré de liberté et 7 les nombres des intervalles

- **σ variance :**

$$\sigma_{\text{a priori}} = 0.2$$

$$\sigma_{\text{a posteriori}} = 0.1379$$

$$\text{Qualité } \sigma = 0.20$$

σ_0 L'écart type E.M.Q du vecteur des résidus observations

$$0.066 \leq \sigma_0 \leq 0.7806$$

Nombre de points à résidus	353
Nombre des intervalles	7
degré de liberté (v)	6
$\sigma_{\text{a priori}}$	0.2
$\sigma_{\text{a posteriori}}$	0.1379
Qualité σ	$0.066 \leq \sigma_0 \leq 0.7806$
Intervalle max	0.7806
Intervalle min	0.066

Tableau III.1 : propriétés des données

III.3. Test de student

Le test de Student, ou test t , est un ensemble de tests d'hypothèse paramétriques où la statistique calculée suit une loi de Student lorsque l'hypothèse nulle est vraie. Un test de Student peut être utilisé notamment pour tester statistiquement l'hypothèse d'égalité de l'espérance de deux variables aléatoires suivant une loi normale et de variance inconnue. Il est aussi très souvent utilisé pour tester la nullité d'un coefficient dans le cadre d'une régression linéaire. Il est utilisé pour déterminer si deux ensembles de données sont significativement différents l'un de l'autre. [\[Site web 3\]](#)

III.3.1. Principe

Le principe du test de Student est le suivant : on veut déterminer si la valeur d'espérance μ d'une population de distribution normale et d'écart type σ non connu est égale à une valeur déterminée μ_0 . Pour ce faire, on tire de cette population un échantillon de taille n dont on calcule la moyenne $\bar{x}$ et l'écart-type empirique s .

Selon l'hypothèse nulle, la distribution d'échantillonnage de cette moyenne se distribue elle aussi normalement avec un écart type $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$.

La variable :

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad (\text{III.4})$$

Suit alors une loi de student à $n-1$ degrés de liberté (car $\bar{x}$ et s sont indépendantes)

Ou

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{III.5})$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{III.6})$$

On peut ensuite utiliser une table des valeurs de la distribution de loi de student pour voir si la valeur de la statistique est supérieure (en valeur absolue pour un test bilatéral) à la quantité à 95% ou 99% et donc rejeter ou non l'hypothèse nulle. Une erreur fréquente est de valider l'hypothèse nulle alors que le test ne permet que de réfuter à raison l'hypothèse avec un niveau de confiance élève (95% ou 99% généralement). [\[Site web 3\]](#)

t valeur de student

$$t = 2.4469$$

l= L'intervalles de tolérance [-5.38 ; 5.43]

Nombre de points	353
Intervalle max	5.43
Intervalle min	-5.38
valeur de student (t)	2.4469
L'intervalle de tolérance (l)	[-5.38 ; 5.43]

Tableau III .2 : propriétés de réseau

III.4. Test de Fisher

Soit un échantillon de n mesure : $y_1, y_2, \dots, y_n$.

La moyenne et l'écart-type de cette série statistique se calcule à l'aide des formules :

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (\text{III.7})$$

et

$$s = \sqrt{\sum \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (\text{III.8})$$

L'écart-type s est donné avec $nu = n - 1$ degré de liberté.

III.4.1. Principe du test

Le test de Fischer permet de comparer deux écarts-types.

Soit deux séries de mesures de taille n_1 et n_2 . Pour chacune d'elle, on calcule l'écart-type.

Le plus grand sera noté s_1 et le plus petit s_2 , on aura donc $s_1 > s_2$. L'écart-type s_1 est connu avec $nu_1 = n_1 - 1$ degré de liberté et l'écart-type s_2 avec $nu_2 = n_2 - 1$ degré de liberté. [[Site web 4](#)]

III.4.2. Les hypothèses du test

H_0 : Les écart – type s observés s_1 et s_2 sont du même ordre de grandeur.

H_1 : L'écart – type s_1 est significativement plus grand que l'écart – type s_2 .

III.4.3. La statistique à calculer.

On calcule :

$$F_{obs} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (\text{III.9})$$

On montre que sous l'hypothèse H_0 , le rapport des deux écarts-types suit une loi de Fisher dont on a dressé la table pour un risque de 5%.

III.4.4. La règle du test

On lit dans la table, qui est donnée pour un risque de 5 %, le nombre $F_{crit}(nu_1, nu_2)$

- Si $F_{obs} < F_{crit}(nu_1, nu_2)$ on accepte H_0
- Si $F_{obs} > F_{crit}(nu_1, nu_2)$ on accepte H_1 au risque inférieur ou égal à 5 %

III.4.5. Fusion de deux écarts-types

Lorsque le test de Fischer permet de conclure que H_0 est vraie, on peut fusionner les deux écarts-types.

L'écart-type fusionné, que l'on note s^* est alors :

$$s^* = \sqrt{\frac{nu_1 \times S_1^2 + nu_2 \times S_2^2}{nu_1 + nu_2}} \quad (\text{III.10})$$

L'écart-type fusionné est alors connu avec $nu = n_1 + n_2 - 2$ degré de liberté. [\[Site web 4\]](#)

III.4.6. Conclusion

Un test statistique permet de porter une conclusion avec un risque d'erreur connu et contrôlé

- Le risqué alpha de première espèce usuel est 0,05
 - Pour contrôler le risque d'erreur de conclure à tort il faut :
- Choisir le bon test.
- Respecter les conditions de validités des tests.
- Peu de tests, définis à l'avance dans un protocole.
 - La puissance d'un test augmente avec :
- Le nombre de sujets.
- Le contrôle des sources de variabilité (diminution de la variance).

III.5 zone d'étude

III.5.1 Position d'étude

La zone d'étude entre de wilaya de Saida et Tiaret

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

Longitude : $0^{\circ} 25' 52,65''$ W $2^{\circ} 23' 15,52''$ W et Latitude : $34^{\circ} 07' 00,32''$ N $35^{\circ} 18' 28,60''$ N

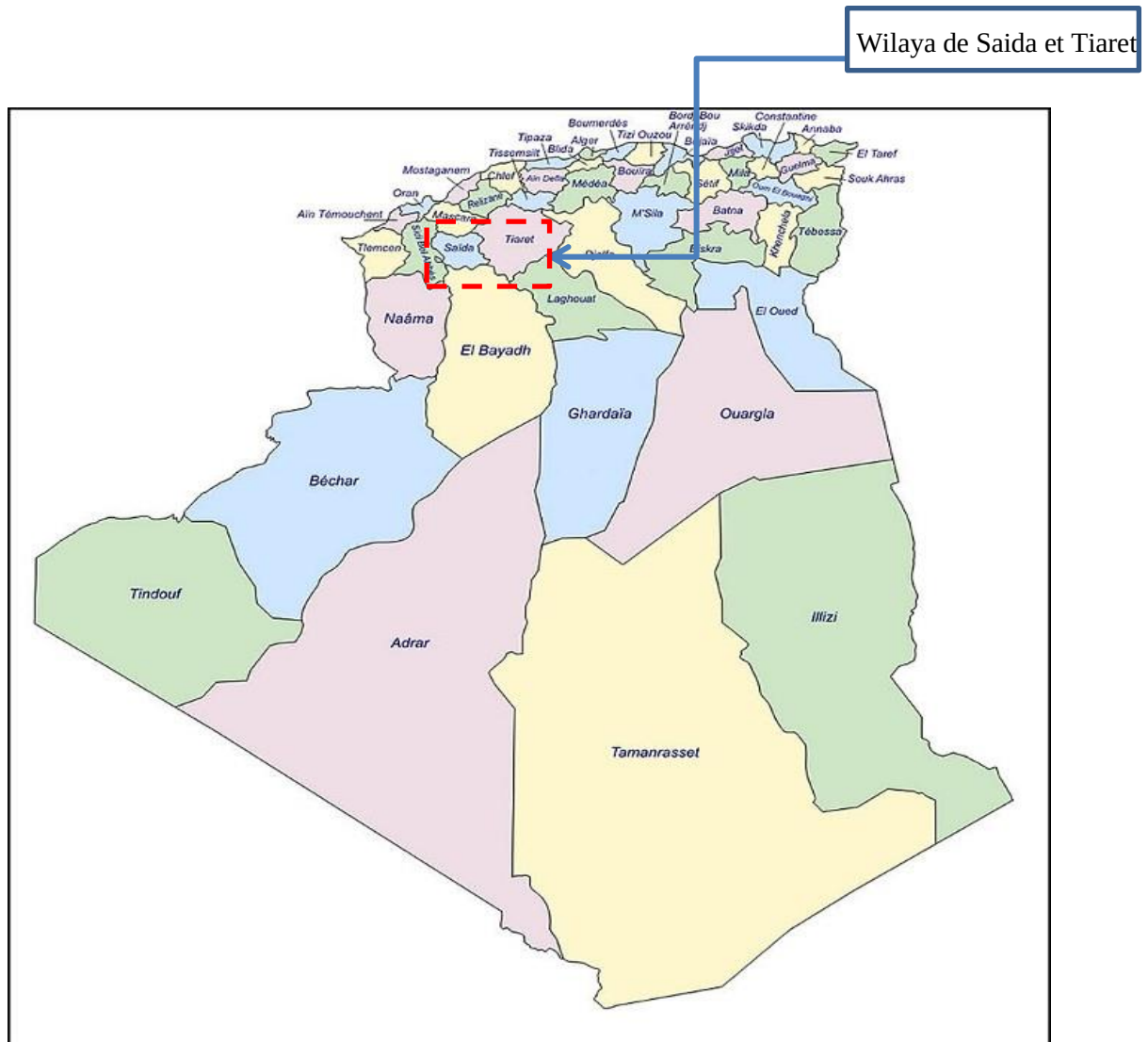


Figure III.1: situation de zone d'étude

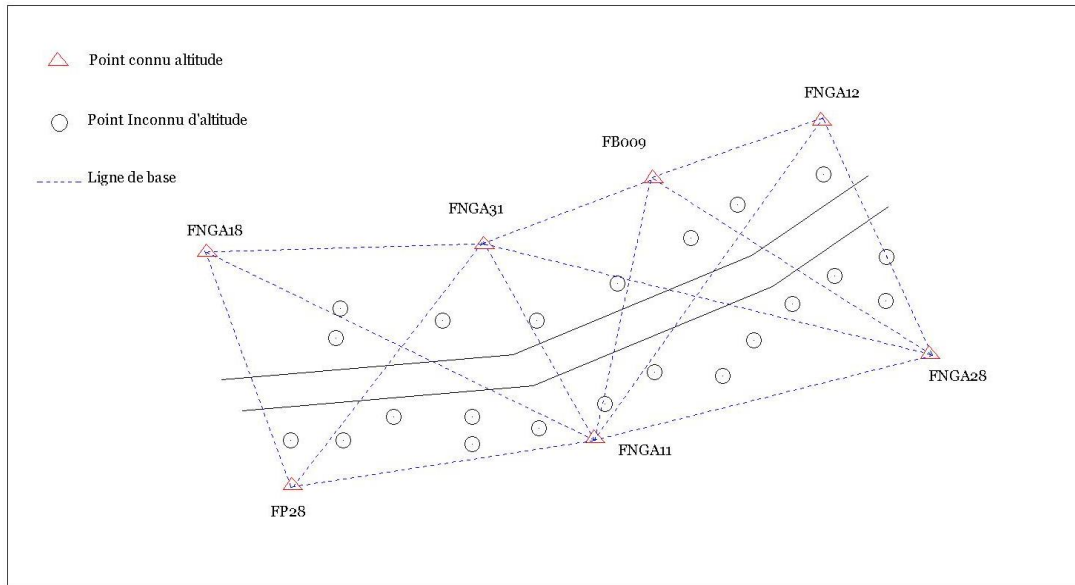


Figure .III.2: schéma de distribution de réseau point d'appui

III.5.2. Les données et les matériaux disponibles dans ce projet

- **Les données :**
- Sept point d'appuie connue altitude (compensait)

Point	Numéro	Nature	Altitude
FNGA 18	347	Enceint	918.4713
FNG31	348	Enceint	832.4980
FB009	349	Enceint	1003.2710
FNGA12	350	Enceint	1108.9249
FNGA11	351	Enceint	970.1494
FNGA28	352	Enceint	1026.4517
FP28	353	Enceint	1001.0900

Tableau III.3 : Tableau représente les points connus mesurés par station GPS

- Les repères de nivellement NGA liées au projet



Figure III.3 : le repère de nivellement FNGA 18 de Saïda



Figure III.4 : le repère de nivellement FNGA 11 de tiffrit

- Les fiches signalétiques des repères de nivellement NGA liées au projet

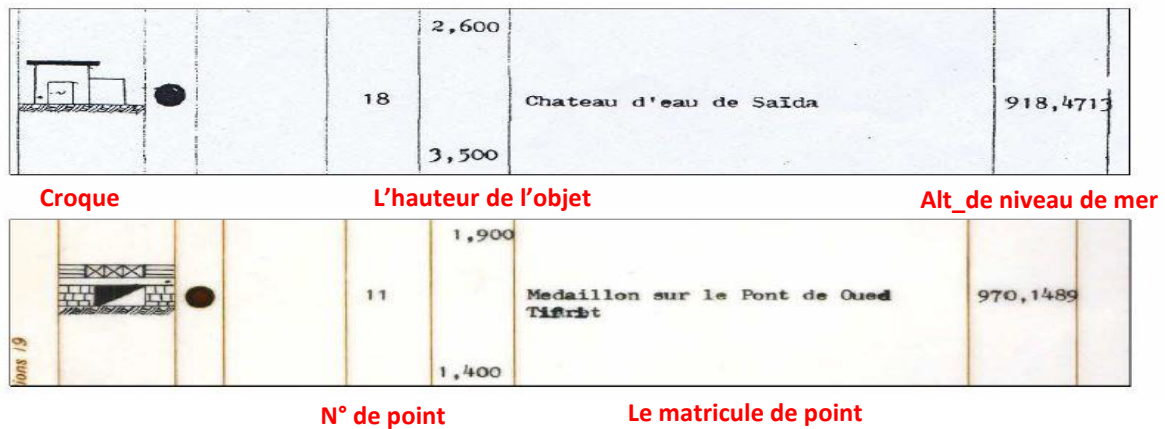


Figure III.5: les fiches signalétiques du repère de nivellement FNGA 18 DE Saïda et le repère FNGA 11 de tiffrit

- 346 points comme de réseau connue altitude (non composait)

Point	Numéro	Nature	Altitude	ALT_MES(m)	Précision (mm)
R3	1	Nouveau	a calculé	949,6087	13188,1228
P150	2	Nouveau	a calculé	989,1944	18931,5626
P150A	3	Nouveau	a calculé	997,0682	20029,4146
D2	4	Nouveau	a calculé	997,3597	19727,4759
D3	5	Nouveau	a calculé	999,5548	21385,3868
D4	6	Nouveau	a calculé	1007,2705	22821,1515
D5	7	Nouveau	a calculé	1015,4080	24128,9342
B1A	8	Nouveau	a calculé	1007,1527	25342,1819
B1	9	Nouveau	a calculé	1007,8484	25507,7024
R16	10	Nouveau	a calculé	952,7440	11188,5639
R18	11	Nouveau	a calculé	983,3962	15887,2058
P151	12	Nouveau	a calculé	1019,0919	18222,8462
P151A	13	Nouveau	a calculé	1034,2080	20519,9505
D11	14	Nouveau	a calculé	1004,0989	24203,6133
R111	15	Nouveau	a calculé	1007,8302	20886,3609
R113	16	Nouveau	a calculé	1015,8634	23485,7500
D13	17	Nouveau	a calculé	1011,2314	25267,3984

Tableau III.4: extrait des points mesurés par nivellement direct (non compensait)

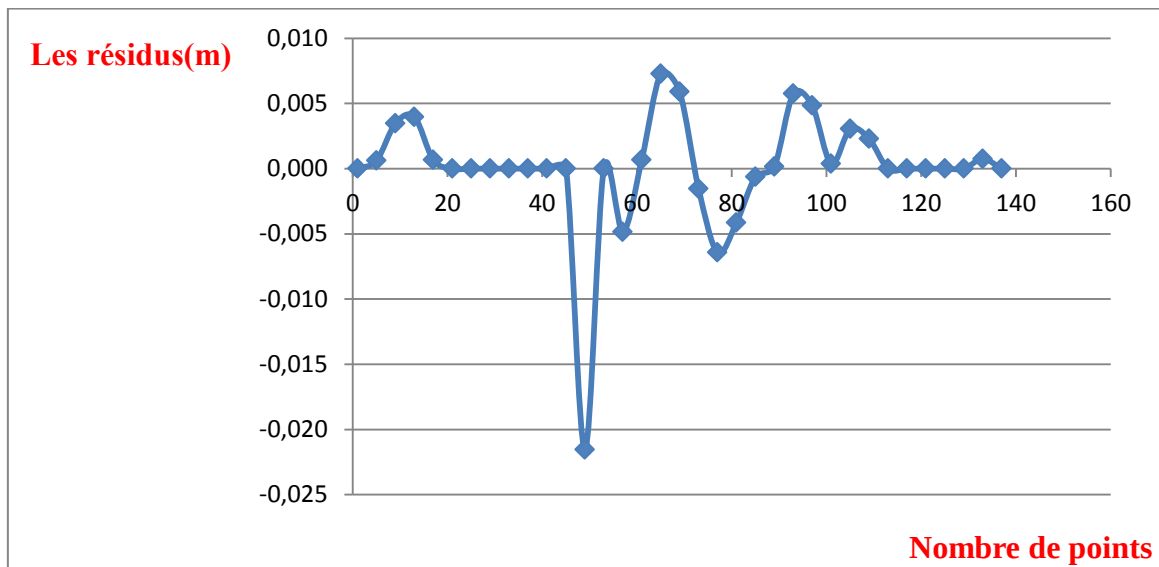


Figure III.6: Valeur des résidus

- Les résidus dans réseaux de nivellement traité par la méthode du moindre carré

• **Les matériaux :**

Il a été utilisé deux niveaux numériques de leica (**sprinter 150**), ces appareils ont la possibilité de lire les informations sur des mires avec code barre et enregistrée directement sur la mémoire interne les données de lecture :

- Nom du point observe
- Distance entre le niveau et la mire
- Dénivèlè entre le niveau et la mire



FigureIII.7: niveaux numériques de leica (**sprinter 150**)

III.5.3.Méthode de levée

Les mesures de nivellement ont été faites avec la méthode de l'aller et router (chaque dénivèlè entre deux repères a été lu deux fois en maniéré indépendant et en horaires différent.

Pour améliorer la qualité des mesures et pour pas avoir des difficultés avec les propriétaires des terrains (l'expropriation n'a pas encore avec l'ingénieur du projet, il a été choisi d'éviter le passage dans certaines endroits (champs cultivées, terrain travaillées propriétés clôturées etc.)

III.5.4.Calcul de réseau altimétrique

Les opérations de calcul ont été effectuées sur deux phases, en un unique tronçon.

Le premier logiciel utilisé a calculée avec la méthode des moindres carres toutes les mesures du nivellement direct : en fixant un point du projet Saïda –moulay- silssen **FB009**

Cinq repères NGA et un point du projet relizane-tiaret.

Le résultat du calcul en bloc est trées bon : sur un développement global de 293 kilomètres, le sima /zéro est de 11 ,7mm.

En ce cas, les donnes du nivellement direct on été utilisée pour faire une double adaptation du model géodique **EGM 2008** un certain numéro des points connu avec la double altitude (ellipsoidique et géodique) a permis de contrôler la validité du calcul.

III.6.Résultat

Des altitudes ci-joint, mettent en évidence lest très bon résultats obtenu avec les deux logiciels au moindres carrées. L'erreur moyenne quadratique, globale est de 6mm.

- Moyenne des résidus $\text{res}_2 = 1\text{mm}$
- E.Q.M des résidus $\text{res}_2 = 6\text{mm}$

ID_Point	Latitude	Longitude	he	ALT_mes (m)	Ondulation (m)	COE1	COE2	COE3	COE4	ORTH (m)	RES (m)	A*X	ORTH1 (m)	RES1 (m)	Kriging (m)	ORTH2 (m)	RES2 (m)
D1			1042,414		49,118	1,000	0,821	0,002	0,571	993,296		0,501	993,797		0,000	993,797	0,000
D2			1045,974	997,360	49,113	1,000	0,821	0,002	0,571	996,861	0,499	0,499	997,360	-0,001	-0,001	997,361	0,001
D3			1048,171	999,555	49,11	1,000	0,821	0,002	0,571	999,061	0,494	0,497	999,558	-0,003	-0,003	999,562	0,003
D4			1055,886	1007,271	49,107	1,000	0,821	0,002	0,571	1006,779	0,492	0,495	1007,274	-0,004	-0,004	1007,278	0,004
D5			1064,023	1015,408	49,107	1,000	0,821	0,002	0,571	1014,916	0,492	0,493	1015,409	-0,001	-0,001	1015,409	0,001
D6			1045,708		49,097	1,000	0,821	0,002	0,571	996,611		0,493	997,104		0,000	997,104	0,000
D7			1049,503		49,094	1,000	0,821	0,002	0,571	1000,409		0,491	1000,900		0,000	1000,900	0,000
D8			1055,497		49,09	1,000	0,821	0,003	0,571	1006,407		0,489	1006,896		0,000	1006,896	0,000
D8A			1056,408		49,087	1,000	0,821	0,003	0,571	1007,321		0,488	1007,809		0,000	1007,809	0,000
D9			1058,117		49,085	1,000	0,821	0,003	0,571	1009,032		0,487	1009,519		0,000	1009,519	0,000
D10			1053,589		49,081	1,000	0,821	0,003	0,571	1004,508		0,485	1004,993		0,000	1004,993	0,000
D10A			1060,229		49,079	1,000	0,821	0,003	0,571	1011,150		0,483	1011,633		0,000	1011,633	0,000
D11			1052,678	1004,099	49,08	1,000	0,821	0,003	0,571	1003,598	0,501	0,479	1004,077	0,022	0,022	1004,056	-0,022
D12			1093,871		49,075	1,000	0,821	0,003	0,571	1044,796		0,478	1045,274		0,000	1045,274	0,000
D13			1059,813	1011,231	49,066	1,000	0,821	0,003	0,571	1010,747	0,484	0,480	1011,227	0,005	0,005	1011,222	-0,005
D14			1078,156	1029,566	49,066	1,000	0,821	0,003	0,571	1029,090	0,476	0,477	1029,567	-0,001	-0,001	1029,567	0,001
D15			1089,497	1040,894	49,069	1,000	0,821	0,003	0,571	1040,428	0,466	0,473	1040,901	-0,007	-0,007	1040,908	0,007
D16			1070,938	1022,335	49,066	1,000	0,821	0,003	0,571	1021,872	0,463	0,469	1022,341	-0,006	-0,006	1022,347	0,006
D17			1093,478	1044,880	49,066	1,000	0,821	0,003	0,571	1044,412	0,468	0,466	1044,878	0,002	0,002	1044,877	-0,002
D18			1092,307	1043,718	49,061	1,000	0,821	0,003	0,571	1043,246	0,472	0,466	1043,712	0,006	0,006	1043,705	-0,006
D19			1111,726	1063,128	49,065	1,000	0,821	0,003	0,571	1062,661	0,467	0,463	1063,124	0,004	0,004	1063,120	-0,004
D20			1101,932	1053,326	49,066	1,000	0,821	0,003	0,571	1052,866	0,460	0,460	1053,326	0,001	0,001	1053,325	-0,001
D21			1117,588	1068,985	49,061	1,000	0,821	0,003	0,571	1068,527	0,458	0,458	1068,985	0,000	0,000	1068,985	0,000
D22			1137,881	1089,262	49,067	1,000	0,821	0,004	0,571	1088,814	0,448	0,454	1089,268	-0,006	-0,006	1089,273	0,006
D23			1147,279	1098,653	49,071	1,000	0,821	0,004	0,571	1098,208	0,445	0,450	1098,658	-0,005	-0,005	1098,663	0,005
D24			1155,246	1106,619	49,074	1,000	0,821	0,004	0,571	1106,172	0,447	0,448	1106,620	0,000	0,000	1106,620	0,000
D25			1157,516	1108,878	49,079	1,000	0,821	0,004	0,571	1108,437	0,441	0,444	1108,881	-0,003	-0,003	1108,884	0,003
D26			1157,906	1109,267	49,08	1,000	0,821	0,004	0,571	1108,826	0,441	0,443	1109,269	-0,002	-0,002	1109,271	0,002
D27			1166,461		49,087	1,000	0,821	0,004	0,571	1117,374		0,436	1117,810		0,000	1117,810	0,000
D28			1170,846		49,089	1,000	0,821	0,004	0,571	1121,757		0,435	1122,192		0,000	1122,192	0,000
D29			1166,326		49,09	1,000	0,821	0,004	0,571	1117,236		0,431	1117,667		0,000	1117,667	0,000
D30			1166,871		49,094	1,000	0,821	0,004	0,571	1117,777		0,425	1118,202		0,000	1118,202	0,000
D32			1170,671		49,093	1,000	0,821	0,005	0,571	1121,578		0,421	1121,999		0,000	1121,999	0,000
D33			1155,022	1106,348	49,092	1,000	0,821	0,005	0,571	1105,930	0,418	0,419	1106,349	-0,001	-0,001	1106,350	0,001
D34			1155,278		49,091	1,000	0,821	0,005	0,571	1106,187		0,417	1106,604		0,000	1106,604	0,000
D35			1150,466		49,089	1,000	0,821	0,005	0,571	1101,377		0,415	1101,792		0,000	1101,792	0,000
D36			1124,685		49,084	1,000	0,821	0,005	0,571	1075,601		0,412	1076,013		0,000	1076,013	0,000
D37			1109,12		49,084	1,000	0,821	0,005	0,571	1060,036		0,410	1060,446		0,000	1060,446	0,000
D38			1110,351	1061,677	49,079	1,000	0,821	0,005	0,572	1061,272	0,405	0,407	1061,679	-0,002	-0,002	1061,682	0,002

Tableau III.5: Le résultat de calcul après déterminer les résidus 2

- L'étape suivante explique comment faire les calculs, jusqu'à ce que le résultat soit atteint.

III.6.1. Phases du calcul

1. Calcul des valeurs de ondulation du modèle global EGM 2008
 - a. Calcul des résidus $\text{res} = \text{alt mes} - (\text{he} - \text{ondulation})$
 - b. 2. sur les résidus, res estimation au moindres carrés d'un modèle à 4 paramètres équivalent à une transformation de datum
 - a. calcul de la matrice du coefficient A
 - b. estimation des paramètres x
 - c. calcul des corrections $A \cdot x$
 - d. calcul des altitudes orthométriques $\text{ortho1} = \text{he} - \text{ondulation} + A \cdot x$
 - e. calcul des résidus $\text{res 1} = \text{alt mes} - \text{ortho1}$ (uniquement pour les points avec la alt mes connue en nivellement)
3. modélisation de l'aire des résidus res1 (algorithme de krigeage)
 - a. calcul des altitudes orthométriques $\text{ortho2} = \text{he} - \text{ondulation} + A \cdot X\text{-krigeage}$
 - b. calcul des résidus $\text{res 2} = \text{alt mes} - \text{ortho2}$ (uniquement pour les points avec la alt mes connue en nivellement).

La conservation de la référence d'altitude NGA dans les opérations de nivellement par GPS est nécessaire pour adapter les hauteurs géoidales géométriques et gravimétriques.

Pour ce faire, on a réalisé un programme en Matlab appelé **NiV_GPS_GEO** qui utilise une transformation de similitude à quatre paramètres décrite par l'équation (I.6).

Les valeurs de ces paramètres n'ayant pas de signification particulière. Pour autant que les points GPS nivelés soient de qualité, en nombre suffisant et bien répartis, les géoïdes gravimétriques ainsi adaptés peuvent être utilisés directement pour effectuer du nivellement par GPS.

COEF1	COEF2	COEF3	COEF4
1	0.820	0.009	0.571

Tableau III.6 : les coefficients Obtenus à partir du tableau précédent

Les statistiques des écarts après l'adaptation ont montré qu'on arrive à un écart moyen de 1mm et un écart moyen quadratique de 6mm qui est jugé très utile pour un projet de ce type.

Ce genre de technique est valable où la variation de terrain est faible ; le cas où le terrain est accidenté de préférence est de choisir la technique de nivellement classique (cas d'Algérie) car l'exploitation des données de champ de pesanteur disponible est peu précise à cause du manque de données et l'infidélité de la technique d'interpolation pour ce type de terrains.

Conclusion Général

L'objectif principal de ce travail était d'intégrer les données de champs de pesanteur et des données GPS pour le calcul un réseau de nivellement à grand étendu (environ 200 km).

L'application de cette technique est très sensible car le client veut avoir la qualité de millimètre au niveau de précision des altitudes résultats et dans les brefs délais. L'existence des points de bases connus en nivellement suffisants bien distribués au niveau de projet et la connaissance de coordonnées géographiques de l'ensemble de points permet de l'adaptation des deux surfaces (géoïde gravimétrique et géométrique) et avec l'intégration de la technique développée par le professeur Sideris de l'université de Calgary relative à l'ajustement combiné des réseaux de GPS, nivellement et géoïde (Kotsakis & al., 1999).

La comparaison entre des résultats trouvés pour les altitudes qui ne participent pas dans le calcul et les altitudes réalisées par cette technique est favorable sachant que l'écart moyen est de l'ordre de millimètre.

Les résultats trouver sont acceptable et permet de remédier la lourde technique de nivellement de précision.

On note que cette technique est valable uniquement pour de terrain de faibles gradients, pour des terrains accidentés, il est conseillé de suivre la technique de nivellement de précision.

En ce qui concerne l'étude statistique des résidus on a essai d'ouvrir un volet important dans l'analyse statistique d'une mesure physique en général et mesure géodésique en particulier, donc il recommandé dans le future de faire ces tests et prend en considération tous les types de test statistique existés dans la théorie d'estimation (test de grosse erreur, test de khi-2, test de fisher ...).

Références Bibliographiques

Beutler G: Bock, H., Brockmann E., Dach R., Fridez P., Gurtner W., Hugentobler U., Ineichen D., Johnson J., Meindl M., Mervart L., Rothacher M., Schaer S., Springer T., Weber R., (2001). Bernese GPS software version 4.2 manual, edited by U. Hugentobler, S. Schaer, and P. Fridez, 418 pp., Astron. Inst., University of Bern, Bern.

Ben Ahmed Daho S. A. (2000). The new gravimetric geoid in Algeria. IGeS Bulletin N°10 – ISSN 1128-3955 – [pp 85-90]

Benahmed Daho S. A., Fairhead J. D., (2004). A new quasigeoid computation from gravity and GPS data in Algeria. Newton's Bulletin N° 2, A joint Bulletin of the Bureau Gravimétrique International and of the International Geoid Service – ISSN 1810-8547: pp 52-59.

Ben Ahmed Dahou S.A. (2010) Assessment of the EGM2008 Gravity Field in Algeria Using Gravity and GPS/Levelling Data. In: Mertikas S. (eds) Gravity, Geoid and Earth Observation. International Association of Geodesy Symposia, vol 135.

B. Si Tayeb (1995): Étude comparative de trois méthodes de compensation: moindres carrées,

gradient conjugué et factorisation QR. Mémoire de fin d'études, CNTS - Arzew 1995.

Congyu Liu:(1993). Precise GPS positioning in the marine environment. Master thesis.

UCGE Reports Number 2055, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.

ESA SP-1233, : The Four Candidate Earth Explorer Core Missions -Gravity Field and steady-State Ocean Circulation Mission, ESA Publications Division 1999, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.

Forsberg R.: 1985. Gravity field terrain effect computations by FFT. Bulletin Géodésique, vol. 59, N° 4.

Forsberg, R.: Sideris M.G., 1993. Geoid computation by multi-band spherical FFT approach, Manuscripta Geodetica, vol. 18, pp. 82-90.

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.

Heiskanen and H. Moritz, 1967: Physical Geodesy, W. H. Freeman and company, San Francisco,.

INCT. (2007). Rapport national de l'algerie iugg 2007 Perugia, réalise par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection.

GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment: Science and Mission Requirements Document, revision A, JPLD-15928, NASA's Earth System Science Pathfinder Program, 1998.

Kotsakis C., Sideris M. (1999) on the adjustment of combined GPS/levelling/geoid networks. Journal of Geodesy 73: 412-421

Leik. Alfred. (1990). GPS Satellite Surveying, John Wiley & Sons, 1990, pp.218-220

N.K. Pavlis, : S.A. Holmes, S.C. Kenyon and J.K. Factor, The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), J. Geophys. Res., 117, B04406, *doi:10.1029/2011JB008916*, 2008

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.

Mahdi HADDAD septembre 2004: Mémoire de magister en techniques spatiales et applications Option : geodesie /Thème de mémoire: Détermination du Géoïde en Algérie du Nord par Intégration des Données Gravimétriques et Altimétriques.

Pierre Bettinelli. (2007).Déformation intersismique de 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

Rahmani Mohamed 2014 : Mémoire de projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme Master 2 : Sciences et techniques topographiques THEME : Uniformisation Des Données GPS (Application Zone D'étude TINDOUF)

Seeber. G. (2003). Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications, de Gruyter, Berlin

Site web JPL. <http://igscb.jpl.nasa.gov/>.

Site web 2 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Test_du_%CF%87%C2%B2

Site web 3 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Test_de_Student

Site web 4 : <http://eduscol.education.fr/rnchimie/math/benichou/tests/testf/testf.htm>

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.

Topo .compil : Topographie et topométrie - S. Milles, J. Lagofun (chapitre GÉODÉSIE, CARTOGRAPHIE page 10)

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

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.

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.

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.

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 C. Reigber, R. Bock, C. Förste, L. Grunwaldt, N. Jakowski, H. Lühr, P. Schwintzer and C. Tilgner, CHAMP Phase-B Executive Summary, GFZ 1996, STR96/13.

Zarrouk Fayçal 2012/ :(Cours (8) de statistiques à distance, élaboré par Zarrouk Fayçal, ISSEP Ksar-Said, 2011-2012)