

Mesure de robustesse d'un réseau géodésique 3D

Cas du réseau GPS de la ville d'Oran – Algérie

■ Bachir GOURINE

Cet article traite l'analyse de robustesse des réseaux géodésiques GPS qui est une combinaison des concepts de fiabilité et de déformation. La robustesse d'un réseau est quantifiée suivant des seuils calculés à partir des tolérances d'erreurs des points ajustés. Les déplacements 3D des points GPS sont comparés à ces seuils, ce qui permet de cerner les zones de faiblesse du réseau traité afin d'y remédier en changeant la configuration du réseau ou en améliorant la qualité des mesures. La déformation du réseau, due aux erreurs de mesures, peut être exprimée en termes de robustesse en configuration, en échelle et en orientation. La validation de la méthodologie développée a été effectuée sur un réseau test composé de 45 points du réseau GPS de la ville d'Oran qui a connu une extension urbaine sans précédent. Les résultats de l'application ont montré la puissance et l'efficacité de la méthodologie d'analyse adoptée qui permet d'effectuer un diagnostic poussé sur les erreurs indétectables par l'analyse statistique usuelle et leurs effets sur les paramètres du réseau.

■ MOTS-CLÉS

Analyse de fiabilité,
Analyse de robustesse,
Seuils de robustesse,
Déplacement, Tenseur
de déformation.

mesures, afin de garantir une robustesse acceptable à celui-ci.

L'objectif assigné à ce travail est d'établir une méthodologie d'analyse de robustesse d'un réseau géodésique 3D (GPS) basée sur les notions de fiabilité et de tenseur de déformation. Cette analyse permet d'effectuer un diagnostic poussé sur les erreurs indétectables par l'analyse statistique usuelle et leurs effets sur les paramètres du réseau.

L'application, développée à travers cet article, a porté sur l'analyse de robustesse du réseau géodésique GPS de la ville d'Oran. Deuxième grande ville en Algérie, Oran a connu depuis plus d'une décennie, une extension urbaine sans précédent, ce qui a nécessité l'établissement d'un réseau géodésique de référence pour adosser les travaux de topographie, de génie civil (infrastructures, ouvrages d'art, VRD,...), de cartographie et de surveillance géodynamique de la région. Dans ce contexte, un projet de réalisation d'un réseau GPS de la ville d'Oran a été entrepris, en 2009, par le Département de Géodésie Spatiales (DGS) du Centre des Techniques Spatiales (CTS – Arzew/Oran), au profit de la Direction des Travaux Publics de la Wilaya d'Oran (DTPO). Le réseau test, considéré dans notre application, est composé de 45 points.

Analyse de robustesse des réseaux GPS

La notion de déformation peut être appliquée dans l'analyse des réseaux géodésiques en considérant le réseau comme étant une structure à part entière. En d'autres termes, les points du réseau sont maintenus ensemble par les observations d'interconnexion, tel qu'un bâtiment est maintenu par ses poutres.

Introduction

Actuellement, l'utilisation des réseaux géodésiques GPS est devenue incontournable dans divers domaines de géodésie, topographie, surveillance géodynamique, etc. Comme les réseaux classiques, les réseaux GPS sont analysés en fonction de certains critères de conception dont principalement la précision, la fiabilité, la robustesse et le coût. La précision se réfère à la qualité du réseau en termes d'erreurs aléatoires. Elle est évaluée à partir de la matrice de variance covariance des paramètres estimés, par la méthode des moindres carrés. La fiabilité est la capacité du réseau à détecter et identifier les aberrations dans les observations, plus précisément, il s'agit de mesurer les valeurs maximales des magnitudes des erreurs qui ne peuvent pas être détectées par des tests statistiques usuels, ainsi que l'effet de ces erreurs sur les paramètres estimés (analyse de fiabilité de Baarda). Pour les observations aberrantes non détectées par l'approche de Baarda (1968), l'influence de ces

erreurs sur le réseau peut être évaluée en utilisant l'approche développée par Vaníček. Il s'agit d'une augmentation de l'analyse de fiabilité par une analyse de solidité géométrique, utilisant la technique du tenseur de déformation, appelée analyse de robustesse.

Le recours à l'utilisation de l'analyse de robustesse des réseaux géodésiques est dû au fait que ces derniers sont établis sur la base de la compensation des observations par la méthode des moindres carrés. Cependant, cette méthode ne fournit aucune information sur la robustesse du réseau en question. Alors, le tenseur de déformation est utilisé pour mesurer de telle robustesse. Cette technique est indépendante des contraintes de l'ajustement (Datum) et ne reflète que la géométrie du réseau et la précision des observations. En plus, des valeurs seuils sont nécessaires pour quantifier la robustesse du réseau. Ainsi, la comparaison des déplacements des points avec ces valeurs mène à reconstruire le réseau, par le changement de sa configuration ou par l'amélioration des



Dans cette analogie, les stations sont considérées comme des articulations et les observations sont des poutres et des supports. Dans le cas des réseaux classiques 2D, les mesures de distance peuvent être considérées comme des poutres de longueur rigide dont l'orientation dans l'espace n'est pas fixe. Les angles peuvent être considérés comme des supports qui fixent l'orientation relative (angles) entre les poutres de différentes longueurs. L'azimut peut être considéré comme un support qui fixe l'orientation d'une poutre par rapport à la fondation, qui agit en tant qu'un Datum (repère de référence). L'utilisation d'une telle analogie permet de se familiariser avec la structure des réseaux géodésiques. En outre, elle contribue à élargir l'analyse de robustesse au cas des réseaux 3D.

Cette analyse repose sur la combinaison de la fiabilité et de la déformation du réseau [Vanicek et al., 2001]. C'est une technique plus appropriée pour l'évaluation fine des effets des erreurs d'observations sur le réseau en utilisant le concept du tenseur de déformation.

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 deux aspects de la fiabilité [Gourine et Ghezali, 2006].

Fiabilité interne : $\nabla_{bi} = \sigma_{bi} \cdot \frac{\lambda_0}{\sqrt{r_i}}$ (1)

σ_{bi} : écart type a priori de l'observation b_i ;

r_i : nombre de redondance de l'observation b_i ;

λ_0 : paramètre de non centralité qui est en fonction des erreurs de 1^{ère} et 11^{ème} espèces (α, β) [Vanicek et al., 2001].

- Fiabilité externe :

$\Delta x = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot \nabla_{bi}$ (2)

A et P : matrices de configuration et de poids des observations, respectivement.

Quant à la déformation, elle désigne le gradient du champ de déplacement. Ce dernier s'exprime pour un point P_i dans le cas tridimensionnel, par :

$\Delta x_i = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix}$ (3)

Alors, la matrice du tenseur de déformation E , pour chaque point P_i est définie par [Seemkooei, 2001] ; [Vanicek et al., 2001] :

$E_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_i}{\partial x} & \frac{\partial u_i}{\partial y} & \frac{\partial u_i}{\partial z} \\ \frac{\partial v_i}{\partial x} & \frac{\partial v_i}{\partial y} & \frac{\partial v_i}{\partial z} \\ \frac{\partial w_i}{\partial x} & \frac{\partial w_i}{\partial y} & \frac{\partial w_i}{\partial z} \end{bmatrix}$ (4)

Pour tout j de 0 à t où t est le nombre de connexions du point P_i avec les autres points du réseau, les composantes du vecteur déplacement peuvent être calculées par :

$a_i + \frac{\partial u_i}{\partial x}(x_j - x_i) + \frac{\partial u_i}{\partial y}(y_j - y_i) + \frac{\partial u_i}{\partial z}(z_j - z_i) = u_j$
 $b_i + \frac{\partial v_i}{\partial x}(x_j - x_i) + \frac{\partial v_i}{\partial y}(y_j - y_i) + \frac{\partial v_i}{\partial z}(z_j - z_i) = v_j$ (5)
 $c_i + \frac{\partial w_i}{\partial x}(x_j - x_i) + \frac{\partial w_i}{\partial y}(y_j - y_i) + \frac{\partial w_i}{\partial z}(z_j - z_i) = w_j$

Où :

a_j, b_j et c_j sont des termes absolus, (X_j, Y_j, Z_j) et (X_i, Y_i, Z_i) sont les coordonnées des points P_j et P_i respectivement.

L'écriture matricielle du système (5) a la forme suivante :

$K_i \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial u_i}{\partial x} \\ \frac{\partial u_i}{\partial y} \\ \frac{\partial u_i}{\partial z} \end{bmatrix} = u_i, K_i \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial v_i}{\partial x} \\ \frac{\partial v_i}{\partial y} \\ \frac{\partial v_i}{\partial z} \end{bmatrix} = v_i$ et $K_i \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial w_i}{\partial x} \\ \frac{\partial w_i}{\partial y} \\ \frac{\partial w_i}{\partial z} \end{bmatrix} = w_i$ (6)

$i = 1, \dots, n$; n est le nombre de points du réseau. La résolution de ces équations par la méthode des moindres carrés conduit au système suivant :

$\begin{bmatrix} \frac{\partial u_i}{\partial x} \\ \frac{\partial u_i}{\partial y} \\ \frac{\partial u_i}{\partial z} \end{bmatrix} = (K_i^T \cdot K_i)^{-1} \cdot K_i^T \cdot u_i = Q_i \cdot u_i, \begin{bmatrix} \frac{\partial v_i}{\partial x} \\ \frac{\partial v_i}{\partial y} \\ \frac{\partial v_i}{\partial z} \end{bmatrix} = (K_i^T \cdot K_i)^{-1} \cdot K_i^T \cdot v_i = Q_i \cdot v_i$ (7)

et $\begin{bmatrix} \frac{\partial w_i}{\partial x} \\ \frac{\partial w_i}{\partial y} \\ \frac{\partial w_i}{\partial z} \end{bmatrix} = (K_i^T \cdot K_i)^{-1} \cdot K_i^T \cdot w_i = Q_i \cdot w_i$

Par l'assemblage de ces équations dans une seule hyper matrice et l'utilisation de l'équation (4), on obtient :

$vec(E_i) = \begin{bmatrix} Q_i & 0 & 0 \\ 0 & Q_i & 0 \\ 0 & 0 & Q_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix}$ (8)

Si l'on désigne par T_i l'hyper matrice bande après l'élimination de la première ligne de la matrice Q_i on peut mettre $vec(E_i)$ sous la forme suivante :

$vec(E_i) = T_i \cdot \Delta X_i$ (9)

En substituant l'équation (2) en (9), on aura :

$vec(E_i) = T_i \cdot (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot \nabla_{bi}$ (10)

Pour déterminer les déplacements du point P_i , on introduit les conditions initiales. Ces dernières sont des coordonnées obtenues à partir de la minimisation de la norme des vecteurs déplacements de tous les points du réseau considéré [Berber et al., 2009]. Par conséquent, les composantes des vecteurs déplacements sont estimées par le système d'équations suivant :

$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = E_i \cdot \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix}$ (11)

Le déplacement total pour chaque point P_i sera calculé par :

$d_i = \sqrt{u_i^2 + v_i^2 + w_i^2}$ (12)

■ Détermination des seuils de robustesse

Les seuils permettent de mesurer la robustesse de n'importe quel réseau. Ces valeurs sont calculées à partir des précisions standards du positionnement du Geodetic Survey Division – Canada [Berber et al., 2009]. Dans cette étude, nous avons utilisé la formule suivante :

$\delta_i = \sqrt{\sigma_{a_{95i}}^2 + \sigma_{b_{95i}}^2 + \sigma_{h_{95i}}^2}$ (13)

Avec, $\sigma_{a_{95i}} = 2.45 \cdot \sigma_{a_i}$; $\sigma_{b_{95i}} = 2.45 \cdot \sigma_{b_i}$ et $\sigma_{h_{95i}} = 1.96 \cdot \sigma_{h_i}$

$\sigma_{a_{95i}}$ et $\sigma_{b_{95i}}$: demi-grand axe et demi-petit axe de l'ellipse de confiance pour une probabilité de 95 %, respectivement.

$\sigma_{h_{95i}}$: intervalle de confiance de l'altitude ellipsoïdale pour une probabilité de 95 %.

$\sigma_{a_i}, \sigma_{b_i}$ demi-grand axe et demi petit axe de l'ellipse d'erreur, respectivement.

σ_{h_i} : écart type de l'altitude ellipsoïdale h du point P_i .

L'intervalle de confiance de 95 % de l'altitude ellipsoïdale est obtenu en multipliant par un facteur d'expansion de 1.96 pour une distribution de probabilité univariante. Dans l'équation (13), les demi-axes ($\sigma_{a_{95i}}$ et $\sigma_{b_{95i}}$) doivent être rééchelonnés par un facteur de (2.795/2.447) et l'intervalle vertical par (2.795/1.960), ceci pour remplacer les facteurs d'expansion 2D et 1D par le facteur d'expansion 3D, avant la formation des limites 3D (estimation des ellipsoïdes de confiance) [Berber et al., 2009].

■ Comparaison entre les vecteurs d et δ

La décision sur la robustesse du réseau s'effectue en comparant les deux vecteurs d_i et δ_i :

- Si $d_i < \delta_i$ pour tout i variant de 1 jusqu'à n où n est le nombre de points P_i ; on dit que le réseau est robuste au niveau de la probabilité requise ;
- Si $d_i > \delta_i$, on dit que le réseau est faible, c'est-à-dire quelques points ne respectent pas le niveau requis de robustesse.

■ Tenseurs de déformation du réseau 3D

Le tenseur de déformation, équation (4), contient toutes les informations sur le comportement d'un champ vectoriel de déplacement. Cependant, son interprétation n'est pas directe. Pour cela, on doit décomposer ce tenseur et en tirer des éléments caractéristiques qui sont les primitives de déformation [Michel, 2003]. Ces dernières permettent une meilleure représentation de la déformation. Dans cette étude, on a choisi trois composantes de déformation parmi les différentes primitives du tenseur de déformation, qui sont des invariants de déformation dans le cas 3D, [Vanicek et al., 1991] et [Berber, 2006] :

Dilatation moyenne :

$$\sigma = \frac{1}{3}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = \frac{1}{3}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})$$

Cisaillement maximal :

$$\gamma_{max} = \max(\lambda_i) - \min(\lambda_i), i = 1, 3$$

Rotation différentielle totale :

$$\Omega = \sqrt{\omega_{xy}^2 + \omega_{xz}^2 + \omega_{yz}^2}$$

avec :

$$\omega_{xy} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{vz} - \varepsilon_{wy})$$

$$\omega_{xz} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{uz} - \varepsilon_{wx})$$

$$\omega_{yz} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{uy} - \varepsilon_{vx})$$

Dans cette étude, ces primitives de déformation notées (σ , γ_{max} , Ω) décrivent, respectivement, la robustesse du réseau en échelle (dilatation), en configuration (cisaillement total), et en orientation (rotation différentielle).

D'après [Vanicek et al., 1991], on peut comparer les valeurs des trois primi-

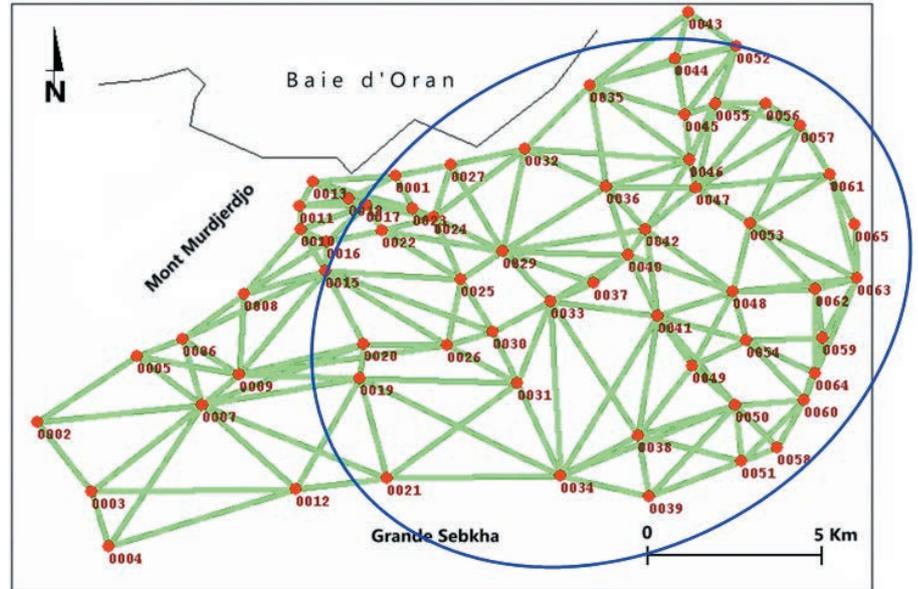


Figure 1. Configuration globale du réseau GPS de la ville d'Oran [DGS, 2009].

tives de déformation par rapport à la précision requise suivant l'ordre du réseau. Il serait donc intéressant d'investiguer sur les seuils de déformation afin de contrôler et de juger la robustesse du réseau en termes de configuration, d'échelle et d'orientation. Des études antérieures concernant ce sujet, ont été effectuées dans le cas des réseaux 2D, nous pouvons citer [Gourine, 2004] et [Michel, 2001].

Application

La ville d'Oran est la deuxième ville en Algérie. Elle a connu depuis quelques années, une extension urbaine sans précédent, ce qui a nécessité l'établissement d'un réseau géodésique

de référence pour adosser les travaux de topographie, de génie civil (infrastructures, ouvrages d'art, VRD,...), de cartographie et de surveillance géodynamique de la région. Dans ce contexte, un projet de réalisation d'un réseau GPS de la ville d'Oran a été entrepris, en 2009, par le Département de Géodésie Spatiales (DGS) du Centre des Techniques Spatiales (CTS – Arzew/Oran), au profit de la Direction des Travaux Publics de la Wilaya d'Oran (DTPO). Ce réseau s'étend sur une zone délimitée par [0° 21' 10" ; 0° 17' 43"'] Ouest en longitude et [35° 21' 05" ; 35° 27' 14"'] Nord en latitude (cf. figure 1). Le réseau test considéré dans notre application, désigné par un cercle rouge dans la figure 1, est composé de 45 points.

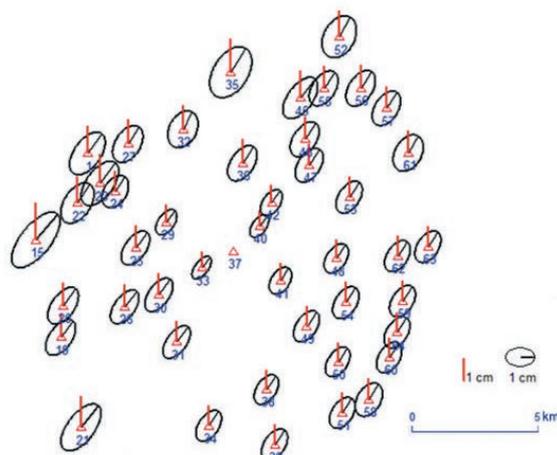


Figure 2. Ellipses et intervalles d'erreurs des points du réseau GPS.

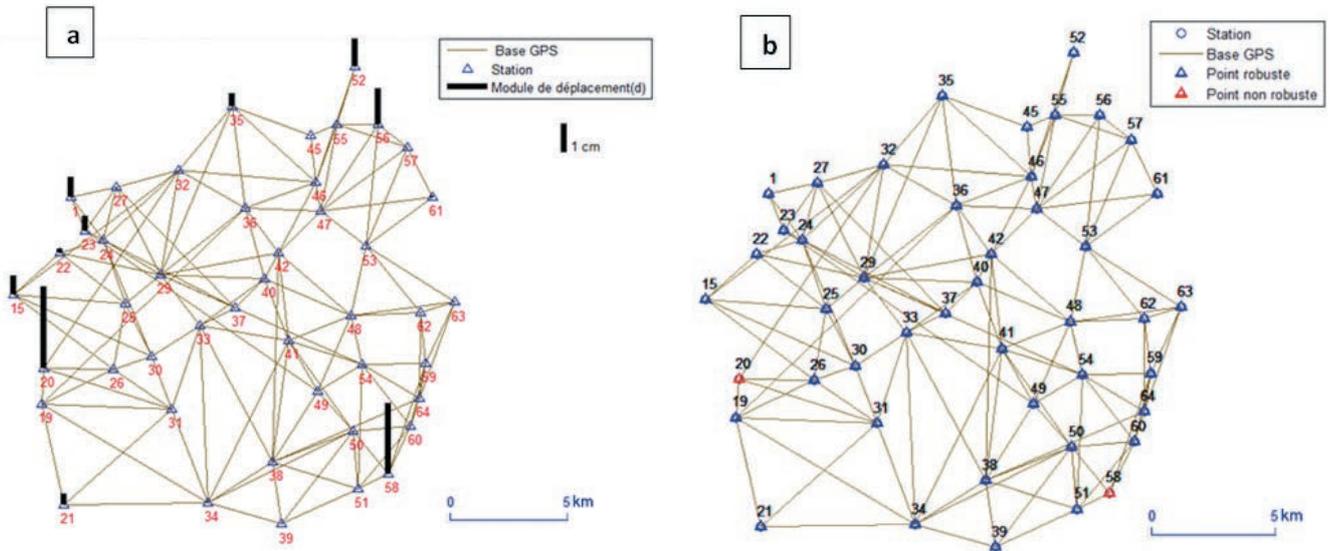


Figure 3. (a) Vecteurs de déplacements d des points GPS (b) Points robustes et non robustes du réseau GPS.

La qualité du réseau est jugée à travers l'analyse statistique. La figure 2 illustre les domaines d'erreurs de l'estimation des paramètres inconnus. Ces domaines sont représentés par des ellipses d'erreurs, pour les composantes planimétriques (E, N) et par les intervalles d'erreurs pour la composante altimétrique (h). Les ellipses d'erreurs absolues des points GPS ont une dimension moyenne de l'ordre de 8 mm. Les intervalles d'erreurs pour la composante verticale sont de l'ordre de 9 mm. On constate à travers la figure 2 que les points se trouvant dans la limite du réseau ont des ellipses sensiblement plus importantes que ceux à l'intérieur du réseau GPS. La taille des ellipses d'erreurs des points 21 et 35 atteint des valeurs de l'ordre de 11 mm, le point 15 a un maximum de 13 mm. La même constatation est

faite pour les intervalles d'erreur pour la composante verticale. Le maximum de 14 mm est atteint au point 15. Le tableau 1 donne les statistiques relatives à la fiabilité du réseau. Les erreurs des observations détectées par la fiabilité interne sont de l'ordre de 6 mm, 3 mm, 4 mm suivant les trois composantes de la ligne de base GPS ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$), respectivement, soit 7,8 mm en 3D. L'erreur maximale est atteinte au niveau de la ligne de base 64 – 54, alors qu'elle est minimale pour la ligne de base 62 – 59. Généralement, la fiabilité interne dépend essentiellement de la précision *a priori* des observations et de la géométrie du réseau (redondance). Compte tenu de ces résultats, nous pouvons en conclure que la fiabilité des observations est bonne. Pour la fiabilité externe, l'effet maximal des erreurs sur les paramètres

du réseau est de l'ordre de quelques millimètres. Par conséquent, le réseau est considéré fiable dans l'ensemble. Cependant, les valeurs maximales (algébriques) de la fiabilité externe, suivant les coordonnées géodésiques locales, n'excèdent pas 15 mm. Le point 15, dont la dimension de l'ellipse d'erreur est maximale, possède la fiabilité externe maximale.

Pour une meilleure interprétation des résultats, l'analyse de robustesse du réseau GPS a été utilisée. Tout d'abord, examinons les déplacements optimaux des points du réseau GPS. Il est connu que la valeur du déplacement d'un point du réseau doit être plus petite que possible. Ceci est considéré comme un critère de robustesse, tel que : $\max(d_i) \rightarrow \min$.

D'après le tableau 2, les déplacements 3D sont de l'ordre de 3 mm, seulement. Les valeurs maximales atteignent 3 cm. La figure 3.a illustre les déplacements de l'ensemble des points GPS. Pour juger et qualifier la robustesse du réseau traité, les valeurs seuils ont été calculées sur la base des paramètres des domaines d'erreurs des points estimés (ellipses et intervalles d'erreurs). Ces seuils sont de l'ordre de 24 mm. La comparaison entre les déplacements et les seuils, nous a permis de déceler les points faibles (non robustes) du réseau GPS, tels que : les points 20 et 58, cf. figure 3.b. On considère, globalement, que le réseau est robuste. Cependant, pour pallier aux zones de

Tableau 1. Statistiques des fiabilité interne (Fi) et externe du réseau (Fe).

	Fi(ΔX)	Fi(ΔY)	Fi(ΔZ)	Fe(dE)	Fe(dM)	Fe(dh)
Moyenne (mm)	6.3	3.0	4.4	-4.4	-1.3	-1.2
EMQ (mm)	2.9	1.1	2.4	4.1	2.0	2.8
Minimum (mm)	2.2	1.1	1.5	-15.1	-5.5	-7.8
Maximum (mm)	16.0	6.3	12.3	6.0	3.6	6.8

Tableau 2. Caractéristiques des déplacements et des primitives de déformation.

	Dépl (d) (mm)	Seuil (δ) (mm)	Dil (σ) (ppm)	Cisail-max (λ) (ppm)	Rot (Ω) (ppm)
Moyenne	2.6	24.6	10	63	28
Minimum	0.0	16.2	-5	0	0
Maximum	28.8	40.5	416	2 690	1 190

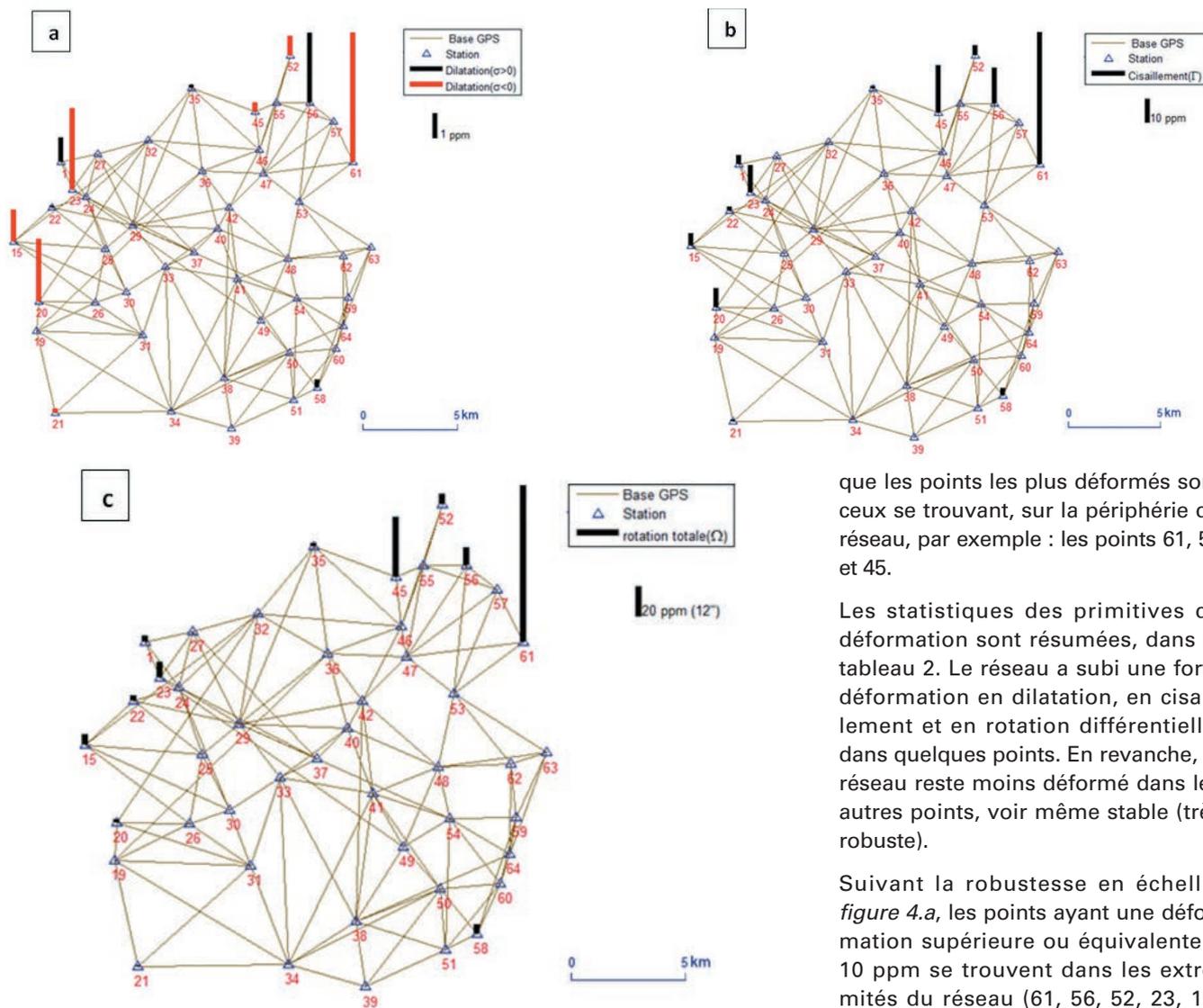


Figure 4. Robustesse du réseau GPS (a) en échelle - dilatation, (b) en configuration - cisaillement, (c) en orientation - rotation différentielle.

faiblesse du réseau, deux solutions se présentent :

- Éliminer les mauvaises lignes de base GPS, ou
- Augmenter la configuration du réseau par de nouvelles bases GPS aux points faibles (identifiés).

Ceci permettra, en premier temps, d'améliorer le réseau en qualité et en robustesse, d'une façon optimale et économique.

Une autre manière de représenter la robustesse du réseau est celle des primitives de déformation du réseau. On a vu, précédemment, comment les effets des erreurs indétectables sur le réseau, s'expriment par des déplacements aux points GPS. Ces erreurs peuvent engendrer, à leur tour, des

déformations au sens non pas physique du terme, mais au sens de leurs effets sur les paramètres du réseau suivant un concept tensoriel. Il a été démontré par [Vanicek et al., 1991] et [Berber, 2006] que le tenseur de déformation ne peut être interprété facilement que par des primitives de déformation et que parmi ces dernières, les invariants permettent d'exprimer la déformation intrinsèque. Nous avons considéré pour le cas du réseau 3D, les invariants de primitives de déformation suivants : dilatation moyenne, cisaillement maximal et rotation différentielle totale, comme paramètres de robustesse du réseau en échelle, en configuration et en orientation, respectivement. La figure 4 représente graphiquement ces déformations aux points du réseau. Il est clair

que les points les plus déformés sont ceux se trouvant, sur la périphérie du réseau, par exemple : les points 61, 56 et 45.

Les statistiques des primitives de déformation sont résumées, dans le tableau 2. Le réseau a subi une forte déformation en dilatation, en cisaillement et en rotation différentielle, dans quelques points. En revanche, le réseau reste moins déformé dans les autres points, voir même stable (très robuste).

Suivant la robustesse en échelle, figure 4.a, les points ayant une déformation supérieure ou équivalente à 10 ppm se trouvent dans les extrémités du réseau (61, 56, 52, 23, 15, 20). De même, pour la robustesse en configuration et en orientation, quelques points communs ont subi des déformations importantes, à savoir les points (61, 56, 45). Cependant, les points identifiés, auparavant, comme points faibles (20 et 58) dont les déplacements sont importants, apparaissent moins déformés que d'autres points estimés comme robustes. A ce niveau, il faut prêter attention à deux choses. La première, est que ces deux aspects de quantification de robustesse abordés (en termes de déplacements et de déformations), sont complémentaires, et la deuxième est que l'aspect statistique de significativité des primitives de déformation doit être pris en compte pour juger la déformation. Tous les résultats obtenus se basent sur des niveaux de risques standards ($\alpha=5$, $\beta=20$ %). Des tests ont été effectués pour examiner l'effet du choix de



ces niveaux sur ces résultats, en adoptant plusieurs valeurs. Les résultats de ces tests ont montré qu'ils sont équivalents à quelques différences près.

Conclusion

A travers cet article, nous avons abordé l'analyse de robustesse des réseaux GPS. Basée sur les notions de fiabilité et de tenseur de déformation, cette analyse permet d'effectuer un diagnostic poussé sur les erreurs indétectables par l'analyse statistique usuelle et leurs effets sur les paramètres du réseau.

L'application a concerné un réseau test du réseau GPS de la ville d'Oran - Algérie. Les résultats obtenus ont montré que les domaines d'erreurs de l'estimation des coordonnées géodésiques locales (ellipses et intervalles d'erreurs) sont plus importants aux points se trouvant sur la périphérie du réseau. Au niveau de la fiabilité du réseau, les erreurs détectées par la fiabilité interne sont de l'ordre de 8 mm. L'effet maximal de la fiabilité interne sur les paramètres estimés du réseau est en moyenne de 4 mm en planimétrie et 1 mm en altimétrie. Compte tenu de ces résultats, le réseau est considéré fiable. Quant à l'analyse de robustesse, les résultats ont montré que le réseau est robuste dans l'ensemble, sauf en quelques points sur son périmètre où les déplacements et les déformations sont importants dus au faible nombre de liaisons de ces points avec ceux du réseau. En effet, les déplacements estimés sont de l'ordre de 3 mm avec des seuils de l'ordre de 30 mm. Les taux de déformations en termes de robustesse en échelle, en configuration et en orientation restent relativement faibles de l'ordre de 10 ppm, 63 ppm et 28 ppm, respectivement.

En perspectives, cette thématique reste ouverte et nécessite une démarche élaborée pour enrichir la méthodologie d'analyse de robustesse des réseaux tridimensionnels (GPS). Afin de concrétiser cette démarche, il est nécessaire de :

- Investiguer sur le choix des niveaux de risque de 1^{ère} et 2^e espèces dans l'analyse de fiabilité ;
- Considérer le calcul de significativité

des primitives du tenseur de déformation, en se basant sur la méthode de Monté Carlo ;

- Traiter d'autres réseaux GPS, notamment, les grands réseaux. ●

Remerciements

L'auteur tient à exprimer sa gratitude à tous les éléments du DGS/CTS (Arzew - Algérie), qui ont contribué au projet de réalisation du réseau GPS de la ville d'Oran (2009).

Contact

Bachir GOURINE

Département de Géodésie Spatiale - Centre des Techniques Spatiales
Arzew - ALGERIE
bachirgourine@yahoo.com
bgourine@cts.asal.dz

Références bibliographiques :

- Baarda W., 1968 : *A testing procedure for use in geodetic networks. Publications on Geodesy. New series. Vol. 2, No. 5, Netherlands Geodetic Commission, Delft.*
- Berber M., 2006 : *Robustness analysis of geodetic networks. Thèse de doctorat, Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick, Canada.*
- Berber M., Vanicek P., Dare P., 2009 : *Robustness analysis of 3D networks. Journal of Geodynamics, Elsevier, Vol.47, No.1, January 2009.*
- DGS (Division de Géodésie Spatiale) 2009 : *Mise en place par GPS du réseau géodésique de la ville d'Oran. Rapport technique de projet, Centre des Techniques Spatiales CTS - Arzew, Algérie.*
- Gourine B., 2004 : *Ajustement avec contraintes du réseau géodésique national. Application : réseau de base. Mémoire de Magistère, Centre des Techniques Spatiales CTS - Arzew, Algérie.*
- Gourine B., Ghezali B., 2006 : *Fiabilité des réseaux géodésiques. Application : réseau cadastral de la ville d'Oran-Algérie. Revue XYZ n° 109, 4^e trimestre 2006.*
- Michel V, Person T., 2003 : *From geodetic monitoring to deformation tensors and their reliability. Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece.*

Michel V., 2001 : *Utilisation des tenseurs pour la représentation des déformations et de leur degré de signification. Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale des Sciences géographiques ENSG -Paris, France.*

Seemkooei A.A., 2001 : *Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks. Journal of Geodesy, V.75, No.4 Springer Verlag.*

Vanicek P., Craymer M.R., Krakiwsky E.J., 2001 : *Robustness analysis of geodetic horizontal networks. Journal of Geodesy, V.75, No.4 Springer Verlag.*

Vanicek P., Krakiwsky E.J., Craymer M.R., Gao Y., Ong P., 1991 : *Robustness analysis. Contract Rep. 91-002 Geodetic Survey Division, Geomatics Canada.*

ABSTRACT

Key-words: Reliability analysis, Robustness analysis, Robustness Thresholds, Displacement, Strain deformation.

This paper deals with robustness analysis of GPS geodetic networks which is a combination of reliability and deformation concepts. The network robustness is quantified according to threshold values which are computed from errors confidence of adjusted points. The 3D displacements of GPS points are compared to these threshold values, this permit to identify the weakness regions of the network in order to remedy them by changing the configuration or improvement of observations until acceptable robustness. The deformation of the network, due to measurements errors, can be expressed in terms of robustness in scale, in configuration and in twist. The validation of methodology developed was performed on a test network composed of 45 points of the Oran city GPS network, which has known an unprecedented urban expansion. The obtained results showed the powerful and the efficiency of the analysis methodology adopted, that allows a powerful diagnosis on errors undetectable by the usual statistical analysis and their effects on the network parameters.