

Méthodologie de contrôle et d'amélioration des réseaux géodésiques 2-D

Bachir GOURINE, Boualem GHEZALI et Habib TAIBI, Algérie

Mots clé: Ajustement, Contrainte, S-transformation, Déformabilité, Déformation.

RÉSUMÉ

Les réseaux géodésiques nationaux issus d'observations terrestres, essentiellement des pays étendus tel que l'Algérie, ne sont pas homogènes et présentent des problèmes d'échelle et d'orientation. L'objectif de cet article est de présenter une méthodologie de contrôle et d'amélioration d'un réseau géodésique local. Le but est d'évaluer la valeur du réseau et d'asseoir une meilleure qualité au système géodésique national. La chaîne de traitement et d'analyse des observations géodésiques, présentée dans cet article, comporte les étapes suivantes:

- Détection des fautes dans les observations utilisant la méthode du simplexe modifié
- Ajustement du réseau géodésique terrestre (contraintes et équations de condition)
- Analyse stochastique du réseau
- Evaluation de la fiabilité du réseau
- Evaluation de la déformabilité et de la déformation du réseau
- Amélioration de la qualité du réseau estimé par le biais de la S-transformation

Les tests effectués ont porté sur un canevas de 13 points (1^{er} ordre) du réseau géodésique Algérien (Nord Sahara 1959), situé au Nord-Ouest du pays. Les données utilisées sont constituées de 50 observations angulaires, 01 distance et 01 mesure astronomique.

SUMMARY

The national geodetic networks resulting from terrestrial observations, particularly for the large countries such as Algeria, are not homogeneous and present problems of scale and orientation. The idea of the paper is to present a methodology of control and improvement of a local geodetic network. The objective assigned is to evaluate the value of the network and to achieve a better quality to the national geodetic system. The data processing and analysis procedure of the geodetic observations, detailed in this article, comports the following steps:

- Blunder detection in the observations vector by using the modified simplex method
- Adjustment of the terrestrial geodetic network (constraints and condition equations)
- Stochastic analysis of the network
- Evaluation of the reliability of the network
- Evaluation of the deformability and the deformation of the network
- Improvement of the quality of the estimated network by the S-transformation.

The tests carried out only on a set of 13 first order points of the national geodetic network (Nord Sahara 1959), localised at the North-West of Algeria. The original data used are composed of 50 angular observations, 01 distance and 01 astronomical measurement.

Méthodologie de contrôle et d'amélioration des réseaux géodésiques 2-D

Bachir GOURINE, Boualem GHEZALI et Habib TAIBI, Algérie

1. INTRODUCTION

La géodésie tout en gardant son imprégnation scientifique et militaire, représente un outil indispensable à la mise en place de l'infrastructure économique par l'intermédiaire de documents cartographiques de plus en plus précis et détaillés, obtenus grâce à l'établissement, par des techniques terrestres ou spatiales, d'un canevas de points d'appui couvrant toute la région considérée. Quelque soit la technique utilisée, le but recherché est de réaliser un réseau géodésique homogène et précis qui servira de base pour différentes études à caractère utilitaire et scientifique (applications aux travaux de mise en place de canevas géodésiques spécifiques: cartographie, auscultation d'ouvrages d'art et de sites industriels, surveillance sismique, réseaux cadastraux, aménagement du territoire, etc.).

Les techniques d'observations classiques utilisées dans le cadre de la réalisation des réseaux géodésiques nationaux (anciens), sont des mesures terrestres et astronomiques (angles, distances et azimuts) permettant une orientation et une mise à l'échelle du réseau. Ces réseaux présentant certaines déformations en orientation et en échelle qui sont mises en évidence par des techniques modernes, nécessitent certaines précautions dans la construction d'un système géodésique local (planimétrique) issu d'observations terrestres. En d'autres termes, il faut définir et mettre en œuvre un processus d'ajustement d'un réseau géodésique classique afin d'asseoir une qualité acceptable au système géodésique et d'assurer une précision homogène sur l'ensemble du canevas.

L'aboutissement à la connaissance précise de la valeur du réseau planimétrique national basé sur des mesures terrestres et à l'amélioration de sa qualité nécessite:

- un outil de détection de faute pour assurer la fiabilité des observations;
- un modèle d'ajustement pour établir un réseau géodésique homogène et précis;
- des outils d'analyse du réseau estimé: tests statistiques, fiabilité, déformation et amélioration de la qualité.

Les tests effectués sont basés sur un jeu de données de 13 points géodésiques du 1^{er} ordre du système géodésique Algérien (Nord Sahara 1959). Les résultats obtenus ont montré la puissance et l'efficacité de la méthodologie adoptée dans cet article.

2. METHODOLOGIE

Les résultats escomptés dans le cadre de cet article portent essentiellement sur la détermination de la valeur d'un réseau planimétrique national et sur l'amélioration de sa qualité. La méthodologie adoptée comporte six étapes:

- Détection des fautes au niveau des observations: méthode du simplexe modifié;
- Ajustement du réseau géodésique: approche des contraintes minimales et intégration des équations de condition aussi bien sur l'orientation que sur la mise à l'échelle;

- Analyse stochastique du réseau;
- Evaluation de la fiabilité du réseau;
- Evaluation de la déformabilité et de la déformation du réseau;
- Amélioration de la qualité du réseau estimé par le biais de la S-transformation.

2.1 Détection des fautes

Il est important de disposer d'un jeu d'observations bien fait et bien filtré pour pouvoir estimer les paramètres d'une façon correcte et précise. Généralement, les erreurs accidentelles sont des erreurs aléatoires non modélisables, qu'on souhaite minimiser. Cependant, la présence de fautes est difficile à localiser par le biais de l'ajustement en norme L2, puisque l'estimateur des moindres carrés est extrêmement sensible aux fautes de mesures (Pecron, 1997). En effet, cette méthode a la tendance de diluer les effets des fautes dans le vecteur des observations qui engendrent des erreurs dans les résultats. Par contre, le critère d'optimisation en norme d'ordre L1 est réputé plus robuste c'est à dire moins sensible aux fautes de mesure. C'est pourquoi, on filtre l'ensemble des observations par la norme L1, en utilisant la méthode du simplexe modifié pour obtenir un jeu d'observations nettoyé et homogène, puis on utilise la norme L2 pour l'estimation finale de la solution (Bonnell, 1999). Cette chronologie de travail est justifié par les raisons suivantes (Coulot, 2002):

- L'ajustement en norme L1 est un processus itératif, il peut s'avérer gourmand en temps de calcul et en plus il ne permet pas de construire une statistique explicite.
- L'ajustement en norme L2 conduit à des équations linéaire faciles, ce n'est pas le cas de la norme L1 quand le système devient grand. Il permet aussi une analyse statistique pour juger de la qualité des paramètres estimés et donc améliorer de ces dits paramètres.

2.2 Ajustement du réseau

En géodésie, on cherche à avoir un réseau géométrique plus voisin du réseau observé. La géométrie du réseau est exprimée par un certains nombre d'équations de condition (ex., équation de Laplace et accord de base) qui assurent l'orientation et la mise à l'échelle du réseau géodésique. Pour ajuster l'ensemble des observations du réseau sous certaines *conditions en orientation et en échelle*, la méthode de résolution est basée sur la substitution des inconnues issues du système d'équations de condition dans le système des relations d'observations (Perelmuter, 1979). On a le système d'équations linéaires qui s'exprime par:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Relations d'observations: } A_{(m,p)} X_{(p)} - L_{(m)} = V_{(m)} \\ \text{Equations de condition: } C_{(q,p)} X_{(p)} + D_{(q)} = 0 \end{array} \right\} (1)$$

avec, A est la matrice de configuration, C est la matrice de coefficients des équations de condition, X est le vecteur des paramètres (inconnues), L est le vecteur des mesures des relations d'observations, D est le vecteur des mesures des relations de condition et V est le vecteur des résidus. Les quantités m , p , q , représentent les nombres d'observations, d'inconnues et d'équations de condition, respectivement.

Par la méthode de subdivision, le système (1) peut s'écrire sous la forme suivante:

$$\left. \begin{array}{l} A_{1(m, p-q)} X_{1(p-q)} + A_{2(m, q)} X_{2(q)} - L_{(m)} = V_{(m)} \\ C_{1(q, p-q)} X_{1(p-q)} + C_{0(q, q)} X_{2(q)} + D_{(q)} = 0 \end{array} \right\} (2)$$

La solution du système (2) comporte deux étapes:

(a) Calcul du vecteur inconnu X_1 par la méthode des moindres carrés pondérés:

$$\hat{X}_1 = (\bar{A}^t P \bar{A})^{-1} \cdot \bar{A}^t P \bar{L} \quad (3)$$

où, $\bar{A} = A_1 - A_2 C_0^{-1} C_1$ et $\bar{L} = A_2 C_0^{-1} D + L$.

(b) Substitution du vecteur \hat{X}_1 dans l'équation (3) et calcul du vecteur inconnu X_2 :

$$X_2 = -C_0^{-1} (C_1 \hat{X}_1 + D) \quad (4)$$

Où, la matrice C_0 est supposée non singulière. On remarque que le calcul du vecteur inconnu X_2 est relativement simple (l'inverse de C_0 facile à calculer puisque sa dimension dépend uniquement du nombre d'équations de condition).

Afin de *caler le réseau* sur le datum de référence, il est important de choisir une définition appropriée (introduction de contrainte). Généralement, on utilise la méthode des *contraintes classiques* qui pose le problème du choix des points d'appui et la dépendance du réseau à ces points.

Une autre approche plus appropriée au calage du réseau géodésique est celle des *contraintes minimales* reconnue par son efficacité pour résoudre le problème de singularité des matrices normales, de fournir ou compléter la définition du datum de référence et de préserver la qualité originale des observations et la forme géométrique du réseau. Cette approche, qui est utilisée pour un *ajustement en réseau libre*, a été adoptée dans notre article.

Le modèle mathématique pour les réseaux libres a la forme suivante, d'après l'équation (1):

$$A_{(m,p)} \cdot X_{(p)} - L_{(m)} = V_{(m)} \quad (5)$$

On peut écrire, comme précédemment, d'après l'équation (2):

$$A_{1(m,p-d)} \cdot X_{1(p-d)} + A_{2(m,d)} \cdot X_{2(d)} - L_{(m)} = V_{(m)} \quad (6)$$

d signifie le défaut de rang de la matrice A . L'équation des contraintes minimales a la forme suivante:

$$A_{(m,p)} \cdot G_{(u,d)} = 0 \quad (7)$$

La matrice G peut s'écrire sous la forme: $G_{(p,d)} = \begin{pmatrix} G_{1(p-d,d)} \\ -I_{(d,d)} \end{pmatrix}$

Par conséquent: $A_1 \cdot G_1 - A_2 \cdot I = 0 \quad (8)$

Avec, $G_1 = (A_1^T \cdot A_1)^{-1} A_1^T \cdot A_2 = N_{11}^{-1} \cdot N_{12}$

Basée sur le principe du minimum de la trace de la matrice variance covariance des paramètres, les contraintes peuvent être écrites par:

$$G_1^T \cdot X_1 - X_2 = 0 \quad (9)$$

Par combinaison de l'équation (6) avec la condition (9.b), on obtient le système suivant:

$$\left. \begin{array}{l} A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 - L = V \\ G_1^T \cdot X_1 - X_2 = 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

L'application de la méthode des moindres carrés pondérées au système (10), donne:

$$X_1 = (\bar{A}^T \cdot P \cdot \bar{A})^{-1} \cdot \bar{A}^T \cdot L \quad (11)$$

$$\text{et, } X_2 = G_1^T \cdot X_1 \quad (12)$$

$$\text{avec: } \bar{A} = A_1 + A_2 \cdot G_1^T$$

La matrice des cofacteurs correspondante s'écrit comme suit:

$$Q_{x,x} = \begin{pmatrix} Q_{x1,x1} & Q_{x1,x1} \cdot G_1 \\ G_1^T \cdot Q_{x1,x1} & G_1^T \cdot Q_{x1,x1} \cdot G_1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\text{avec: } Q_{x1,x1} = (\bar{A}^T \cdot P \cdot \bar{A})^{-1}$$

2.3 Analyse du réseau

Pour pouvoir juger de la qualité du réseau après l'ajustement, il est nécessaire de construire des tests statistiques sous certaines hypothèses (Coulot, 2002). L'analyse statistique de cette qualité est divisée en deux parties:

- (a) Analyse de la qualité des observations:
 - Test de *Student* des grosses erreurs des observations;
 - Test du *Khi-2* de la valeur du facteur de variance à posteriori.
- (b) Analyse de la qualité des paramètres estimés:
 - Précisions des paramètres du réseau;
 - Ellipses d'erreurs et test des résidus estimés.

2.4 Fiabilité du réseau

Généralement, la fiabilité d'un réseau représente la capacité du réseau de détecter et de résister contre les grosses erreurs dans les observations. A cet égard, on distingue la fiabilité interne et la fiabilité externe. Elle dépend de la géométrie du réseau et de la précision des observations (Seemkooei, 2001). A ce niveau on cherche à avoir un réseau optimal, en terme

de fiabilité, dont on veut minimiser la magnitude des erreurs non détectables dans les observations et par conséquent, minimiser les effets de ces erreurs sur les paramètres estimés.

La fiabilité interne est évaluée par la taille des erreurs marginales dans la $i^{\text{ème}}$ observation l_i , exprimée par (Carosio et al., 1995); (Dominici et al., 1995) et (Gourine et al., 2001):

$$\nabla_{li} = \sigma_{vi} \cdot \frac{\delta_0}{\sqrt{r_i}} \quad (14)$$

- σ_{vi} : écart type du résidu de l'observation l_i ;
- r_i : nombre de redondance de l'observation l_i ;
- δ_0 : paramètre d'excentrement et il fonction des erreurs de I^{ère} et II^{ème} espèce (α, β).

Les nombres de redondance des observations sont les éléments diagonaux de la matrice R :

$$R = I - A(A^t P A)^{-1} A^t P \quad (15)$$

Il prennent des valeurs comprises entre 0 et 1. La valeur nulle indique qu'il n'y a pas de redondance de l'observation considérée et qu'une erreur sur cette observation ne peut pas être découverte.

La fiabilité externe qui est l'influence de la faute ∇_{li} sur les coordonnées du réseau, est représentée par la relation suivante (Carosio et al., 1995); (Gourine et al., 2001):

$$\nabla_x = (A^t P A)^{-1} A^t P \nabla_{li} \quad (16)$$

On peut dire que le réseau géodésique devrait être conçu tel que:

- (a) les grosses erreurs doivent être détectées et éliminées. Une erreur marginale, dans une observation, doit être petite en comparaison avec son écart type; et
- (b) l'effet de cette erreur sur les coordonnées doit être le plus petit que possible.

2.5 Déformabilité et la déformation du réseau

Une autre méthode d'évaluation des effets des erreurs sur le réseau est l'*analyse de robustesse*. Elle est basée sur le concept du tenseur de déformation. Ce dernier définit le gradient du champ des déplacements. Etant donné un champ de déplacement bidimensionnel $U(x,y) = (u,v)^t$, en fonction de la position $X = (x, y)^t$, la matrice du tenseur de déformation E est définie par (Seemkooei, 2001); (Vanicek et al., 2001):

$$E = \nabla(U) = \frac{\partial U(x, y)}{\partial X} = \begin{pmatrix} e_{ux} & e_{uy} \\ e_{vx} & e_{vy} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Elle contient toute l'information de la déformation, mais reste très difficile à interpréter. Afin de faire une interprétation facile du tenseur de déformation, différentes grandeurs scalaires peuvent être déduites de la matrice E appelées les primitives de la déformation, telles que:

- La dilatation ou tenseur moyen: $\lambda = \frac{1}{2}(e_{ux} + e_{vy})$;
- Le cisaillement total γ qui est la moyenne géométrique des cisaillements pur τ et simple v :

$$\tau = \tau_{xy} = -\tau_{yx} = \frac{1}{2}(e_{ux} - e_{vy}); v = v_{xy} = -v_{yx} = \frac{1}{2}(e_{uy} + e_{vx})$$
 et

$$\gamma = \gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \sqrt{\tau_{xy}^2 + v_{xy}^2} = \frac{1}{2}\sqrt{(e_{ux} - e_{vy})^2 + (e_{uy} + e_{vx})^2}$$
 ;
- La rotation différentielle locale: $\omega = \frac{1}{2}(e_{uy} - e_{vx})$.

L'analyse de robustesse utilise la fiabilité externe du réseau comme étant un champ de déplacement local. Les gradients de ce champ sont évalués séparément pour chaque coordonnées x et y . Ainsi, on détermine les composantes de la matrice du tenseur de déformation correspondante. On s'intéresse, lors de l'analyse et l'interprétation des résultats, aux valeurs maximales des primitives de déformations; notées $(\lambda_{max}, \gamma_{max}, \omega_{max})$. Elles décrivent la solidité du réseau en échelle, en configuration, et en orientation, respectivement.

Pour pouvoir juger la significativité de ces paramètres, on est amené à estimer la déformabilité du réseau. La déformabilité d'un réseau est l'inverse de sa stabilité, dans le sens où, un réseau déformable est un réseau sensible aux incertitudes des observations. Elle est exprimée par la moyenne à laquelle on ajoute une tolérance (2,57 fois l'écart type) des primitives de déformation virtuelle obtenues sur un jeu de simulations de Monté Carlo. Cette définition permet de recouvrir 99% des déformations virtuelles, dans l'hypothèse que l'échantillon calculé suive une loi normale. D'après (Michel V., 2001):

$$\lambda_{def} = \bar{\lambda} + 2,57\sigma_{\lambda}; \gamma_{def} = \bar{\gamma} + 2,57\sigma_{\gamma}; \omega_{def} = \bar{\omega} + 2,57\sigma_{\omega}$$

Par ailleurs, le degré de signification des différentes primitives est:

$$\Sigma_{\lambda} = \frac{\lambda - \lambda_{def}}{\lambda_{def}}; \Sigma_{\gamma} = \frac{\gamma - \gamma_{def}}{\gamma_{def}}; \Sigma_{\omega} = \frac{\omega - \omega_{def}}{\omega_{def}}$$

Σ prend une valeur entre -1 et $+\infty$, telle que:

- $\Sigma < 0$: la déformation n'est pas significative, elle est la conséquence d'un bruit de mesure dans les observations.
- $\Sigma > 0$: la déformation est significative.
- $0 < \Sigma < 1$: la déformation est de l'ordre de la déformabilité, tout en étant significative.

2.6 Amélioration de la qualité du réseau par la S-transformation

Après l'ajustement des différentes observations, la matrice variance covariance des paramètres estimés $C_{\hat{x}}$ reste entachée d'erreurs externes, dues aux effets non modélisables et/ou les réductions négligées (Leick, 1990). Ces effets exercent une influence systématique sur les résultats qui se traduisent, dans notre cas, par une translation suivant les deux axes x et y , une rotation autour de l'axe z et une mise à l'échelle du réseau estimé (Welsch, 1986). Cependant, pour extraire la précision réelle ou interne du réseau, notée $C_{\hat{x}}^i$, à partir de la matrice $C_{\hat{x}}^e$, il faut appliquer, à cette dernière, une transformation de similitude appelée S-Transformation (Gourine et al., 2001), telle que:

$$S = I - G(G^t \cdot G)^{-1} G^t \quad (18)$$

Avec, $G = [G_1 \ G_2 \ \dots \ G_n]$ où, n est le nombre de points du réseau.

I est la matrice identité et G représente la matrice des contraintes sur l'origine, sur l'orientation et sur l'échelle du réseau, telle que:

$$G^t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ -y_1^0 & x_1^0 & \dots & -y_p^0 & x_p^0 \\ x_1^0 & y_1^0 & \dots & x_p^0 & y_p^0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{Translation en x} \\ \text{Translation en y} \\ \text{Rotation} \\ \text{Facteur d'échelle} \end{array}$$

Où (x_i^0, y_i^0) sont les coordonnées approchées du $i^{\text{ème}}$ point.

Les paramètres internes du réseau sont obtenues par une S-transformation des paramètres estimés: $X^i = S \cdot \hat{X}$

Ainsi, la matrice des précisions internes est obtenue, par la formule suivante: $C_{\hat{x}}^i = S \cdot C_{\hat{x}}^e \cdot S^t$

3. TESTS EFFECTUES

Les données géodésiques utilisées sont constituées de 52 observations (50 lectures horizontales, une distance amplifiée et un azimut de Laplace) obtenues à partir de 13 points géodésiques du premier ordre situés dans la région Ouest du pays. Le jeu d'observations de cette zone test a été fourni par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT), en tant qu'organisme responsable des données géodésiques, en Algérie. Les précisions des mesures d'angle, de distance et d'azimut sont de l'ordre de ± 07 dmgr, $\pm(5\text{cm} + 10^{-5} \cdot D)$ et ± 3 dmgr, respectivement. Le référentiel géodésique utilisé pour la planimétrie est le système géodésique National dit *Nord Sahara 1959* et la projection cartographique employée est UTM (Universal Transverse Mercator), calculée sur l'ellipsoïde Clarke 1880A. La figure (1) illustre la configuration du réseau test.

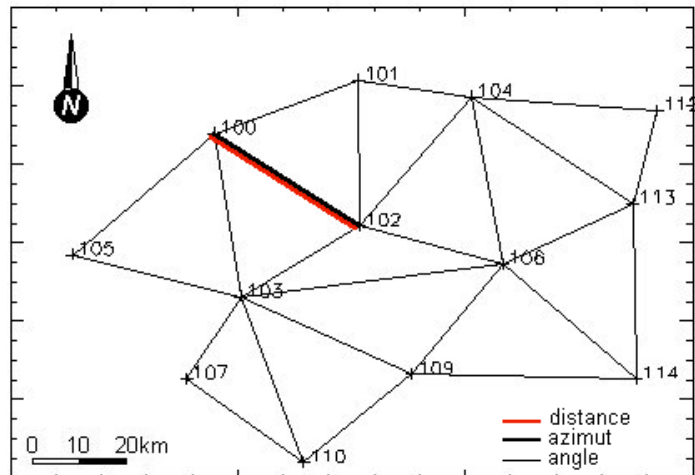


Figure 1: Configuration du réseau géodésique de premier ordre

Pour filtrer le vecteur des observations afin de détecter d'éventuelles fautes, on a utilisé l'algorithme du simplexe modifié. A priori, il n'existe pas d'observations aberrantes. Car en exécutant, l'ajustement en norme L1 et en norme L2 sur les observations, séparément, on a constaté que les résidus issues des deux algorithmes ont le même ordre et n'indiquant en rien la présence de fautes, voir figure (1.a). Cela veut dire, que les observations sont bien faites et peuvent être utilisées, directement, pour l'estimation des paramètres du réseau.

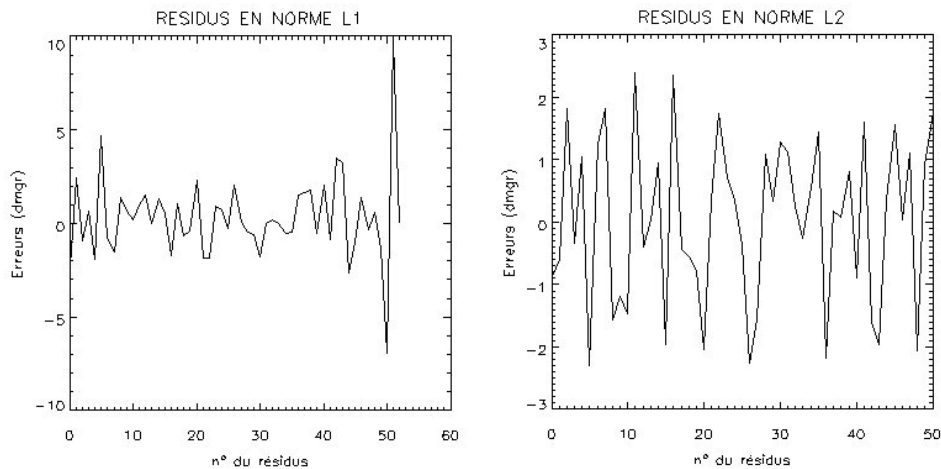


Figure 2.a: Les résidus des observations déterminés par la méthode du simplexe modifié (norme L1) et celle des moindres carrés (norme L2)

Néanmoins, pour illustrer la robustesse de la norme L1 par rapport à la norme L2, on a effectué le test suivant: on a simulé des fautes dans le vecteur des observations de l'ordre de 0,4 et 0,05 grades, simultanément. Leur détection était très efficace en utilisant l'ajustement en norme L1, par contre ces fautes sont noyées dans l'ensemble des résidus en norme L2, comme il est montré dans la figure (1.b).

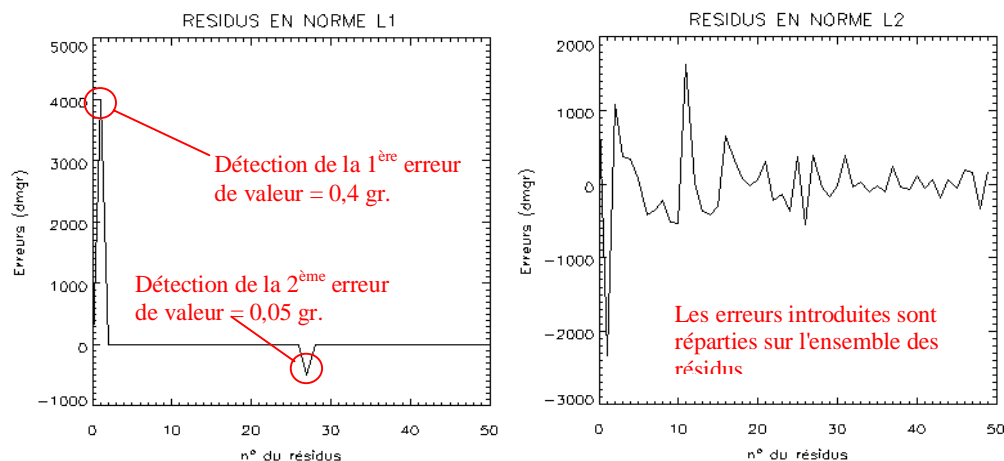


Figure 2.b: Détection des fautes simulés sur les observations par les deux méthodes d'ajustement

Il est clair que l'ajustement en norme L1 présente un outil indispensable pour filtrer et nettoyer le vecteur des observations. Une fois que cette opération est effectuée, on entame l'estimation des paramètres du réseau et leurs précisions par la méthode des moindres carrés.

Après l'ajustement avec contraintes minimales du réseau, on a obtenu les résultats suivants:

| Nombre des paramètres | Nombre de | | Nombre des paramètres du Datum 'd' | Ecart type à posteriori σ_0 | Ecart type à priori $\hat{\sigma}_0$ | Test du Khi-2 | Test de Student |
|-----------------------|-------------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------|
| | observation | condition | | | | | |
| 39 | 51 | 01 | 04 | 10 dmgr | 03 dmgr | positif | 01 observation suspecte |

Le test du khi2 est positif. Donc, l'ensemble des résidus suivent une loi normale (i.e., l'hypothèse nulle est satisfaite) et l'ajustement est jugé correct. Le test de Student a révélé la présence d'une observation suspecte hors l'intervalle de confiance [-3dmgr , +3dmgr].

| Paramètres | Précision | |
|-------------|-----------|--------|
| | Min | Max |
| dV0 (dmgr) | ± 1 | ± 2 |
| dx (cm) | ± 8.9 | ± 18.5 |
| dy (cm) | ± 5.3 | ± 17.6 |
| Position 2D | ± 11.0 | ± 23.3 |

Tableau 1: Précisions des paramètres du réseau.

Le tableau (1) montre que la précision géodésique est bien respectée, pour ce type de réseau. On remarque que la précision angulaire est bien meilleure que celle de la planimétrie. En effet, la précision maximale de ± 2dmgr représente seulement une précision métrique de ±12cm, pour une portée de géodésie classique de premier ordre. Ceci reflète la qualité des observations angulaires par rapport aux mesures de distance qui est étroitement liée aux types des appareils topographiques utilisées et aux procédés de calculs.

Les ellipses d'erreurs expriment le domaine de confiance contenant la vraie position, avec une probabilité de 95%, voir figure (3).

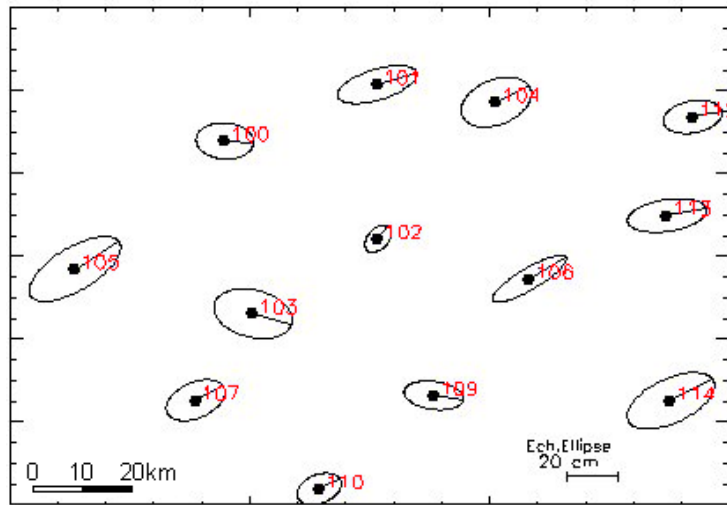


Figure 3: Ellipses d'erreurs à 95% de probabilité

L'effet des grosses erreurs ou des erreurs marginales, sur l'ensemble des coordonnées est illustré par le tableau (2).

| Fiabilité externe | Min | Max |
|----------------------|-------|-------|
| dv0 (dmgr) | - 1.0 | + 1.0 |
| dx, dy (cm) | - 9.2 | + 5.2 |
| $\sqrt{dx^2 + dy^2}$ | 0.0 | + 9.3 |

Tableau 2: Fiabilité externe du réseau

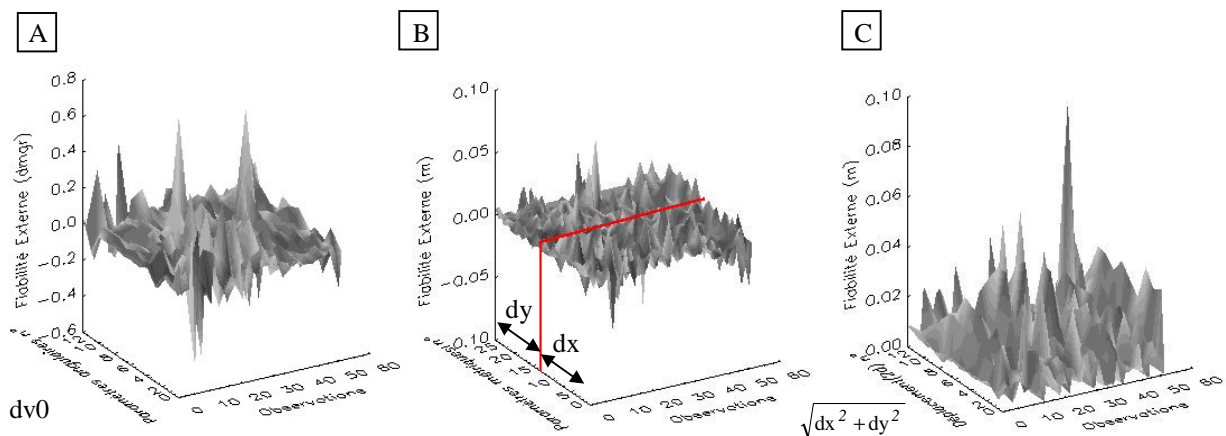


Figure 4: Fiabilité externe du réseau, (a) fiabilité externe des paramètres angulaires (b) fiabilité externe des paramètres métriques en x et en y (c) fiabilité externe des positions 2D.

La figure (4) illustre l'ensemble des fiabilités externes du réseau. Chaque erreur marginale; fiabilité interne de l'observation; exerce un effet différent sur l'ensemble des paramètres du réseau. On a séparé entre les effets sur les paramètres angulaires $dV0$ et sur les paramètres métriques (dx et dy). On remarque que ces effets sont de l'ordre de ± 5 à ± 10 cm. On peut juger qu'il n'y a pas une influence significative des erreurs marginales sur le réseau, car elles sont du même ordre que les imprécisions des paramètres voire même inférieures.

Un autre moyen d'évaluer l'effet des erreurs sur le réseau est l'analyse de robustesse qui s'appuie sur le concept de la déformation. La robustesse est exprimé en terme d'échelle, de configuration et d'orientation, voir figure (5).

| | λ (ppm) | γ (ppm) | $\delta\omega = \omega_i - \omega_0$ (dmgr.) |
|------|-----------------|----------------|--|
| Min. | - 0.03 | 0.00 | - 0.43 |
| Max. | 0.01 | 0.06 | 0.52 |
| Moy. | - 0.00 | 0.02 | - 0.08 |

Tableau 3: Statistique des mesures de la robustesse du réseau

$\delta\omega$ étant la rotation différentielle propre de chaque triangle et ω_0 est la rotation de bloc commune pour l'ensemble du réseau qui est égale à -0.1 dmgr.

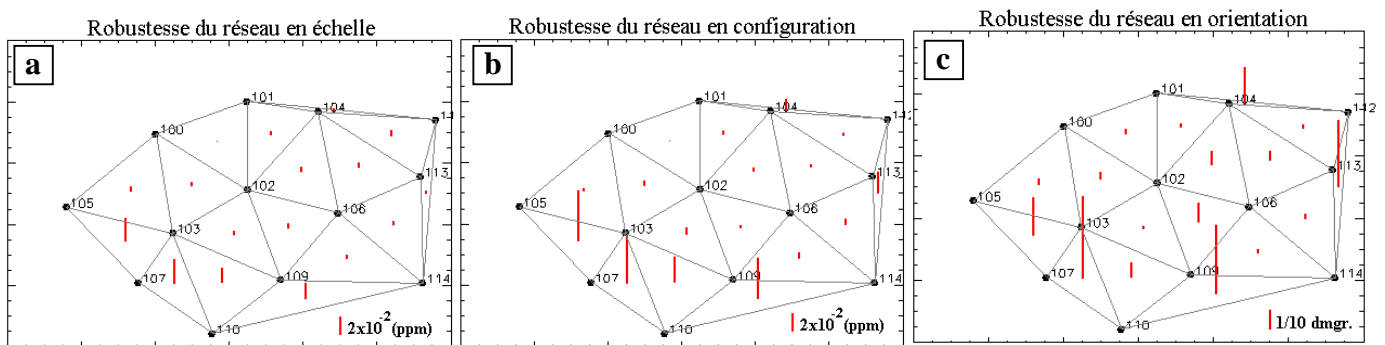


Figure 5: Robustesse du réseau, (a) en échelle (dilatation), (b) en configuration (cisaillement), (c) en orientation (rotation différentielle propre)

La figure (5) représente la robustesse du réseau qui est caractérisée par les valeurs absolues des trois quantités primitives de déformation, pour chaque triangle. Tant que ces valeurs sont grandes tant que la robustesse est moindre, et par conséquent on peut distinguer les zones de faiblesse dans le réseau. Dans ces zones, les erreurs sont de l'ordre de $\pm 6 \times 10^{-2}$ ppm ($\sim \pm 0.3$ cm), en échelle et en configuration et de l'ordre de $\pm 5 \times 10^{-1}$ dmgr ($\sim \pm 4$ cm), en orientation.

Après un calcul de la déformabilité du réseau en échelle, en configuration et en orientation, pour chaque triangle, on a constaté que le degré de significativité est toujours inférieur à zéro, ce qui confirme que les déformations obtenues sont non significatives (i.e., leurs effets sont négligeables sur le réseau) et sont dues à un bruit de mesures. Cette remarque rejoint la constatation faite sur les résultats de l'analyse de la fiabilité du réseau.

Enfin, pour minimiser ces effets externes sur l'ensemble du réseau, on applique une S-transformation sur les paramètres et leurs variances covariances. La précision externe obtenues sur les coordonnées est de l'ordre de:

$$\bar{\sigma}_x = \pm 13.2 \text{ cm}, \quad \bar{\sigma}_y = \pm 10.0 \text{ cm}.$$

La précision interne du réseau, après l'application de la S-transformation, est de l'ordre de:

$$\bar{\sigma}_x^i = \pm 11.1 \text{ cm}, \quad \bar{\sigma}_y^i = \pm 10.3 \text{ cm}.$$

| | Avant la S-transformation | | Après la S-transformation | |
|-----|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| | a (cm) | b (cm) | a (cm) | b (cm) |
| Min | 7.1 | 4.4 | 8.7 | 3.7 |
| Max | 22.0 | 11.0 | 16.9 | 9.3 |
| Moy | 14.6 | 7.8 | 13.5 | 7.3 |

Tableau 3: Comparaison entre les ellipses d'erreurs

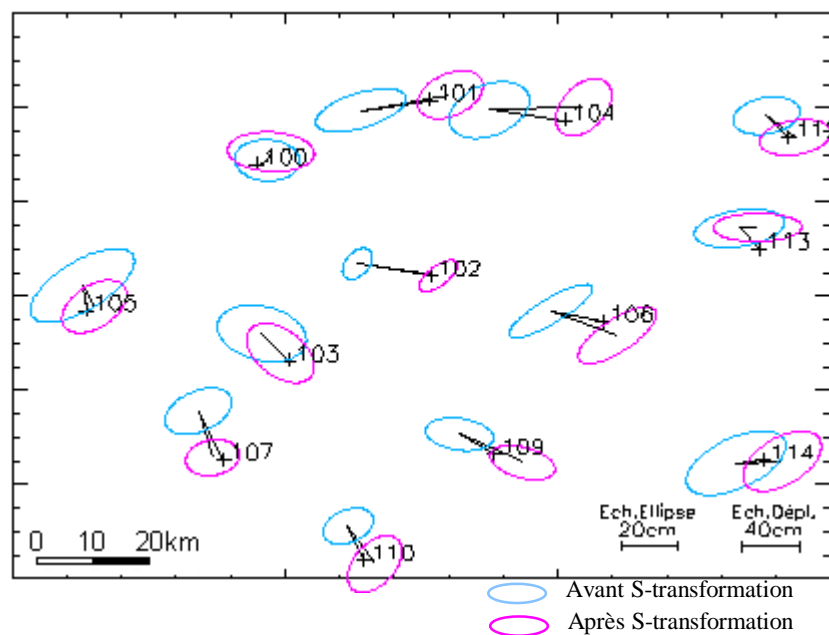


Figure 6: Comparaison entre les ellipses d'erreurs avant et après l'application de la S-transformation

La figure (6) montre une comparaison entre les ellipses d'erreurs avant et après l'application de la S-transformation sur le réseau. Une légère amélioration en précision, de l'ordre de 8% en x et de 6% en y, est mise en évidence. Cette transformation a permis de minimiser les écarts entre les coordonnées ajustées et les coordonnées approchées. On remarque bien que sans les effets des erreurs externes, la solution du réseau s'approche des valeurs approchées.

4. CONCLUSION

La méthodologie décrite a permis de contrôler la consistance des données, d'estimer et d'améliorer la qualité du réseau afin d'évaluer sa valeur et sa précision interne. En effet, les tests effectués sur un réseau, composé de 13 points de premier ordre de la triangulation nationale, ont révélé que:

- la précision géodésique est bien respectée pour l'ensemble des points, qui est de l'ordre de ± 5 cm à ± 20 cm
- les erreurs marginales sont de l'ordre de ± 5 cm à ± 10 cm
- les effets de ces erreurs, sur les coordonnées du réseau, sont de l'ordre de ± 10 cm
- la valeur du réseau en terme de robustesse en échelle, en configuration et en orientation est de l'ordre de ± 0.1 cm, ± 0.3 cm, ± 4 cm, respectivement
- Une légère amélioration en précision de l'ordre de 8% en x et de 6% en y , soit 10% en planimétrie.

Ces résultats reflètent la bonne qualité du réseau test et sa robustesse. Il est important de souligner que le jeu de données utilisé, dans nos traitements, est restreint et ne reflète pas la réalité d'un réseau géodésique national qui en général comporte quelques milliers de points. De ce fait, il est recommandé d'intégrer un processus d'exécution des calculs d'ajustement de grands blocs et de tester cette méthodologie pour un réseau étendu (cas de l'Algérie), afin de confirmer sa puissance.

REFERENCES

- Bonnel T., 1999: Combinaison de jeux de coordonnées de stations terrestres en norme L1, Mémoire de stage de fin d'études ESGT, Juin 1999.
- Carosio A., Reis O., 1995: Méthodes géodésiques et modèles mathématiques pour l'implantation des nouvelles transversales alpines, Revue XYZ -n° 62- 1^{er} trimestre 1995.
- Coulot D., 2002: Initiation théorique et pratique à la méthode d'estimation par moindres carrés, Notes de cours, Ecole d'été du GRGS, Septembre 2002.
- Dominici, A. Stoppini, M. Unguendoli, F. Radicioni, 1995: Precision and reliability versus surplus measurements in GPS networks, Bollettino di Geodesia e Scienze Affini N° 4.
- Gourine B., Ghezali B., Taibi H., 2001: Combinaison d'observation terrestres et spatiales (GPS) pour des application géodésiques, Revue des technologies avancées, CDTA, n°13, pp.52-60, juillet 2001.
- Leick A., 1990: GPS satellite surveying, édition John Wiley & Sons, New York, 1990.
- Michel V., 2001: Utilisation des tenseurs pour la représentation des déformations et de leur degré de signification, rapport de stage de 3^e année du cycle I.T.G.C.E, Ecole Nationale des Sciences géographiques (ENSG), octobre 2001.
- Niemeier W., Tengen D., 1990: PANDA, the software package for precise engineering networks, second accelerator workshop, Desy, Hamburg, septembre 1990.
- Pecron S., 1997: Auscultation des aérorefrigérants de centrales nucléaires, évolutions possibles des méthodes, mémoire d'ingénieur, ESGT, soutenu le 27 juin 1997, France.
- Peremulter A., 1979: Adjustment of free networks, Bulletin géodésique volume 53, pp.291-296.

- SNAP, 1999: www.gmat.unsw.edu.au/snap, site internet sur les satellites de navigation et le positionnement, School of Surveying & Spatial Information Systems, The University of New South Wales, Australie, Mai 1999.
- Seemkoeei A. A., 2001: Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks, Springer Verlag, volume 75, numéro 4, juillet 2001.
- Vanicek P., Craymer MR, Krakiwsky EJ, 2001: Robustness analysis of geodetic horizontal networks, Springer Verlag, volume 75, numéro 4, juillet 2001.
- Welsch W., 1986: Problems of accuracies in combined terrestrial and satellite control networks, Bulletin Géodésique (1986) 60: 193-203.

BIOGRAPHICAL NOTES

Mr. Bachir Gourine, Magister student (option: Geodesy), in Laboratory of Geodesy, National Centre of Spatial Techniques (CNTS), Arzew / Algeria. He teaches geodesy and micro-triangulation since 1995, at the CNTS. The main subjects of his research concern the combination of the terrestrial and spatial (GPS) observations for geodetic applications, the approaches of transformation between national and GPS coordinates for cadastral works, the modelling and evaluation of the network deformations. The subject of his thesis is about the global adjustment of the national geodetic network.

Mr. Boualem Ghezali, researcher in the Laboratory of Geodesy of the National Centre of the Spatial Techniques (CNTS), Arzew / Algeria. Domains of intervention, concerning geodesy, articulate around themes of research relative to the precise positioning by spatial techniques and to the geodesic data treatments. The achieved works are about the technical GPS and its applications in geodesy, in geodynamics and works of large scale, on the development of tools related to the geodesic astronomy and about the technical VLBI for the geodesic applications. In parallel of research activities he teach courses about "Geodesic Astronomy" and "Reference Frames" for the engineer students and Magister.

Mr. Habib Taibi, has his Magister diploma in geodesy since 2000. He works at the National Center of Spatial Techniques (CNTS - Arzew- Algeria) as researcher to the laboratory of geodesy. Except the teaching that he dispenses in the CNTS since 1988. His main activity is in geodesy, particularly in geodetic network processing and adjustment, in GPS and auscultation, in signal processing using wavelet transformation (satellite imagery domain) and in the VLBI for cycle slip detection.

CONTACTS

Mr. Bachir Gourine
Mr. Boualem Ghezali
Mr. Habib Taibi
National Centre of Spatial Techniques (CNTS)
Laboratory of Geodesy
1 Avenue de la Palestine BP 13
Arzew, 31200
ALGERIA.
Tel. + 213 41 47 22 17
Fax + 213 41 47 36 65
Email: gourineb@cnts.dz; bachirgourine@yahoo.com
Email: ghezalib@cnts.dz
Email: taibih@cnts.dz