

République Tunisienne
Ministère de l'Équipement et de l'Habitat
Office de la Topographie et de la Cartographie

**APPORT DE LA GEODESIE SPATIALE A LA
MISE EN ŒUVRE RAPIDE D'UN SYSTEME
GEODESIQUE UNIFIE EN AFRIQUE**

**Communication Présentée à la 7ème Conférence
Cartographique Régionale pour l'Afrique, 6 -11
septembre 1989, Ouagadougou, Burkina Faso**

**Dr Chedly Fezzani, Ingénieur Général Géographe
Abdelmajid Ben Hadj Salem, Ingénieur Principal
Géographe**

VERSION 2., AVRIL 2019

abenhadjalem@gmail.com

Table des matières

1	Introduction	3
2	Le Levé par la méthode Doppler	4
2.1	Applications Géodésiques	5
2.1.1	Etablissement d'un canevas géodésique de base	5
2.1.2	Densification d'un réseau géodésique	6
2.1.3	Connexion de deux réseaux géodésiques	7
2.1.4	Formulation Complète du passage d'un système à un autre	7
3	Le Levé par le GPS	8
4	Combinaison des observations terrestres classiques avec les données spatiales (Doppler, GPS)	9
4.1	Le lien fonctionnel entre les réseaux Doppler et géodésique terrestre :	10
4.2	Les modèles de compensation :	10
5	Nécessité de mise en œuvre urgente d'un système de référence unifié pour l'Afrique	10
6	Conclusions	12



FIGURE 1 – Dr Chedli Fezzani

LA PUBLICATION DE CETTE VERSION NUMÉRIQUE EST
DÉDIÉE À LA MÉMOIRE DU DR CHEDLY FEZZANI
(1943-2019) QUI NOUS A QUITTÉ LE 09 MARS 2019.¹

1. Image de l'Observatoire du Sahara et du Sahel

APPORT DE LA GEODESIE SPATIALE A LA MISE EN ŒUVRE RAPIDE D'UN SYSTEME GEODESIQUE UNIFIE EN AFRIQUE²

Résumé

Posséder un système de référence unifié, établi sur des bases universellement admises et à caractère utilitaire, c'est contribuer d'une façon remarquable à une exploitation judicieuse de l'information géographique pour promouvoir le développement économique de l'Afrique tant sur le plan national, régional que continental.

Pour se faire, il importe aujourd'hui de tirer le meilleur profit des techniques spatiales et de bien les assimiler surtout par les institutions nationales Cartographiques.

Sortant des sentiers battus et des multiples communications théoriques présentées à cet effet, la présente communication :

- est rédigée à l'intention des petites institutions africaines de cartographie,
- définit les préalables organisationnels pour mettre en œuvre rapidement le Système de référence unifié à l'échelle continentale.
- sert de cadre pour orienter le débat sur les vraies questions à poser en la matière.

1 Introduction

La présente communication vise à démystifier la géodésie spatiale pour la rendre accessible aux institutions nationales de Cartographie accaparées par des exigences de production et ne disposant pas toujours d'ingénieurs géodésiens suffisamment informés des résultats de ces nouvelles techniques.

Plusieurs imminents géodésiens ont eu à développer les divers aspects mathématiques de ces techniques.

Nous nous limiterons à des aspects généraux permettant de saisir les multiples applications qui en découlent aux fins de promouvoir de saisir les multiples applications qui en découlent aux fins de promouvoir rapidement la mise en place et la densification des réseaux nationaux d'une part et d'accélérer la mise en œuvre d'un système de référence unifié pour l'Afrique.

Parmi les techniques de la géodésie spatiale qui jouent un grand rôle dans l'établissement des réseaux géodésiques, citons :

- le levé par la méthode Doppler,

2. - Dr FEZZANI Chedly, Ingénieur Général Géographe,

- BEN HADJ SALEM Abdelmajid, Ingénieur Principal Géographe.

Adresse : OTC, Cité Olympique, BP 156, 1080 Tunis Cedex, Téléx 14129, Tunisie.

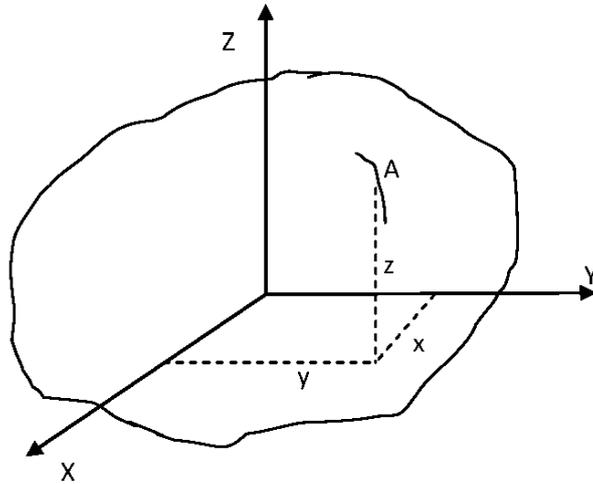


FIGURE 2 – Position d'un point dans un système de référence

- le levé par le GPS (Global Positioning System), méthode en cours de développement.

Ces deux techniques permettent de déterminer les coordonnées tridimensionnelles (X, Y, Z) d'un point dans un système de référence rapporté au centre de gravité de la terre.

2 Le Levé par la méthode Doppler

Cette méthode utilise les signaux électromagnétiques émis par les satellites TRANSIT de l'U.S. Navy(orbite circulaire polaire, altitude 1000 km) et reçus par un récepteur stationné en un point de coordonnées inconnues. Grâce à l'effet Doppler sur les ondes émises et à la connaissance du temps de réception des signaux et des positions des satellites, les coordonnées de la station inconnue seront déterminées. La durée de la visibilité d'un satellite au dessus de l'horizon d'un lieu peut atteindre 18 mn (ce qu'on appelle un passage). Ces passages enregistrés par le récepteur peuvent être traités par le micro-processeur de celui-ci qui donnera une position approchée, ou transférés sur l'ordinateur pour le traitement définitif avec les logiciels appropriés(GEODOP, GDI, DOPPLR,...).

Pour 50 passages environ, l'écart-type d'une composante géocentrique $(\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z)$ varie de 0.3 m à 5 m suivant le mode de calcul et les éphémérides utilisées (positions du satellite). Une bonne détermination nécessite une semaine d'observation.

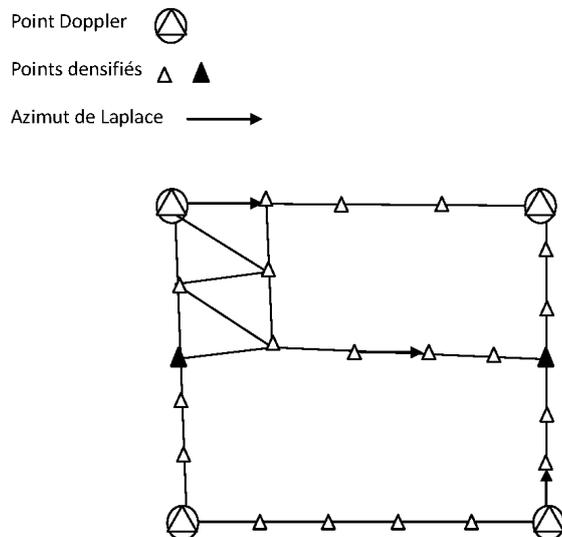


FIGURE 3 – Etablissement d'un canevas géodésique de base

2.1 Applications Géodésiques

2.1.1 Etablissement d'un canevas géodésique de base

Pour un pays démuné de points géodésiques, la méthode Doppler permet de déterminer un canevas de points distants de 100-250 km servant d'ossature à un réseau densifié par des cheminements ou par des chaînes de triangles avec observation d'azimut de Laplace. Le système de référence à utiliser peut-être le système géocentrique Doppler ou un système obtenu par une transformation du système Doppler. La transformation la plus simple est la translation (Fig.4) :

$$X_D = O'M = T + X_g \iff X_g = OM = X_D - T \quad (1)$$

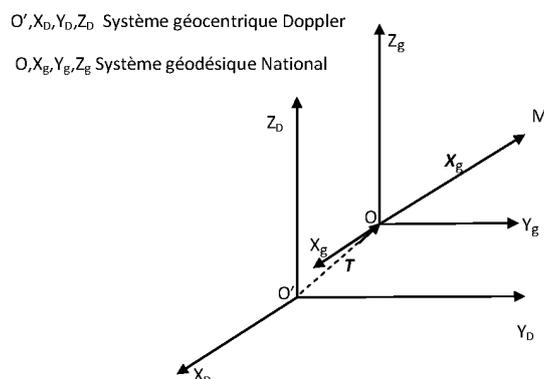


FIGURE 4 – Les systèmes Doppler et géodésique National

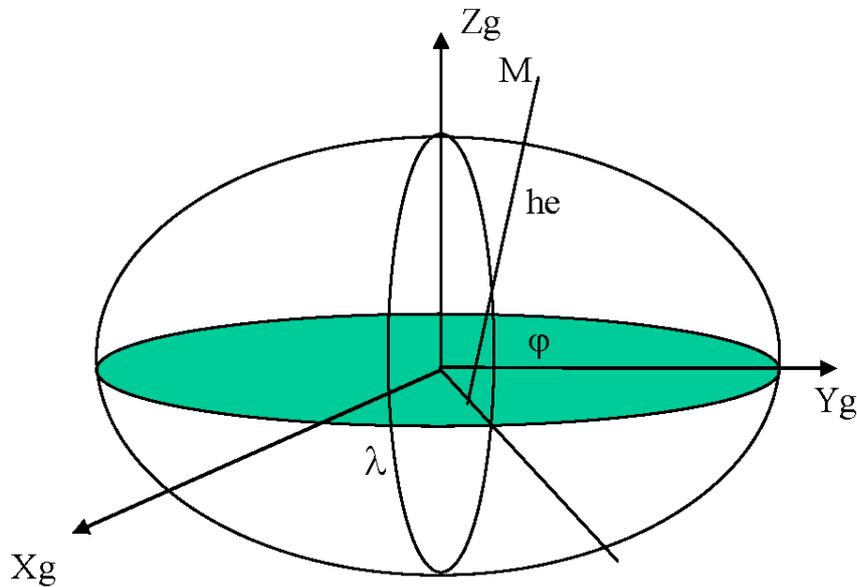


FIGURE 5 – Les coordonnées géodésiques

A partir de (1) et du choix de l'ellipsoïde de référence, on détermine les coordonnées géodésiques (φ, λ, h_e) des points par des formules bien établies.

2.1.2 Densification d'un réseau géodésique

La densification d'un réseau géodésique nécessite la détermination de points par la méthode Doppler. Ces points serviront comme contraintes dans la compensation d'un réseau. Parmi ces points, il faut choisir au moins 3 stations connues, ce qui permettra de définir les paramètres de passage du système géocentrique au système géodésique national. Considérons la formule de passage la plus simple : la translation :

$$\mathbf{X}_D = \mathbf{T} + \mathbf{X}_g \quad (2)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{X}_D - \mathbf{X}_g \quad (3)$$

$\mathbf{X}_D \rightarrow$ déterminés par le Doppler

$\mathbf{X}_g \rightarrow$ en stationnant des points connus

ainsi \mathbf{T} est connue.

Pour les points inconnus, leur position dans le système géodésique national sera calculée par :

$$\mathbf{X}_g = \mathbf{X}_D - \mathbf{T} \quad (4)$$

La méthode Doppler permet de vérifier l'orientation d'un réseau géodésique. Ainsi la comparaison des azimuts géodésiques, calculés en utilisant d'une part les coor-

données obtenues par le Doppler, d'autre part les coordonnées, peut révéler une désorientation du réseau en question.

A l'aide des coordonnées Doppler, on peut estimer le facteur d'échelle du réseau donné par le rapport :

$$\frac{L_D}{L_G} \quad (5)$$

où L_D : distance entre deux points calculée avec les coordonnées Doppler,

L_G : distance calculée avec les coordonnées géodésiques nationales. On exprime le rapport sous la forme :

$$\frac{L_D}{L_G} = 1 + m \quad (6)$$

m est appelé l'échelle exprimée en parties par million. Exemple : $\frac{L_D}{L_G} = 1 + 20 \times 10^{-6}$ montre que les côtés des triangles du réseau géodésique sont courts de 20 mm/km , quantité détectable avec les distancemètres.

2.1.3 Connexion de deux réseaux géodésiques

La méthode Doppler sert aussi lors de deux réseaux géodésiques différents (travaux sur les zones frontalières, matérialisation des frontières,...) :

Exemple :

$$\text{Pays 1 Système 1} \quad \mathbf{X}_{D1} = \mathbf{T}_1 + \mathbf{X}_{g1} \quad (7)$$

$$\text{Pays 2 Système 2} \quad \mathbf{X}_{D2} = \mathbf{T}_2 + \mathbf{X}_{g2} \quad (8)$$

Pour les points communs (connus dans les deux systèmes), on a :

$$\mathbf{X}_{D1} = \mathbf{X}_{D2} \quad (9)$$

$$\text{avec} \quad \mathbf{T}_1 + \mathbf{X}_{g1} = \mathbf{T}_2 + \mathbf{X}_{g2}; \quad \mathbf{X}_{g2} = \mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_2 + \mathbf{X}_{g1} \quad (10)$$

Le passage du système 1 au système 2 se fait grâce au vecteur translation ($\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_2$) :

Les coordonnées du point B dans le système 2 s'obtiennent par :

$$\mathbf{X}_{g2}(B) = \mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_2 + \mathbf{X}_{g1}(B) \quad (11)$$

Ainsi, les observations entre A et B se font dans le même système à savoir le système (2).

2.1.4 Formulation Complète du passage d'un système à un autre

Préalablement nous avons simplifié la formule de passage à une quasi-translation. La formulation la plus complète est de la forme :

$$\boxed{\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + (1 + m) \begin{pmatrix} 1 & rz & -ry \\ -rz & 1 & rx \\ ry & -rx & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}} \quad (12)$$

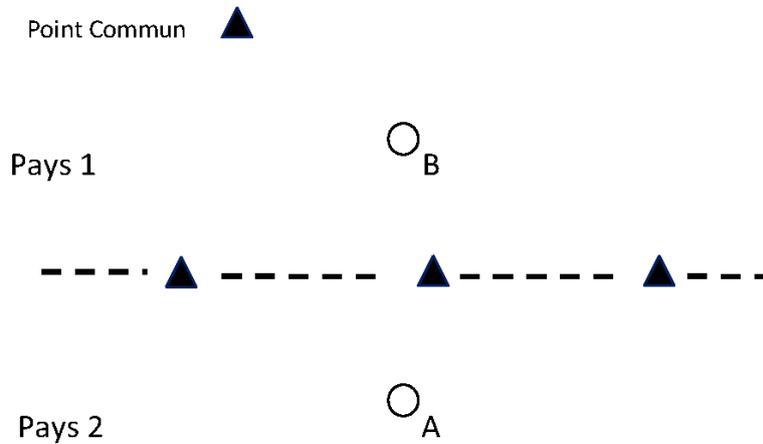


FIGURE 6 – Connexion de deux réseaux géodésiques

avec :

- T est le vecteur translation de composantes $\begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix}$ entre les systèmes 1 et 2 ;
- $1 + m$ est le facteur d'échelle entre les 2 systèmes ;
- $\begin{pmatrix} rx \\ ry \\ rz \end{pmatrix}$ les 3 rotations infinitésimales qui ramènent les axes du trièdre géodésique (1) parallèles aux axes du trièdre (2).

Soit vectoriellement :

$$\boxed{\mathbf{X}_2 = \mathbf{T} + (1 + m) \cdot R(rx, ry, rz) \cdot \mathbf{X}_1}$$

3 Le Levé par le GPS

Le GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement par satellite. Développé par le Département Américain de la Défense, il comprendra à sa phase finale une constellation de 18 satellites (8 satellites, juillet 1998) ; placés sur 6 orbites planes, d'inclinaison 55° et à une altitude de $20\,000\text{ km}$. La période d'un tour de la terre est de 12 h .

Sur chaque satellite est embarquée une horloge ultra-stable (rubidium, cesium) de fréquence fondamentale $F = 10.23\text{ Mhz}$. Cette horloge génère deux fréquences porteuses $L1 = 1575.42\text{ Mhz} = 154 \cdot F$ et $L2 = 1227.6\text{ Mhz} = 120 \cdot F$

Sur l'onde $L1$ sont modulés deux signaux pseudo-aléatoires appelés le code P (précision) et le code standard ou code C/A (clear access). Sur l'onde $L2$, seul le code P est modulé. Le code P est réservé aux organismes militaires Américains,

quant au code C/A , il est accessible aux divers utilisateurs. Comme le Doppler, un message comportant les éléments orbitaux, l'identification du satellite et les dates d'émission est transmis au récepteur GPS par les ondes porteuses.

Avec la constellation actuelle, on peut observer 4 à 5 satellites pendant 2 à 3 heures par jour suivant la position du récepteur sur la terre.

Le GPS permet :

- la détermination des coordonnées d'un point isolé,
- la détermination de bases,
- la transmission du temps,
- la détermination des coordonnées et de la vitesse d'un mobile à un instant donné.

Par rapport à la méthode Doppler, le levé par le GPS est plus rapide (10 à 20 fois).

Applications Géodésiques Les applications géodésiques du GPS sont :

- La détermination des coordonnées géocentriques d'un point (position absolue).
- La détermination relative des points (bases).

Les sources d'erreurs qui affectent la détermination des coordonnées sont :

- L'orbite du satellite.
- Les effets de l'atmosphère sur les signaux reçus par le récepteur GPS.
- L'horloge du récepteur GPS.

La détermination relative permet d'éliminer la partie principale de ces sources d'erreurs.

La précision en position absolue peut atteindre les 20 *cm*. La précision est améliorée pour la détermination des bases, elle est d'ordre centimétrique.

4 Combinaison des observations terrestres classiques avec les données spatiales (Doppler, GPS)

La combinaison des données satellites avec les observations terrestres s'était posée dès l'établissement des réseaux satellites ([1]).

Le développement de la géodésie Doppler dans l'établissement et le contrôle des réseaux géodésiques a contribué à faire appel à la combinaison des données spatiales, en particulier, les données Doppler avec les observations terrestres pour la compensation des réseaux géodésiques.

La combinaison des observations terrestres classiques avec celles du Doppler ou le GPS posent les 2 problèmes ci-dessous :

- Le lien fonctionnel entre le réseau terrestre et le réseau Doppler (GPS).

- Les modèles de compensation.

4.1 Le lien fonctionnel entre les réseaux Doppler et géodésique terrestre :

Le lien fonctionnel entre les réseaux Doppler (GPS) et géodésique terrestre se rapporte aux relations entre les coordonnées Doppler (GPS) et géodésiques des points communs. Ces relations sont étudiées dans les transformations entre les systèmes géodésiques.

Les relations sont exprimées en coordonnées cartésiennes (modèles de Bursa-Wolf, Hotine, Molodensky,...) ou en coordonnées géodésiques (formules de Molodensky-DMA).

4.2 Les modèles de compensation :

Les modèles de compensation appartiennent à 2 groupes :

- G1 : combinaison des observations terrestres avec des contraintes Doppler (GPS), c'est-à-dire que les coordonnées Doppler sont calculées séparément et sont considérées fixes lors de la compensation.
- G2 : combinaison des observations terrestres avec les données Doppler (GPS) par le biais de la relation fonctionnelle entre les systèmes Doppler et géodésique, dans une seule compensation.

5 Nécessité de mise en œuvre urgente d'un système de référence unifié pour l'Afrique

Bien que des efforts assez importants ont été fournis et plusieurs progrès ont été réalisés, ils restent néanmoins insuffisants.

Faut-il ici rappeler l'approbation de l'approche conceptuelle présentée par l'AAC en 1986 à la 6ème CCRA et l'appui formulé par l'OUA à cette œuvre scientifique (Résolution OUA-CM/res.980 (XLI) de février-mars 1985 du conseil des Ministres de l'OUA) ainsi que l'approbation du projet du réseau gravimétrique conçu et présenté par le Comité gravimétrique Africain.

Nul ne peut aujourd'hui mettre en doute la nécessité impérieuse d'un système de référence uniforme pour l'Afrique, système devant servir de cadre à l'intégration des réseaux nationaux dans un ensemble cohérent et homogène.

Nous avons participé d'une façon ou d'une autre à la mise en place d'un formidable réseau Doppler couvrant la quasi-totalité du continent et une mobilisation internationale a été obtenue pour sa réalisation.

Faut-il encore plaider ce dossier ou alors s'attarder sur les raisons majeures de son blocage ?

Pourquoi donc s'arrêter et ne pas avoir l'ambition de tirer pleinement profit de nos acquis pour tendre vers un idéal commun ?

Est-ce l'handicap réside uniquement dans nos faibles moyens matériels et humains ?

Hélas non car l'Afrique est dotée d'un formidable potentiel humain capable d'appréhender tous les aspects de cette œuvre scientifique. Elle peut obtenir sans difficultés l'assistance financière de Nations sœurs et de plusieurs organisations internationales si notre dossier est suffisamment argumenté et soutenu par des actions coordonnées.

C'est là où réside tout notre problème qu'il faut savoir aborder et résoudre avec toute la sagesse africaine.

Que d'années perdues par la dispersion de nos efforts et l'absence d'une coordination efficace de nos potentialités.

Il faut savoir éviter de nous perdre en conjecture inutile et d'unir nos efforts pour faire œuvre utile. L'expérience du passé doit nous guider vers d'autres voies plus opérationnelles. Notre proposition consiste donc à clarifier au préalable qui fait quoi en la matière. Il est inutile de s'accuser mutuellement du blocage et optons pour une action coordonnée.

Que :

- * l'OUA et la CEA parrainent ces œuvres scientifiques et soutiennent toute action menée sur le plan international ;

- * l'OACT assure la coordination scientifique et la mobilisation des fonds nécessaires à la mise en œuvre de ces projets ;

- * les centres spécialisés régionaux contribuent à leur mise en œuvre matérielle dans leur sous-région respectivement ;

- * les commissions scientifiques spécialisées assurent la conception, l'approche méthodologique avec les organisations internationales dûment habilitées.

Notre effort doit viser essentiellement à :

- * doter notre continent d'un système de référence uniforme servant d'ossature aux systèmes nationaux ;

- * renforcer et accroître la coopération sur l'ensemble des problèmes posés par l'urgence des besoins et le développement rapide des technologies utilisées en la matière ;

- * amener les gouvernements africains à accorder davantage d'intérêt et de moyens à ces travaux d'infrastructures de base ;

- * revaloriser et densifier le patrimoine scientifique de l'Afrique et l'adapter aux nouvelles exigences.

6 Conclusions

La réalisation des œuvres de ce système de référence uniforme, dénommé **Réseau Géodésique Intégré de l'Afrique**, marquera un tournant décisif pour le développement de ces sciences tant sur le plan national, régional que continental.

J'ose espérer que la 7^{ème} CCRA s'attache davantage à tracer les voies les plus appropriées pour faire avancer ces projets en exploitant au mieux les structures existants en Afrique et éviter à l'Afrique le cloisement néfaste et les tiraillements du passé.

Références

- [1] **D.B. Thomson**. 1976. Combination of Geodetic Networks. Technical report No 30, Department of Surveying Engineering. University of New Brunswick. Fredericton N.B.Canada.