

STRATÉGIE D'INTÉGRATION DES DONNÉES GPS EN SPATIOCARTOGRAPHIE

Par Salem KAHLOUCHE, Abdelkader DJILALI

Centre National des Techniques Spatial - CNTS BP 13 Arzew 31200 - ALGERIE

RÉSUMÉ

Le choix et la qualité des points d'appui en vue d'une cartographie spatiale revêt un caractère essentiel.

L'introduction de points GPS dans les modèles de correction pose un problème spécifique de compatibilité entre systèmes de référence et de détermination des paramètres de passage au système cartographique local. L'insuffisance de l'information géographique, essentiellement la non disponibilité de ces paramètres et de la hauteur du géoïde a nécessité, l'utilisation d'un jeu de données de 11 points appartenant au réseau ADOS.

Les résultats obtenus à partir des équations différentielles de Molodensky et de méthodes globales basées sur le modèle de potentiel Rapp 360 de l'O.S.U; ont montré une différence entre les référentiels selon les modèles utilisés et une influence importante de la méconnaissance du géoïde. Les différentes étapes permettant l'intégration des données spatiales (GPS,...) dans le système cartographique local (Nord-Sahara), avec la définition des principaux systèmes utilisés ainsi que des tests de détermination de positions absolues par GPS monofréquence sont présentés.

INTRODUCTION

Le processus d'établissement de la carte de base nécessite la mise en place d'un réseau géodésique de référence servant de support aux rectifications géométriques des images satellitaires.

Les possibilités offertes par l'imagerie dans les différentes opérations d'établissement ou de révision de la carte de base, posent des impératifs de densité et de précision du canevas de points d'appui. Ces points d'appui identifiés avec précision sur l'image brute de façon à connaître leurs coordonnées image doivent être déterminés sur le terrain par des techniques de positionnement (terrestres ou spatiales).

Les données de télédétection, et particulièrement les données SPOT, sont considérées comme une source d'information importante pour les applications cartographiques. Les domaines abordés par la carto-

graphie satellitaire sont désormais annexés, grâce à la finesse de la résolution et à la vision stéréoscopique, à celui de la cartographie de base.

La précision géométrique finale que l'on peut espérer dans une telle exploitation va dépendre de deux types de facteurs:

- du modèle de corrections géométriques utilisé,
- des points d'appui utilisés pour rectifier l'image ou pour restituer le couple d'images dans le cas
- d'une vue stéréoscopique.

Le premier facteur n'induit que des erreurs très faibles : les modèles mathématiques de corrections géométriques intégrant la géométrie interne de l'instrument (paramètres de prise de vue), l'orbite (lois de déformation parfaitement connues), et les vitesses de dérive en attitude (déterminées par des mesures à bord) ne génèrent qu'une erreur inférieure à 1 m (Toutin, 1986; Guichard, 1986; Hottier, Battah, 1990; ...).

Le second type va imposer la précision finale: de nombreuses expériences ont été réalisées (IGN, 1986; Begin et al 1988; Toutin, 1989; ...) pour le choix, le nombre, la répartition et la précision des points d'appui.

La précision finale obtenue en spatio-cartographie doit être de même ordre de grandeur que l'erreur graphique généralement admise (0.1 mm x E). Le bilan d'erreur est donné par l'expression (Clavet, ... 1993) :

$$\sigma^2 = \sigma_m^2 + \sigma_p^2 + \sigma_c^2$$

où : σ_m : erreur modèle (< 1m : Toutin; Carboneau, 1990)

σ_p : erreur lecture d'image (< 4m : Clavet, 1991)

σ_c : erreur due au canevas d'appui (GPS)

Les points peuvent provenir de différentes sources : géodésiques, photogrammétriques ou cartographiques. Chaque source disposera de son niveau de précision et de sa performance (intérêt économique). L'utilisation des techniques de positionnement par satellites (GPS,...) permet de s'affranchir des contraintes liées à la géodésie classique (visibilité, délais,...) et offre un gain en temps, en précision et en coût. L'exploitation

des données GPS nécessite la connaissance de la hauteur du géoïde pour la détermination des paramètres de passage entre le référentiel spatial et le système cartographique local.

Pour pallier à la non disponibilité d'un géoïde local ou d'un réseau gravimétrique dense, l'utilisation de modèles globaux de potentiel (GRIM4, RAPP 360, ...) pourrait améliorer la modélisation.

La transformation et la détermination des paramètres de passage entre ces référentiels, l'introduction de points ADOS ainsi que le calcul du géoïde à partir de modèles de potentiel sont des étapes nécessaires à toute stratégie d'intégration de données GPS en spatocartographie.

◆ ACQUISITION DES POINTS D'APPUI

L'utilisation de l'imagerie satellitaire nécessite, avant d'aborder les volets classification et mise en évidence des différents thèmes recherchés, la correction de l'image brute des distorsions géométriques et radiométriques. La correction géométrique, qui permet de rendre superposable à une carte, l'image brute recueillie, ne peut être effectuée que si des détails, points d'appui, de calage ou de contrôle, identifiables sur l'image, sont déterminés dans un système de référence homogène.

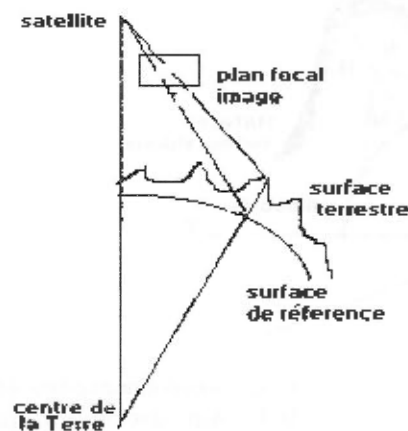


fig n° 1: affets de relief

- La répartition :

Les points doivent être répartis aux endroits les plus hauts et les plus bas de la topographie. Toutin propose six intersections de route en X réparties sur le bord de l'image. (fig n° 2)

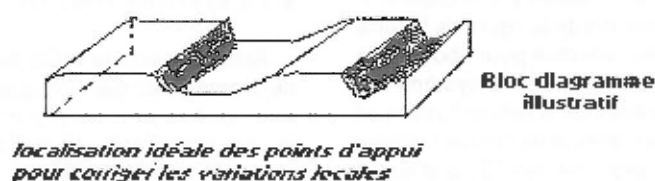


fig n° 2

D'après l'ensemble des différentes expériences, la méthode d'acquisition des coordonnées images et terrain, qui permettrait d'obtenir la plus grande précision finale est basée sur la nature des points d'appui et la qualité de leur sélection .

■ Sélection des points d'appui

La sélection des variétés d'objets ou de structures sur les images pouvant servir de points d'appui (ou de contrôle) doivent satisfaire certaines propriétés liées à :

- La stabilité et l'extraction

Cette structure ne doit pas changer en forme et en taille d'une image à une autre. Cette structure doit être extraite d'une manière sûre en utilisant des techniques standards de traitement d'image (il n'est pas pratique de développer des techniques sophistiquées pour extraire des structures qui apparaissent dans peu d'images).

En traitement d'image, les coordonnées images peuvent être obtenues sur des imagerie, rééchantillonnées par un facteur 4 (le chiffre 1/4 de pixel est donné en X et Y (Westin, 1991)).

- La topographie

Ces points doivent refléter les variations locales du terrain, pour les satellites de haute résolution les erreurs dues aux variations locales deviennent significatives. (figure n° : 1)

■ Nature du point d'Appui

L'utilisation des points de référence tirés de la carte topographique au 1/50 000 ne répond pas de façon adéquate aux normes de précision. Avec les données SPOT, une situation presque inverse se produit: la carte topographique est moins précise au niveau planimétrique (SPOT avec 10m en planimétrie, est compatible à l'échelle du 1/33 333).

Il ressort de l'étude comparative faite par Clavet (1992) sur la précision des différentes sources de points d'appui et leur estimation en coût, les résultats suivants:

Photogrammétrie :	10m
GPS :	12,4m
Cartographique :	39m

En tenant compte des facteurs: précision, économie et situation du patrimoine cartographique de la plupart des pays, l'obtention des points par le système de positionnement global reste la seule solution.

◆ ACQUISITION DES POINTS PAR GPS

Le GPS est un système de positionnement tridimensionnel dont la mesure est basée sur la réception

des signaux émis par la constellation dans la bande L (L1=1.2Ghz, L2= 1.6 Ghz). Il fournit à partir d'observations de pseudo-distance ou de déphasage (combinaisons simple, double, triple...) des positions absolues (X,Y,Z) dans le référentiel de coordonnées cartésiennes WGS 84 (World Geodetic System) ou des différences de position ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) entre stations. La précision optimale du GPS est fournie en positionnement relatif (par mesure de phase de la porteuse), les différences de coordonnées cartésiennes sont exprimées dans le système de coordonnées GPS. Après le choix d'un modèle de terre (ellipsoïde terrestre), ces différences peuvent être transformées en différences de coordonnées géographiques ($\Delta\lambda, \Delta\phi$) et d'altitude Δh .

Si les coordonnées ellipsoïdiques peuvent être obtenues avec précision, l'obtention des altitudes orthométriques (H) au dessus du niveau moyen des mers (géode) nécessite l'introduction de données externes et sont obtenues à partir d'observations physiques (champ de pesanteur, ...). Les altitudes GPS sont purement géométriques, elles se réfèrent à un ellipsoïde arbitrairement choisi. La conversion des altitudes géométriques (h ellipsoïdique) en quantités physiques (H orthométrique) nécessite la connaissance des positions des deux surfaces «géode-ellipsoïde» dite hauteur du géoïde N qui est donnée par la forme simple: $h = H + N$

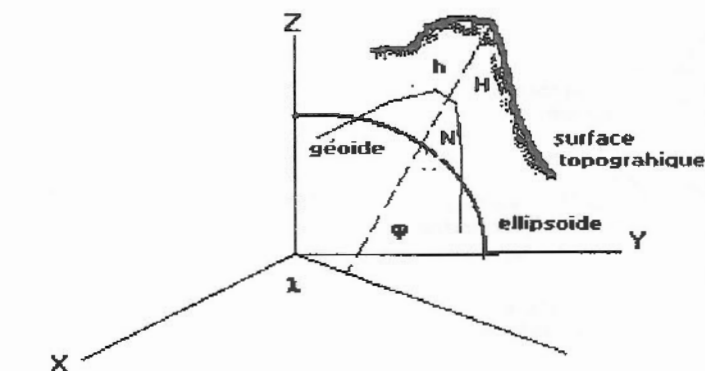


Fig N° 3 : Surfaces de référence

λ, ϕ : coordonnées ellipsoïdiques
h, H : Altitudes ellipsoïdique et orthométrique
N : hauteur du géoïde
X, Y, Z : coordonnées cartésiennes

◆ LES SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE UTILISÉS

Les systèmes WGS sont développés par le DOD-US. depuis WGS 60, l'approximation de la figure de la terre et de son champ de gravité a évolué pour aboutir à la définition actuelle du WGS 84 qui est le système de référence pour les éphémérides GPS radiodiffusées et précises. Le positionnement avec la technique Doppler sur satellites TRANSIT (système NNSS) a d'abord utilisé le système de référence WGS 72 pour les éphémérides opérationnelles. Les travaux de détermination

des éphémérides précises de la DMA ont conduit à définir le système de référence NWL 9D puis le NSWC 9Z-2 pour pallier aux insuffisances du WGS 72.

■ Le système WGS 84

Actuellement, le WGS 84 est défini par un système de coordonnées géométriques, un modèle ellipsoïdique, un modèle du champ gravitationnel terrestre et un jeu de paramètres de transformation. Les paramètres choisis pour le WGS 84 sont proches de ceux du GRS 80 (Geodetic Reference System) adopté comme système international (Moritz 1980).

- Le système de coordonnées WGS 84: géocentrique dont l'orientation est celle définie à partir des stations fixes du BIH. L'axe Z est parallèle au CTP (Conventional Terrestrial Pole) et l'axe X (Méridien zéro, parallèle à celui défini par le BIH) est l'intersection du méridien référence, comprenant le CTP avec le plan équatorial.

En pratique, il est défini par un jeu de stations

$$\begin{array}{rcl} X & = & 0 \\ Y & = & 0 \\ Z & = & 4,5 \end{array} + \begin{array}{r} -0,6 \cdot 10^6 \\ 0,814 \cdot R_0 \\ 0 \end{array} + \begin{array}{r} -0,814 \cdot R_0 \\ -0,6 \cdot 10^{-6} \\ 0 \end{array} \begin{array}{l} X \\ Y \\ Z \end{array}$$

WGS 84 NSWC 92-2

La conversion de tout point Doppler obtenu par les éphémérides précises dans le système WGS 84.

- L'ellipsoïde WGS 84: la définition de l'ellipsoïde WGS 84 n'est pas seulement une surface géométrique mais est définie comme étant une surface équipotentielle de révolution (ellipsoïde géométrique) du champs de pesanteur terrestre (modèle WGS 84) dont les axes principaux sont confondus avec les axes des coordonnées. Les paramètres ellipsoïdiques sont aussi identiques à ceux du GRS 80 (Moritz 1980) hormis le coefficient zonal normalisé de 2ème degré déduit du modèle de potentiel WGS 84.

- Le modèle de potentiel (EGM 84): développement en harmoniques sphériques de degré et ordre 180 . Les coefficients d'ordre supérieur à 18 sont classifiés.

Les paramètres de définition adoptés pour le référentiel WGS 84 sont :

- a = 6378137 m
- C20 = - 484,16685 10^{-6} Coefficient géométrique de 2ème degré du potentiel gravitationnel G
- ω = 729211 10^{-11} rad/s Vitesse de rotation angulaire terrestre
- GM = 3986005 10^8 m³/s² Constante gravitationnelle

Pour les applications du GPS, les paramètres de transformation entre les différents systèmes géodésiques et le WGS 84 sont pour la plupart du temps connus et publiés par la DMA (NSWC 92-2, NAD27, ED 50, ...) néanmoins pour l'établissement de spatio-cartographies en Algérie, la transformation WGS 84 - Nord Sahara reste à définir.

■ Le système Nord Sahara

Le calcul par l'AMS et l'IGN du premier ordre du réseau de triangulation incluant les données :

- du nouveau parallèle algérien (réfection de 1953-1954 et calculs de 1955),
- du parallèle sud,
- des méridiennes de Gabes (Tunisie) et Guercif (Maroc);

réparties à la surface terrestre. Il est obtenu à partir du système NSWC 92-2 utilisé pour les éphémérides précises des satellites NNSS et de l'introduction des résultats d'autres techniques spatiales (SLR, LLR, VLBI, ..).

Les paramètres de transformation permettent par la relation :

dans le système Europe 50, a montré des discordances entre le système cartographique saharien basé sur des points astronomiques et le système cartographique Nord basé sur l'ellipsoïde de Clark 80. Pour concilier les canevas ainsi obtenus, l'IGN et l'AMS ont établi sur l'ellipsoïde Clark 80 un système géographique tel que les discordances de la triangulation et de l'astronomie soient minimum. Le système, appelé Nord Sahara, est déduit de l'Europe 50 par la transformation suivante :

$$\begin{array}{l} \text{ENS} = \text{ED50} - 4'' \cdot 000 \text{ (longitude)} \\ \text{ENS} = \text{ED50} - 48'' \cdot 400 \text{ (latitude isométrique)} \end{array}$$

auquel est associé l'ellipsoïde Clark 80 (a = 6378249,145m et b = 6356514,870m) et est défini tel que :

- l'origine est obtenue à partir du point fondamental (Voirol);
- l'échelle est fournie par les différentes mesures de base effectuées au fil invar;
- l'orientation est obtenue par astronomie de position (points de Laplace).

Pour minimiser les distorsions causées par une forte valeur de la déviation de la verticale, un artifice de réduction à été introduit de telle sorte que le réseau actuel ne comporte plus de point fondamental .

Le réseau ADOS - African Doppler Survey :

Le projet ADOS a été lancé en 1982 afin de permettre la normalisation des réseaux géodésiques africains. Le réseau, réalisé par technique Doppler sur satellites Transit et comprenant 310 points (dont 18 en Algérie), constituera un réseau d'ordre zéro, canevas de base du Réseau Géodésique Intégré pour l'Afrique (RGIA) particulièrement au vu de la précision finale obtenue (0,8m en absolu) . Les résultats définitifs ont été publiés dans le référentiel NSWC 92-2, lors de l'assemblée générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale tenue à Vancouver en 1987.

◆ TRANSFORMATION WGS 84 - NORD SAHARA

La transformation des données GPS dans le système géodésique local, qui est la base du système

cartographique en vigueur et dont la spatio-carte doit être superposable, nécessite la connaissance des paramètres de passage avec l'emploi d'un modèle adéquat tenant compte les différentes spécificités.

Le choix du modèle de transformation, c'est à dire la détermination des paramètres de passage requiert la disponibilité d'un jeu de données connus dans chacun des systèmes. La transformation à 7 paramètres, dite de Helmert se présente sous la forme générale suivante :

$$[X]_{WGS} = T + k \mathcal{R} [X]_{NS}$$

X : vecteur position
T : translation
 \mathcal{R} : rotation autour des 3 axes
k : facteur d'échelle

En tenant compte des rotations infinitésimales : $\mathcal{R}(ex, ey, ez) = 1 + \delta \mathcal{R}(ex, ey, ez)$
et de la proximité du facteur d'échelle de la valeur unité, ($k = 1 + \Delta$) la forme générale est, au premier ordre :

$$\begin{array}{rcccl} X & & X & & 1 & 0 & 0 & X & 0 & Z & -Y & T_x \\ Y & = & Y & + & 0 & 1 & 0 & Y & -Z & 0 & X & T_y \\ Z_{WGS} & & Z_{NS} & & 0 & 0 & 1 & Z & Y & -X & 0 & T_z \\ & & & & & & & & & & & \Delta \\ & & & & & & & & & & & \epsilon_x \\ & & & & & & & & & & & \epsilon_y \\ & & & & & & & & & & & \epsilon_z \end{array}$$

Pour la détermination des paramètres de transformation Nord Sahara -WGS le jeu de données test utilisés comprend les coordonnées de 11 points du réseau national exprimées dans les systèmes NSWZ-2 et Nord Sahara, avec absence d'un modèle de géoïde local.

rotation supplémentaire (Veis), ou un formalisme géographique issu des équations différentielles de Molodensky. Pour passer rigoureusement d'un système géographique ($\lambda_1, \varphi_1, h_1$) à un autre ($\lambda_2, \varphi_2, h_2$), on doit réaliser le passage trirectangle à 7 paramètres auxquels s'ajoutent les paramètres des ellipsoïdes associés aux deux systèmes.

Les modèles de transformation utilisés se présentent sous forme d'un formalisme cartésien à 7 paramètres (Bursa) déduit de la forme générale ci dessus, avec introduction d'un vecteur initial (Molodensky) ou d'une

En formalisme géographique, l'expression au premier ordre des équations de Molodensky est :

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = -(\sin\lambda / \rho_2 \cos\varphi) T_x + (\cos\lambda / 2 \cos\varphi) T_y - (1-2f) \tan\varphi (\epsilon_x \cos\lambda + \epsilon_y \sin\lambda) + \epsilon_z$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -(\sin\varphi \cos\lambda / \rho_1) T_x - (\sin\varphi \sin\lambda / \rho_1) T_y + (\cos\varphi / \rho_1) T_z + \epsilon_x \sin\lambda - \epsilon_y \cos\lambda + \sin^2\varphi (a\Delta f + fa) / \rho_1$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \cos\varphi \cos\lambda T_x + \cos\varphi \sin\lambda T_y + \sin\varphi T_z + ka - \Delta a - (a\Delta f + f\Delta a) \sin^2\varphi$$

avec : $(T_x, T_y, T_z)^t$: vecteur translation
 $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)^t$: vecteur rotation
k : facteur d'échelle
f : inverse de l'aplatissement ($\Delta f = f_2 - f_1$)
a : demi grand axe ($\Delta a = a_2 - a_1$)
 ρ_1, ρ_2 : rayons de courbure principaux

La résolution du problème de détermination des paramètres de passage revient à résoudre le système :

$$\begin{array}{l} \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \mathcal{F}_\lambda (T_x, T_y, T_z, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z) \\ \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \mathcal{F}_\varphi (T_x, T_y, T_z, \epsilon_x, \epsilon_y, \Delta a, \Delta f) \\ \Delta h = h_2 - h_1 = \mathcal{F}_h (T_x, T_y, T_z, k, \Delta a, \Delta f) \end{array}$$

où :

$\lambda_1, \varphi_1, h_1$: données dans le système (Nord Sahara)
 $\lambda_2, \varphi_2, h_2$: données dans le système spatial (NSWC 9Z-2)

L'altitude ellipsoïdique (h_1) dans le système Nord Sahara n'est pas connue. La donnée connue est l'altitude quasi orthométrique (H) déterminée par des opérations de nivellement à partir d'une surface de niveau référence des altitudes qui est le géoïde.

Le calcul de l'altitude ellipsoïdique (h) dans le système Nord Sahara nécessite la connaissance de la hauteur du géoïde (N): $h = H + N$

La 3ème équation du système ci dessus :

$$h_2 - h_1 = \mathfrak{F}_h (T_x, T_y, T_z, k, \Delta a, \Delta f)$$

$$h_2 - h_1 = (H + N)_2 - (H + N)_1 = N_2 - N_1$$

avec $N_2 = h_2 - H$: connu
 $N_1 = h_1 - H$: inconnu

◆ DÉTERMINATION DU GÉOÏDE GLOBAL

La hauteur du géoïde, ainsi que certaines quantités gravimétriques (anomalie de pesanteur, gradient vertical, ...) peuvent être déduites d'une fonctionnelle du

potentiel terrestre développée en harmoniques sphériques jusqu'au degré et ordre L ($L=360$, Modèle de H.Rapp développé à l'Ohio State University - OSU 91)

$$V = GM/r \left\{ \varepsilon + \sum_{m=1}^L (R/r)^l \left[\{ C_{l0} - (1-\varepsilon) C_{l0}^* \} P_{l0}(\sin\phi) + \sum_{m=1}^l (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\sin\phi) \right] \right\}$$

Avec GM : constante géogravitationnelle

ε : 1 si le terme central du potentiel est inclus, $\varepsilon = 0$: s'il s'agit du potentiel perturbateur (potentiel réel diminué du potentiel de l'ellipsoïde de référence)

R : rayon terrestre

(r, ϕ, h) : coordonnées sphériques

L : degré et ordre maximum ($L \rightarrow +\infty$). La troncature à L correspond à une résolution moyenne de $20000 \text{ Km}/L$. $L=360$: résolution 56 Km à l'équateur

$P_{l0}(x)$: polynôme de Legendre normalisé, de degré l

$P_{lm}(x)$: fonction associée de Legendre, normalisée de degré l et d'ordre m ($m < l$)

C_{l0} : harmoniques zonaux du modèle, normalisés

C_{l0}^* : harmoniques zonaux de l'ellipsoïde de référence normalisés (seuls les termes de degré pair sont non nuls)

La hauteur du géoïde est donnée par la formule de Bruns :

$$N = U/\gamma \quad (U : \text{potentiel perturbateur}, \gamma : \text{potentiel normal})$$

γ est donné par la formule de Somigliana

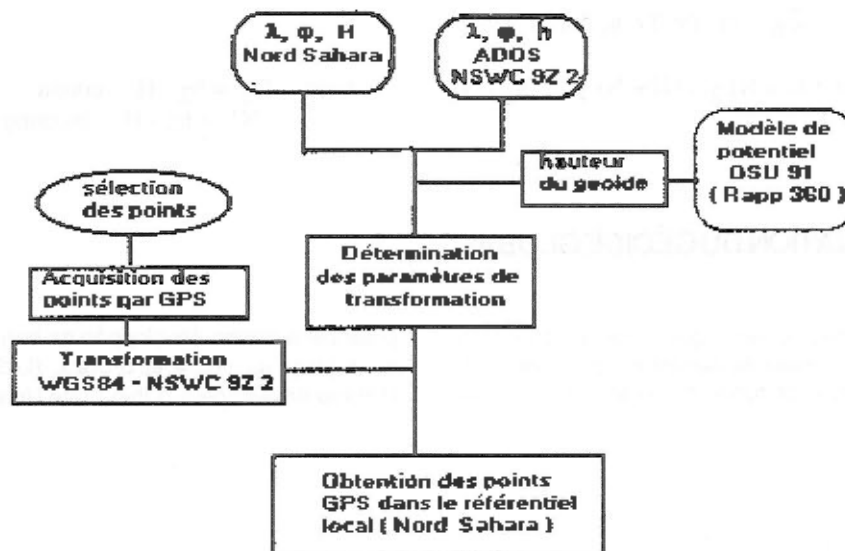
$$\gamma = (a\gamma_e \cos^2 \phi + b\gamma_p \sin^2 \phi) / (a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$$

Le calcul de la hauteur du géoïde s'effectue dans le cadre d'une approximation sphérique, sur la base du modèle de coefficients du géopotential normalisés, OSU 91:

$$N = R \sum_{l=2}^L \sum_{m=0}^l P_{lm}(\cos\phi) (C_{lm}^* \cos m\lambda + S_{lm}^* \sin m\lambda)$$

◆ PROCÉDURE D'INTÉGRATION DES DONNÉES GPS

Le processus d'intégration est décrit par l'organigramme suivant :



◆ TRAITEMENT DES DONNÉES

Les données utilisées sont :

- un lot de 11 points du réseau ADOS (NSWC 92-2) connu dans le système local Nord Sahara;
- un modèle de potentiel OSU91 de degré et ordre 360 (Rapp 360);
- un jeu de coordonnées, de 15 points du réseau national helvétique (région d'Yverdon), exprimées dans les systèmes CH-1903 et WGS84, associés respectivement aux ellipsoïdes de Bessel et WGS84, avec un modèle de géoïde pour la validation des traitements effectués.

- des logiciels de validation (GBSYNTP & GBSYNTM) fournis par le Bureau Gravimétrique International et permettant la détermination de grilles de quantités gravimétriques par synthèses ponctuelles et moyennes d'une fonctionnelle du potentiel (Balmino 1993).

Détermination des paramètres : Les travaux entrepris sur la détermination des paramètres ont fourni pour les différents modèles les écarts types suivants sur les observations (pour le jeu à 11 points) et sur les paramètres (translations "T" en mètres, facteur d'échelle "k" et rotations "R" en secondes sexa) :

Modèle	σ_x	σ_y	σ_z	σ_t	$\sigma_k(E-6)$	σ_r
Molodensky	4,074	2,984	4,790	0,70	0,1097	0"0226
Bursa-Wolf	4,053	3,16	4,675	0,70	0,1095	0"0226
Veis	7,147	5,796	5,335	0,69	0,1676	0"0346
Molodensky(géo)	0,301	0,433	4,375	0,44	0,0694	0"0143

La résolution globale par moindres carrés du système à (m) points, (3m) équations et (m+7) inconnues fournirait une solution (mathématique en cas de forte redondance) pour la hauteur du géoïde en ces points ainsi que pour les paramètres de transformation. En fonction des divers tests effectués, sur le réseau de 11 points, connus dans les deux systèmes NSWC 92-2 et Nord Sahara, il s'est avéré qu'aucune conclusion significative ne puisse être émise sur la détermination du géoïde et la résolution de la transformation

- La méconnaissance du géoïde a une plus grande influence sur le facteur d'échelle bien que les translations s'en trouvent aussi altérées.

- En se basant sur la condition de Helmert ($\sum N_i^2 = \text{minimum}$) et en substituant aux altitudes ellipsoïdiques, les altitudes orthométriques ($N=0$), la résolution du système ne fournirait qu'une solution approchée pour les paramètres.

Le problème ne pourrait être rigoureusement résolu avec une détermination précise des paramètres, qu'avec l'introduction de données externes (gravimétrie, modèles de potentiel, ...) et d'un réseau de référence ayant une densité suffisante et une répartition homogène.

De part la proximité des différents systèmes et la faible couverture du réseau de référence (ADOS) l'introduc-

tion de modèles simplifiés (sans rotation) pourrait fournir des résultats acceptables en augmentant la redondance.

Influence du géoïde : Les paramètres obtenus avant et après introduction d'une valeur de hauteur de géoïde sont respectivement pour un modèle cartésien (Bursa) et géographique (Molodensky) à 7 paramètres :

- Altitude Ellipsoïde = Altitude Orthométrique

Modèles à 7 paramètres	Translation en mètres	Ecart type	Facteur d'échelle	Ecart type	Rotation moyenne	Ecart type	Ecart type des Obs		
							σ_x	σ_y	σ_z
Bursa	405,88	0,69	$3,26 \cdot 10^{-6}$	0,11	0°83	0°023	4.05	3.16	4,68
Molodensky	406.35	0,44	$3.48 \cdot 10^{-6}$	0,07	0°71	0°14	σ_λ 0°11	σ_ϕ 0°15	σ_η 4.38

- Altitude Ellipsoïde = Altitude Orthométrique - Hauteur du géoïde

Modèles à 7 paramètres	Translation en mètres	Ecart type	Facteur d'échelle	Ecart type	Rotation moyenne	Ecart type	Ecart type des Obs		
							σ_x	σ_y	σ_z
Bursa	476,88	1.13	$3,41 \cdot 10^{-6}$	0,17	3°63	0°36	8.33	2.97	6,87
Molodensky	476.96	0,99	$3.51 \cdot 10^{-6}$	0,16	3°61	0°32	σ_λ 0°30	σ_ϕ 0°41	σ_η 9.9

◆ TESTS GPS EFFECTUÉS

- WM 101 : Des observations GPS pour un positionnement absolu et différentiel ont été effectuées avec les récepteurs WM101 (Wild Magnavox) monofréquence (code C/A) et multicanaux (8) et traitées avec le logiciel POPS (Post Processing software) de l'université de Berne. Les positions absolues les plus précises ont été obtenues pour la période de 45 mn (Cf Tableau). Les paramètres de traitement utilisés par POPS sont:

- Pseudo distance : code C/A
- Ephémérides : radio diffusées
- Paramètres inconnus : coordonnées et horloge
- Modèle ionosphérique : modèle simple couche
- Modèle troposphérique : Saastamoinen :
- Elévation minimale : 15°

La précision absolue obtenue sur les divers points stationnés (4 points) avoisine 5 m à partir d'observations effectuées sur 4 à 7 satellites. L'écart type en fonction du nombre et de la durée des observations est donné par le tableau :

Site : CNTS 1 : Récepteur Monofréquence (WM 101)

Nbr Obs	Durée Obs	Ecart type			Ecart total (mètres)
		σ_x	σ_y	σ_z	
64	15mm	8.41	10.45	5.09	14.34
124	30mm	8.64	8.97	5.06	13.44
188	45mm	7.54	8.23	4.61	12.07
240	60mm	12.24	14.20	7.80	20.31

-GARMIN 100 : D'autre part les comparaisons entre les résultats (I, j) fournis par un récepteur GPS de poche (GARMIN 100), dont la convergence de la solution a été obtenue après 10 mn d'observation, avec les données Nord Sahara transformées; a donné des écarts d'une amplitude moyenne de plus de 30 m. Les différences fournies en 4 points appartenant au réseau test d'Arzew sont :

Point	Dx	DY	DZ	D(m)
305	-14.24	18.82	19.85	30.8
208	10.66	15.99	-14.65	24.2
229	4.86	35.20	-6.46	36.2
225	10.88	31.03	15.42	36.3

CONCLUSION

Les données fournies par le système GPS peuvent être intégrées comme points d'appui d'une spatio-cartographie. En effet, l'utilisation de paramètres de passage entre le référentiel GPS (WGS 84) et le référentiel local Nord Sahara déterminés avec une précision acceptable au vu de la précision recherchée (5m) et considérant la qualité des modèles de correction analytique introduits, permet au niveau métrique une meilleure intégration. L'introduction de valeurs globales de géoïde n'a pas permis d'améliorer la précision de détermination des paramètres de part la qualité et la

répartition du jeu de données disponibles (11 points) notamment en altimétrie (nivellement) et nécessiterait la disponibilité de données locales (gravimétriques, ...).

D'autre part les tests GPS, monofréquence code C/A, effectués ont montré les limitations des résultats fournis en positionnement absolu pour des applications de cartographie topographique (1/50.000) et ce quelque soit la durée d'observation. L'utilisation du mode différentiel, où le GPS offre de meilleurs résultats (10^{-6} D), nécessite la disponibilité d'un réseau géodésique sous forme de données transformées ou de points connus en absolu. Les récepteurs classiques monofréquence utilisés doivent permettre un positionnement absolu de qualité acceptable en cas de non disponibilité de points déjà connus. L'emploi de récepteurs de précision adéquate nécessiterait probablement, pour réduire le temps d'observation de travailler en mode bifréquence et d'utiliser le code précis (P).

Enfin, la mise en application d'une stratégie d'intégration de points GPS devrait être basée d'une part sur une technique d'extraction des points appropriée au type d'utilisation voulue (échelle de restitution) et d'autre part sur un réseau connu homogène et bien réparti dans les systèmes GPS (WGS 84) et local (Nord Sahara).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les personnes qui ont contribué dans les traitements géodésiques particulièrement MM Aarizou (calcul de géoïde), Zeggai (transformations) et Djeriah (détermination et traitement GPS).

Bibliographie

- G. BALMINO
Description mathématique relative aux logiciels GBSYNTP et GBSYNTM
Note technique - BGI - Février 93
- D. CLAVET - M. LASSÈRE - J. POULIOT
GPS Control for 1/50000 Scale Topographic Mapping satellite Images
Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol 59 N°1 - Janvier 93 pp107 - 111
- H. GUICHARD
Etude sur la précision de modélisation des images SPOT
Bulletin SFPT n° 90, 1993
- P. HOTTIER - M. BATTAH
Transformation d'un couple de scènes SPOT en un couple d'images épipolaires
SFPT N°123 - 1991
- S. KAHLUCHE
Transformation entre systèmes de référence géodésiques
Journées d'études CNTS - INC - Alger Février 1991.
- F.Z. LOHMAR
World Geodetic System 1984
In GPS Techniques Applied to Geodesy and Surveying - Darmstadt April 1988
- H. MORITZ
Geodetic Reference System 1980
Bulletin Géodésique Vol 54 pp 395-405
- T. TOUTIN - JP. LEMIEUX
Le système de rectification des images de télédétection
Canadian Journal of Remote Sensing - Vol 17 N° 4 - 1991.
- Y. SETO
Geometric correction algorithms for satellite imagery
IEEE, vol 29 mars 1991
- A. ZEGGAI S. KAHLUCHE
Transformation entre systèmes de référence géodésiques
Bulletin d'information N°5 CNTS Juillet 1992.