

Juillet 2008 - 1^{er} Semestre • 11^{ème} année • Prix 40 DA • Etranger 15 € • ISSN 1112-3745

Bulletin des Sciences Géographiques

Édité et publié par l'Institut
National de Cartographie
et de Télédétection

n° 21



Ortho-Image de la région "DELLYS", vue par QuickBird et distribuée par Eurimage le 25 Janvier 2006.



INCT BULLETIN DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

N° 21
Juillet 2008

Publication semestrielle, de l'Institut
National de Cartographie et de
Télédétection (INCT), Algérie.

Fondée en Octobre 1997
N°21 - Juillet 2008
ISSN 1112-3745

Responsable de la revue : INCT

Éditeur : Centre de la Documentation et de
la Conservation de l'Information
Géographique, INCT, Alger.

Adresse : Bulletin des Sciences Géographiques,
INCT, 123, rue de Tripoli Hussein Dey 16040,
BP 430, Alger, Algérie.

Tél: (021) 47 09 20
(021) 47 00 30

Fax: (021) 23 43 81
(021) 47 00 29

E-mail : inct99@wissal.dz

Tirage :

400 Exemplaires

Comité de Rédaction :

- Mr. ABDEDOU Mohamed
Sous Directeur des Travaux Spécifiques
et Arts Graphiques, INCT (Président).

- Mr. DROUAI Fethallah
Chef du CDCIG, INCT.

- Mr. DEGAICHA Fethi
Master, CT, INCT.

- Mr. CHOUDER Med Tahar
Ingénieur, CREIS, SGT.

Comité de Lecture :

- Mr. ABDELLAOUI Hassen
Magister, INCT, (Président)

- Mr. BELBACHIR Mohamed Faouzi
Professeur, USTO.

- Mr. OMRANE Naceur
PHD, INCT.

- Mr. AYADI Abdelkrim
Directeur de recherche, CRAAG.

- Mr. KAHLOUCHE Salem
Directeur de recherche, CTS.

- Mr. OUGUINI Rachid
Maître de recherche, ASAL.

- Mr. GHEZALI Boualem
Chargé de recherche, CTS.

- Mr. SI MOHAMED Mohamed Arezki
Chargé de recherche, CTS.

- Mr. HADDAD Mahdi
Magister, INCT.

Sommaire / Contents

Pages

MODIFICATION DU NOYAU INTEGRAL DE STOKES : ETUDE DES PERFORMANCES.....	02
<i>Par N. RABEHI & M. AARIZOU</i>	
METHODOLOGIE D'ANALYSE DE LA QUALITE DES RESEAUX GEODESIQUES BIDIMENSIONNELS.....	08
<i>Par B. GOURINE & B. GHEZALI</i>	
ELABORATION D'UN SIG POUR LA GESTION DES RESEAUX GEODESIQUES.....	17
<i>Par A. DERKAOUI & B. GHEZALI</i>	
CONFLITS D'USAGES ET DYNAMIQUES SPATIALES ; LES ANTAGONISMES DANS L'OCCUPATION DES ESPACES PERIPHERIQUES DES GRANDES VILLES EN ALGERIE, CAS D'ORAN.....	23
<i>Par H. M. MAACHOU</i>	
CONSEQUENCES DE L'ALTERATION DES GNEISS ARKOSIQUES SUR LA TOPOGRAPHIE LOCALE, (MASSIF DE L'EDOUGH ANNABA, N.E ALGERIEN).....	29
<i>Par S. HADJ ZOBIR, A. LARABA, K. KHANCHOUL</i>	
IDENTIFICATION DES FACTEURS DE VARIATION DU CHIMISME DE L'EAU DANS UN MILIEU CRISTALLIN.....	37
<i>Par H. MAJOUR, H. HANI, K. KHANCHOUL & L. DJABRI</i>	
AEROTRIANGULATION ANALYTIQUE : COMPENSATION PAR FAISCEAUX.....	49
<i>Par H. BOUNOUR, F. BOUCHENAK & B. TAKARLI</i>	
METHODES DE CORRESPONDANCE D'IMAGES NUMERIQUES.....	58
<i>Par H. BOUNOUR, F. BOUCHENAK & A. DJILALI</i>	

© 2008

Tout droit réservé pour tous pays,
textes, illustrations, photos.

Modification du Noyau Intégral de Stokes : Etude des Performances

N. RABEHI, M. AARIZOU

Centre des Techniques Spatiales, Division de Géodésie Spatiale
BP 13 Arzew - 31200 – Algérie, Email : Rabehin@gmail.com

ملخص :

لتحديد قيم الجيود حسب طريقة ستوكس نستعمل قيم الجاذبية الموزعة على مستوى كل سطح الأرض ؛ لكن مع عدم توفر هذه التغطية الكاملة و لحساب دقيق لتكامل ستوكس نتبع المنهجية التي تركز على معرفة قيم الجاذبية في منطقة معينة. هذا القطع يتولد عنه أخطاء التي نقوم بتقليصها عن طريق تغيير نواة تكامل ستوكس.

Résumé : La détermination du géoïde par la méthode de Stokes exige au préalable des données gravimétriques bien réparties sur la totalité de la terre. En revanche, dans le cas d'une absence d'une couverture gravimétrique globale, la méthodologie adoptée pour résoudre l'intégrale de Stokes repose uniquement sur la connaissance de la gravité locale où la zone d'intégration est limitée.

Par conséquent, la procédure de troncature du domaine d'intégration engendre des erreurs qui peuvent perturber d'une façon significative l'estimation du géoïde. Afin de minimiser les effets de ces erreurs et de garantir une solution fiable, nous proposons à travers cet article une technique connue sous le nom "modification du noyau intégral de Stokes".

Mots clés : noyau de Stokes, domaine d'intégration, troncature, modification du noyau, déterministe, stochastique, géoïde local.

Abstract : The geoid determination by the method of Stokes requires gravity data evenly distributed over the entire of the Earth.

However, and with the absence of the global gravity measurement the methodology adopted to solve the Stokes integral computation take into account only the local gravity, limiting the integral just over the computation area.

This truncation generates errors that can perturb significantly the estimation of geoid. So, to minimise the effects of these errors and ensure a reliable solution, we proposed throughout this article a technique known as "Stokes kernel modification".

Keywords : Stokes's Kernel, area of integration, truncation, modified kernel, deterministic, stochastic, local geoid.

1. Introduction

L'application de la formule de Stokes sur une échelle locale, nous conduit à tronquer le domaine d'intégration en tenant compte seulement de la zone d'étude. Par conséquent, cette troncature engendre des erreurs sur la détermination de l'ondulation du géoïde. Dans le but de réduire les effets de ces erreurs, nous introduisons une technique appelée modification du noyau intégral de Stokes.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le thème de cet article dont l'objectif principal consiste en une étude des performances de la modification du noyau intégral de Stokes qui est basée sur les deux approches suivantes :

- La première approche dite "stochastique" porte sur l'étude statistique des erreurs dues à la troncature du domaine d'intégration, aux anomalies de gravité terrestres et aux coefficients du modèle géopotential global [Argen et Sjoberg, 2003].

- La seconde approche appelée "déterministe" consiste uniquement à minimiser l'erreur de cession de convergence rapide de la série d'erreur de troncature (Meissl, Wong et Gore, Hec et Gruninger, Vanicek et Kleusberg, Featherstone et al.).

2. Généralités sur le noyau intégral de Stokes

L'intégrale définie sur la sphère unitaire est donnée par l'expression suivante:

$$\int_{\sigma} K(\psi) \cdot f(\sigma') \cdot d\sigma' \tag{1}$$

Où $K(\psi)$ le noyau de l'intégrale qui s'exprime sous forme d'une série infinie orthogonale en fonction des polynômes de Legendre :

$$K(\psi) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2n+1}{4\pi} a_n \cdot P_n(\cos\psi) \tag{2}$$

Avec :

$$a_n = \int_0^{\pi} K(\psi) \cdot P_n(\cos\psi) \sin\psi \, d\psi \quad , \quad \forall n=0,1,2, \dots ;$$

Si $K(\psi)$ est une fonction continue, sa première et deuxième dérivées sont continues, par suite, la série (2) converge vers 0.

L'intégrale (1) peut être écrite sous forme d'une série infinie des harmoniques sphériques Y_n :

$$\int_{\sigma} K(\psi) \cdot f(\sigma') \, d\sigma' = \sum_{n=0}^{\infty} a_n Y_n(\sigma) \tag{3}$$

Où ;

$$Y(\sigma_n) = \frac{2n+1}{4\pi} \int_{\sigma} f(\sigma') P_n(\cos\psi) \, d\sigma' \quad ; \quad \forall n=0,1,2, \dots ;$$

On définit la fonction $K^*(\psi)$ sur l'intervalle $[0, \pi]$ comme suit :

$$K^*(\psi) = \begin{cases} K(\psi) & \text{si } 0 \leq \psi \leq \psi_0 \\ 0 & \text{si } \psi_0 < \psi \leq \pi \end{cases} \tag{4}$$

$$K^*(\psi) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2n+1}{4\pi} s_n(\psi_0) \cdot P_n(\cos\psi) \tag{5}$$

$K^*(\psi)$ s'exprime sous forme d'une série orthogonale en fonction des polynômes de Legendre ; elle est discontinue au point $\psi = \psi_0$.

3. Modification du noyau intégral de Stokes

En géodésie, l'ondulation du géoïde est donnée par le biais d'une forme modifiée de l'intégrale de Poisson et elle s'écrit comme suit: [Heiskanen et Moritz, 1967] :

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma_0} \int_{\sigma} \Delta g(\psi) \cdot S(\psi) \cdot d\sigma' \tag{6}$$

En pratique, cette ondulation est donnée sous forme d'une somme de la contribution des zones proches et lointaines que l'on minimise en utilisant l'inégalité de Schwartz. Cette minimisation tient compte de l'orthogonalité des harmoniques sphériques, de l'utilisation des anomalies de gravité résiduelles et

de l'insuffisance des données gravimétriques terrestres sur la totalité de la Terre.

$$[\delta N(\psi)]^2 \leq k^2 \|\Delta g\|^2 \|S(\psi)\|^2 \tag{7}$$

Δg est une constante alors que $\|S(\psi)\|$ varie en fonction du paramètre de modification $s_n(\psi)$; Ainsi, la minimisation de l'erreur de troncature introduite sera basée sur l'étude de la minimisation de $\|S(\psi)\|$ telle que :

$$\forall i \in R : \frac{\partial}{\partial s_n} \int_{\sigma} [S(\psi)]^2 \, d\sigma' = 0 \tag{8}$$

Par suite, le noyau modifié s'exprimera en fonction du noyau sphérique original $S(\psi)$ et du coefficient de modification s_n comme suit :

$$S^M(\psi) = S(\psi) - \sum_{n=2}^M \frac{2n+1}{2} s_n P_n(\cos\psi) \tag{9}$$

La valeur du coefficient s_n définie à partir du degré $n = 2$, diffère généralement d'une méthode de troncature à l'autre. Sa formule est bien déterminée dans le cas d'approches déterministes. Par contre, au niveau des modifications stochastiques, elle varie en fonction d'autres paramètres [Ellmann, A, 2004].

3.1 Noyaux déterministes

Les noyaux déterministes ne tiennent pas compte des erreurs dues aux coefficients du modèle et des anomalies de gravité terrestres. Cette approche dite "déterministe" repose uniquement sur la minimisation de l'erreur de troncature et elle est appliquée dans le cas où l'aspect statistique de ces erreurs est méconnu.

Comme première modification, on trouve le noyau sphéroïdale qui consiste à enlever du noyau sphérique original de Stokes les (M-1) premiers termes de sa série qui interviennent dans la contribution du modèle géopotential. Ceci, permet d'obtenir un filtrage des données gravimétriques de basses fréquences.

$$S^M(\psi) = S(\psi) - \sum_{n=2}^M \frac{2n+1}{n-1} P_n(\cos\psi) \tag{10}$$

Le noyau de "Wong and Gore" utilise la même méthode de troncature relative au noyau sphéroïdal de Stokes. Le degré de modification utilisé dans ce cas est égal à L, degré de développement du modèle sphéropotential. Ceci, permet de réduire l'instabilité de la fonction du noyau sphéroïdal de Stokes pour les grands degrés de n. De ce fait, on choisit le degré de modification tel que $L < M$ tout en tenant compte de l'hypothèse sur la fiabilité de la précision des anomalies de gravité obtenues par l'analyse d'orbites des satellites en vue de la détermination du sphéroïde utilisé [Rabehi, N, 2004].

La méthode de modification de "Meissl" consiste à soustraire du noyau sphérique de Stokes la valeur du noyau à la distance sphérique ψ_0 .

Cette modification permet d'obtenir un noyau sous forme d'une fonction continue en ψ_0 . Cette propriété permet d'obtenir une convergence rapide de la série d'erreur de troncature [Featherstone, W.E et al., 1998].

La modification de "Heck and Gruninger" est similaire à celle de "Meissl", sauf que la soustraction est appliquée au noyau sphéroïdal de Stokes. Il s'agit de soustraire du noyau sphéroïdal de Stokes sa valeur au point de distance sphérique ($\psi = \psi_0$). Le but est de rendre continue la fonction du noyau sphéroïdal de l'erreur ainsi modifiée.

Le noyau de "Heck and Gruninger" est donné par :

$$S^{HG} = \begin{cases} S^L(\cos\psi) - S^L(\cos\psi_0) & \text{si } 0 \leq \psi < \psi_0 \\ 0 & \text{si } \psi_0 \leq \psi \leq \pi \end{cases} \quad (11)$$

Les procédés de modification, présentés ci-dessus, consistent à transformer le noyau sphérique de Stokes correspondant à un domaine d'intégration sur toute la sphère, en un noyau intégral approprié qui correspond au domaine d'intégration imposé par la zone locale. Ces modifications ont pour but de filtrer, selon le choix du degré de troncature, les anomalies de gravité de basses fréquences, supposées de qualité fiable.

Pour que la transformation du noyau intégral soit plus fiable, on procède à la modification du noyau de Stokes avec le critère de rendre minimale l'erreur engendrée par la zone de troncature.

Le critère de minimisation, par la méthode des moindres carrés, utilisé par "Vaniček et Kleusberg", porte sur l'erreur de troncature δN_b , avec l'hypothèse que le modèle des coefficients géopotential et les anomalies de gravité terrestre sont supposés non entachés d'erreurs.

La méthode de minimisation de l'erreur moyenne quadratique nous mène ainsi à un système de (L-1) équations linéaires de la forme :

$$\begin{cases} \sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} t_k(\psi_0) e_{nk}(\psi_0) = Q_n^{WG}(\psi_0) ; 2 \leq n \leq L \\ Q_n^{WG}(\psi_0) = Q_n(\psi_0) - \sum_{k=n}^L \frac{2k+1}{k-1} e_{nk}(\psi_0) \end{cases} \quad (12)$$

$Q_n^{WG}(\psi_0)$ est le coefficient de troncature de "Wong" et "Gore".

On peut considérer cette approche comme un cas particulier de la modification de "Sjöberg", $2 \leq n \leq L$ définis par la suite.

D'autre part, on trouve le noyau sphéroïdal modifié hybride.

Il existe une autre technique de modification (noyau sphéroïdal modifié hybride) basée sur la combinaison de deux approches où on applique la soustraction de "Meissl" sur le noyau sphéroïdal modifié par "Vaniček et Kleusberg", pour obtenir la continuité de la fonction de ce noyau [Featherstone, W.E. et al., 1998] :

$$S_F(\cos\psi) = S_{WG}(\cos\psi) - S_{WG}(\cos\psi_0) - \sum_{k=2}^L \frac{2k-1}{2} t_k(\psi_0) [P_k(\cos\psi) - P_k(\cos\psi_0)] \quad (13)$$

Cette approche de modification tient compte de toutes les propriétés définies dans les autres noyaux le choix du degré sphéropotential de troncature L, la continuité de la fonction du noyau de l'erreur et la minimisation de l'erreur de troncature au sens des moindres carrés.

La figure 1 met en évidence le comportement du noyau de "Featherstone et al." (noyau hybride : Meissl-Molodensky modifié) par rapport aux noyaux de "Vaniček et Kleusberg" et sphérique, pour la distance sphérique $\psi_0 = 4^\circ$ correspondant à la zone de troncature.

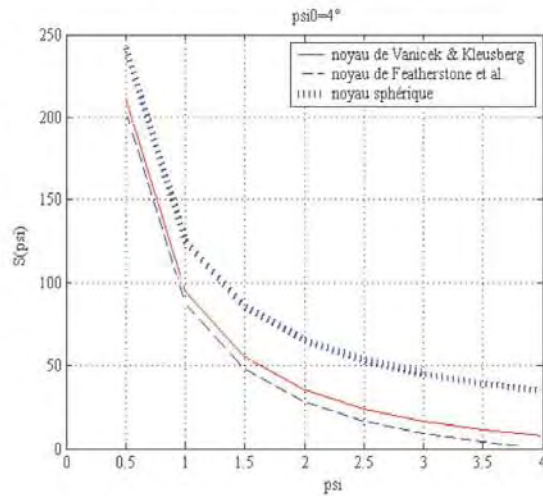


Fig. 1 Noyaux de "Featherstone et al.", de "Vaniček and Kleusberg" et sphérique pour $\psi_0 = 4^\circ$.

La figure 1 montre que le noyau de "Featherstone" et al. décroît plus rapidement que les autres noyaux et prend la valeur zéro pour la distance sphérique $\psi_0 = 4^\circ$ choisie.

Théoriquement, la méthode de modification de "Featherstone & al." tient compte des propriétés de toutes les modifications déterministes présentées dans cet article.

3.2 Noyaux stochastiques

La méthode proposée par "Sjöberg" a pour but de minimiser, au sens des moindres carrés, toute source

d'erreurs affectant le calcul du géoïde. Ces erreurs (relation 14) sont principalement dues aux effets des anomalies de gravité terrestres δN_0 , de la zone d'étude, de la troncature du domaine d'intégration δN_1 et des coefficients du modèle géopotential δN_2 [Ellmann, A, 2001], telles que :

$$\delta N = \delta N_0 + \delta N_1 + \delta N_2 \quad (14)$$

Cette approche est dite stochastique du fait que les valeurs des erreurs, en général, n'étant pas bien connues. Dans ce cas, on adopte des modèles standard de variance en prenant le soin de bien choisir le modèle géopotential.

Ainsi, l'erreur moyenne quadratique des ondulations du géoïde est représentée par la norme de l'erreur globale qui est la somme des contributions partielles des erreurs [Ellmann, A, 2004] :

$$m_N^2 = \|\delta N_{SJ}\|^2 = E \left\{ \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} (\tilde{N}_{SJ} - N) d\sigma \right\} \quad (15)$$

$$m_N^2 = c^2 \sum_{n=2}^M (s_n^{SJ})^2 dc_n + c^2 \sum_{n=2}^{\infty} \left[(Q_n^{SJ})^2 c_n + \left(\frac{2}{n-1} - Q_n^{SJ} - s_n^* \right)^2 \sigma_n^2 \right]$$

Q_n^{SJ} est le coefficient de troncature de "Sjöberg" dont la forme générale est donnée en fonction du coefficient de troncature sphérique Q_n et des coefficients de Paul e_{nk} . Son expression est définie par "Paul et Hagiwara" jusqu'au degré maximum 2000 et du paramètre de modification [Ellmann, A, 2001] :

$$Q_n^{SJ}(\psi) = Q_n(\psi) - \sum_{n=2}^l \frac{2n+1}{2} s_n^{SJ} e_{nk} \quad (16)$$

Où c_n , dc_n et σ_n^2 représentent respectivement la variance de degré n des anomalies de gravité, la variance de degré n des erreurs des anomalies de gravité et la variance de degré n des erreurs des anomalies de gravité terrestres.

L'équation (15) est composée de trois parties : La première représente la contribution due aux erreurs des coefficients du modèle et elle s'écrit en fonction du paramètre de modification s_n^{SJ} et de la variance de degré n des erreurs des anomalies de gravité déterminées à partir du modèle. La seconde reflète l'erreur de troncature et la dernière indique l'influence des erreurs des données terrestres.

Le paramètre de modification s_n^{SJ} dépend de la qualité des données, du rayon de troncature choisi et des caractéristiques du modèle géopotential utilisé. Afin d'estimer sa valeur, on dérive l'erreur moyenne quadratique m_N^2 par rapport à s_n^{SJ} :

$$\frac{\partial}{\partial s_k^{SJ}} \|\delta N\|^2 = 0 \quad k = 0, 1, \dots, M \quad (17)$$

Le système d'équation obtenu est linéaire, du type $AX = b$, que l'on résout par moindres carrés.

A représente une matrice symétrique de coefficients a_{kr} , X représente le paramètre s_k^{SJ} et b le coefficient h_k :

$$a_{kr} = a_{kr} = \frac{2k+1}{2} \cdot \frac{2r+1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} e_{nk} e_{nr} (\sigma_n^2 + c_n) + (\sigma_r^2 + dc_r) \delta_{kr} - \frac{2k+1}{2} e_{kr} \sigma_r^2 - \frac{2r+1}{2} e_{rk} \sigma_k^2$$

$$h_k = \frac{2k+1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} [Q_n(\sigma_k^2 + c_n) - \Omega_n] e_{nk} + \Omega_k - Q_k \sigma_k^2$$

Avec $\Omega_n = \frac{2\sigma_n^2}{n-1}$

Théoriquement, le paramètre de modification s_n ne dépend que du degré. Par contre s_n^{SJ} varie en fonction du rayon de troncature choisi, de la qualité des données, et des caractéristiques du modèle géopotential utilisé. Cette méthode de minimisation de la moyenne quadratique de l'erreur globale rend le paramètre de modification s_n^{SJ} plus performant.

4. Etude des coefficients de troncature

La première modification fut apportée par "Molodensky" [Molodensky, M.S et al., 1962] au noyau original (sphérique) de Stokes en vue de réduire l'effet de troncature. Cette modification mène à la série infinie suivante :

$$\delta N_1 = c \sum_{n=M+1}^{\infty} Q_n(\psi_0) \Delta g_n \quad (18)$$

Les coefficients qui s'expriment en fonction du noyau original de Stokes sont déterminés de la manière suivante :

$$Q_n(\psi_0) = \int_{\psi_0}^{\pi} S(\psi) P_n(\cos \psi) \sin \psi d\psi \quad (19)$$

Le coefficient sphéroïdal de troncature s'écrit en fonction du coefficient de troncature correspondant au noyau sphérique de Stokes défini précédemment et d'un coefficient e_{nk} déterminé numériquement à l'aide des formules de récurrence de "Paul" (1973) [Chuangding, Z et al., 1998].

$$Q_n^M(\psi_0) = Q_n(\psi_0) - \sum_{k=2}^M \frac{2k+1}{k-1} e_{nk}(\psi_0) \quad (20)$$

Le coefficient sphéroïdal de troncature devient instable au voisinage du degré 360 (figure 2). Cette divergence est éliminée par "Wong et Gore" en soustrayant les degrés L du noyau sphérique tel que $L \leq M$.

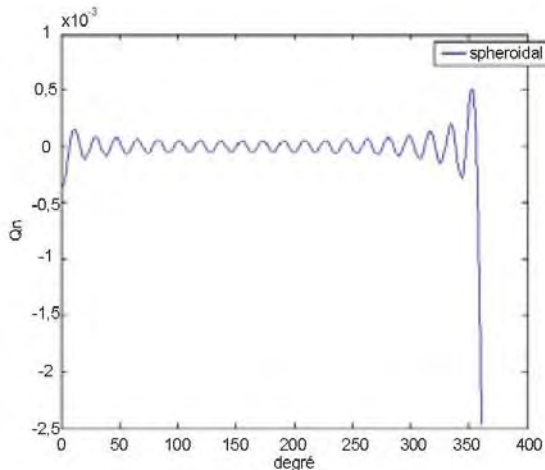


Fig. 2 Coefficient sphéroïdal de troncature

En général, on prend le degré de modification L égal à 20 (limite du degré des coefficients harmoniques précis). La propriété de la convergence du coefficient de troncature a conduit "Meissl" à considérer sa modification par la simple soustraction qui mène à la continuité de la fonction du noyau de l'erreur à la distance sphérique $\psi = \psi_0$.

Afin de développer l'expression explicite du coefficient de troncature de "Meissl", on utilise la formule générale de la seconde identité de "Green" [Featherstone.W.E et al., 1998].

Ainsi, le coefficient de troncature de "Meissl" s'exprime comme suit :

$$Q_n^F(\psi_0) = Q_n(\psi) + \frac{S(\psi_0)}{(n+1)} [P_{n-1}(\cos \psi_0) - \cos \psi_0 \cdot P_n(\cos \psi)]$$

L'utilisation de la méthode des moindres carrés dans la définition de certains paramètres du noyau permet une minimisation de l'erreur bien meilleure que les noyaux sphéroïdal et sphérique. [Vaniček et Featherstone, 1998]

Le coefficient de troncature de "Vaniček et Kleusberg" (figure 3) prend des valeurs plus petites que les autres coefficients. Son oscillation s'affaiblit tout en augmentant le degré et converge vers zéro pour des grandes valeurs de n .

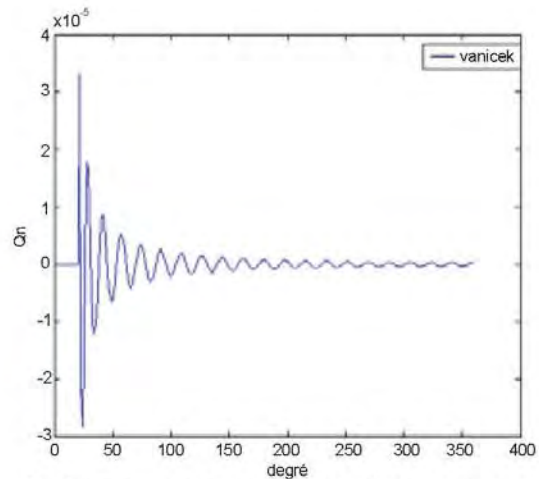


Fig. 3 Coefficient de troncature de "Vaniček et Kleusberg".

La détermination de la nature de la série d'erreur de troncature dépend de la forme explicite de son coefficient de troncature qui est lié à la continuité ou à la discontinuité du noyau de l'erreur sur l'intervalle $[0, \pi]$.

Mais, avec l'utilisation de la soustraction de "Meissl" et la considération des propriétés des polynômes de Legendre, il en résulte que:

$$Q_n^{me} \leq O(n^{-2}) \quad \text{pour} \quad n \rightarrow \infty \quad (21)$$

On conclut que la série spectrale de l'erreur de troncature est une série convergente.

La modification de "Featherstone et al." est une combinaison de deux approches puisqu'elle utilise la méthode des moindres carrés étudiée par "Vaniček et Kleusberg" pour la minimisation de l'erreur de troncature et la soustraction de "Meissl" pour la convergence rapide de la série d'erreur de troncature. Cette approche de modification tient compte de toutes les propriétés définies dans les autres noyaux à savoir : le choix du degré sphéropotential de troncature n , la continuité de la fonction du noyau de l'erreur et la minimisation de l'erreur de troncature au sens des moindres carrés.

5. Conclusion

L'idée principale de "Molodensky" consistait à enlever du noyau sphérique de Stokes les termes correspondant aux degrés inférieurs de sa série. Ceci, permettrait un filtrage des erreurs de petites fréquences. Cette vision ayant évolué suite aux travaux de "Wong" et "Gore" révélant une instabilité du coefficient sphéroïdal de troncature pour les degrés supérieurs.

A cet effet, le degré de modification a été limité à celui du modèle sphéropotentiel. D'autre part, l'approche de "Meissl" qui prend en considération la continuité de la fonction du noyau de l'erreur, consiste à soustraire du noyau sa valeur au rayon de troncature et mène ainsi à la convergence rapide de la série d'erreur de troncature.

L'idée de l'utilisation de la minimisation de l'erreur de troncature au sens des moindres carrés dans la détermination du noyau est très intéressante. En pratique, cette modification a donné de bons résultats dans différentes régions de la Terre.

Les modifications *déterministes* ne tiennent pas compte des erreurs dues aux coefficients du modèle géopotentiel et aux biais dus aux anomalies de pesanteur terrestre. Ces différentes estimations n'étant pas assez connues, "Sjöberg" a introduit l'usage des modèles standard de variance pour les représenter dans une modification dite *stochastique*.

Par contre, lorsque la variance des données est disponible et fiable, les modifications stochastiques offrent une combinaison de deux types de données avec une minimisation de l'erreur globale représentant la somme de toute source d'erreur.

Le but de cette étude comparative entre les différents noyaux modifiés, développé à travers cet article, est de procéder au choix d'un noyau convenable pour la détermination précise du géoïde.

Par ailleurs, en cas du manque d'informations sur les données gravimétriques et sur les coefficients du modèle géopotentiel, il est souhaitable l'usage des modifications déterministes, plus précisément les noyaux modifiés en utilisant la méthode des moindres carrés. Ce choix est consolidé par le fait que théoriquement cette modification englobe toutes les propriétés des différents noyaux.

Références Bibliographiques

- Ågren, J, Sjöberg, L.E 2003 : "*Comparison of some methods for modifying Stokes' formula in the goce era*". Royal Institute of Technology, Sweden 2003.
- Ellmann, A 2001 : "*Least square modification of Stokes formula with application to the Estonian geoid*". Geodesy report No. 1056, Royal Institute of Technology (Kungl Tekniska HOGSKOLAN)
- Chuaning, Z, Zhonglian, L, Xiaoping, W, 1998 : "*Truncation error formulae for disturbing gravity vector*". Journal of geodesy, 72:119 - 123.
- Ellmann, A, 2004 : "*The geoid for the Baltic countries determined by the least squares modification of Stokes' formula*". Doctoral Dissertation in geodesy report No. 1061, Royal Institute of Technology (Kungl Tekniska Hogskolan).
- Evans, J.D, Featherstone, W.E, 2000 : "*Improved convergence rates for the truncation error in gravimetric geoid determination*". Journal of geodesy, 74: 239-248
- Featherstone, W.E, Evans, J.D, Olliver J. G 1998 : "*A Meissl-modified Vaniček and Kleusberg kernel to reduce the truncation error in gravimetric geoid computations*". Journal of geodesy, 72: 154- 160.
- Heiskanen, W. A , Moritz, H 1967 : "*Physical Geodesy*". W.H Freeman & company.San Francisco 1967.
- Molodenskii, M.S, Eremeev, V.F, Iyurkina, M, 1962 : "*Methods for study of the External Gravitational Field and Figure of the earth*". Israel programme for the Translation of the Scientific Publications
- Rabehi, N, 2004 : "*Troncature du noyau intégral de Stokes_Etude des performances*". Mémoire de magister. CNTS Arzew. Novembre 2004.
- Vaniček, P, Featherstone, W.E, 1998 : "*Performance of three types of Stokes' kernel in the combined solution for the geoid*". Journal of geodesy, 72: 684- 697.

Méthodologie d'Analyse de la Qualité des Réseaux Géodésiques Bidimensionnels

B. GOURINE & B. GHEZALI

Division de Géodésie Spatiale – Centre des Techniques Spatiales (CTS)

BP n° 13, Arzew – 31200 – ALGERIE, Tél.: +213 41 47 22 17; Fax : +213 41 47 36 65

E-mail : bachirgourine@yahoo.co

ملخص :

يستند منهج تحليل نوعية الشبكة الجيوديزية ، في هذا المقال، على ثلاثة مفاهيم : المصدقية ، الصلابة و الدقة الداخلية للشبكة . يسمح تحليل مصداقية الشبكة بكشف أخطاء الملاحظات التي لم يكشفها التحليل العرضي . يهدف تحليل صلابة الشبكة إلى التقييم الدقيق لأثر أخطاء الملاحظات على الشبكة بإستعمال مفهوم وترة التغير . أخيراً ، يتعلق تقييم نوعية الداخلية للشبكة بتطبيق S-transformation على أبعاد الشبكة وإختلاف مصفوفاتهم بهدف تخفيض الأخطاء الخارجية للملاحظات . تركز التطبيق حول تحليل شبكة جيوديزية ثنائية الأبعاد (2D) متكونة من 13 نقطة جيوديزية من الفئة الأولى (نظام شمال الصحراء 1959)، و التي تقع في شمال غرب الوطن . النتائج المختلفة المحصل عليها خلال هذا التحليل موضحة .

Résumé : La méthodologie d'analyse de la qualité d'un réseau géodésique, présentée dans cet article, repose sur trois concepts : la fiabilité, la robustesse et la précision interne du réseau. L'analyse de la fiabilité du réseau permet de détecter les observations aberrantes (outliers) non détectables par l'analyse stochastique. L'analyse de robustesse du réseau a pour but l'évaluation fine des effets des erreurs d'observations sur le réseau en utilisant le concept du tenseur de déformation. Enfin, l'évaluation de la qualité interne du réseau concerne l'application de la S-transformation sur les paramètres du réseau et leurs matrices variances covariances dans le but de minimiser les erreurs externes des observations. L'application a porté sur l'analyse d'un réseau géodésique bidimensionnel (2D) composé de 13 points géodésiques du premier ordre (Nord Sahara 1959), situés dans la région Nord Ouest du pays. Les différents résultats obtenus lors de l'analyse sont illustrés.

Mots clés : Réseau Géodésique, Précision, Fiabilité, Robustesse, S-transformation.

Abstract : The methodology of analysis quality of a geodetic network, presented in this paper, is based on three concepts : the reliability, the robustness and the internal precision of the network. The analysis of the network reliability permits to detect the gross errors non detectable by the stochastic analysis. However, the aim of network robustness analysis is the fine evaluation of observations errors effects on the network points, using the concept of strain tensor of deformation.

Finally, the evaluation of the internal quality of the network concerns the application of the S-transformation on the network parameters and their variance covariance matrices, in order to minimize the external errors of observations. The application has focused on the analysis of a bi-dimensional (2D) geodetic network composed of 13 geodetic points of first order (Nord Sahara 1959), situated in the North West region of the country. The different results obtained during the analysis are illustrated.

Keywords : Geodetic Network, Precision, Reliability, Robustness, S-Transformation.

1. Introduction

Habituellement, l'analyse des réseaux géodésiques repose sur des tests statistiques usuels qui consistent aux tests des observations aberrantes, du facteur de variance à priori, des ellipses d'erreurs absolues et relatives, et des résidus ajustés (Vanicek et al., 2001). Tous ces tests sont basés sur l'hypothèse nulle H_0 qui postule que le vecteur des résidus suit une distribution normale de probabilité. Dans ce cas, les mesures erronées peuvent être éliminées du traitement. Le problème se pose quand les erreurs sur les observations sont indétectables par ces tests.

Baarda est le premier géodésien qui a mené une étude sur le risque de 2^{ème} espèce dans l'établissement des réseaux géodésiques.

L'idée principale est la formulation d'une hypothèse alternative H_A (négation de l'hypothèse H_0) qui postule l'existence des erreurs indétectables par les tests usuels (Han et al., 1999) ; (Vanicek et al., 2001). Ses investigations dans ce domaine, le menèrent à établir la théorie de la *fiabilité*.

Une extension de cette théorie, appelée *analyse de la robustesse*, vient de conforter l'analyse des réseaux géodésiques. Cette technique se base sur la combinaison de la fiabilité et de la déformation du réseau en utilisant le concept du tenseur de déformation définissant le gradient du champ des déplacements.

Après l'ajustement du réseau géodésique, la matrice variance covariance des paramètres estimés reste entachée d'erreurs "externes" dues aux effets non modélisables et / ou aux réductions négligées (réfraction atmosphérique, déviation de la verticale, ...) (Leick, 1990).

Dans le but de minimiser ces erreurs externes pour bien caler le réseau et évaluer sa *précision réelle ou interne*, nous introduisons une technique connue sous le nom de "*S-transformation*".

2. Méthodologie d'Analyse des Réseaux Géodésiques (2D)

La méthodologie d'analyse des réseaux géodésiques bidimensionnels (2D), adoptée dans cet article, comporte les étapes suivantes :

- *Analyse stochastique* : repose sur des tests statistiques permettant de juger la qualité du modèle d'ajustement, des observations et des paramètres ajustés ;

- *Fiabilité du réseau* : permet de détecter les observations aberrantes ou les systématismes résiduels des observations non détectables par l'analyse stochastique et leurs effets sur les paramètres estimés ;

- *Analyse de robustesse du réseau* : consiste à évaluer les effets des erreurs d'observations sur le réseau en utilisant le concept du tenseur de déformation;

- *Evaluation de la qualité interne du réseau* : concerne l'application de la S-transformation sur les paramètres du réseau et leurs matrices variances covariances afin de bien caler le réseau et d'évaluer sa précision interne.

2.1 Analyse stochastique du réseau

L'analyse stochastique comporte deux grands volets:

(a) *Analyse de la qualité des observations* :

- Test du χ^2 (conformité de la distribution des résidus avec la distribution normale),
- Test de Student (intervalle de confiance),
- Test de Tau (conformité des résidus normalisés à la loi normale centrée réduite).

(b) *Analyse de la qualité des paramètres estimés* :

- Précisions des paramètres du réseau,
- Ellipses d'erreurs absolues,
- Ellipses d'erreurs relatives.

2.2 Fiabilité du réseau

La *fiabilité d'un réseau* peut être représentée comme étant la capacité d'un réseau de *détecter* et de *résister* aux *erreurs d'observations non détectables* par les tests statistiques classiques. Elle dépend de la géométrie du réseau et de la précision des observations (Seemkooei, 2001).

Le but recherché, en terme de fiabilité, est la minimisation de la magnitude des erreurs non détectables dans les observations et par conséquent, la minimisation des effets de ces erreurs sur les paramètres estimés. Deux éléments essentiels définissent la fiabilité (Lachapelle, 2000) :

(a) *Fiabilité interne* : elle permet de contrôler les observations. Elle comprend plusieurs indicateurs, notamment, la part de redondance (r_i), le résidu standardisé et la plus petite faute détectable (V_{li}) dans la $i^{\text{ème}}$ observation l_i . Dans le calcul de cette dernière, la puissance du test β est fixée à une valeur référence de 80%, d'après Moore et al. (2002). On a alors (Carosio et al., 1995) ; (Dominici et al., 1995) :

$$V_{li} = \sigma_{vi} \cdot \frac{\delta}{\sqrt{r_i}} \quad (1)$$

Avec :

σ_{vi} : écart-type du résidu de l'observation l_i ,
 r_i : part de redondance de l'observation l_i ,

δ : paramètre d'excentrement de la densité de probabilité des résidus et il est en fonction des erreurs de I^{ère} et II^{ème} espèce (α, β), (Leick, 1990) ; (Vanicek et al., 2001).

Les parts de redondance des observations sont les éléments diagonaux de la matrice R définie telle que (Seemkoei, 2001) :

$$R = I - A(A^T P A)^{-1} A^T P \quad (2)$$

Où A et P , représentent respectivement les matrices de configuration et des poids des observations. Les valeurs des parts de redondance sont comprises entre 0 et 1. La valeur 0 signifie que l'erreur sur l'observation considérée ne peut pas être identifiée et la valeur 1 signifie que l'observation est bien contrôlée.

(b) *Fiabilité externe* : l'indicateur de *fiabilité externe*, noté ∇_x , est l'effet de chaque ∇_{li} sur les paramètres estimés des points du réseau. Elle est représentée par la relation suivante (Carosio et al., 1995) ; (Dominici et al., 1995) :

$$\nabla_x = (A^T P A)^{-1} A^T P \nabla_{Li} \quad (3)$$

2.3 Analyse de robustesse du réseau

2.3.1 Définition

Par définition, la robustesse d'un réseau géodésique est une 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 qui 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 (Seemkoei, 2001) ; (Vanicek et al., 2001) ; (Michel et al., 2003):

$$E = \frac{\partial U(x, y)}{\partial X} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x}(x, y) & \frac{\partial u}{\partial y}(x, y) \\ \frac{\partial v}{\partial x}(x, y) & \frac{\partial v}{\partial y}(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{ux} & e_{uy} \\ e_{vx} & e_{vy} \end{pmatrix} \quad (4)$$

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

- La dilatation ou tenseur moyen :

$$\lambda = \frac{1}{2}(e_{ux} + e_{vy});$$

- Le cisaillement total γ :

$$\gamma = \gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{1}{2} \sqrt{(e_{ux} - e_{vy})^2 + (e_{uy} + e_{vx})^2}$$

- La rotation différentielle locale :

$$\delta\omega = \frac{1}{2}(e_{uy} - e_{vx}) - \Omega = \omega - \Omega.$$

Où Ω représente la rotation globale qui correspond à la moyenne des ω sur les points du réseau.

L'analyse de robustesse utilise les valeurs absolues de la *fiabilité externe* maximale $|\nabla_x|_{\max}$ du réseau comme étant un champ de déplacement local (Seemkoei, 2001). Les gradients de ce champ sont évalués séparément pour chaque coordonnée x et y pour déterminer les composantes de la matrice du tenseur de déformation leur correspondant.

L'analyse et l'interprétation des résultats tiennent compte des valeurs *maximales* des primitives de déformations notées ($\lambda_{\max}, \gamma_{\max}, \delta\omega_{\max}$) décrivant respectivement la robustesse du réseau en *échelle* (dilatation), en *configuration* (cisaillement total), et en *orientation* (rotation différentielle).

2.3.2 Déformabilité et degrés de signification

La signification de ces paramètres est basée sur l'estimation de la *déformabilité* du réseau qui représente l'inverse de sa solidité dans le sens où un réseau déformable est un réseau sensible aux incertitudes des observations. En d'autres termes, c'est l'étude du comportement du réseau sous l'effet des variations des observations dans leur intervalle de confiance. Ce choix de caractériser la déformabilité d'un réseau est dû au fait qu'il est possible de quantifier les déformations qu'implique une variation des observations. Pour cela, nous introduisons la notion de *déplacement virtuel* d'un point qui est défini comme étant le déplacement de ce point qu'impliquent des modifications aléatoires des observations dans leur intervalle de confiance et de *déformation virtuelle* du réseau qui représente la déformation consécutive aux déplacements virtuels de l'ensemble des points du réseau.

La quantification de la déformabilité d'un réseau est basée sur les *primitives de déformation virtuelle* obtenue par la méthode de *Monté Carlo* qui consiste à effectuer une série de tirages aléatoires de jeux d'observations bruitées selon leur distribution statistique. A partir d'un jeu d'observations donné, on ajuste le réseau et on évalue sa fiabilité externe. Les nouvelles valeurs de la fiabilité externe maximale ainsi déterminées seront les déplacements virtuels à partir desquels les déformations virtuelles sont calculées. La réitération de ce processus s'effectue suivant le nombre de simulations.

La déformabilité est donnée par la relation suivante :

$$Def = M + T \tag{6}$$

Où M et T représentent, respectivement, la moyenne et la tolérance des primitives de déformation virtuelle obtenues à partir d'un jeu de simulations de *Monté Carlo*. La tolérance T , égale à 2,57 fois l'écart type de ces primitives, permet de recouvrir 99% des déformations virtuelles, dans l'hypothèse que l'échantillon calculé suive une loi normale (Michel et al., 2003) :

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{def} &= \bar{\lambda} + 2,57\sigma_{\lambda} \\ \gamma_{def} &= \bar{\gamma} + 2,57\sigma_{\gamma} \\ \delta\omega_{def} &= \bar{\delta\omega} + 2,57\sigma_{\delta\omega} \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

Avec :

$\bar{\lambda}$, σ_{λ} : moyenne et écart type des dilatations virtuelles (simulées);

$\bar{\gamma}$, σ_{γ} : moyenne et écart type des cisaillements totaux virtuels (simulés);

$\bar{\delta\omega}$, $\sigma_{\delta\omega}$: moyenne et écart type des rotations différentielles virtuelles (simulées).

Enfin, à partir de la déformabilité, le *degré de signification* (Σ) des tenseurs de déformation peut être défini pour chaque primitive de déformation réelle ($\lambda_{max}, \gamma_{max}, \delta\omega_{max}$), par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \Sigma_{\lambda} &= \frac{\lambda_{max} - \lambda_{def}}{\lambda_{def}} ; \quad \Sigma_{\gamma} = \frac{\gamma_{max} - \gamma_{def}}{\gamma_{def}} ; \\ \Sigma_{\delta\omega} &= \frac{\delta\omega_{max} - \delta\omega_{def}}{\delta\omega_{def}} \end{aligned} \tag{8}$$

Avec : $-1 \leq \Sigma \leq +\infty$, tel que si :

- $\Sigma < 0$: la déformation n'est pas significative car elle peut être considérée comme la conséquence d'un bruit de mesure dans les observations.

- $\Sigma > 0$: la déformation est significative.

- $0 < \Sigma < 1$: la déformation est significative et elle est de l'ordre de la déformabilité.

2.4. Evaluation de la qualité interne du réseau

Après l'ajustement du réseau géodésique, la matrice variance covariance des paramètres estimés, notée, $C_{\hat{x}}$ reste entachée d'erreurs *externes* dues aux effets non modélisables et / ou aux réductions négligées (Leick, 1990) et notamment à l'effet du système de référence (Sillard, 1999). Ces effets exercent une influence systématique sur les résultats qui se traduisent par une translation, une rotation et une mise à l'échelle du réseau estimé (Welsch, 1986).

Pour minimiser ces erreurs, nous avons utilisé une transformation de similitude appelée S-transformation qui s'exprime par la formule suivante (Kuang et al., 1992) ; (Wellenhof et al., 1993) ; (Sillard, 1999):

$$S = I - G(G^t . G)^{-1} G^t \tag{9}$$

Où S est appelée aussi projecteur, I est la matrice identité et $G = [G1 \ G2 \ \dots \ Gn]$ 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 et p nombre de points.

Les paramètres internes du réseau sont obtenus par une S-transformation des paramètres estimés :

$$X^i = S . \hat{X} \tag{10}$$

La solution interne X^i est une solution unique du réseau (Corsilla, 1984). La précision interne du réseau, notée $C_{\hat{x}}^i$, est obtenue par une S-transformation de la matrice variance covariance externe des paramètres, notée $C_{\hat{x}}^e$, telle que :

$$C_{\hat{x}}^i = S . C_{\hat{x}}^e . S^t \tag{11}$$

Elle est caractérisée par la propriété de la trace minimale, c à d., $tr(C_{\hat{x}}^i) = \min$.

3. Application

L'application a porté sur l'analyse d'un réseau géodésique bidimensionnel (2D) composé de 13 points géodésiques du premier ordre situés dans la région Nord Ouest de l'Algérie.

Les données géodésiques utilisées lors de l'analyse sont constituées de 51 observations angulaires (50 lectures horizontales et un azimut de Laplace) et sont fournies par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT). Les précisions des mesures d'angle et d'azimut sont respectivement de l'ordre de ± 7 dmgr et ± 3 dmgr. La méthode d'ajustement du réseau adoptée est celle avec "contraintes internes" (Gourine et al., 2005).

3.1 Analyse stochastique du réseau

Le tableau (1) montre que les résidus suivent une loi normale puisque le test du χ^2 est positif. Le test de Student n'a révélé aucune observation suspecte qui soit hors intervalle de confiance [-2dmgr, +2dmgr].

Tableau 1. Statistiques de l'ajustement du réseau.

Nombre d'inconnues	39
Nombre d'observations	51
Nombre de paramètres du datum (système de coordonnées de référence)	4
Ecart type à priori σ_0	8 dmgr
Ecart type à posteriori $\hat{\sigma}_0$	2 dmgr
Test du χ^2	Positif
Test de Student	Pas d'observations suspectes
Test de Tau	Positif pour chaque résidu

Les dimensions des ellipses d'erreurs absolues sont en moyenne de 12 cm (figure 1.a), de même que pour les dimensions des ellipses d'erreurs relatives de l'ensemble des couples de points sont en général de même amplitude (en moyenne ≈ 16 cm) (figure (1.b)). Par conséquent, la précision obtenue sur l'ensemble des points du réseau est homogène et jugée bonne vis à vis de la précision requise en géodésie classique (± 20 cm).

3.2 Fiabilité du réseau

Les figures (2) et (3) représentent respectivement, l'amplitude des erreurs d'observations non détectables par les tests statistiques usuels et leurs effets sur les paramètres estimés du réseau. L'influence de la fiabilité interne sur les paramètres estimés dépend essentiellement de la part de redondance des observations. Plus la part de redondance d'une mesure est petite (i.e., faible contribution au degré de liberté), plus son influence sur les paramètres estimés devient importante.

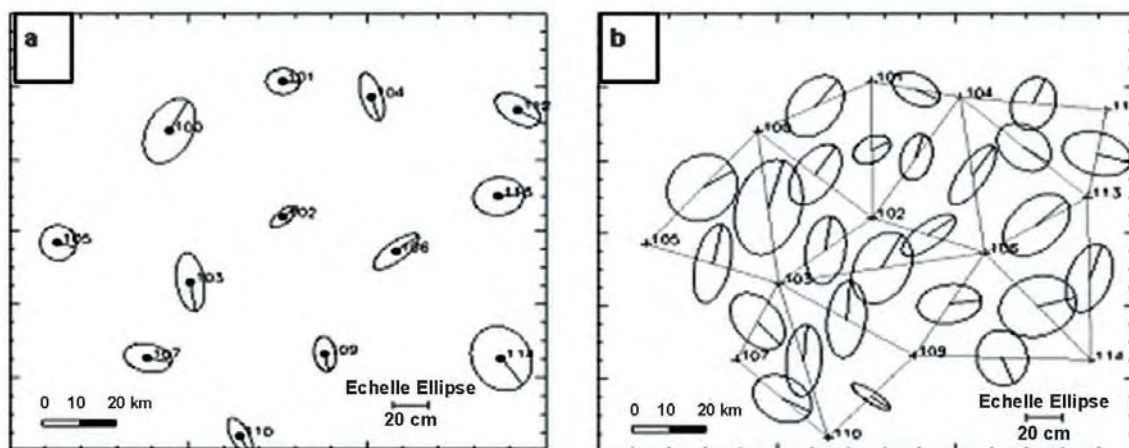


Fig. 1 (a) Ellipses d'erreurs absolues; (b) relatives.

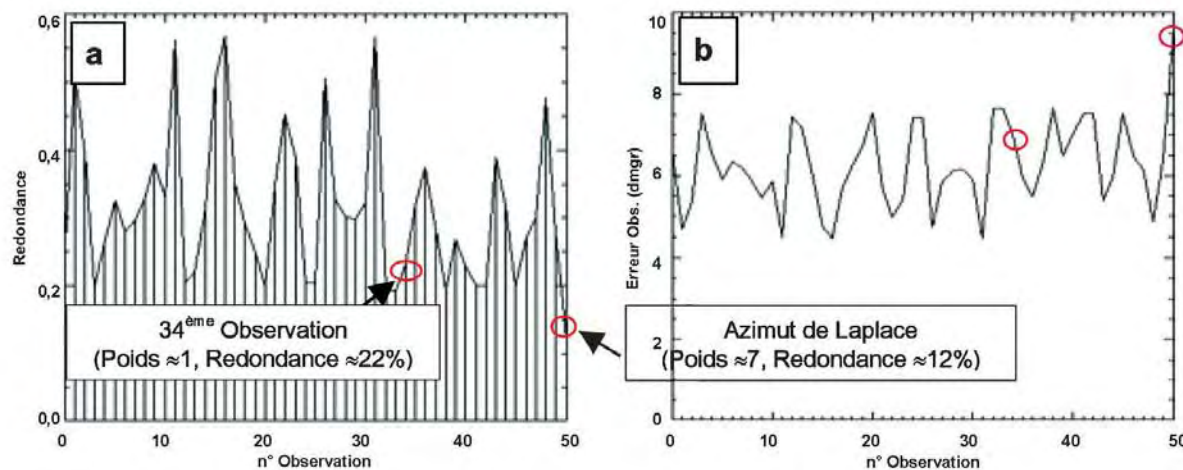


Fig. 2 Fiabilité interne du réseau : (a) redondance des observations, (b) fiabilité interne.

En d'autres termes, si la part de redondance est proche de 1, la variance des résidus est de l'ordre de la variance des observations et par conséquent, la variance des observations ajustées tend vers 0. Dans ce cas, le bruit dans les résidus est égal à celui des observations (i.e., les observations sont ajustées avec une grande précision). Par contre, si la part de redondance est proche de 0, alors la variance des résidus est nulle (i.e., la variance des observations ajustées est égale à celle des observations). Pour garantir la fiabilité du réseau, la variance des observations ajustées doit être inférieure à celle des observations (Cepek, 2001).

La figure (2.a) montre que les valeurs de la redondance des observations sont comprises entre 20% et 60% et que les erreurs détectées (fiabilité interne : figure 2.b) sont en moyenne de 6 dmgr. Par exemple, la part de redondance pour l'observation ajustée n° 34 est égale à 28% et que sa variance est inférieure à celle de sa mesure brute. Par contre, la part de redondance relative à l'azimut de Laplace est relativement plus petite ($\approx 12\%$) et l'erreur correspondante est sensiblement grande ($\approx 10\text{dmgr}$).

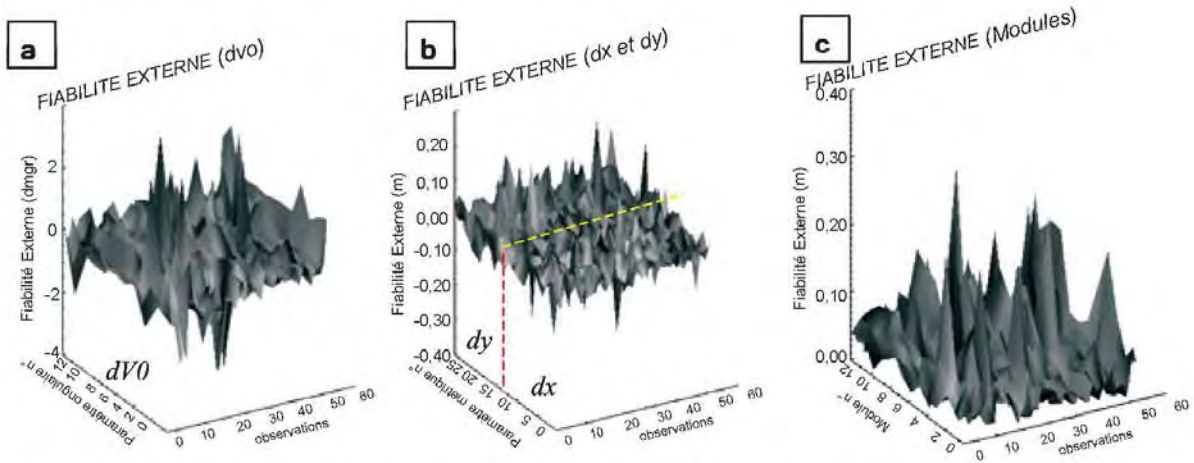


Fig. 3 Fiabilité externe du réseau : (a) en orientation $V0$ (b) en coordonnées x et y (c) en position.

D'après le tableau (2), nous remarquons que l'EMQ (l'Ecart Moyen Quadratique), noté s , de l'azimut ajusté (1.9 dmgr) est sensiblement égal à l'EMQ de la mesure brute (3 dmgr). Dans ce cas, la part de redondance est faible (12%) et par conséquent, la fiabilité de cette observation n'est pas totalement garantie (Cepek, 2001) ; (Leick, 1990). Ceci est dû principalement à la forte pondération de cette mesure (poids $\approx 7, \sigma = 3\text{dmgr}$) par rapport aux poids des autres observations angulaires (poids $\approx 1, \sigma = 7\text{dmgr}$). Ce constat a été déjà observé via un test qui consiste à attribuer un poids important (≈ 7) à une observation angulaire quelconque (exemple : mesure n° 34). Afin de satisfaire les critères de la fiabilité du réseau, il est recommandé de :

- Concevoir le réseau de sorte que les parts de redondance des observations soient semblables, afin que la capacité de détection des erreurs d'observations soit sensiblement identique en tout point du réseau. La fiabilité du réseau repose sur le critère général suivant: $\text{Min}(r_i) \rightarrow \text{Max}$, où r_i représente la part de redondance de la $i^{\text{ème}}$ observation.
- Disposer d'un lot d'observations n qui soit au moins 3 fois supérieur au nombre de paramètres à estimer p . Par conséquent, la somme des parts de redondance des observations $\sum r_i$ (nombre de degrés de liberté du réseau $n - p$) sera au moins deux fois supérieure au nombre des paramètres : $\sum r_i = n - p \geq 2p$, avec : $n \geq 3p$.

Tableau 2. Résultats relatifs au calcul de la part de redondance et des EMQ.

	EMQ Obs. ajustée (dmgr)	EMQ Résidu (dmgr)	Part de Redondance (%)
EMQ Azimut Laplace = 3dmgr	1.92	1.08	12
EMQ Obs. n°34 = 7dmgr	3.24	3.76	28
Test : EMQ Obs. n°34 = 3dmgr	2.2	0.80	7

L'effet des erreurs externes détectées par la fiabilité interne sur l'ensemble des paramètres ajustés est représenté dans le tableau (3). L'ensemble des fiabilités externes du réseau est illustré par la figure (3).

Le tableau (3) et la figure (3), montrent que les effets maximaux des biais de mesures sur le

paramètres du réseau sont de l'ordre de ± 31 cm sur la position planimétrique et de ± 4 dmgr sur l'orientation. Compte tenu de la précision requise en géodésie classique, ces biais n'exercent pas d'influences significatives sur les coordonnées du réseau.

Tableau 3. Statistiques de la fiabilité externe du réseau.

Fiabilité externe	Min	Max
dv0 (dmgr)	- 3.9	+ 3.6
dx, dy (cm)	- 30.7	+ 23.2
Module (cm) $\sqrt{dx^2 + dy^2}$	0.2	+ 30.9

3.3 Analyse de robustesse du réseau

La méthode d'analyse de robustesse du réseau repose sur la représentation optimale des effets des biais d'observations sur le réseau (fiabilité externe maximale) en terme de déformation. La figure (4) illustre la robustesse du réseau en terme de configuration, d'échelle et d'orientation sur chaque point. Elle est caractérisée par les valeurs absolues des trois quantités primitives de déformation: cisaillement γ (configuration), dilatation λ (échelle), et rotation différentielle $\delta\omega$ (orientation). Tant que ces valeurs sont importantes tant que la robustesse est moindre et par conséquent, on peut distinguer les zones de faiblesse du réseau.

D'après le tableau (4), la robustesse du réseau en configuration (≈ 7 ppm), en échelle (≈ 2 ppm) et en orientation (≈ 1 ppm), est jugée acceptable dans le cadre de la géodésie classique (≈ 10 ppm).

Un calcul de déformabilité des primitives de déformation et leurs degrés de signification a été effectué. Les résultats ont montré que les valeurs de γ et $\delta\omega$ sont dans l'ensemble non significatives car leurs effets sont négligeables sur le réseau. Par contre, la déformation en dilatation λ est en moyenne de l'ordre de la déformabilité tout en étant significative. Par conséquent, le réseau est jugé plus robuste en configuration et en orientation qu'en échelle.

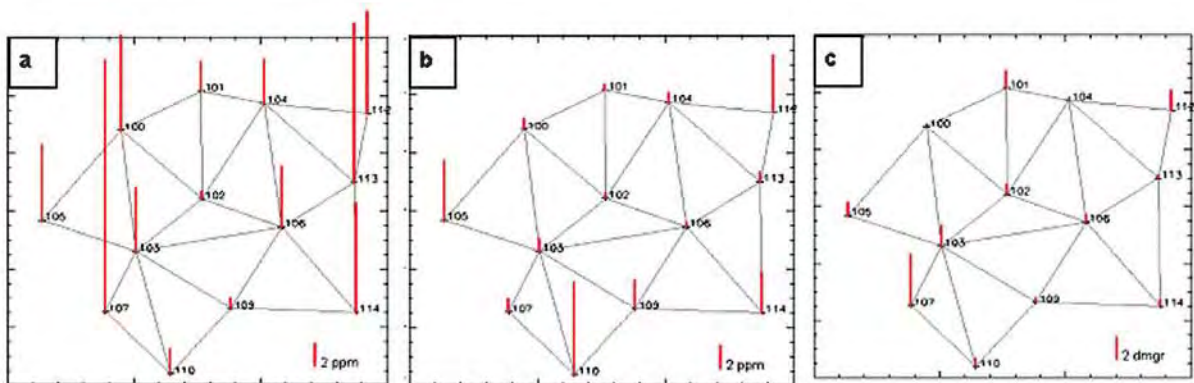


Fig. 4 Robustesse du réseau (a) en configuration (b) en échelle (c) en orientation.

Tableau 4. Statistiques de la robustesse du réseau.

	γ (ppm)	λ (ppm)	$\delta\omega = \omega_i - \Omega$ (dmgr)
Min	0.6	0.3	0.0 (0.0 ppm)
Max	22.4	8.1	4.6 (7.2 ppm)
Moyenne	7.3	2.3	0.8 (1.3 ppm)

3.4 Evaluation de la qualité interne du réseau

L'application de la S-transformation sur les paramètres du réseau et leurs variances covariances permet de minimiser les erreurs externes (biais) des observations. La moyenne des écarts types sur les coordonnées des points du réseau, avant l'application de la S-transformation, est de l'ordre de :

$$\bar{\sigma}_x = \pm 10.3 \text{ cm}, \quad \bar{\sigma}_y = \pm 12.2 \text{ cm}.$$

Après l'application de la S-transformation, cette moyenne est de l'ordre de :

$$\bar{\sigma}_x^i = \pm 9.8 \text{ cm}, \quad \bar{\sigma}_y^i = \pm 10.2 \text{ cm}.$$

Nous remarquons, qu'après l'application de la S-transformation, la précision moyenne sur les composantes x et y s'est améliorée de 0.5 cm en x et de 2 cm en y .

La figure (5) illustre les ellipses d'erreurs obtenues avant et après l'application de la S-transformation sur le réseau.

Les dimensions des ellipses d'erreurs, a et b , après l'application de la S-transformation se sont améliorées de l'ordre de 10%. Le tableau (5) fournit les valeurs minimale, maximale et moyenne des dimensions des ellipses d'erreurs avant et après la S-transformation.

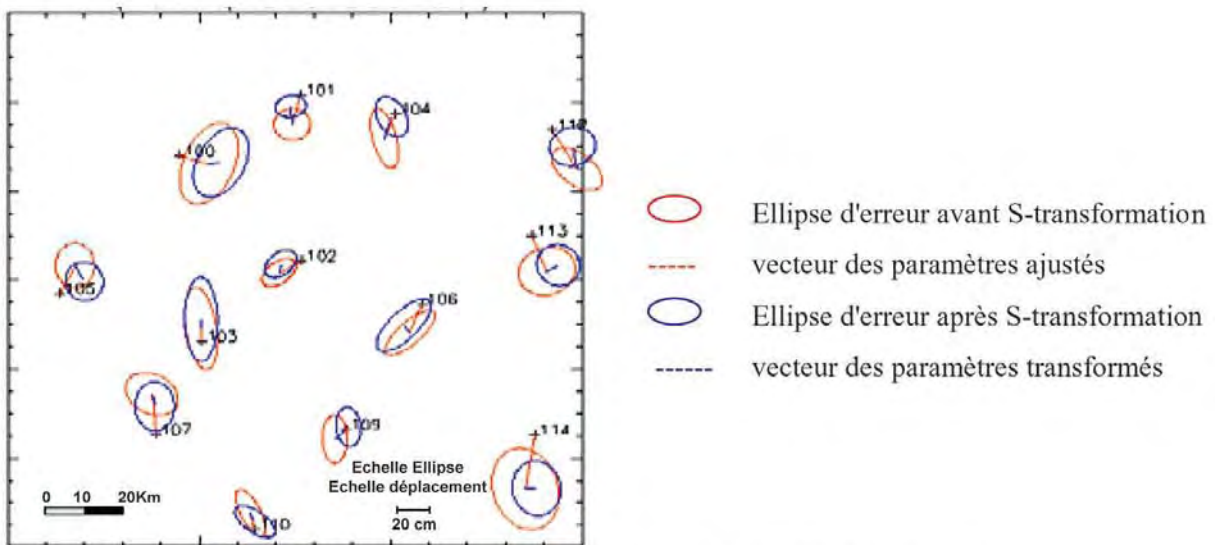


Fig. 5 Comparaison des ellipses d'erreurs (avant et après application de la S-transformation).

Tableau 5. Statistiques des ellipses d'erreurs avant et après application de la S-transformation.

	Avant la S-transformation		Après la S-transformation	
	a (cm)	b (cm)	a (cm)	b (cm)
Min	9.3	4.9	7.9	4.7
Max	19.6	15.9	18.3	11.8
Moyenne	13.8	8.2	11.9	7.8

4. Conclusion

La méthodologie d'analyse des réseaux géodésiques, adoptée dans cet article, présente un avantage, dans la mesure où elle permet de bien définir et d'évaluer la qualité des réseaux géodésiques qui est caractérisée par la précision, la fiabilité et l'analyse de la robustesse. La fiabilité permet de détecter les erreurs non détectables par l'analyse statistique usuelle. Elle dépend essentiellement de la part de redondance de chaque observation (géométrie du réseau), du nombre de degrés de liberté du réseau et de la

mesures. L'analyse de robustesse permet d'évaluer efficacement les effets des erreurs d'observations sur chaque point du réseau en terme de tenseur de déformation. Pour une interprétation facile des résultats, les valeurs des déformations sont exprimées en terme de robustesse du réseau en échelle, en configuration et en orientation. La signification de ces paramètres est basée sur l'estimation de la déformabilité du réseau. Toutefois, la robustesse reste tributaire de la géométrie du réseau.

Enfin, l'application de la S-transformation sur le réseau estimé (i.e., les paramètres et leur matrice variance covariance) permet de minimiser les erreurs externes (erreurs de modélisation, erreurs du système de référence,...) afin de bien caler le réseau et d'évaluer sa précision interne ou réelle. Les résultats obtenus lors des tests effectués sur une zone pilote du réseau de base Algérien (Nord Sahara 1959) ont montré la puissance de cette méthodologie d'analyse de la qualité du réseau.

En perspectives, il serait intéressant d'appliquer cette méthodologie d'analyse sur un réseau géodésique 3D (réseau GPS, par exemple).

Références Bibliographiques

- Carosio A., Reis O., 1995 : *Méthodes géodésiques et modèles mathématiques pour l'implantation des nouvelles transversales alpines*, Revue XYZ 62, .
- Cepek A., 2001 : *Program gama for adjustment of local geodetic network*. Document d'aide du programme "gama". Site internet : <http://www.gnu.org/software/gama>.
- Corsilla F., 1984 : *Tecniche di ottimizzazione delle reti geodetiche – Technique of optimisation of geodetic network*, Bulletin of Italian society of topography and photogrammetry n° 2.
- Dominici D., Stoppini A., Unguendoli M., 1995 : *Precision and reliability versus surplus measurements in GPS networks*, Bollettino di geodesia e scienze affini 4.
- Gourine B., Ghezali B., Taibi H., 2005 : *Ajustement avec contraintes internes des réseaux géodésiques*, Bulletin des sciences géographiques, N° 15, pp 8-13.
- Han S., Rizos C., 1999 : *Network adjustment issues using mixed GPS surveying techniques*. 40th & 6th S.E. Asian Surveyors Congress, Fremantle, Australia, pp 68-76.
- Kuang S., Chrzanowski A., 1992 : *Multi-objective optimisation design of geodetic networks*, Manuscripta geodaetica 17, pp 233-244.
- Lachapelle G., Ryan S., 2000 : *Statistical reliability measures for GPS*, IMA workshop on mathematical challenges in GPS, Université de Minnesota, Etats Unis.
- Leick A., 1990 : *GPS satellite surveying*. Edition John Wiley & Sons, New York, Etats Unis.
- Michel V., Person T., 2003 : *From geodetic monitoring to deformation tensors and their reliability*. 11th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Greece.
- Moore M., Rizos C., Wang J., 2002 : *Quality control issues relating to an attitude determination system using a multi-antenna GPS array*. School of surveying and spatial information systems, University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Seemkooei A.A., 2001 : *Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks*. Journal of Geodesy 75, pp 227-233.
- Sillard P., 1999 : *Modélisation des systèmes de référence terrestres - contribution théorique et méthodologique*. Thèse de Doctorat, Observatoire de Paris.
- Vanicek P., Craymer M.R., Krakiwsky E.J., 2001 : *Robustness analysis of geodetic horizontal networks*. Journal of Geodesy 75, pp 199-209.
- Wellen Hof B. H., Lichtenegger H., Collins J., 1993 : *Global Positioning System, Theory and Practice*, Springer Verlag, 2^{ème} édition.
- Welsch W.M., 1986 : *Problems of accuracies in combined terrestrial and satellite control networks*. Bulletin géodésique 60, pp 193-203.

Elaboration d'un SIG pour la Gestion des Réseaux Géodésiques.

A. DERKAOUI, B. GHEZALI
Centre des Techniques Spatiales – Division de Géodésie
BP 13, 31200 Arzew, Algérie

ملخص :

يتركز موضوع هذا المقال حول التصميم، الإنجاز و وضع على مستوى CTS نظام المعلومات الجغرافي SIG الخاص بوضع الشبكات الجغرافية المختلفة. يستخدم مستعمل هذا النظام قواعد الإستفهام الفضائية والدالية التي تسمح بالإجابة على كل طلب يهدف إلى الإستعلام على وجود المعطيات الجيوديزية أياً كانت في المنطقة. اقتضى إنجاز نظام المعلومات الجغرافي جرد وتحليل يسمح بتصنيف المعطيات في أربعة مجالات (شبكة قياس الجاذبية، شبكة التسوية، شبكة جيوديزية أرضية و فضائية GPS). سمح إعداد المخططات التصورية مجالاً بمجال إلى تزويد الجزء الوصفي تحت "SGBD Access". تم المرور من الجداول الدالية نحو الرسم البياني تحت "Mapinfo" بإنشاء خرائط الشبكات المختلفة، بينما تتلاقى المعلومة البيانية بخاصيتها الدالية في القاعدة. أخيراً، تؤمن قواعد الإستفهام المتنوعة الدالية و الفضائية بأجهزة ترابط، تتجز بمعلومات "Mapbasic"، مطابقة لإحتياجات مستعملي المعلومة الجيوديزية .

Résumé : Le thème développé à travers cet article porte sur la conception, la réalisation et la mise en place au niveau du CTS un système d'information géographique (SIG) de l'état des divers réseaux géodésiques. L'utilisateur de ce système dispose de fonctionnalités d'interrogation spatiale et sémantique permettant de répondre à toute requête visant à s'informer de l'existence d'une donnée géodésique quelconque sur une région. La réalisation de ce SIG a nécessité un inventaire et une analyse de l'existant qui a permis de classer les données en quatre domaines (réseau gravimétrique, réseau de nivellement, réseau géodésique terrestre et réseau géodésique spatial GPS). L'élaboration des schémas conceptuels par domaine a permis. Enfin, les règles d'interrogation diversifiées sémantiques et l'implémentation de la partie descriptive sous le SGBD "Access". Le passage des tables sémantiques vers le graphique est effectué, sous l'environnement "Mapinfo", par la création de cartes des divers réseaux, tout en reliant l'information graphique à ces attributs sémantiques dans la base. Enfin, les règles d'interrogation diversifiées sémantiques et spatiales sont assurées par des interfaces, "Mapbasic", bien adaptées aux besoins des utilisateurs de l'information géodésique.

Mots clés : Réseau géodésique, Base de données, SIG, SGBD relationnel.

Abstract : The developed theme through this article is about the conception, the realization and the setting up to the level of the CTS a system of geographical information (GIS) of the state of the various geodesic networks. The use of this system has functionalities of spatial and semantic questioning permitting to answer all requests aiming to inquire about the any geodesic data existence on a region. The realization of this GIS required an inventory and an analysis of the existing that permitted to classify the data in four domains (gravimetric network, network of levelling, terrestrial geodesic network and spatial geodesic network GPS). The development of the conceptual diagrams by domain permitted the implementation of the descriptive part under the DBMS "Access." The passage of the semantic tables toward the diagram is done, under the "MapInfo" environment, by the creation of cards of the various networks, while joining the graphic information to these semantic attributes in the basis. Finally, the rules of varied semantic and spatial questioning are assured by interfaces, developed in "Map basic" language, well adapted to the need of the users of the geodesic information.

Keywords : Geodesic network, Data base, GIS, relational DBMS.

1. Introduction

Les techniques de géodésie (terrestre ou spatiale) exige une variété et un volume important de données (observations, répertoires de points géodésiques, éphémérides des satellites, données géodésiques, etc.). Comparativement à la méthode de recherche traditionnelle basée essentiellement sur la consultation des archives et dépourvue de tout moyen de calcul, l'outil élaboré et présenté dans cet article offre de meilleures possibilités notamment :

- Analyses thématiques, statistiques et spatiales,
- Création de cartes,
- Mise à jour de données,
- Rassemblement de données.
- Organisation des données spatiales en couches,
- Interrogation conviviale de la base de données.

Ce travail effectué au niveau de la division de géodésie du CTS, consiste à la mise en œuvre d'un SIG de l'état des réseaux géodésiques qui comporte deux grands volets :

1^{er} volet : Base de données

La conception de la base de données a nécessité le développement de plusieurs phases :

- Inventaire de l'information géodésique par domaine en s'appuyant sur la documentation disponible au niveau du CTS : il comporte la description des données, la compilation des documents de spécifications des producteurs de l'information géographique, et la collecte et l'exploitation des données existantes. Les données ont été classées en quatre domaines (réseau gravimétrique, réseau de nivellement, réseau géodésique terrestre et réseau géodésique spatial GPS).
- Modélisation de l'information géodésique par domaine : elle permet de dégager l'ossature du réseau géodésique, notamment en terme de spécification, de description des informations qui seront supportées par le système. Cette phase sera représentée par l'établissement d'un schéma conceptuel par domaine utilisant l'approche entité association et le formalisme HBDS en intégrant toutes les contraintes descriptives et fonctionnelles.
- Implémentation du schéma conceptuel de chaque domaine sous le SGBD relationnel "Access".
- Validation de la base de données géodésiques.

2^{ème} volet : Modèle SIG

Une fois les définitions formelles des informations adoptées, un modèle SIG est développé sous le logiciel SIG "Mapinfo". Il englobe surtout les contraintes spatiales des données.

Enfin, pour répondre au souci de mettre à la disposition des usagers de l'information géodésique, un système convivial, dans lequel les outils utilisés sont transparents pour l'utilisateur, des règles d'interrogation diversifiées sémantiques et spatiales ont été développées en langage "Mapbasic" sous l'environnement "Mapinfo". Elles jouent le rôle d'interface avec les utilisateurs de l'information géodésique, et permettront un gain en temps d'accès aux données géodésiques quelconques sur une région.

2. Base de Données

2.1 Analyse de l'information géodésique

Dans le cadre de ce travail, cette étape a consisté à inventorier et analyser les données géodésiques existantes au niveau du Centre des Techniques Spatiales (CTS). L'exploitation des différents documents et fichiers existants et l'étude des besoins des différents usagers de l'information géodésique, qu'ils soient chercheurs ou opérateurs économiques, publics ou privés, nous ont permis d'établir une liste de données classée en quatre domaines :

Domaine "réseau gravimétrique" : le réseau gravimétrique est subdivisé principalement en trois réseaux partiels (ordres 0, 1 et 2). Un point gravimétrique est décrit par des informations descriptives et géométriques (matricule, désignation, ordre, nature, type, état, type d'observation, instrument de mesure, gravité observée, système géodésique, anomalie à l'air libre, correction de terrain, position géographique et sa précision, système d'altitude, altitude et sa précision, méthode de traitements, etc.).

Les données gravimétriques utilisées ont été fournies par le Bureau Gravimétrique International (B.G.I.) et sont exprimées dans le Système de Référence Géodésique GRS80. La précision a priori des mesures est de 5 mGals.

Domaine "réseau géodésique classique" : le réseau de géodésie classique est établi par des techniques terrestres (mesures d'angles, de distances et d'azimuts) et calculé sur un ellipsoïde à partir d'un point fondamental [Bouteloup, D, 2002]. Les points géodésiques sont matérialisés sur le terrain par des repères dont leurs coordonnées sont publiées sous forme de répertoire.

Ce domaine regroupe les informations relatives aux observations (période, lieu dit, opérateur, instruments, type de mesure, précision, etc.) et aux traitements géodésiques (méthode de calcul, date, matériel, ellipsoïde, projection cartographique, précision, etc.), et à la description des points géodésiques (numéro, situation cartographique et administrative, système géodésique, ordre, coordonnées géodésiques, système d'altitude, altitude, précision, répertoire, etc.).

Les données exploitées sont fournies par l'INCT (Institut National de Cartographie et de Télédétection), en tant qu'organisme national ayant en charge le réseau géodésique national et la cartographie de base.

Domaine "réseau de nivellement" : un repère de nivellement est représenté par des informations descriptives et géométriques (matricule, nom, état, type, nature, numéro et nom du cheminement, situation cartographique et administrative, point kilométrique, technique de détermination, organisme responsable, répertoire, système d'altitude, altitude, précision, etc.) [B. chemaa, 1999]. D'autres informations relatives aux observations sont intégrées à savoir les points de référence visés, l'époque et la session d'observations, les mesures, l'instrument utilisé, le nom de l'opérateur, etc.

Ce domaine regroupe aussi le "réseau de GPS/nivellement" qui représente des stations GPS nivelées qui sont rattachées au réseau Nivellement Général Algérien (NGA).

Domaine "réseau de géodésie spatiale" : le réseau de géodésie spatiale est réalisé par des techniques d'observations spatiales (GPS, Altimétrie spatiale, DORIS, VLBI, etc.). Dans le cadre de ce travail, les données de géodésie spatiale utilisées sont issues de la technique GPS. Un point GPS est décrit par des informations relatives aux observations (numéro du point, situation cartographique et administrative, période, nom de la session, heure de début et de fin de la session, lieu dit, opérateur, instruments, type de mesure, hauteur de l'antenne, nombre de satellites observés, etc.) et aux traitements (logiciel, méthode de calcul, date, réseau de référence, système géodésique, coordonnées géodésiques, système d'altitude, altitude, précision, etc.). [N. Dennai, 2004]

2.2 Modélisation des données

La modélisation constitue une démarche d'investigation permettant de gérer un réseau. C'est une étape fondamentale dans la conception des bases de données.

La méthode adoptée pour la création de ces modèles est basée sur celle de MERISE (Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique de Système d'Entreprise) qui prévoit une conception par niveaux qui sont les suivants [H. Tradieu & A. Rochfeld, 1991]:

Le niveau conceptuel : Modèle Conceptuel de Données (MCD). Les modèles de diagrammes de référence utilisés dans ce niveau sont le modèle "Entité Association" et le modèle "HBDS" (Hypergraph Based Data Structure) [F. Duquenne, 1990].

Le niveau logique : Modèle Logique de Données (MLD). Ce niveau introduit la notion des tables logiques, et constitue donc le premier pas vers les tables des SGBD relationnel.

Le niveau physique : Modèle Physique des Données (MPD). Il se base sur le modèle logique des données et contient finalement les tables à l'aide d'un SGBD.

2.3 Implémentation

Il s'agit à ce niveau de traduire le MCD en un modèle relationnel plus proche de la machine.

Après normalisation et transformation du MCD en modèle logique relationnel, une implémentation par domaine a été effectuée sous le SGBD relationnel "Access". La validation des différents modèles physiques établis pour chaque domaine est basée sur des données concrètes disponibles au niveau du CTS (§ 1.1.).

3. Modele SIG

En plus des fonctionnalités qu'offre les SGBD, les SIG offrent particulièrement des outils de développement, de traitements statistiques, d'opérations de superposition et d'analyse spatiale. Ils permettent aussi d'exprimer et d'exécuter des requêtes complexes, et d'importer des données à partir d'autres systèmes (SIG et SGBD) et de logiciel de CAO ou de traitement d'images.

3.1 Création des cartes graphiques

La démarche adoptée pour la création des cartes graphiques des réseaux sous l'environnement "Mapinfo" est la suivante :

- Connexion à la base de donnée "Access" via l'outil l'connexion DBMS;
- Importation des tables;
- Création du Linkage entre les tables à l'aide des requêtes SQL [Viescas J.];
- Création de la carte des points (géodésiques, gravimétriques, etc.).

La figure 1 représente un exemple de la répartition du réseau gravimétrique national (découpage administrative par commune).



Fig. 1 répartition des points gravimétriques.

L'outil SIG permet aussi de croiser des critères sémantiques; la figure suivante (2) illustre un exemple de ce croisement de critères :

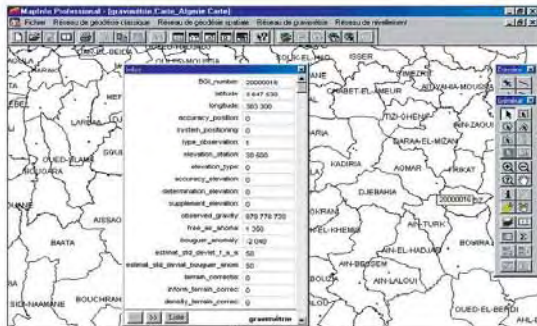


Fig. 2 localisation et consultation d'un point gravimétrique.

3.2 Elaboration du menu personnalisé

Pour concrétiser notre travail, nous avons élaboré, en langage MAPBASIC, un programme permettant l'accès facile à l'information, la communication rapide et conviviale entre l'utilisateur et le logiciel et l'exécution rapide des requêtes personnalisées par simples clics.

L'interface développée est constituée d'un menu composé de cinq sous menus liés à des applications

exécutables distinctes. La figure (3) illustre les principales fonctionnalités du menu principal :



Fig. 3 Menu principal du programme.

Le menu "Fichier" regroupe les principales fonctions du menu de MapInfo telles que l'import de table et la modification de la structure de la table (figure 4).

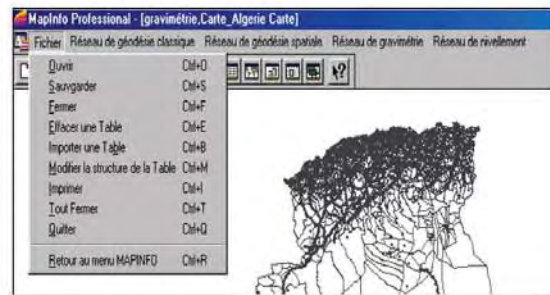


Fig. 4 Description du menu "Fichier".

Un exemple du menu "Réseau de géodésie classique" est illustré par la figure 5. Il permet la visualisation des points du réseau sur une carte découpée par commune et l'exécution de quelques requêtes spatiales et sémantiques.

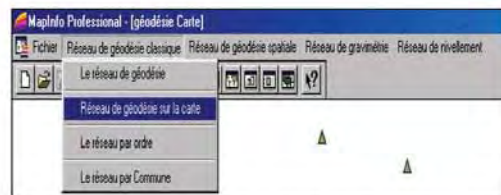


Fig. 5 Menu "Réseau de géodésie classique".

3.3 Mécanismes d'interrogation

Les SIG procurent à la fois des outils simples d'interrogation et de puissantes solutions d'analyses. L'intégration de données au travers des différentes couches d'information permet d'effectuer une analyse spatiale rigoureuse. Cette analyse par croisement d'information, si elle peut s'effectuer visuellement nécessite souvent le croisement des informations sémantiques et graphiques. Les figures suivantes (6) et (7) illustrent quelques exemples d'interrogations :

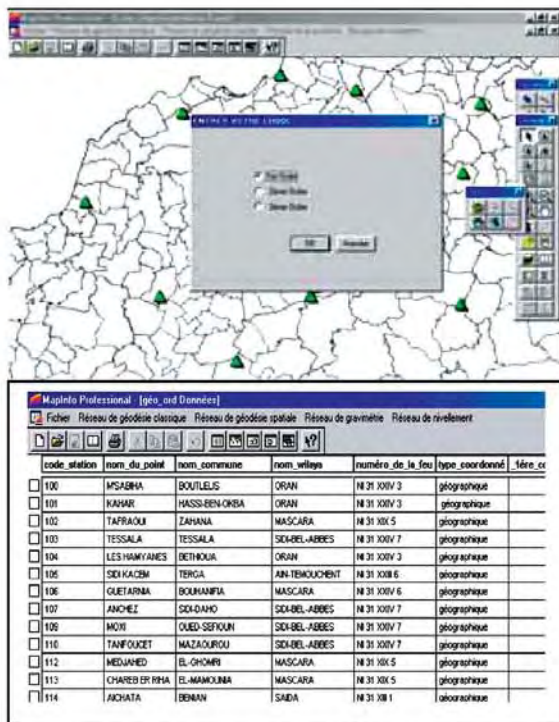


Fig. 6 Sélection des points géodésiques par ordre.

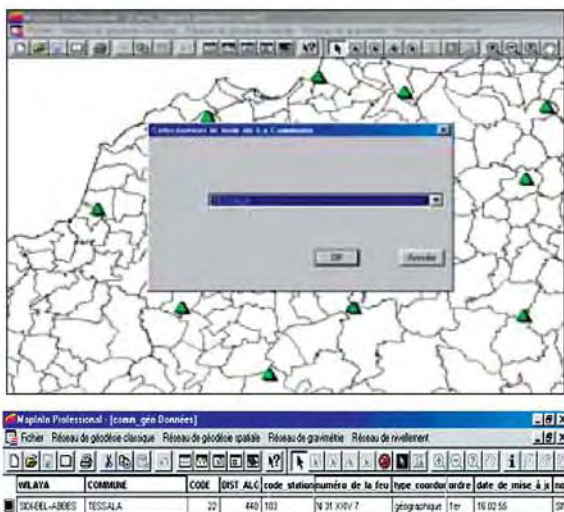


Fig. 7 Sélection de la commune par nom.

4. Conclusion

Le travail présenté dans cet article constitue un maillon de la chaîne de développement d'un système d'information géographique destiné à mettre à la disposition des différents acteurs intéressés à l'Information géographique d'un outil de renseignement sur l'état de couverture cartographique du pays, intégré dans un processus de consultation à distance via un réseau de communication (réseau national, Internet, etc.).

Ce système une fois opérationnel, aura des retombées positives aussi bien sur le plan économique, scientifique que technique. En effet, il constituera un outil majeur de promotion de l'usage de l'information géodésique. De même, il permettra de valoriser l'information existante et d'orienter de manière plus efficace les programmes de réalisation de couvertures cartographiques. Ceci engendrera en conséquence un gain appréciable en coût et en temps d'accès à l'information géodésique.

Le système devra disposer de toutes les fonctionnalités d'interrogation et de formulation de requêtes en se basant sur le découpage administratif ou la spécification d'une région particulière. Il devra répondre au souci de mettre à la disposition des usagers de l'information géodésique, un système convivial, dans lequel les outils utilisés sont transparents pour l'utilisateur. Il reposera sur l'usage de la technologie des SIG et des résultats d'une enquête auprès de tous les producteurs de l'Information Géodésique.

L'application développée, dans le cadre de ce travail, démontre clairement la faisabilité de tel projet. Elle permettra à l'utilisateur de doter d'un outil d'information performant et actualisé sur les états des différents réseaux géodésiques par le biais de mécanismes d'interrogation spatiale ou sémantique. Néanmoins, la validation de cet outil a été basée uniquement sur un échantillon de données géodésiques restreint disponible au niveau du CTS et ne permettra pas, en conséquence, de prononcer sur sa fiabilité.

Références Bibliographiques

Bouteloup. D, 2002 : cours de géodésie, systèmes géodésiques et transformations de coordonnées.

Chemaa B., 1999 : conception de base de données géodésique : article. Bulletin des sciences géographique N°04 I.N.C.T.

Dennouni N., 2004 : Elaboration d'une nouvelle base de données géodésiques intégrant les nouvelles missions spatiales. Mémoire de magister (CTS)

Duquenne F., 1990 : La base de données géodésique sa conception, son état de réalisation et les perspectives, instructions techniques IT/N°63, Institut Géographique National / Paris.

Duquenne F., 1990 : La base de données géodésique sa conception, son état de réalisation et les perspectives, instructions techniques IT/N°63, Institut Géographique National / Paris.

Tradieu H. & Rochfeld A., 1991 : Méthode merise, démarche et pratique. (Tome 2) / Paris.

Viescas J. : Guide du langage SQL, Microsoft PRESS.

Conflits d'Usages et Dynamiques Spatiales ; les Antagonismes dans l'Occupation des Espaces Périphériques des Grandes Villes en Algérie, Cas d'Oran

H. M. MAACHOU

Département de géographie et d'aménagement du territoire
Université d'Oran-Es-Senia
hmaachou@yahoo.fr

ملخص :

التحضر استحوذ على الأراضي في الجزائر، على السواحل كما في داخل البلاد وعلى طول محاور الطرق. في حين وصل عدد المدن بها اليوم أربع مرات عما كانت عليه منذ قرن من الزمن. حالياً، المدن الجزائرية بصفة عامة نجحت في تنظيم ديناميكية الاقتصاد الإقليمي وحتى الوطني، ولكن الوجه السيئ لهذا التحضر "الناجح" هو خلقه لظاهرة ذات نتائج بيئية وخيمة. نحاول من خلال هذا التحليل التطرق إلى التحولات التي طرأت في العشرينات الأخيرة من خلال دراسة مدينة وهران على ظاهرة اكتساح الفضاءات المحيطة بها، وفي نفس الوقت نلفت الانتباه إلى مسالة المحافظة على الأراضي الفلاحية المحيطة بالمدن الكبرى. وفي هذا المنظور، تحليل تطور هذه المدينة يستفاد منها في دراسة مدن أخرى تتشابه معها في ديناميكية تطورها.

Résumé : L'urbanisation gagne du terrain en Algérie, sur les côtes comme à l'intérieur et le long des axes de transport, et le pays compte aujourd'hui quatre fois plus de villes qu'il y a un siècle.

Aujourd'hui, les villes algériennes d'une manière générale ont réussi à s'imposer dans leur région et à dynamiser l'économie régionale voire nationale.

Mais revers de cette urbanisation « réussie », le fait urbain conquérant gagne sans conteste du terrain et engendre un phénomène aux conséquences environnementales lourdes.

La pression urbaine sur les terres agricoles est préoccupante surtout autour des grandes agglomérations, les collectivités locales disposent pourtant d'une panoplie d'instruments d'intervention, mais devant leur inefficacité, il faut poser la question du partage des tâches entre les différents acteurs

Le but de cette étude est de mettre en relief les changements survenus ces dernières décennies par le biais d'une étude de cas (agglomération oranaise), le processus de débordement d'une grande ville sur son espace périphérique. Et aussi d'attirer l'attention sur la question de la sauvegarde des ressources agricoles autour des grandes villes.

Mots clés : Oran, urbanisation, périurbanisation, croissance urbaine, périphérie, consommation des terres agricoles,

Abstract : Urbanisation is increasing in Algeria, on the coastal areas as well as inside the country and along the transport networks.

The country has today four times more in the number of cities than it has a century.

Today the Algerian towns have had an important impact on the dynamic of regional and even national economy.

But the side effect of this "successful" urbanization has led in a threatening environmental impacts.

The main target of this analysis is to show the changes occurred during these last years through a case study (the agglomeration of Oran) the process of a big town spreading at its space periphery. This paper focuses on the preservation of agricultural resources in metropolitan areas.

In this perspective to analyse the evolution process of this town allows us to better understanding that of other towns as the development mechanism is almost the same.

key words : Oran, Urbanization, periphery urbanization, urban growth, consumption of agricultural land.

1. Introduction

En Algérie, agriculture et urbanisation entretiennent des relations aussi fortes que difficiles comme dans toutes les situations régies par des rapports d'interdépendance et d'hégémonie. Nous sommes en effet face à un problème universel dont l'acuité s'accroît avec le temps et concerne particulièrement certaines zones stratégiques: vallées, espaces littoraux, espaces périurbains des grandes agglomérations.

Devant la poussée démographique et l'augmentation du nombre des néo-citadins, les villes continuent à connaître une extension variable de l'espace bâti selon leur dynamique et leur site géographique.

L'ampleur du problème de pression de l'urbanisation sur les terres agricoles voisines du littoral algérien et en particulier dans la région oranaise.

Oran fait figure de grande métropole, dominant sans conteste tout l'ouest du pays, deuxième ville d'Algérie après la capitale. Pourtant cette ville ne fut fondée qu'au X^e siècle, ne fut longtemps que le débouché portuaire de la capitale Tlemcen, fut longtemps bloquée dans son développement par l'occupation espagnole, fut détruite en 1790 par un tremblement de terre. En 1830, la ville ne comptait que 4000 habitants. C'est la colonisation qui en a fait un grand port, débouché de tout l'ouest, et la capitale économique d'une région en plein essor viticole. Après le coup de l'indépendance, la ville perdit plus de la moitié de sa population (COTE, M 1996).

Après le départ des colons, la première décennie (1962 – 1975) a été marquée par un ralentissement de la construction, du fait qu'Oran fut considérée comme une ville privilégiée en matière d'habitat.

Cependant, il est un fait notoire que l'espace urbain d'Oran n'a commencé à changer qu'à partir de 1975 avec les projets planifiés des ZHUN (zones d'habitat urbaines nouvelles) et les zones industrielles, suivis par les programmes des coopératives immobilières et de lotissements à partir des années 1980. Depuis, l'agglomération oranaise a connu une croissance spatiale considérable. Cette croissance a touché presque toute la zone périurbaine de l'ouest à l'est et cela due aux effets conjugués de l'accroissement de la population oranaise et de l'exode rural. La ville s'est densifiée puis, elle a éclaté.

La périurbanisation correspond aux nouvelles formes de cette croissance urbaine qui se poursuit désormais depuis environ trente ans. Dans le contexte de l'accélération monstrueuse de l'urbanisation des anciens noyaux ruraux autour de la ville qui ont été considérés comme des réserves de terrains à bâtir.

L'une des importantes conséquences entraînées par

cette urbanisation excessive est l'augmentation de la pression sur le sol à usage agricole.

En effet, les terrains agricoles sont de plus en plus sollicités pour répondre à une demande croissante pour les logements, les équipements, les services publics.*

2. Potentialité foncière de la ville d'Oran

Oran est située dans la partie septentrionale de l'Oranie centrale, au fond de la baie qui s'étend de Cap Falcon jusqu'à la pointe de Canastel.

Au début de sa fondation, le site d'Oran était limité dans l'embouchure du Ravin de Raz El Ain, les facteurs influençant ce choix ont été d'une part la présence d'eau douce à proximité de Raz El Ain et d'autre part les possibilités naturelles qu'il offrait sur le plan militaire notamment pour la défense de la ville.

Oran se singularise par les deux spécificités suivantes :

- La ville occupe un site qui est une synthèse des principaux reliefs on y retrouve la mer, la montagne, la plaine, - qui la région prédispose à toutes les natures d'activités : primaire, secondaire et tertiaire.
- Elle a été durant plusieurs siècles le lieu de brassage de différentes peuplades, de différentes races, religions, cultures et civilisations, chacune de ces peuplades a essayé d'utiliser ce site de la manière la plus optimale.

Le choix du site apparemment ne se souciait guère des possibilités d'avenir de la ville pour sa modernisation et son extension urbaine. En effet, Oran à l'heure actuelle doit faire face à deux principales contraintes :

- les contraintes naturelles qui sont les hauteurs du Djebel Murdjadjo à l'ouest, les marécages du sud notamment la Daia Morsly et la grande Sebkhah, la mer au nord ;

- les contraintes dites économiques qui consistent à préserver les terres agricoles entourant la ville d'Oran, en l'absence d'études économiques sérieuses qui pourraient déterminer la nécessité de confier certains terrains dits agricoles aux réserves foncières de la ville et d'évaluer les conséquences sur les coûts d'urbanisation.

3. La question démographique

Deuxième agglomération algérienne, Oran s'inscrit dans la série des grandes villes-ports qui jalonnent le pourtour de la Méditerranée. Elle s'en distingue, par le poids exceptionnel d'un héritage colonial, encore encore largement présent dans sa morphologie et son architecture, mais aussi par les très grandes difficultés qu'ont rencontrées, les politiques publiques,

depuis l'indépendance, pour maîtriser et pour gérer la croissance urbaine. L'accélération contemporaine du dynamisme démographique. En 1830, lorsque débute la période coloniale, Oran troisième ville d'Algérie à l'époque après Alger et Constantine, compte quelques 20 000 habitants, une immigration continue en fait une ville à majorité européenne. La population algérienne de la ville est passée de 46 000 habitants en 1936 à 82 000 en 1948, 110 000 en 1954 et 210 000 en 1961, devenant ainsi, à la veille de l'indépendance, majoritaire. (SEMMOUD, B, 1986) Passée l'indépendance en 1962 et le départ de près de 180 000 « pieds noirs », largement compensé par les flux venus des campagnes et des villes algériennes, la croissance démographique s'accélère. L'agglomération passe à 342 293 habitants en 1966, 682 404 habitants en 1987, 832 168 habitants en 1998, on estime qu'elle compte aujourd'hui environ d'un million.

Lorsqu'on constate que la population d'Oran s'est ralentie d'après le dernier recensement de 1998, et que le taux d'accroissement n'est que de 1,03 % largement inférieur à la moyenne nationale urbaine, en revanche, l'accroissement de la population de sa périphérie a connu un phénomène inverse : cette dernière s'est accrue au rythme de 6,43 %. En fait ces niveaux sont la résultante et le reflet d'une moyenne qui cache une certaine réalité tant le contraste est frappant entre l'agglomération oranaise et sa périphérie (6,43 %).

En effet, une immense périphérie s'est mise en place autour d'Oran avec des taux parfois plus que spectaculaires, (Ain Beida : 10,48 %, Sidi Chahmi : 9,37 %, Es Senia : 5,9 %).

D'une manière générale, le dynamisme démographique que connaît la zone périurbaine oranaise a permis d'augmenter son poids par rapport à celui d'Oran. Cette couronne ne représentait que 5,5 % de l'agglomération oranaise toute entière en 1966. près du quart de la population oranaise agglomérée vivent dans ces espaces périurbains d'Oran en 1998. cela explique certainement l'extension spatiale que connaissent les zones périphériques d'Oran notamment durant la décennie quatre vingt dix. (HADEID, M, 2004)

4. Organisation spatiale

La ville d'Oran a évolué par des couronnes successives autour d'un noyau urbain colonial.

- La première correspond à la portion de la ville entre la première ceinture et le littoral et qui coïncide avec la ville d'avant les années vingt, le cœur donc de la ville et l'espace le plus fréquenté pour ses nombreux atouts.

- La deuxième celle située entre la première couronne et le premier boulevard périphérique, donc Oran entre 1920 et 1950, une zone déjà moins tumultueuse qui regroupe d'anciens faubourgs phagocytés par l'extension urbaine.

- La troisième, la portion de la ville entre la deuxième et troisième boulevard périphérique et celle qui englobe la plupart des cités créées après l'indépendance.

- Enfin, la quatrième couronne, correspond à la nouvelle extension, donc Oran des dix dernières années (différents programmes d'habitats).

5. L'extension spatiale et son impact sur le foncier

Depuis l'indépendance et jusqu'en 1977, la croissance spatiale d'Oran restait extrêmement insignifiante. Hormis les quelques équipements réalisés en dehors de son périmètre de 1959, elle consistait à densifier les parcelles libres du tissu urbain existant, durant cette période, Oran pouvait contenir l'essentiel du croît démographique dans la mesure où les logements vides délaissés par les colons après l'indépendance ont permis d'abriter une part importante des populations locales et celles venues d'autres régions rurales ou urbaines (HADEID, M, 2004)

La ville s'est densifiée puis, surtout à partir des années 1970, elle a éclaté.

La périurbanisation correspond aux nouvelles formes de cette croissance urbaine qui se poursuit désormais depuis trente ans. Dans le contexte de l'accélération spectaculaire de l'urbanisation, les espaces ruraux autour des villes ont d'abord été considérés comme des réserves de terrains à bâtir.

Eclatement du bâti dans tous les sens au niveau de la couronne périurbaine et la naissance de plusieurs noyaux d'habitats.

En effet, ce sont les nouvelles politiques d'habitat qui sont à l'origine des principales extensions des périphéries des villes algériennes, ces politiques se fondent sur l'habitat de type individuel où l'Etat reste le grand promoteur foncier, tantôt directement (cas des coopératives immobilières mais aussi des recasements), tantôt par l'intermédiaire des collectivités locales et leurs services techniques que sont les agences foncières en stimulant des opérations de type lotissement.

La métropole s'est déchargée au profit de sa périphérie. Cette extension périphérique est due d'une part aux arrivées régulières des migrants, et faute de pouvoir pénétrer en force dans le tissu urbain déjà saturé, se sont implantés dans l'espace le plus proche de celui-ci, d'autre part, à la migration

des nouveaux ménages (du centre vers la périphérie) où l'exiguïté des chambres, l'entassement dans deux ou trois pièces d'une famille qui s'agrandit, querelles familiales, environnement dégradé, sont autant de raisons qui poussent au départ. Cependant, le moteur essentiel de la croissance périphérique des villes algériennes a été et reste, quelles que soient les règles officielles, la saturation des tissus urbains centraux qui les a rejetés vers la périphérie.

Le phénomène de fusionnement, entendu comme la jonction physique et fonctionnelle d'une ville, avec une autre ou d'autres villes de moindre importance, voire même de localités encore sous-équipées, semble prendre forme autour des grandes villes algériennes à l'instar d'Oran qui a déjà fusionné physiquement avec Bir El Djir.

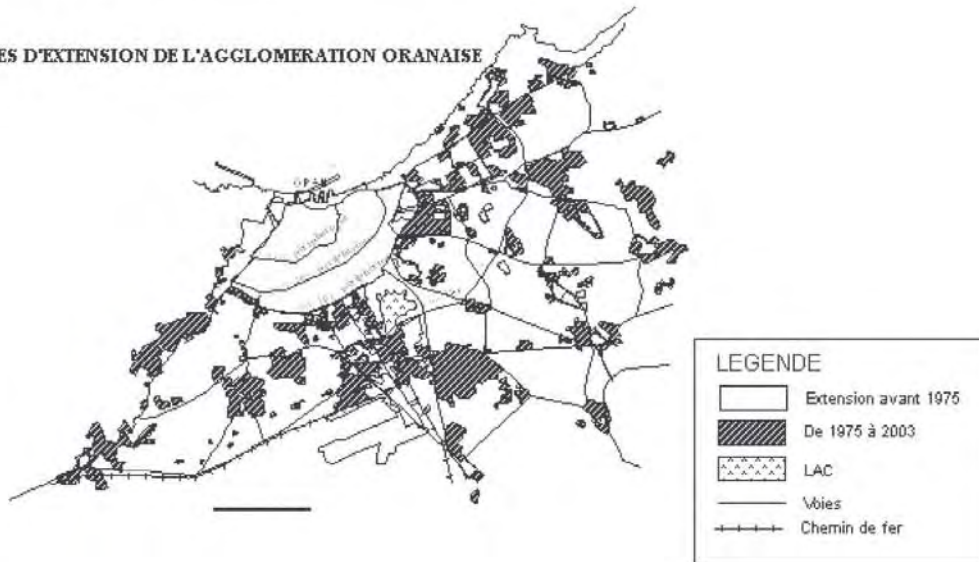
des cultures maraîchères se situait surtout à l'Est et au sud de la ville et la culture annuelle se localisait essentiellement à l'ouest et dans le sud-est.

L'arboriculture n'a pas bénéficié de la spécialisation de l'espace agricole, elle occupait des parcelles de dimensions variées, cette arboriculture était à majorité composée d'oliveraies.

Les colons ont introduit dans la région la culture de vignoble qui était localisés à l'est et au sud et quelques parcelles à l'ouest de la ville.

Pendant la période coloniale, nous constatons qu'il y a une étendue de la ville surtout sur le périurbain qui représente en valeur absolue 2 100 hectares, éliminant ainsi 1900 ha d'espace agricole.

PHASES D'EXTENSION DE L'AG-GLOMERATION ORANAISE



6. Occupation du sol

L'examen de la carte de la croissance spatiale de la ville d'Oran, nous indique que l'espace urbanisé occupait en 1830 seulement 200 hectares. En effet, nous constatons que la grande étendue des parcelles consacrés à l'agriculture et qui constituaient la quasi-totalité de la surface totale communale. Cette constatation nous conduit à affirmer que l'agriculture constituait l'activité substantielle de la population d'Oran. La production agricole était axée sur les cultures maraîchères et les cultures annuelles. La localisation des cultures maraîchères se situait surtout à l'Est et au sud de la ville et la culture annuelle se localisait essentiellement à l'ouest et dans le sud-est. L'arboriculture n'a pas bénéficié de la spécialisation de l'espace agricole, elle occupait des parcelles de dimensions variées, cette arboriculture était à majorité composée d'oliveraies. Les colons ont introduit dans la région la culture de vignoble qui était localisés à l'est et au sud et

quelques parcelles à l'ouest de la ville. Pendant la période coloniale, nous constatons qu'il y a une étendue de la ville surtout sur le périurbain qui représente en valeur absolue 2100 hectares, éliminant ainsi 1900 ha d'espace agricole. Depuis l'indépendance, nous constatons qu'il y a une extension urbaine considérable sur des terres agricoles, la superficie de la ville d'Oran calculée d'après les différents documents est de plus de 7 000 hectares, donc la ville d'Oran multiplie sa superficie par trois fois et demi (3,5). C'est donc la surface agricole utile (SAU) qui est la grande victime de cette évolution. L'extension actuelle vers l'est aura donc des conséquences graves : la disparition presque totale du domaine des Martyrs qui constitue la quasi-totalité de la zone maraîchère périurbaine ; la disparition de la zone maraîchère et arboriculture de Bir El Djir ; à terme la disparition du domaine khemisti.

7. Limites des outils de planification

Le développement urbain algérien est encadré par un ensemble d'organismes publics, qui n'ont cependant pu empêcher une consommation excessive de terres agricoles.

Le pays s'est doté d'instruments spécifiques institués par la loi de 2001 relative à l'aménagement du territoire, en confirmant le schéma national d'aménagement du territoire (SNAT) au niveau national, le schéma régional et les plans d'aménagement du territoire (SRAT) au niveau régional et les plans d'aménagement de wilaya (PAW) par wilaya et en rajoutant le schéma d'aménagement et d'urbanisme des aires métropolitaines à initier pour les quatre plus grandes villes.

Au niveau local, le pays est doté également, depuis la loi de 1990, d'instruments d'urbanisme. Le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme (PDAU) et le plan d'occupation des sols (POS).

La nouvelle instrumentation mise en place par l'institution du PDAU et du POS, en remplacement du plan directeur d'urbanisme (PUD), n'a pas résolu le problème. Ces nouveaux instruments continuent à prendre en charge, de la même façon que le PUD uniquement les préoccupations et les besoins des centres urbains et à répondre à leurs pressions, au dépend de l'équilibre du milieu rural.

Le « non urbain », qu'il soit qualifié de rural, d'agricole ou de naturel, reste toujours défini dans ses rapports avec l'urbain, et sera, soit susceptible d'être urbanisé un jour soit comme acquis à l'agriculture, soit comme protégé, c'est à dire maintenu en état non rentable.

pour l'urbaniste, il s'agit d'équilibrer le « vide » et le « plein ». il tend face à la poussée de l'urbanisation à composer des plans, où la place de l'urbain soit nettement fixée dans le patrimoine rural, sans se soucier de l'équilibre de ce dernier.

C'est qu'au plan d'aménagement, en dépit des efforts de protection des terres agricoles, qui s'étendent à l'ensemble de l'espace naturel, il n'y a pas eu d'effet réel sur le terrain, les plus riches terres agricoles ont été et continuent d'être empiétées par une urbanisation aussi bien anarchique que programmée.

Même si le représentant de l'agriculture, adopte une position constante et logique, en se présentant comme le défenseur de ces espaces à préserver systématiquement, son opposition à l'approbation des plans d'urbanisme reste sans effet, face à « l'ordre » prôné par ces plans et un espace rural « mal défini ».

Ainsi la mutation du monde rural s'effectue sous le mode de son aliénation par la ville, la préparation de l'avenir de la ville se fait au dépend de la campagne, et le conflit d'intérêt ville/campagne, est dominé par la première.

Ce qui est certain, c'est que les instruments tels qu'ils sont proposés actuellement, ont deux résultats opposés et également nocifs : favoriser la destruction de l'espace naturel, figer l'espace planifié urbain dans des situations qui ne permettent pas à la vie rurale de se restituer et d'évoluer.

Oran dispose d'un instrument de la planification spatiale et gestion urbaine, Le Plan d'Aménagement et d'Urbanisme d'Oran : (PDAU 1995), ce dernier est un outil primordial entre les mains des collectivités locales et des services de l'Etat.

la forme urbaine choisie dans le PDAU, est le résultat d'un « compromis » avec l'agriculture ; le PDAU ayant choisi de rompre avec la forme radio concentrique de la ville d'Oran, afin de préserver les terres agricoles de haute valeur, malgré toutes les implications stratégiques que cela comportait sur le système urbain général de l'agglomération ;

l'importance de la question est telle que, la nécessité d'aborder cette dualité permanente entre la ville et sa campagne s'annonce incontournable.

La question apparaît de même à l'échelle des POS, au niveau de parcelles agricoles dites « à protéger » exploitées et productives et ayant bénéficié de fonds financiers, et qui se trouvent au milieu d'une zone urbaine ; quel sera leur sort, les transformer en parc urbain ou jardin botanique, répondra t il à leur préservation en tant que parcelle à haute valeur agricole ;

Pendant les trente dernières années, des implantations ont été choisies sur des terrains agricoles, C'est ainsi que le béton a eu raison des plaines, deux zones industrielles (Es senia, Hassi Ameur) avec 850 ha, cinq zones d'habitats urbains nouvelles (Hai el Othmania, Dar ElBeida, USTO, Khémisti, Seddikia) avec 700 ha et un programme d'habitat à Hai El Yasmine et une série de coopératives de types d'habitat individuel, et plusieurs grands équipements éducatifs et autres.

Cette amputation a été faite à la plaine fertile d'Oran, Es-Senia et Bir El Djir qui fournit des produits maraîchers à une partie de la région

D'une manière générale, ce conflit sera toujours présent, aussi bien au court qu'au long terme, et concernera encore plus, les futures révisions des instruments d'urbanisme ; il mérite alors une sérieuse attention, celle qui ne favorisera pas l'intérêt d'une partie au détriment de l'autre, les deux étant autant vitales l'une pour l'autre.

8. Conclusion

Durant ces dernières décennies, Le tissu urbain de l'agglomération oranaise a plus que doublé, et qui se manifeste par des transformations de son espace périphérique avec de profondes mutations sur le plan spatial, fonctionnel et social. Ce nouveau tissu réalisé en moins de 30 ans, à une ampleur dépassant largement celle de l'ancien tissu urbain réalisé durant plusieurs siècles.

Ce tissu est caractérisé par une trame radioconcentrique imposée par quatre boulevards périphériques convergeant au centre.

Le phénomène de la croissance démographique, et celui de l'attractivité de cette ville ont pour corollaire, une consommation abusive de l'espace agricole périphérique.

- L'extension de la ville d'Oran se fait principalement en direction de l'Est, vu l'absence de contraintes physiques, contrairement aux autres directions, à savoir la mer Méditerranée au Nord, le massif de Murdjadjo à l'Ouest, la Sabkha au Sud. Mais face à la flambée des loyers et à la crise du logement surtout dans les grandes villes, la périphérie proche ou lointaine constitue et constituera dans les années à venir un espace refuge aussi bien pour les ruraux que pour les urbains, exclus de la ville.

L'espace périphérique d'Oran offre aujourd'hui un paysage contrasté où l'agriculture, industrie, équipements et l'habitat sont si intimement mêlés que tout projet d'aménagement rural semble irrémédiablement compromis.

Situées sur les grands axes ou au cœur des communes et des douars périphériques, les terres agricoles sont sujettes à de brusques mutations : la céréaliculture est remplacée par le maraîchage, pour finalement céder la place aux chantiers de construction.

Ce phénomène atteint un degré d'acuité assez fort étant donné l'ampleur et l'étendue des agressions permanentes à l'encontre de l'environnement urbain et naturel et du fragile équilibre entre l'espace urbain et l'espace rural.

Dépourvue de tout aménagement rigoureux et systématique, la campagne périphérique doit accueillir toujours plus d'habitants au détriment de l'agriculture. Elle assume ainsi de nouvelles fonctions, résidentielles, industrielles, services publics, et voit inéluctablement les terres agricoles se transformer en sol urbain.

Le milieu rural, outre son rôle nourricier traditionnel, est maintenant investi d'une nouvelle fonction de rééquilibrage du territoire en fonction des nouveaux besoins des citoyens. Cette ardente obligation de l'aménagement du territoire doit s'imposer à toutes les échelles, locale comme régionale et voire nationale.

Elle implique que le pouvoirs publics soient investis d'une réelle volonté, et de la capacité d'édicter et de faire respecter une réglementation qui préserve les besoins vitaux des collectivités d'aujourd'hui et ceux des générations futures.

Une autre dimension est à prendre en compte : le fait qu'au-delà des situations locales ou régionales, c'est l'ensemble du pays qui est concerné par les dangers d'une urbanisation agressive.

Références Bibliographiques

- Benali. D, Di Giulio. A, Lasram. M, Lavergne. M, 1996 : urbanisation et agriculture en méditerranée : conflits et complémentarités, l'Harmattan, Paris.
- Bendjelid. A, 2001 : armature urbaine et population en Algérie, revue *Insaniyat* n° 13, CRASC, Oran.
- Côte, M. 1996 : l'Algérie espace et société, ed Masson/ Armand Colin, Paris.
- Hadeid. M, 2004 : éclatement du bâti et différentiation spatiale, des nouveaux espaces urbains d'Oran, séminaire sur l'urbanisation à Oran, 27 – 28 janvier 2004, USTO, Oran.
- Maachou. H-M, 1999 : consommation des terres agricoles en Algérie, le cas de l'Oranie, Thèse de doctorat, Université de Provence, Aix-en-Provence.
- Semmoud. B, 1986 : industrialisation et espace régional en Algérie le cas de l'Oranie littorale, tome 1,2, OPU, Alger.
- Semmoud. B, 1995 : croissance urbaine, mobilité et changement social dans l'agglomération oranaise (Algérie), cahiers du GREMANO n° 12, Université de Paris VII.
- Armature urbaine, collections statistiques n° 97, ONS, RGPH 1998, Alger.

Conséquences de l'Altération des Gneiss Arkosiques sur la Topographie Locale, (Massif de l'Edough Annaba, N.E Algérien)

S. HADJ ZOBIR *; A.A. LARABA; K. KHANCHOUL
Université Badji Mokhtar / Faculté des Sciences de la Terre / Dépt de Géologie
BP 12 El-Hadjar Annaba, 23000 Annaba
* e-mail: shadjzobir@yahoo.fr

ملخص :

تقع منطقة الدراسة في الجزء الشرقي لجبال إيدوغ (منطقة عنابة)، تتميز بمناخ البحر الأبيض المتوسط . و هي أحد أكثر المناطق الممطرة في الجزائر (بين 750 و 1200 مم / سنة). تمحورت الدراسة حول المقطع الطولي لصخر الناييس الأركوزي الواقع في منحدر تل صغير بين 550 م و 450 م . تتألف هذه الصخور من تركيب معدني متجانس. المعادن السائدة هي الكوارتز، الفلدسبات و الميكا . يتكون الإنكسار الطيني الموجود بكثرة في القاعدة من الأيالات و المونتموريلورايت . مقابل المعدنة ، كيماوية هذه الصخور غير متجانسة . تبين التحاليل الكيميائية المعاينة من قمة إلى قاعدة صخر الناييس تقدم تدرجي في التركيب الكيميائي من ناحية المكاسب و الخسائر في Mg و Ca,Na,K,Fe تشير قيم (الدليل الكيميائي للتغير) CIA بأن صخر الناييس الأركوزي قد مر بتغير كيميائي هام. ظهور المراحل الطينية في الصخرة أثر في تعديل علم الطبوغرافيا المحلي و شكّل تموجات مرتفعة التردد في قاعدة صخر الناييس الغني بالمعادن الطينية .

Résumé : La zone d'étude, située sur le flanc NE du massif de l'Edough (région de Annaba), se caractérise par un climat de type méditerranéen. Le massif est un des plus arrosés d'Algérie (entre 750 et 1200 mm/an). L'étude s'est portée le long d'un profil sur des gneiss arkosiques à flanc de coteau localisé entre la côte 550m et 450m. Ces roches montrent une composition minéralogique très homogène. Les minéraux dominants sont le quartz, les feldspaths et les micas. La fraction argileuse, plus abondante à la base du banc, est représentée par l'illite et la montmorillonite. A l'opposé de la minéralogie, la chimie de ces gneiss est très hétérogène. Les analyses chimiques du matériel prélevé du sommet vers la base du banc révèlent une évolution progressive dans la composition chimique en terme de gains et de pertes en Ca, Na, K, Fe et Mg. Les valeurs de CIA (Chemical Index of Alteration) suggèrent que les gneiss arkosiques ont subi une importante altération chimique. La présence de phases argileuses dans la roche a eu pour effet de modifier la topographie locale en formant des ondulations dont la fréquence est croissante vers le bas du banc gneissique plus riche en minéraux argileux.

Mots-clés : Altération, Minéraux argileux, CIA, Gneiss arkosiques, Edough.

Abstract : The studied zone, located on the east part of the massif of Edough (region of Annaba, Algeria), is characterized by a Mediterranean climate type. The massif is one of the most watered of Algeria

(between 750 and 1200 mm/year). The study was carried along a profile on arkosic gneiss which are located in a small hill slop between 550m and 450m. These rocks show a very homogeneous mineralogical composition. The dominant minerals are quartz, feldspars and micas. The clay fraction, more abundant at base is represented by illite and montmorillonite. In opposition to mineralogy, the chemistry of this gneiss is very heterogeneous. The chemical analyses of the material, sampled from the summit to the base of the gneissic bank, reveal a progressive evolution in the chemical composition in terms of gains and losses in Ca, Na, K, Fe and Mg. The values of CIA (Chemical Index of Change) suggest that the arkosic gneiss has undergone an important chemical weathering. The presence of clay phases in the rock formation had an effect on the modification of the local topography by developing curlings in which the frequency is increasing toward the base of the clay-rich gneissic beds.

Key words : Weathering, Clay minerals, CIA, Arkosic gneiss, Edough.

1. Introduction

La distribution des éléments chimiques au cours de l'altération dépend de nombreux facteurs tels que la mobilité des éléments chimiques, la composition chimique et minéralogique. Les propriétés physiques de la roche mère ainsi que les conditions climatiques environnantes (intensité de la pluviométrie,

la température). Ce travail se propose d'étudier le comportement des éléments chimiques lors de l'altération chimique des gneiss arkosiques du massif de l'Edough.

2. Cadre Géologique et Climatique

Le massif de l'Edough est constitué de formations métamorphiques diverses formant une structure antiforme de direction NE-SW (Fig.1). Le cœur de l'antiforme, dite "unité inférieure" est composé de gneiss à biotite et de gneiss ocellés à deux micas datés Néoprotérozoïque (Hammor et Lancelot, 1998), avec parfois des bancs de leptynites et de marbres (Hilly,

1962; Gleizes et al., 1988; Ahmed-Said et Leake, 1993). Au-dessus des gneiss vient une unité dite "intermédiaire" composée de micaschistes à grenat, disthène, sillimanite et andalousite avec des bancs métriques de marbres. L'unité supérieure, dite "série des alternances", est composée principalement par des séricitoschistes, chloritoschistes et schistes graphiteux avec des bancs centimétriques à métriques de quartzites. Le complexe métamorphique et la couverture sédimentaire ont été intrudés durant le Miocène par des magmas de composition acide à intermédiaire avec la mise en place de roches volcaniques. Le massif de l'Edough a subi un métamorphisme polycyclique.

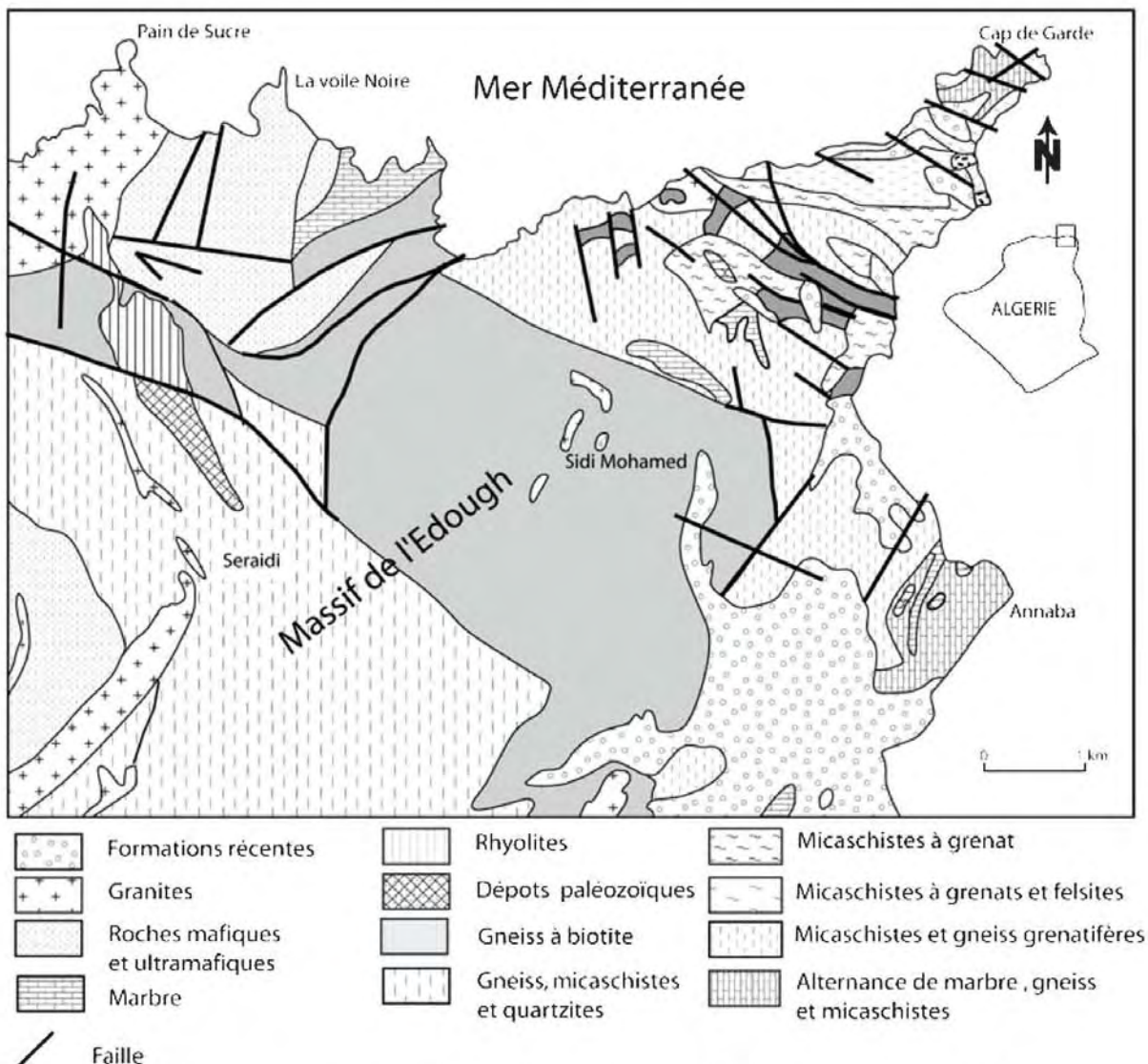


Fig. 1 Carte géologique simplifiée du massif de l'Edough, (modifiée sur la base des travaux de : Ex SONAREM 1980, Ahmed Saïd 1993, Gleizes et al 1988, Ilavsky.I et al 1987).

Les gneiss étudiés, localisés sur le versant Ouest (à très forte pente de 50%) d'un bassin versant secondaire font partie de l'unité inférieure et sont des gneiss arkosiques à signature magmatique (Hadj Zobir, données non publiées). Le massif de l'Edough se caractérise par un climat de type méditerranéen. La température moyenne annuelle est de 16°C et les précipitations sont abondantes avec un total moyen annuel de 1184 mm (mesurées à la station de Séraïdi entre 1988 et 2004). Le réseau hydrographique est très dense et de type dendritique (Fig.2).

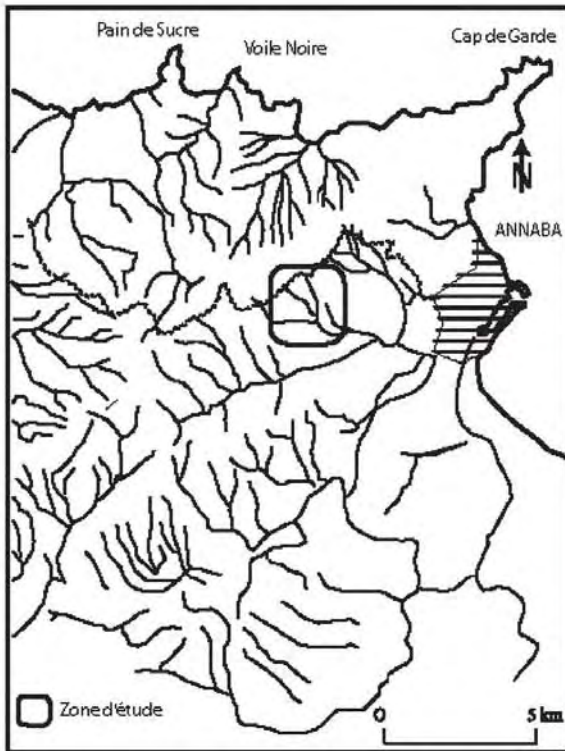


Fig. 2 Réseau hydrographique du massif de l'Edough.

3. Méthodes

Cinq échantillons ont été prélevés le long d'un profil à flanc de coteau localisé entre la côte 550 m et 450 m (Fig.3). Ces échantillons ont fait l'objet d'une étude pétrographique détaillée. Les analyses des éléments majeurs des gneiss ont été exécutées par XRF au GFZ (GeoForschungs Zentrum Potsdam) et à l'Institut des Sciences de l'Université de Potsdam, Allemagne. Les analyses radiocristallographiques ont été effectuées au laboratoire RX du CRD de la SONATRACH, Boumerdès, Algérie.

4. Résultats et discussion

4.1 Pétrographie

L'aspect macroscopique des gneiss est folié avec parfois des faciès ocellés à grains grossiers feld-

spathiques (Fig.4a). Vers la base du banc gneissique le grain est généralement fin (< 1mm), les yeux quartzo-feldspathiques sont beaucoup plus petits, ce qui confère à la roche un aspect finement lité. La couleur de la roche varie du brun clair au brun foncé vers la base (Fig4b). Les échantillons montrent une composition minéralogique relativement homogène et semblable. Au microscope ces gneiss sont essentiellement constitués de phénoblastes (1 à 4mm) de feldspaths (plagioclases et orthose), de quartz et de micas (biotite et muscovite).

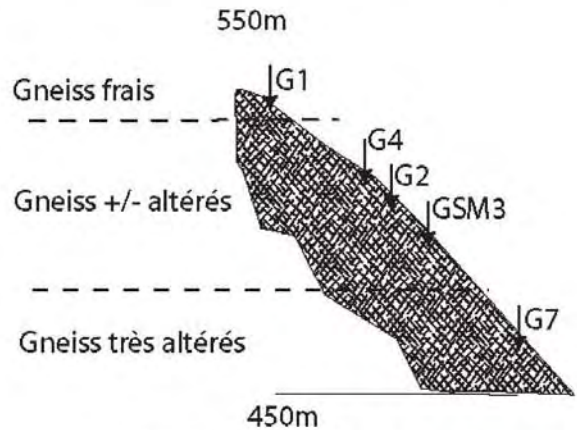


Fig. 3 Position des échantillons sur le profil (échelle non respectée).

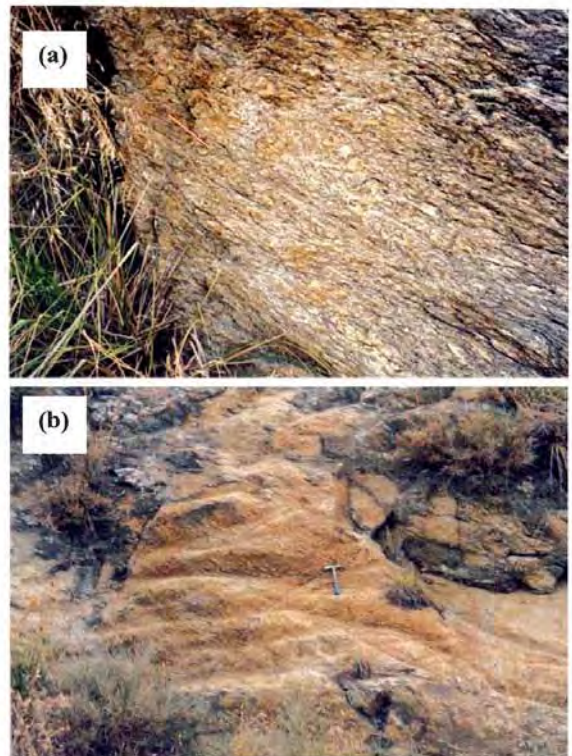


Fig. 4 a- Gneiss arkosiques frais à gros yeux quartzo-feldspathiques.
b- Vue de la base très altérée du banc des gneiss arkosiques.

Les minéraux accessoires sont représentés par l'apatite et le zircon. La composition modale de ces gneiss en plagioclase, quartz, feldspath et biotite nous permet de le considérer comme étant granitique. Les minéraux d'altération sont représentés par de la kaolinite, présente sous forme de traces uniquement dans l'échantillon le moins altéré (G1) qui a été prélevé dans la partie supérieure du banc gneissique, de l'illite et de la montmorillonite. Les échantillons (G2, G3 et GSM3) et G7 prélevés respectivement dans la partie intermédiaire et inférieure du banc de gneiss montrent une évolution du degré d'altération et se caractérisent par l'absence de la kaolinite et l'abondance de l'illite et de la montmorillonite.

4.2 Composition Minéralogique

De point de vue minéralogique on remarque une diminution en feldspaths et en micas et une

augmentation de la concentration modale en minéraux argileux. Les effets de l'altération se traduisent dans nos échantillons par l'apparition de minéraux néoformés tels que la kaolinite, l'illite et la montmorillonite. L'échantillon (G1) qui est le moins altéré a montré des traces de la kaolinite en plus de l'illite et de la montmorillonite. La présence de la kaolinite confirme la nature granitique de la roche mère ainsi que le bon drainage de celle-ci. Dans cet échantillon, les plagioclases ont probablement été transformés dans un premier temps en gibbsite qui s'est transformée à son tour en kaolinite. L'illite et la montmorillonite qui sont très présents dans la zone intermédiaire et basse des gneiss arkosiques traduisent respectivement une altération dans des conditions de mauvais et de très mauvais drainage. La concentration en minéraux néoformés est progressive de l'échantillon le moins altéré (G1) à celui le plus altéré (G7) (tableau1).

Tableau 1. Concentration en minéraux argileux des gneiss arkosiques (K- Kaolinite, I- Illite, M- Montmorillonite).

Localisation dans la coupe	Caractéristiques	Echantillons	Minéraux argileux (%)		
			K	I	M
Haut	Gneiss arkosiques frais	G1	Traces	100	Traces
Centre	Gneiss arkosiques +/- altérés	G4		90	10
		G2		70	30
		GSM3			
Bas	Gneiss arkosiques très altérés	G7		45	50

4.3 Distribution des éléments chimiques

Le tableau 2 liste les résultats des analyses chimiques en majeurs et traces des gneiss arkosiques. La distribution des éléments chimiques le long du profil d'altération montre des patrons en zigzag (Fig.5). Cette distribution est en étroite relation avec le degré d'altération de la roche. A titre d'exemple Al_2O_3 varie de 313.69 à 15.2%, TiO_2 de 0.432 à 0.721%, MgO de 0.63 à 1.2%, Fe_{total} de 3.31 à 4.89% et CaO de 1.5 à 1.7%. Les concentrations en Na_2O varient de 3.1 à 2.49% alors que K_2O varie de 3.5 à 3.4 % respectivement dans les gneiss les moins altérés et les plus altérés. Les teneurs en cet élément sont plus élevés au centre du profil 4.6%.

Le diagramme ternaire A-CN-K (A= Al_2O_3 , CN= $CaO+Na_2O$, K) (Fig.4a) ainsi que celui

CIA versus la profondeur (Fig.6.a) montre que les gneiss arkosiques ont enregistré une importante altération. La position des échantillons dans le diagramme traduit le degré d'altération de chacun d'eux. L'échantillon G7, le plus altéré est proche du sommet A ($A=Al_2O_3$), alors que l'échantillon le moins altéré s'en éloigne. Les études ont montré que le lessivage des éléments tel que Ca, Na est proportionnel au degré d'altération (Wronkiewicz et Condie, 1987). L'index d'altération chimique ($CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$) (Nesbitt et Young, 1984) calculé pour tous les échantillons (CIA varie de 62,78 à 68,32) (tableau 2) traduit l'évolution progressive de l'altération, ainsi que l'introduction progressive de minéraux alumineux, du sommet vers la base du banc des gneiss arkosiques (Fig.6b).

Tableau 2. Analyses des éléments majeurs des gneiss arkosiques du massif de l'Edough, CIA
- Index of Chemical Alteration.

	GNEISS FRAIS	GNEISS +/-ALTERES			GNEISS ALTERES
	G1	G 4	G 2	GSM3	G 7
SiO2	71,471	67,923	67,736	69,707	68,031
Al2O3	13,690	15,192	15,611	14,537	15,203
Fetot	3,315	4,599	4,077	4,689	4,893
CaO	1,519	1,516	1,440	1,823	1,598
MgO	0,630	1,041	1,048	0,965	1,207
MnO	0,015	0,050	0,044	0,076	0,048
K2O	3,576	4,189	4,641	3,376	3,403
Na2O	3,018	2,305	2,040	2,520	2,049
P2O5	0,228	0,230	0,190	0,228	0,232
TiO2	0,432	0,678	0,595	0,609	0,721
LOI	2,081	2,067	2,278	1,630	2,695
Total	99,974	99,790	99,700	100,160	100,081
CIA	62,789	65,478	65,782	65,317	68,321

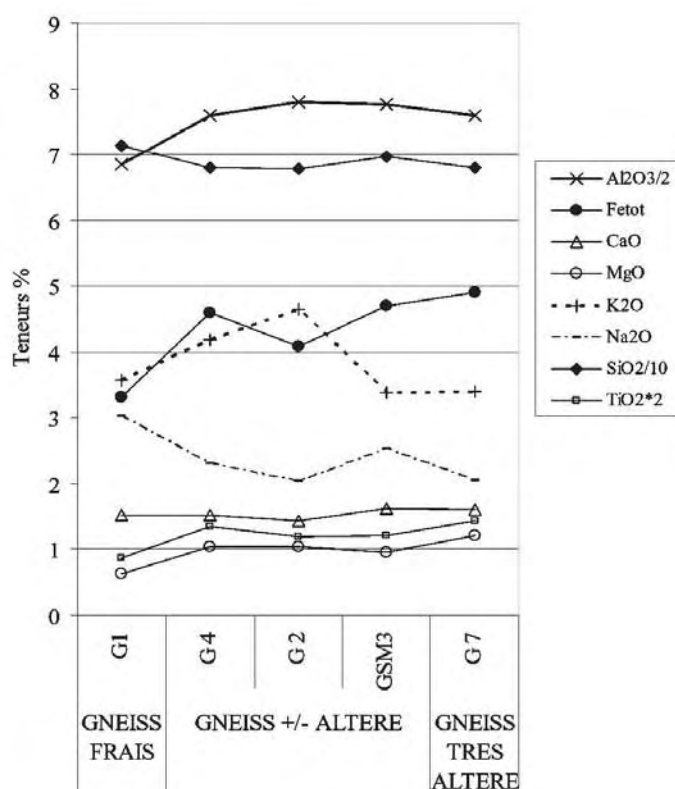


Fig. 5 Profile de distribution des éléments majeurs.

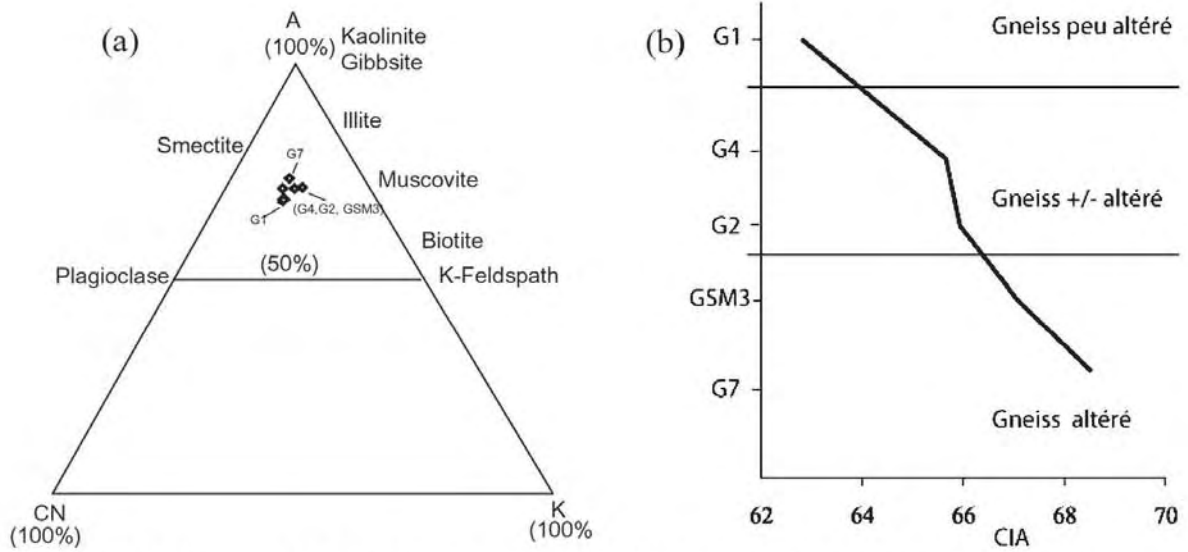


Fig. 6 a- Diagramme A-CN-K, b- évolution de l'altération (CIA) avec la profondeur (La profondeur est représentée par l'ordre de prélèvement des échantillons).

Dans le but d'évaluer le comportement des éléments chimiques durant l'altération des gneiss arkosiques en terme de gain et de perte en un élément par rapport à la roche mère, le pourcentage de modification

(% modification = $[(X/Ti)_s - (X/Ti)_p - 1] * 100$) (Nesbitt, 1979) a été calculé (Fig.7). Le Ti considéré comme élément immobile durant l'altération a été pris comme élément de référence.

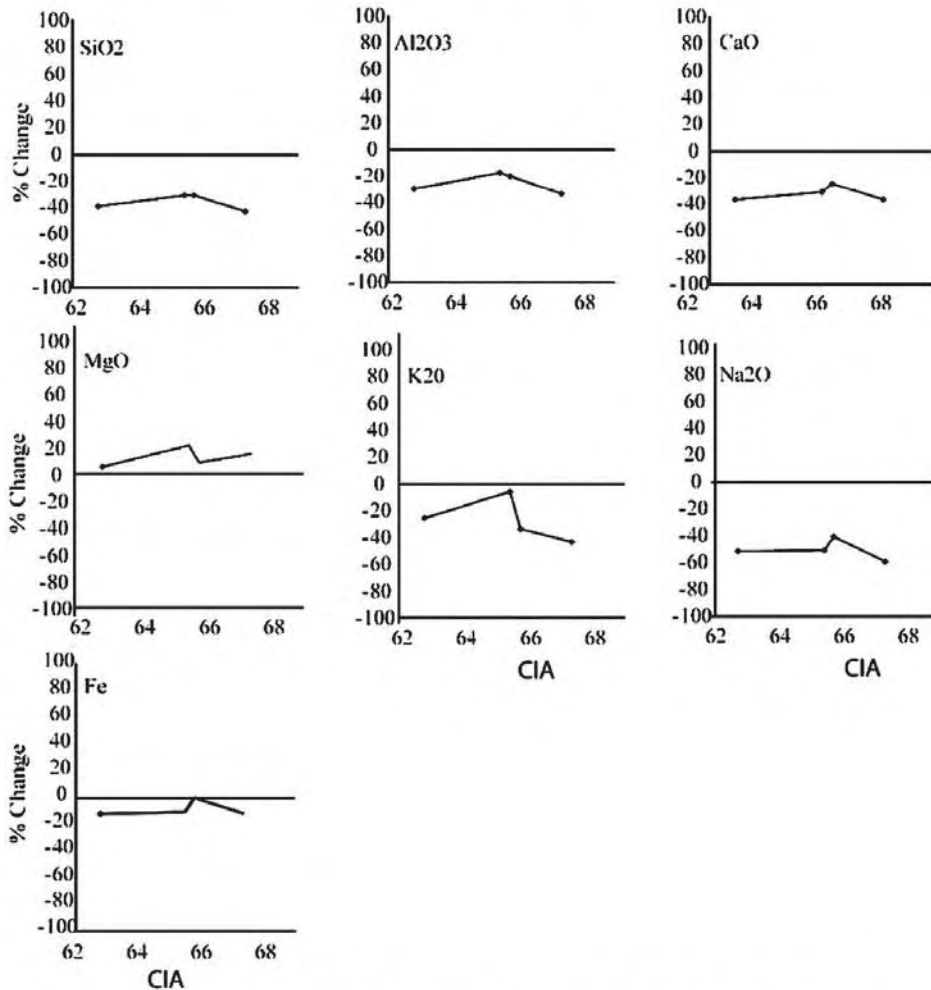


Fig. 7 Pourcentage de modification (% Change) versus le degré d'altération (CIA) des gneiss arkosiques du massif de l'Edough.

Au cours de l'altération la mobilité des éléments chimiques s'exprime en termes de perte ou en gain par rapport à la roche parentale (représenté par l'échantillon G1). Les majeurs SiO_2 , Al_2O_3 , CaO montrent une perte de l'ordre de 40%. La valeur la plus importante (60%) en terme de perte est celle de Na_2O . CaO et Na_2O sont lessivés de la roche parentale ainsi que des minéraux argileux. Le potassium (K) montre une perte variant de 20 à 40%, cette variation est en accord avec l'augmentation de la valeur de l'indice d'altération. Le MgO et le FeO_{tot} ont un comportement différent de celui des autres éléments majeurs, on note pour Mg un gain variant de 0 à 20% et pour Fe des pertes très faibles de l'ordre de 10%. Les faibles variations de ces éléments indiquent une altération sélective avec formation de minéraux secondaires tels que les oxydes et d'hydroxydes, ce qui explique la couleur brunâtre des roches fortement altérés.

4.4 Effets de l'altération

Les modifications chimiques et l'apparition de minéraux argileux ont eu pour conséquence de façonner la topographie locale du banc gneissique. La base des gneiss arkosique qui est riche en minéraux argileux montre localement un nombre important d'ondulations qui sont interprétées comme la conséquence direct de la présence des

minéraux argileux. L'illite et la montmorillonite de part leurs propriétés physiques (les propriétés gonflantes) provoquent des modifications de volume de la roche hôte. Ces modifications de volume ont entraînés des changements dans le système poreux induisant ainsi des variations dans le comportement hydrologiques. L'allure et la fréquence des ondulations sont en relation avec la quantité et la nature des minéraux argileux présents (Fig.8). La partie supérieure du banc gneissique montre de faibles ondulations, ce qui concorde avec la présence de l'illite qui est un minéral caractéristique des zones poreuses et à fort drainage. L'augmentation de la fréquence des ondulations vers la base du banc gneissique indique une évolution dans la minéralogie des minéraux argileux et du système poreux. La présence de la montmorillonite dans ces zones indique un mauvais drainage ainsi qu'une faible porosité de la roche. Dans la montmorillonite, l'incorporation du Fe et Mg dans la structure cristalline par substitution de Al et l'insertion de Ca, Na et H_2O dans l'espace interfoliaire a pour effet d'augmenter l'épaisseur des feuillets qui passe de 14\AA à 17\AA . Le gonflement de la montmorillonite par absorption des éléments chimiques et de l'eau en particulier à pour conséquence une augmentation du volume de la roche.

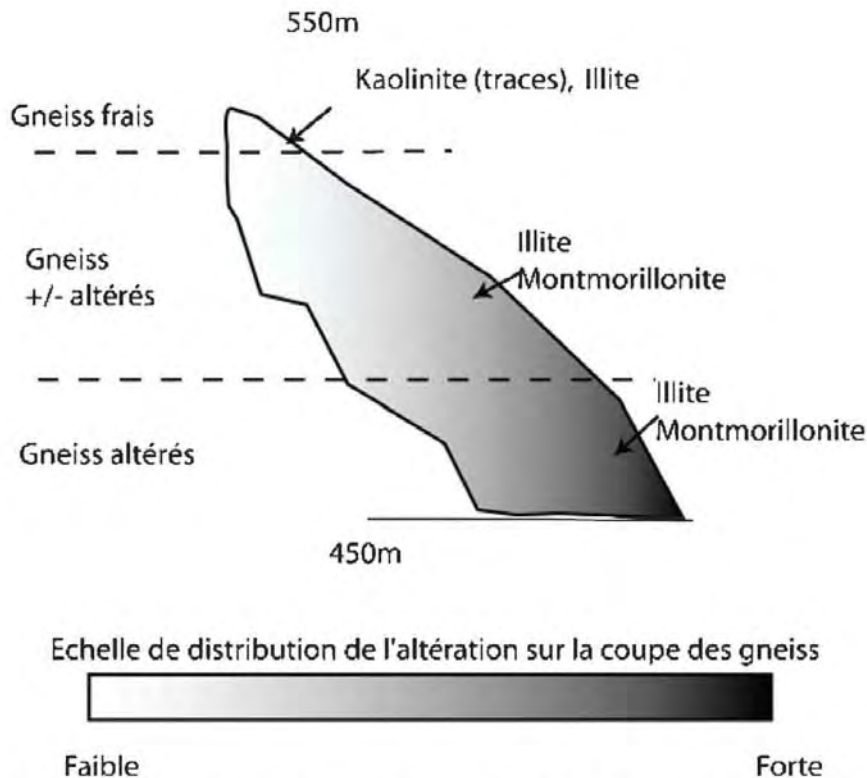


Fig. 8 Distribution spatiale des ondulations en fonction du taux et de la nature des minéraux argileux.

5. Conclusion

Les analyses chimiques, les valeurs de CIA (Chemical Index of Alteration) et le taux de changement suggèrent que les gneiss arkosiques ont subi une importante altération chimique, un important lessivage et une évolution progressive dans la composition chimique des minéraux néoformés. La nature des minéraux argileux indique une évolution progressive de l'altération. La kaolinite se forme dans des terrains à bon drainage alors que la montmorillonite ne se rencontre que dans les roches à très mauvais drainage et parfois dans celles à des conditions de confinement.

Les propriétés absorbantes de la montmorillonite ont eu pour effet d'augmenter le volume du minéral ce qui a eu pour conséquences de modifier le volume de la roche mère. La base du banc gneissique qui est très riche en montmorillonite, a subi d'importantes modifications de volume ce qui a eu pour conséquences une modification mineure de la topographie locale.

Remerciements

Les auteurs remercient le personnel du laboratoire GFZ Potsdam, le personnel des analyses chimiques de l'Institut des Sciences de l'Université de Potsdam (Allemagne). Nos remerciements vont également au personnel du laboratoire RX du CRD Boumerdes.

Références Bibliographiques

- Ahmed Said Y. & Leake B.E. Rogers G. 1993 : The petrology, geochemistry and petrogenesis of the Edough igneous rocks, Annaba, NE Algeria. *Journal of African Earth Science*, 17, 1, 111-123.
- Gleizes G. Bouleton, J. Bossière G. & Collomb, P. 1988 : Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le Massif cristallophyllien de l'Edough (Est Algérien). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 306 (II), 1001-1008.
- Hammor D. & Lancelot J. 1998 : Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le Massif de l'Edough (Nord-Est de l'Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 327, série II, 391-396.
- Hilly J. 1962 : Etude géologique du Massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est Constantinois). *Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie (nouvelle série)* 19, 408.
- Ilavsky J. & Snopkova P. (1987). Découverte d'acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 305, 881-884.
- Nessbit H. W & Young C.M. 1984 : Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic consideration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1523-1534.
- Wronkiewicz D. J. & Condie K. C. 1987 : Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa : source-area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2401-2416.

Identification des Facteurs de Variation du Chimisme de l'Eau dans un Milieu Cristallin

H. Majour, H. Hani, K. Khanchoul & L. Djabri

Département de Géologie, Université Badji Mokhtar - Annaba, BP 12, 23000 Annaba, Algérie.

Adresse e-mail de l'auteur : yah_majour@yahoo.fr

ملخص :

تتكون جبال إيدوغ من مجموعة صخور متحولة في شمال شرق الجزائر. تشكل قبة نايس محاطة بشست ميكاني بمستوى الرخام البسيط. تحتوي أيضًا على بعض الصخور النارية النادرة. تأثير الجو على صخرة النايس سمح باستقرار تربة سميكة شكلت طبقات مائية استغلت لتزويد الماء الصالح للشرب. يجري التصرف الطبيعي لنظام جيولوجيا الماء في مجموعة ينابيع موزعة طبقاً للإتجاهين رئيسيين NW-SE و NE-SW، يعود تزويد الطبقات المائية إلى نفاذية المطر بمعدل سنوي يقدر ب 1040 مم (1978 إلى 2006 مم)، تستند دراسة الخصائص الفيزيائية الكيميائية للطبقات المائية على النتائج التحليلية لسلسلة العينات الدورية في 15 يوم، أنجزت بين 2005-2006. على أساس المعالجة الإحصائية، تمت مطابقة العمليات الرئيسية المسؤولة عن التطور الكيميائي الملاحظ على مستوى الطبقات المائية. يعود تخفيف العناصر الكيميائية وزيادة محتويات البوتاسيوم إلى نفاذية مياه المطر. تساهم المياه القذرة في زيادة المعدنة، تخضع مصفوفة الصخرة إلى الإنحلال طبقاً لمساهمة ثاني أكسيد الكربون المفسر لمعدنة المياه الجوفية. في هذه الدراسة. تم استعمال شبكات الخلايا العصبية الإصطناعية (ANN) لنقل التدفق و معدنة الينابيع. ولذلك يسمون بتحديد تأثير العوامل الفيزيائية الكيميائية و المناخية و خصوصاً الخصائص البنيوية الخاصة بالينابيع.

Résumé : Située au nord-est de l'Algérie, la partie centrale du massif de l'Edough est constituée essentiellement de gneiss et de migmatites à intercalations de marbres et d'amphibolites. L'altération superficielle de la roche mère (gneiss) a permis le développement d'un sol épais de près de 10 mètres, qui constitue un aquifère exploité pour l'alimentation en eau potable. La décharge naturelle de ce système hydrogéologique se réalise par un ensemble de sources qui se répartissent selon deux directions préférentielles d'orientation NE-SW et NW-SE. Ces dernières correspondent aux directions de deux familles de failles conjuguées. L'alimentation de l'aquifère est essentiellement due à l'infiltration des eaux de précipitation d'une valeur moyenne de 1040 mm/an (1978 à 2006). L'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'aquifère du massif cristallophyllien de l'Edough est basée sur les résultats analytiques obtenus pour une série d'échantillons, de périodicité de 15 jours, réalisés entre Juin 2005 et Février 2006. Partant d'un traitement statistique, les principaux processus responsables de l'évolution chimique observée au niveau de l'aquifère ont été identifiés.

L'infiltration des eaux météoriques est responsable de la dilution des éléments chimiques et de l'augmentation des teneurs en potassium. L'apport des eaux usées est responsable de l'augmentation de la minéralisation, en particulier à proximité du village de Seraidi. La matrice rocheuse de l'aquifère est soumise selon l'apport du gaz carbonique à une dissolution qui explique une partie de la minéralisation des eaux souterraines. Dans cette étude, les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés pour simuler les débits et la minéralisation des sources et d'appréhender par conséquent l'influence des facteurs physico-chimiques, climatiques et notamment des caractéristiques structurales sur le comportement des sources.

Mots Clés : milieu cristallin, réseau neurone artificiel, débits, minéralisation.

Abstract : The Edough massif is a metamorphic body in the northeast Algeria. It forms a gneissic dome surrounded by micaschistes with minor marble levels. It also contains some rare ultramafic rocks.

The gneiss weathering allows the settlement of thick soil that constitutes an aquifer exploited for the drinking water supply. The natural discharge of this hydrogeologic system is realized by a set of springs, which are distributed according to two main directions NE – SW and NW – SE. The supply of the aquifer is due to the rainfall infiltrations with an annual average of 1040 mm (1978 to 2006 mm). The study of the physico-chemical characteristics of the aquifer is based on the analytical results carried out on a series of samples for a periodicity of 15 days, realized between 2005 and 2006. On the basis of a statistical treatment, the main processes ruling the observed chemical evolution within the aquifer are defined. The infiltration of meteoric waters governs the dilution of the chemical elements and the increase of potassium contents. The waste water contributes to the increase of the mineralization. The rock matrix is submitted to dissolution according to the carbon dioxide contribution which explains the mineralization. In this survey artificial neurons networks (ANN) have been used to simulate the flows and the mineralization of the springs. Consequently they allow to define the effect of the physico-chemical and climatic factors and more particularly the structural one the behaviour of the springs.

Key words : crystalline medium, artificial neurons networks, flows, mineralization.

1. Introduction

Afin d'aider des planificateurs de l'eau pour acquérir la connaissance adéquate et comprendre les relations qui peuvent exister entre qualité et la quantité de l'eau, il y a un besoin d'utiliser une méthodologie adéquate pour définir les déterminants de la qualité des eaux souterraines influençant par là l'attraction des différents utilisateurs municipaux et ceux du domaine agricole.

Pendant la dernière décennie, le modèle des réseaux de neurones artificiels (ANN) a été appliqué avec succès à plusieurs processus hydrologiques, tels que le modèle pluie-débit (Minns et Hall, 1996), prévision de la pluie, modélisation de la demande en eau (Liu et al., 2003), modélisation de la qualité de l'eau (Rajurkar et al., 2004; Riad et al., 2004; Hani et al., 2006), modélisation des débits liquides (Coulibaly et al., 2000), problèmes des eaux souterraines (Lallahem et al., 2004) et problèmes dans le fonctionnement du réservoir (Coulibaly et al., 2000). Hornik et al. (1989) a montré que l'ANN pourrait être appliqué aux différents problèmes appliqués en génie civil. Maier et Dandy (2000) ont examiné dans leurs travaux des modèles du réseau neuronal pour la prévision des ressources en eau.

Une rétro-propagation de type « perceptron » multicouches (MLP) avec les fonctions de transfert en forme de S est la plus connue du réseau neuronal due à sa haute performance comparée aux autres réseaux (Lippmann, 1987; Riad et al., 2004).

Cet article introduit la rétro-propagation MLP et autres types de modèles ANN pour pouvoir établir des comparaisons. Ces types incluent la Fonction de la Base Radiale (RBF), régression générale des réseaux neuronaux (GRNN) et Linéaires.

Le massif de l'Edough renferme dans son sous sol un potentiel hydrique assez précieux surtout d'un point de vue qualitatif. Il est constitué par un réseau de sources utilisées essentiellement pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Cependant le développement de ce village et l'accroissement des besoins en eau peuvent provoquer la dégradation de la qualité de ses eaux qui constituent par ailleurs un des apports à la nappe des graviers.

Dans cette étude, nous essayerons d'identifier les facteurs responsables de la variation des débits des sources et d'analyser l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux et d'identifier les facteurs qui régissent ces variations.

2. Zone étudiée

L'Edough constitue un véritable îlot montagneux, entouré par la mer Méditerranée au Nord, la vallée de l'oued Kébir à l'Ouest, au Sud par la dépression du lac Fetzara et par la plaine de Annaba à l'Est. La masse principale de ce massif est allongée vers le nord-est avec une ligne de crête longue de 25 kilomètres qui débute du lac Fetzara, s'élève très rapidement à Koudiat El Roha avec 616 m, pour atteindre 1008 m au Kef Seba le point culminant de la région. Cette ligne redescend vers le village de Seraïdi (867 m) puis s'abaisse régulièrement jusqu'au Cap de Garde au Nord. Les deux versants du massif, ainsi identifiés, sont assez distincts :

- le versant Nord-Ouest est moins abrupt mais profondément entaillé par de nombreux ravins.
- le versant Sud-Est, est beaucoup plus raide avec une pente globale de 25%.

La région étudiée est caractérisée par un climat méditerranéen. La température moyenne annuelle est de 15°C. La région reçoit des précipitations abondantes dont le total moyen annuel est de 1040 mm mesuré à la station de Seraïdi (1978-2005). Les chutes de neige sont également fréquentes. D'une manière générale, la période d'alimentation (1^{ère} phase d'échantillonnage) débute par une infiltration très courte correspondant aux dernières averses du mois de Juin, passe ensuite à une décrue, puis à un tarissement mobilisant les eaux de réserves.

Enfin, la période de recharge finale (2^{ème} phase d'échantillonnage) se termine par un relèvement des courbes correspondant à la crue d'hiver (Majour, 1996). Le réseau hydrographique est très dense, bien hiérarchisé et encaissé. Il est de type dendritique. Les principaux oueds à écoulement pérenne sont: El Aneb, Boudjenane, El Ourida, Erbibba et Maïser. Le djebel Edough est un vaste anticlinal métamorphique constitué essentiellement par des gneiss ceinturés par des micaschistes (Hilly, 1962; Caby et Hammor, 1992; Ahmed-Said, 1993). Les gneiss occupent la partie centrale du massif et sont oeillés, feuilletés ou rubanés (Fig. 1 a-b).

La plupart sont à deux micas mais parfois seule la muscovite est représentée. Ils renferment outre la biotite, la muscovite, du quartz, des feldspaths alcalins (orthose, microcline) et des plagioclases (albite, oligoclase), de la tourmaline et du grenat près des zones de passage aux micaschistes. Les micaschistes sont plus abondants et occupent les zones périphériques du massif de l'Edough. Ils sont essentiellement formés de quartz, de biotite et de muscovite. Ils renferment également des minéraux de métamorphisme: grenat, staurotide, tourmaline, andalousite, disthène.

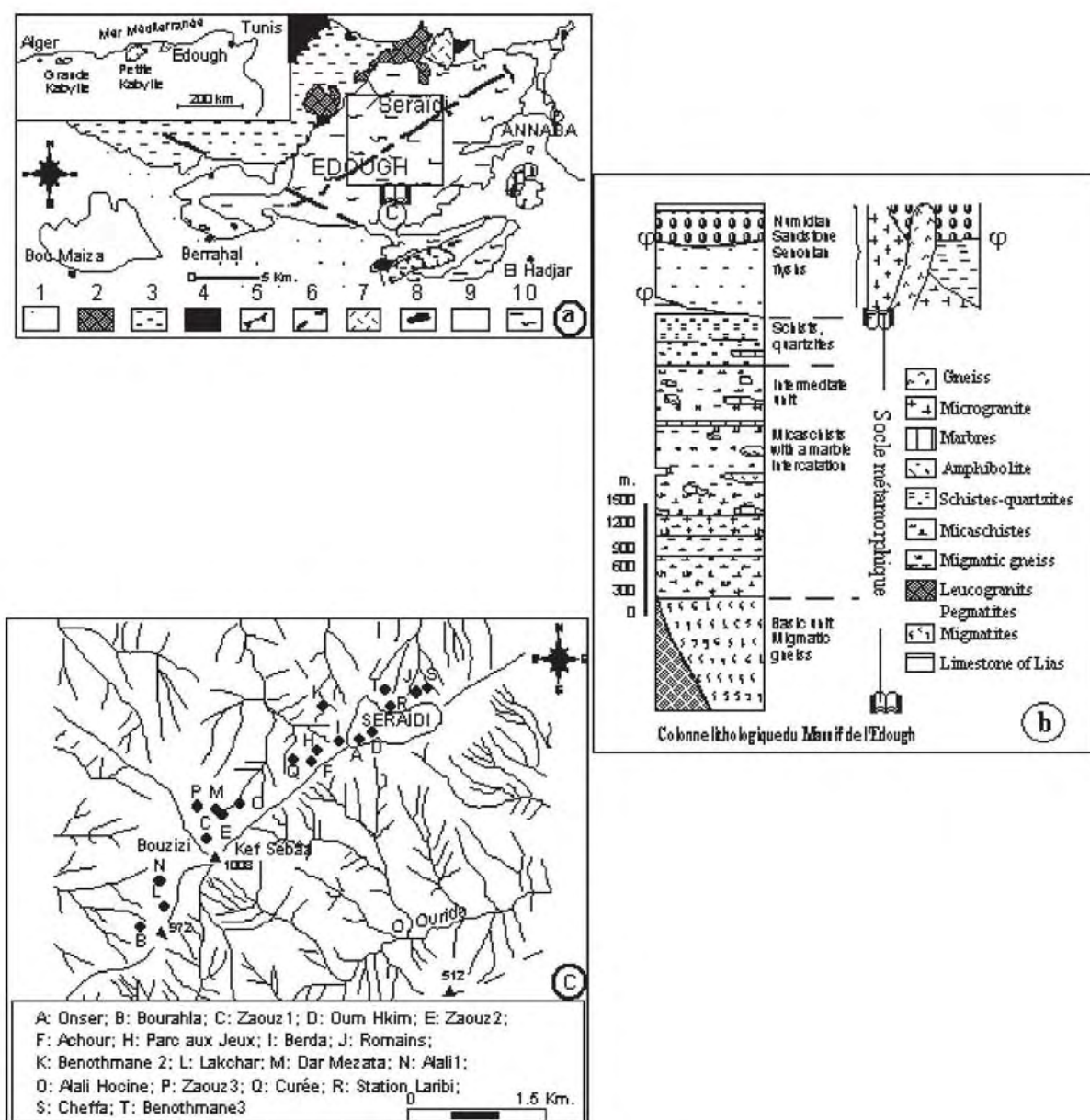


Fig. 1 Situation et description de la zone d'étude. (a) Cadre géologique (d'après Hilly, 1962; Hammor, 1992; modifiée). En cartouche, croquis de situation: 1: Quaternaire indifférencié; 2: roches éruptives miocènes; 3: flyschs allochtones; 4: couverture de type prékabyle; 5: contact anormal; 6: axe antiforme; 7: amphibolites; 8: calcaires métamorphiques; 9: micaschistes; 10: gneiss. (b) Colonne lithologique du massif dunaire (Hammor, 1992). (c) localisation des sources échantillonnées.

Dans le massif de l'Edough, la naissance des sources semble être liée à la tectonique cassante et l'altération superficielle du socle. Les accidents tectoniques connus jusqu'à ce jour dans le massif de l'Edough permettent de déceler deux familles d'accidents :

- Une première famille, dont l'orientation est Nord Ouest - Sud Est. La direction la plus fréquente de ces accidents varie de N 120° E à N 150° E.
- La seconde famille, qui semble être conjuguée à la première, est dirigée Nord Est- Sud Ouest.

Outre le système de failles conjuguées NW-SE et NE-SW, la phase tectonique est également responsable de la formation des fractures d'extension secondaires. L'altération superficielle de la roche mère (gneiss) permet le développement d'un sol épais pouvant atteindre par endroits huit mètres d'épaisseur (Gleizes et al., 1988). Ainsi, à proximité des fractures, nous constatons que la roche mère perd toute sa cohésion et devient friable, prenant une teinte blanchâtre. D'une manière générale, les sources du massif de l'Edough se répartissent selon deux directions préférentielles d'orientation NW-SE et NE-SW correspondant aux directions des deux de failles conjuguées. Dans le village de Seraïdi, la répartition des sources peut être liée à des zones d'altération du socle (Fig. 1c).

3. Matériels et méthode

Les données climatiques journalières ; précipitations (RAIN), évaporation (EVP) et température (TEMP) proviennent de la station de Seraïdi. Les jaugeages des sources du massif de l'Edough (CFLOW) ont été réalisés dans le cadre de la préparation d'un mémoire de Magistère (Majour, 1996). Dans cette étude, les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été utilisés pour essayer d'obtenir une relation entre le débit de la source et les caractéristiques climatiques. Dans ces conditions le débit à la source peut s'exprimer de la manière suivante (Lallahem and Mania, 2002A) :

$$CFLOW = F[RAIN(t), RAIN(t-1), \dots, RAIN(t-k+1); EVP(t), EVP(t-1), \dots, EVP(t-k+1); RAIN(t), TEMP(t), TEMP(t-1), \dots, TEMP(t-k+1), X1FLOW(t), X1FLOW(t-1), \dots, X1FLOW(t-k+1), X2FLOW(t), X2FLOW(t-1), \dots, X2(t-k+1)] + e(t)$$

Où : t est un index du temps avec une valeur entière positive; TEMP(t), EVP(t), RAIN(t) représentent les vecteurs des paramètres d'entrée à un temps t; X1FLOW, X2FLOW, X3FLOW, X4FLOW, F[] est une fonction non linéaire qui sera estimée par le modèle ANN; e(t) est l'erreur de simulation qui devrait être la plus faible; k, nombre inconnu représentant le pas de temps; si k = 1, le débit calculé (CFLOW) à l'instant t = 0 dépend uniquement des

valeurs des paramètres à l'entrée du modèle à t = 0 autrement dit un lag-1, c'est-à-dire:

$$CFLOW = F[EVP(t), RAIN(t), TEMP(t), X1FLOW(t), X2FLOW(t)] + e(t)$$

où k est évalué par une procédure itérative jusqu'à l'obtention du plus petit écart possible entre les débits mesurés et ceux calculés en utilisant une seule couche cachée du modèle.

Par ailleurs, nous avons choisi d'utiliser 50% des données saisies pour l'apprentissage afin d'assurer une bonne représentativité de l'ensemble du tableau d'entrée, 25% pour la phase de validation et les 25% restants pour tester le modèle (Lallahem et Mania, 2002B). Ensuite pour vérifier la fiabilité des résultats du modèle, nous avons utilisé la notion de racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (Nash et Sutcliffe, 1970). Celle-ci peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{N}}$$

Où Q est le débit mesuré à l'exutoire; \hat{Q} , le débit calculé par le modèle et N, le nombre total de mesures.

L'évolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du massif de l'Edough est basée sur les résultats analytiques obtenus sur une série d'échantillons de périodicité de 15 jours à 1 mois. Chacune des 19 sources répertoriées a été ainsi échantillonnée 23 fois.

Afin d'étudier les mécanismes qui commandent l'évolution spatiale et temporelle de la qualité des eaux du réservoir cristallin de l'Edough, les données ont été traitées par l'analyse en composantes principales (ACP). La démarche adoptée consiste à établir une ACP pour chaque campagne d'échantillonnage (évolution dans l'espace) et une ACP pour chaque source (évolution temporelle).

4. Résultats

4.1 Simulation des débits des sources

Les résultats obtenus montrent une parfaite superposition des courbes des débits mesurés et calculés lors des phases d'apprentissage, de validation et de test.

Ils montrent également des écarts minimums avec des valeurs de RMSE très faibles. L'introduction des paramètres climatiques (température, précipitations et évaporation) permet donc d'obtenir une bonne reconstitution des débits des deux sources étudiées (Fig. 2). Par conséquent, nous pouvons utiliser cette démarche pour décomposer les hydrogrammes des sources ou pour valider des hypothèses de travail.

D'une manière générale, la période d'étude débute par une infiltration très courte correspondant aux dernières averses du mois de Juin, passe ensuite à une décrue, puis à un tarissement mobilisant les eaux

de réserves. Enfin, la période d'échantillonnage correspond au relèvement des courbes lié à la crue d'hiver.

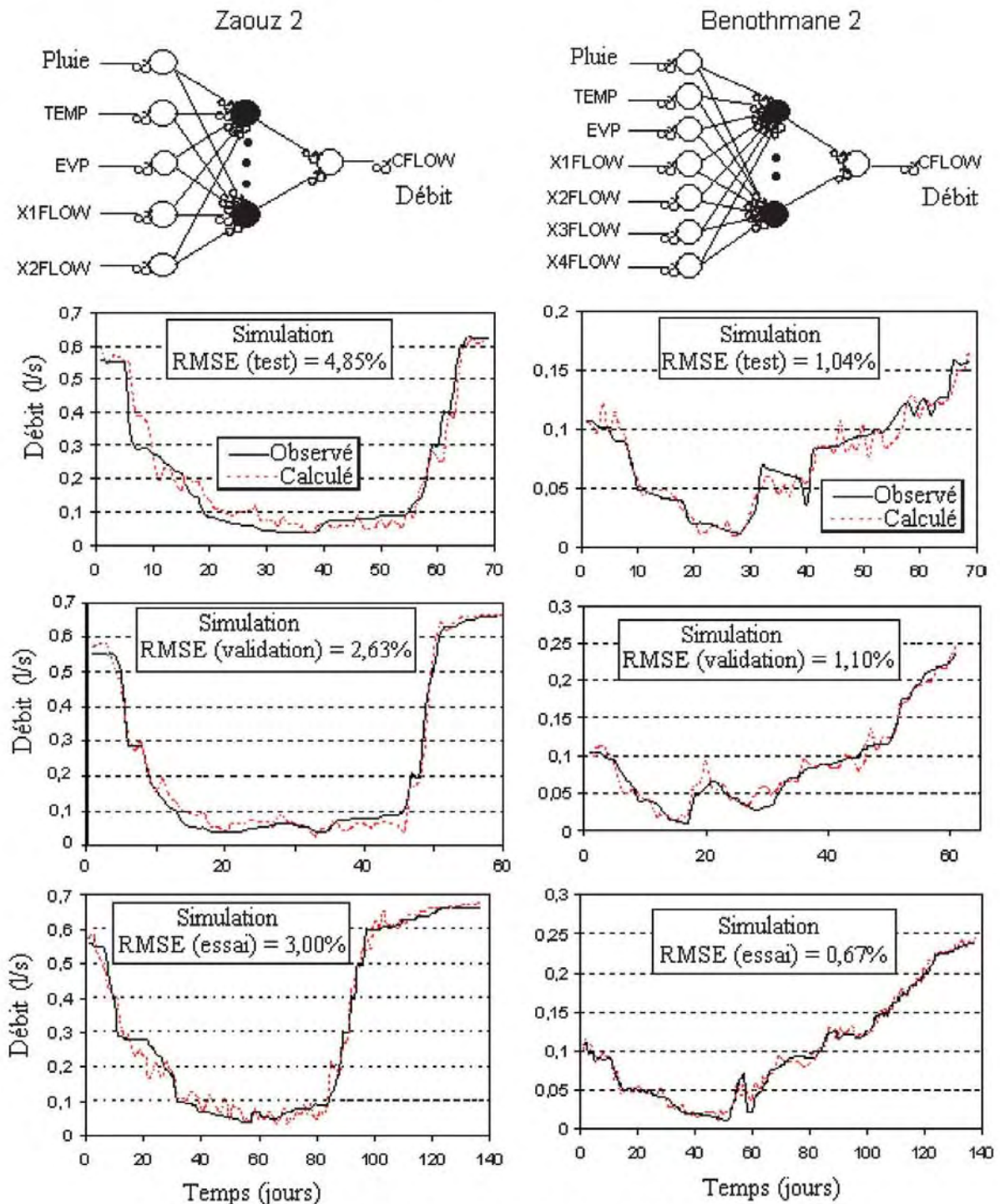


Fig. 2 Comparaison entre les débits mesurés et calculés dans les sources Zaouz 2 et Benothmane 2.

4.2 Evolution physico-chimique des eaux

Les résultats obtenus montrent que la conductivité présente un ensemble de valeurs comprises entre 260 et 2127 $\mu\text{S}/\text{cm}$; les valeurs minimales correspondent à des mesures obtenues sur les eaux de la source de Bourahla en période de crue d'hiver alors que les sources de Curée et des Romains, situées dans le village de Seraidi, enregistrent les valeurs maximales pendant la période d'étiage. L'étude des corrélations montre que la conductivité est surtout contrôlée par les bicarbonates, le calcium, les chlorures, le sodium et le magnésium et à une moindre échelle par les sulfates et les nitrates. Les températures sont assez homogènes pour l'ensemble des sources. Le degré de variation d'une source à une autre est assez faible avec cependant un écart global qui distingue la période hivernale, avec un minimum de 9°C, et la période d'étiage avec un maximum de 19°C. La valeur du pH varie entre 5,5 et 7,8 ce qui indique une eau acide puis équilibrée et enfin légèrement basique.

A partir des données analytiques ont été évalués les coefficients de corrélation entre les débits et les éléments physico-chimiques pour chaque source pour illustrer ainsi l'évolution physico-chimique des eaux dans l'aquifère (Tableau 1). Les meilleures corrélations « r » sont celles qui lient le potassium au débit à la source de Dar-Mezata et Zaouz3 avec respectivement $r = 0,931$ et $0,921$, $r = 0,846$ pour le

débit et la température à Ben-Othmane 2 et $r = 0,828$ pour le couple débit-sulfate à la source Dar-Mezata (Hani et al., 2002).

Lorsque les corrélations sont inverses, cela signifie que les valeurs des éléments mesurés diminuent quand le débit augmente. C'est le cas des chlorures, des bicarbonates, des nitrates (sauf en cas de pollution), du calcium, du magnésium, de la conductivité et des températures. Tous ces éléments évoluent comme s'ils avaient une origine endogène puisque les teneurs les plus fortes sont observées pendant les décrues et le tarissement et le plus faible en périodes pluvieuses. Le cas inverse a été observé pour les sulfates, le potassium et le pH qui évoluent comme le débit. Graphiquement, à une augmentation de débit correspond des valeurs fortes en sulfates, en potassium, et un pH fort et inversement lors d'une diminution de débit.

Afin d'étudier les mécanismes qui commandent l'évolution spatiale et temporelle de la qualité des eaux du réservoir cristallin de l'Edough, les données ont été traitées statistiquement par l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La démarche adoptée consiste à établir une ACP pour chaque campagne d'échantillonnage (évolution dans l'espace) et une ACP pour chaque source (évolution temporelle).

Tableau 1. Matrice de corrélation débit - éléments physico-chimiques.

	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	CE	T	pH
A	-0,266	-0,102	-0,285	0,510*	0,189	-0,030	-0,426	-0,146	0,093	0,141	0,161
B	0,251	-0,292	-0,091	-0,363	-0,073	-0,224	0,086	0,604*	-0,057	-0,066	0,076
C	0,139	-0,173	0,082	-0,068	0,176	-0,252	0,019	0,759*	-0,321	-0,237	0,322
D	-0,502*	-0,545*	-0,094	-0,042	-0,488*	-0,172	-0,561*	-0,248	-0,323	0,179	-0,086
E	-0,199	-0,625*	-0,398	-0,510*	-0,534*	-0,464*	-0,712*	0,647*	-0,497*	-0,488*	-0,244
F	0,124	-0,191	-0,091	0,323	-0,430	-0,156	-0,427	0,216	-0,595*	-0,059	-0,030
G	-0,753*	-0,409	0,192	0,209	-0,599*	-0,692*	-0,242	0,053	-0,539*	-0,336	-0,006
H	0,166	-0,330	-0,206	-0,019	0,041	-0,020	-0,626*	0,504*	-0,188	-0,136	0,366
I	-0,451*	-0,581*	-0,174	0,173	-0,381	-0,444	-0,032	-0,472*	-0,163	-0,146	-0,041
J	-0,611*	-0,534*	0,241	0,077	-0,722*	0,243	-0,770*	0,663*	0,271	-0,846*	0,438
K	0,035	-0,574*	0,582*	-0,616*	-0,357	-0,040	-0,254	-0,246	-0,341	0,322	-0,153
L	-0,711*	-0,419	0,828*	-0,358	-0,158	-0,397	-0,559*	0,931*	-0,268	-0,324	0,318
M	-0,250	-0,489*	-0,157	-0,525*	-0,558*	-0,236	-0,607*	0,674*	-0,609*	-0,690*	0,480
N	-0,423	-0,758*	-0,234	0,372	-0,318	-0,031	0,054	0,395	-0,416	-0,620*	-0,361
O	-0,258	-0,364	0,425	-0,556*	-0,134	-0,182	-0,509*	0,921*	-0,222	-0,380	0,364
P	-0,319	0,077	0,166	0,121	-0,330	-0,387	-0,411	-0,133	-0,684*	-0,336	0,046
Q	-0,273	-0,026	0,087	-0,182	-0,655*	-0,514*	-0,517*	0,355	-0,210	-0,237	0,049
R	-0,233	-0,183	0,346	0,275	-0,286	-0,038	0,097	0,269	-0,076	-0,450*	0,075
S	-0,206	0,001	0,167	0,250	-0,683*	-0,487*	0,366	0,307	-0,071	0,417	0,027

A : Onser ; B : Bourahla ; C : Zaouz 1 ; D : Oum Hkim ; E : Zaouz 2 ; F : Achour ; H : Parc aux jeux ; I : Berda ; J : Romains ; K : Benothmane2 ; L : Lakchar ; M : Dar Mezata ; N : Alali 1 ; O : Alali Hocine ; P : Zaouz 3 ; Q : Curée ; R : Station Laribi ; S : Cheffa ; T : Benothmane 3 ; * : coefficients significatifs différents de 0 au seuil de 0,05 reconnus à partir d'un test bilatéral de Student.

4.3 Evolution spatiale de la qualité des eaux

Pour les différentes campagnes d'analyse, on obtient des diagrammes factoriels qui montrent que (Fig. 3a-c) :

- Un important nuage de points correspond à la minéralisation naturelle par altération du réservoir

(hydrolyse des silicates essentiellement) (Fritz, 1975; Travi et Mudry, 1997). Cette famille est bien représentée sur l'axe 1 (axe réservoir) de presque toutes les campagnes ;

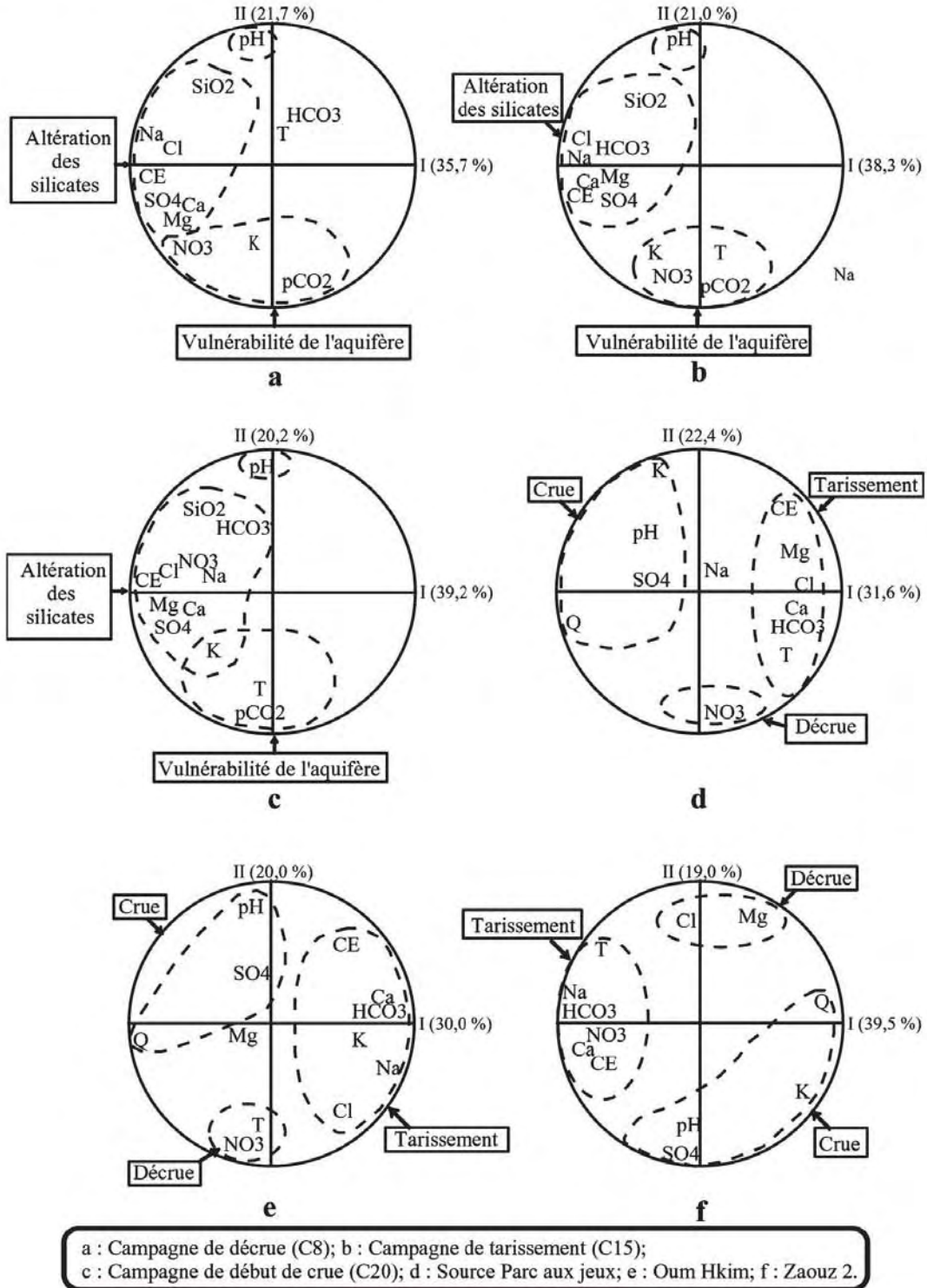


Fig. 3 Analyse en Composantes Principales : évolution saisonnière des processus responsables de la qualité des eaux.

• Des points isolés, liés surtout aux équilibres des eaux, se traduisent par l'opposition entre le pH associé souvent aux SiO_2 et HCO_3 (abscisse positive sur l'axe 2) et la pCO_2 avec la température et le potassium (abscisse négative sur l'axe 2). Dans le cas du réservoir cristallophyllien de l'Edough, caractérisé par une faible profondeur de 8 m environ (résultat du forage), la sensibilité de la nappe aux variations thermiques est un bon indicateur du temps de transfert des eaux d'infiltration. On peut donc considérer que l'axe 2 caractérise la vulnérabilité de la nappe sans négliger pourtant l'hétérothermie annuelle du sous-sol quand la nappe est profonde.

4.4 Evolution saisonnière de la qualité des eaux

Nous présentons quelques exemples de résultats de l'ACP appliquée à l'ensemble des sources (Fig. 3d-f). D'une manière générale, on peut distinguer trois groupes de points : l'un formé par la conductivité électrique, les bicarbonates, le calcium, les chlorures, le sodium et la température correspondant à la période de tarissement le second par le potassium et le pH représentant la crue.

Les sulfates peuvent être présents beaucoup plus dans le premier que dans le second groupe.

L'axe 1 est donc apte à discriminer les points où les facteurs climatiques provoquent d'une part une hausse sensible de la minéralisation par altération des silicates et d'autre part la dilution des éléments chimiques et l'augmentation des teneurs en potassium. Le troisième groupe est représenté essentiellement par les nitrates dont les teneurs sont relativement plus élevées en période de décrue.

5. Discussion

5.1 Altération des silicates plus importante en tarissement qu'en période de crue

L'ensemble des éléments de la minéralisation, Ca, HCO_3 , Cl, NO_3 , Mg, Na, NO_3 , SO_4 et conductivité électrique, révèle un comportement identique au cours du temps. Leurs courbes de variation ont des allures comparables. La baisse des débits est suivie par une augmentation des éléments de la minéralisation suite à l'altération des silicates plus importante en période d'étiage qu'en période de crue (Fig. 4).

On doit admettre que l'écoulement d'étiage, incluant essentiellement le drainage de la matrice s'est effectué avec une infiltration plus riche en CO_2 suite à une augmentation de la température (Appelo et Postma, 1993) que celles des eaux d'hiver, par exemple lors des petites crues du fin de printemps et de début d'été. L'étude des indices de saturation (S.I.) des eaux par rapport aux principaux minéraux, calculés avec le programme WATEQF (Plummer et al. 1976), montre que les concentrations des principaux éléments sont essentiellement sous le contrôle de l'équilibre avec le quartz (SIQuartz), la calcédoine (SICalc), la silice amorphe (SIGel), la silice vitreuse (SIGlas) et à un degré moindre de la calcite, de l'anhydrite, de l'aragonite et de la dolomite.

L'évolution chimique des eaux étudiées sur la base des calculs thermodynamiques, met en évidence une augmentation très significative de la minéralisation en période de tarissement traduisant en cela la tendance des eaux à s'équilibrer par rapport à ces minéraux en présence de gaz carbonique (Figs. 4 et 5).

Les valeurs de la pCO_2 sont en moyenne plus élevées en été qu'en hiver. Cette dernière période est caractérisée par une diminution des teneurs qui chutent énormément après une dilution favorisée par l'arrivée des eaux météoriques et qui participent à l'augmentation des débits et une augmentation des teneurs en potassium issues de l'hydrolyse des feldspaths, des feldspathoïdes (leucite) et des micas (muscovite).

5.2 Caractérisation du facteur «vulnérabilité»

L'opposition entre débit, pH, potassium et température semble rendre compte des conditions du milieu et de leur influence sur les variations thermiques des eaux des émergences, sachant que la sensibilité des eaux souterraines aux variations thermiques est un bon indicateur du temps de transfert des eaux d'infiltration. Le tableau 2 mentionne les sources dont les analyses participent au mieux à cette opposition. La source Alali 1 caractérise cette opposition avec des coefficients de corrélation assez significatifs entre la température et le débit d'une part ($r = -0.69$) et entre la température et le pH d'autre part ($r = -0.783$).

Tableau 2. Coefficients de corrélation entre température-pH et température-débit.

Point d'eau	Alali 1	Benothmane 2	Alali Hocine	Romains	P/ jeux	S/ Laribi	Onser
T-pH	-0.783	-0.337	-0.004	-0.690	-0.577	-0.647	-0.636
T-Q	-0.690	-0.846	-0.620	-0.146	-0.336	-0.237	-0.141

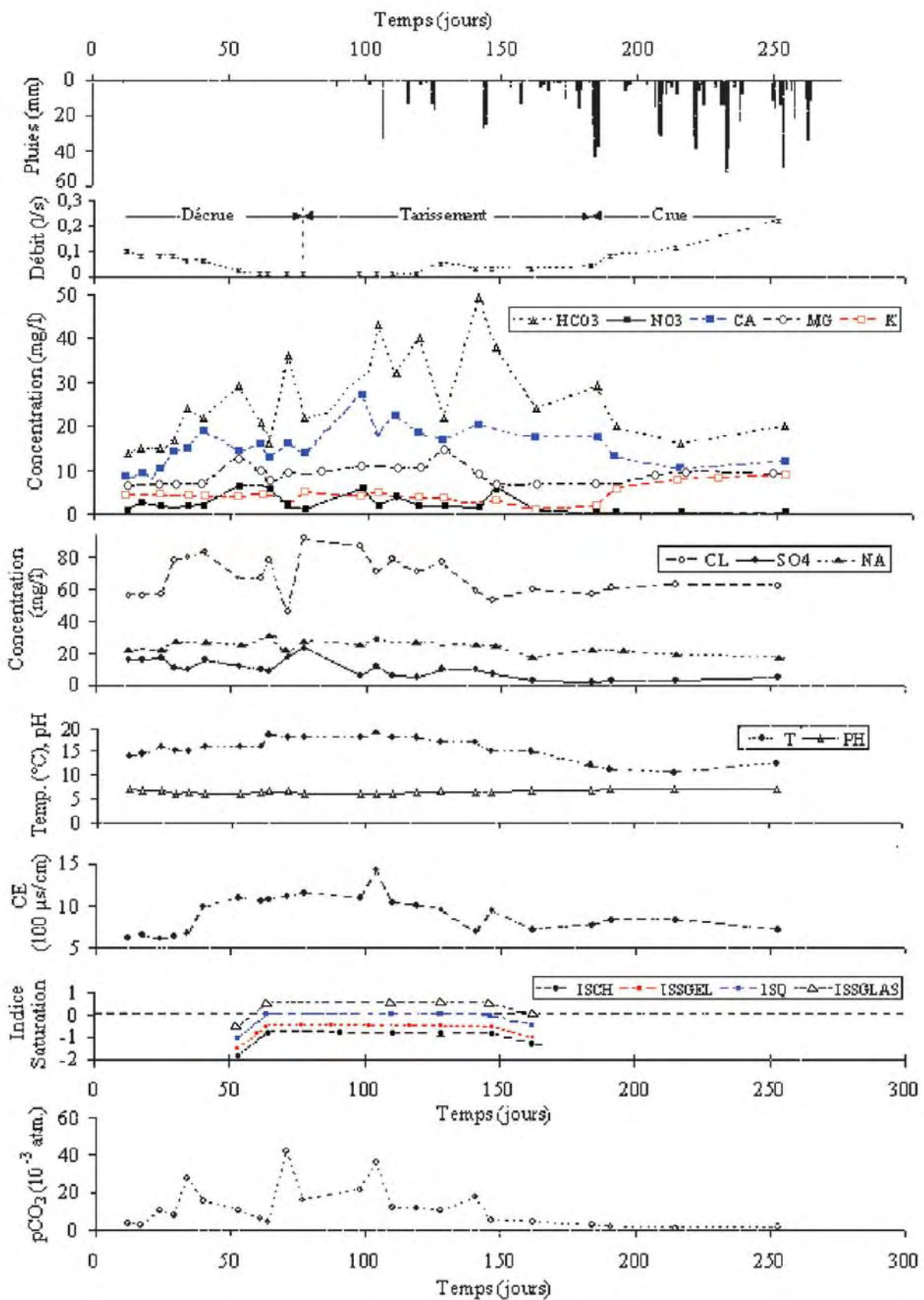


Fig. 4 Courbes d'évolution des différents éléments physico-chimiques « source Alali 1 ».

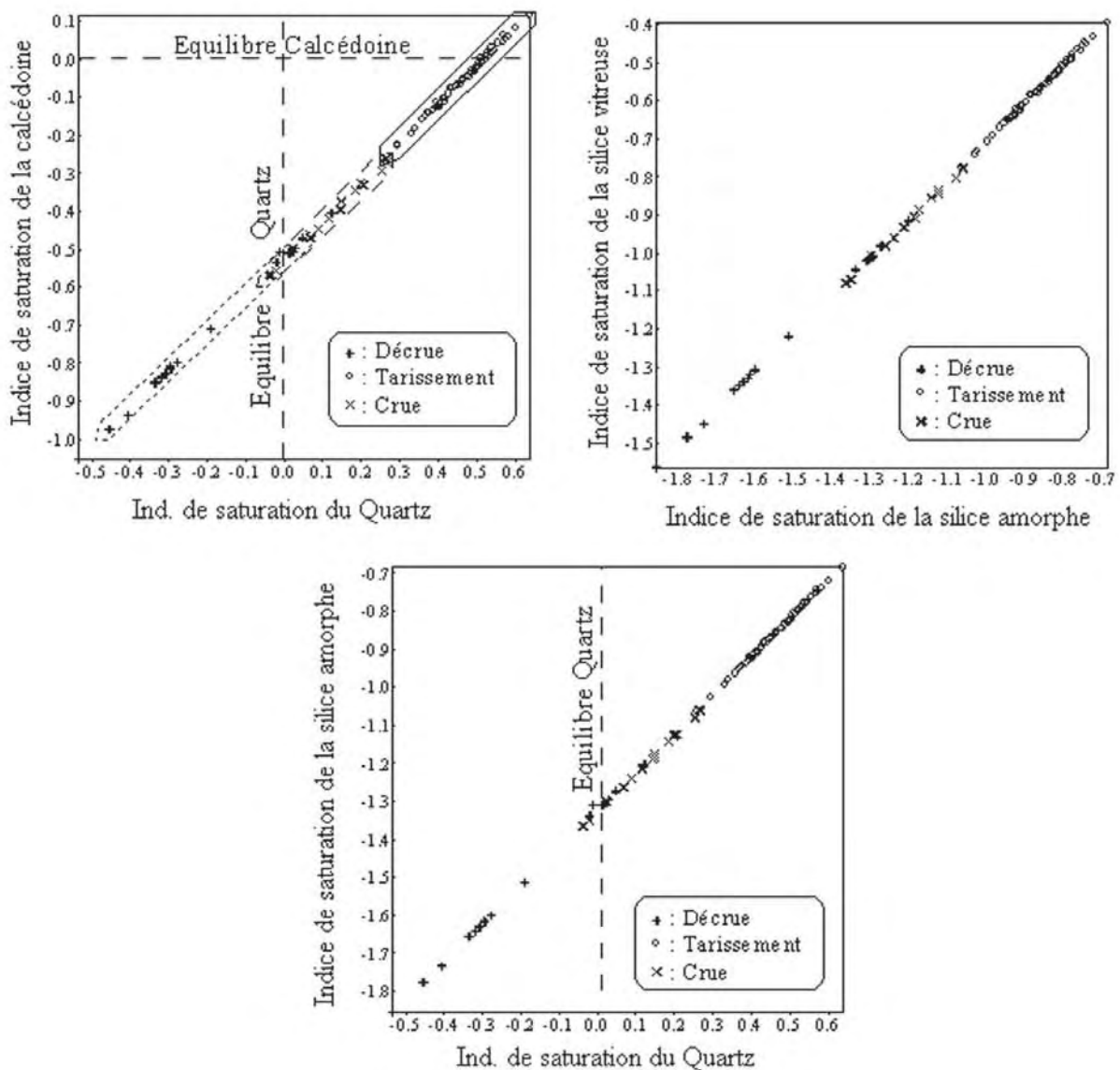


Fig. 5 Relations entre les indices de saturation.

Les profils de la figure 4 traduisent ces constatations; ils montrent une évolution inverse entre le débit et la température au cours de la période d'observation. La décrue et le tariissement sont caractérisés par une quasi-stabilisation avec toutefois, des valeurs plus faibles pendant la décrue qu'en tariissement. Ce dernier est marqué par une mise en équilibre des eaux avec l'encaissant. La température d'équilibre semble atteinte dans l'intervalle 18-19°C. Cet équilibre coïncide avec une augmentation des concentrations des éléments issus de l'altération des silicates et une diminution des éléments liés au réservoir ou d'origine externe (cas du potassium et des sulfates). La période hivernale est marquée par l'arrivée dans le réservoir des eaux d'infiltration qui abaissent la température des eaux de l'aquifère.

6. Conclusion

L'altération superficielle de la roche mère permet le développement d'un sol épais qui constitue la principale ressource en eau pour l'alimentation des populations locales et qu'il convient de protéger et de comprendre le fonctionnement. Le traitement par ACP des données chimiques observées pendant une période de huit mois sur une vingtaine de source du massif de l'Edough met en évidence deux principaux processus responsables de la qualité des eaux des sources et de leur évolution dans le temps. Le premier est l'hydrolyse des silicates responsables de l'augmentation de la minéralisation en période de tariissement (Fig. 6).

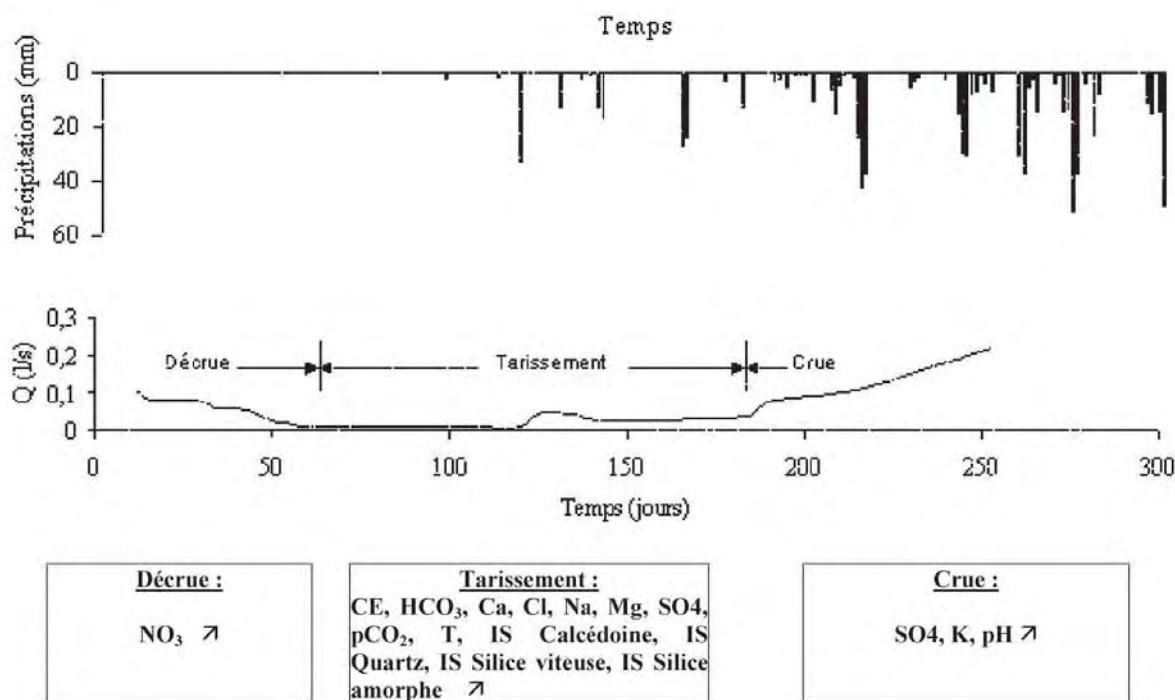


Fig. 6 Evolution saisonnière de la minéralisation dans les sources de l'Edough.

L'étude des indices de saturation des eaux par rapport aux principaux minéraux montre que les concentrations des principaux éléments sont essentiellement sous le contrôle de l'équilibre avec le quartz, la calcédoine, la silice amorphe et la silice vitreuse. Les analyses thermodynamiques montrent une tendance des eaux à s'équilibrer par rapport à ces minéraux en présence de gaz carbonique plus important en tarissement que lors des autres périodes de l'année.

Le second processus, lié surtout à la vulnérabilité de la nappe et sa sensibilité aux variations thermiques, constitue un bon indicateur du temps de transfert des eaux d'infiltration. Les données utilisées dans cette étude montrent que les eaux des sources du massif de l'Edough sont d'excellente qualité chimique mais l'accroissement des terres cultivées et le développement des agglomérations limitrophes pourraient, dans un proche avenir, influencer négativement la qualité des eaux. Il serait donc intéressant d'utiliser ces méthodes très simples pour détecter d'éventuelles pollutions de surface.

Par ailleurs, le passage de la décrue au tarissement est marqué, pour la majorité des sources, par une baisse des teneurs en nitrates et par une augmentation des éléments de la minéralisation suite à l'altération des silicates plus importante en période d'étiage. L'hiver est caractérisé par une diminution des teneurs qui chutent énormément après une dilution favorisée par l'arrivée des eaux météoriques qui participent à l'augmentation des débits et une augmentation des teneurs en potassium.

Références Bibliographiques

- Ahmed-Said Y. 1993 : The Edough leptynites, Annaba, NE Algeria, are they good indicators to the origin of the biotite gneisses?. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, volume 4, n°2 pp. 99-107.*
- Appelo C.A.J., Postma D. 1993 : *Geochemistry, groundwater and pollution.* – Ed. A. A. Balkema, Rotterdam, 536 p.
- Caby R., Hammor D. 1992 : Le massif cristallin de l'Edough (Algérie) : un "Metamorphic Core complex" d'âge miocène dans les Maghrébides. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Mécanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre, 314 (08) 829-835.*
- Coulibaly, P., Anctil, F., Bobée, B. 2000 : Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *J. Hydrol.* 230: 244-257.
- Fritz B. 1975 : Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géométrie des altérations et des eaux continentales. *Mém. Sci. Géol. N°41, 148 p.*
- Gleizes G., Bouloton J., Bossière G., Collomb P. 1988 : Données lithologiques et pétro-structurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est-Algérien). *C. R. Acad. Sci. Paris, t. 306, Série II, p. 1001-1008, 1988.*

- Hani A., Djabri L., Mania J., Majour H. 2002 : Evolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du massif cristallophylien de l'Edough (Annaba, Algérie). 19^{ème} colloque de géologie africaine, El Jadida (Maroc), pp. 100.
- Hani, A., Lallahem, S., Mania, J., Djabri, L. 2006 : On the use of finite-difference and Neural network models to evaluate the impact of underground water overexploitation. *Hydrol. Process.* 20 : 4381-4390.
- Hilly J. 1962 : Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est constantinois). Bull. n°19 carte géologique Algérie, Alger, 339p.
- Hornik, K., Stinchcombe, L., White, H. 1989 : Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Netw.* 2: 359-366.
- Lallahem, S., Mania, J. 2003a : A nonlinear Rainfall-Runoff Model using Neural Network Technique: Example in Fractured Porous Media. *Math. And Comp. Model.* 37: 1047-1061.
- Lallahem, S., Mania, J. 2003b : Evaluation and forecasting of daily groundwater outflow in a small chalky watershed. *Hydrol. Process.* 17: 1561-1577.
- Lallahem, S. Mania, J., Hani, A., Najjar, Y. 2004 : On the use of neural networks to evaluate groundwater levels in fractured media. *J. hydrol.* 28: 738-744.
- Liu, J., Savenije, H.H.G., Xu, J. 2003 : Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *Phys. and Chemist. of the Earth* 28: 219-224.
- Lippmann, RP. 1987 : An introduction to computing with neural nets. *IEEE ASSP Magazine* April: 4-22.
- Maier, H.R., Dandy, G.C. 2000 : Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. *Environ. Model. & softw.* 15: 101-124.
- Majour H. 1996 : Utilisation de l'analyse statistique pour l'étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique du réservoir cristallin de l'Edough (Nord Est Algérien). Mém. de magistère, Université de Annaba, 112 p.
- Minns, A.W., Hall, M.J. 1996 : Artificial Neural Networks as rainfall-runoff models. *Hydrol. Sci.* 41 (3): 399-417.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970 : River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology*, 10: 282-290.
- Plummer N.L., Jones B.F., Truesdell A.H. 1976 : (revised 1978, 1984) – WATEQF, a FORTRAN IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations paper 76-13.
- Rajurkar, M.P., Kothiyari, U.C., Chaude U.C. 2004 : Modeling of the daily rainfall runoff relationship with artificial neural network. *J. Hydrol.* 285: 96-113.
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L., Najjar, Y. 2004 : Predicting catchment flow in a semi-arid region via an artificial neural network technique. *Hydrol. Process.* 18: 2387-2393.
- Travi Y., Mudry J. 1997 : Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Hydrogéologie*, n°1, pp. 13-21.

Aerotriangulation Analytique : Compensation par Faisceaux

H. BOUNOUR, F. BOUCHENAK, B. TAKARLI

Centre des Techniques Spatiales

BP, 13 Arzew-31200 – Algérie

bounour39@hotmail.com

ملخص :

يتمحور موضوع هذه المقالة حول عملية تعويض كتلة صورة ضوئية بطريقة الحزم. تهدف هذه الدراسة الى إعداد برنامج التثليث الجوي بطريقة التكرار، و هذا بمعزل عن جهاز القياس، مما يسهل إستعماله بسهولة. تركز التطبيق على كل الصور الضوئية لمنطقة أرزيو في مقياس 1/2 0000، مجهزة في نقاط مجسمة. النتائج المحصل عليها بتقنية الحزم ذات نوعية أفضل من تلك المحصل عليها بالنماذج المستقلة (M4-3 ou M7) أو بالشريط.

Résumé : Le thème développé à travers cet article porte sur le processus de compensation d'un bloc de photographies par la méthode de faisceaux. Le but de cette étude est l'élaboration d'un programme d'aerotriangulation par la méthode itérative, et ce indépendamment de l'instrument de mesure, ce qui facilitera aisément son emploi.

L'application a porté sur un jeu de photographies de la région d'Arzew, à l'échelle du 1/20000, équipées en points de stéréopréparation. Les résultats obtenus par la technique des faisceaux sont de meilleure qualité que ceux obtenus par les modèles indépendants (M4-3 ou M7) ou par bande.

Mots clés : Compensation, faisceaux, aérotriangulation, précision.

Abstract: The theme developed through this article is about the process of the compensation of a photograph block by the method of bundles. The goal of this survey is the development of an aerotriangulation program by method iterative, and this independently of the instrument of measure, what will facilitate its use comfortably.

The application was used a whole of photographs of the Arzew region, at scale 1/20000, equipped in points of stereopréparation. Results carried out by the technique of bundles are better quality that those obtained by the independent models (M4-3 or M7) or by strip.

Key words : Compensation, bundles, aérotriangulation, precision.

1. Introduction

De nos jours, la technique d'aerotriangulation s'est considérablement développée en terme de précision, apportant des résultats importants dans différents domaines tels que :

- La cartographie : aux petites, moyennes et grandes échelles.
- Le cadastre : coordonnées des bornes situées en limites des propriétés.
- Les levés de génie-civil : chantier d'autoroute, auscultation des ouvrages d'arts, ...etc.
- La densification des réseaux géodésiques.

L'aerotriangulation utilise trois principales méthodes de compensation de bloc qui sont tributaires de l'unité photogrammétrique utilisée (le faisceau, le modèle ou la bande) :

- La compensation par bande (compensation polynomiale) qui exige que les données soient des coordonnées bande (méthode de SCHUT).
- La compensation par modèles indépendants qui nécessite que les coordonnées soient des coordonnées modèle (y compris les coordonnées des centres perspectifs) (PAT M4-3 de STUTTGART).
- La compensation par faisceaux qui exige que les coordonnées soient des coordonnées cliché [5].

Le travail présenté dans cet article s'est focalisé autour du troisième point qui consiste principalement à l'élaboration d'un programme de compensation d'un bloc de photographies par la méthode de faisceaux. Les tests effectués ont porté sur l'ajustement par faisceaux d'un bloc de photographies à l'échelle du 1/20000, de la région d'Arzew.

2. Principe de la méthode de compensation par faisceau

Théoriquement, la méthode de compensation par faisceaux fournit de meilleurs résultats, spécialement lorsque la technique d'autocalibration est utilisée. Le modèle fonctionnel de cette approche repose sur le principe de la **colinéarité** (relations perspectives qui existent entre l'image et le point sur le terrain) décrit ci-dessous [9].

La photogrammétrie est une projection centrale dans laquelle on distingue l'espace objet qui correspond au terrain, de l'espace image qui correspond au fond de chambre de la caméra. Pour réaliser cette projection, la condition géométrique est d'avoir des vecteurs colinéaires, c'est-à-dire que le point image; le centre de projection et le point objet, se situent sur la même droite dans l'espace.

Les équations de colinéarité (1) permettent de passer d'un point objet à un point image :

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} \quad (1)$$

- (x, y) : coordonnées d'un point P dans le système image
- (x'0, y0') : coordonnées du point principal dans le système image
- (X, Y, Z) : coordonnées d'un point P dans le système objet
- (X0, Y0, Z0) : coordonnées du centre de projection dans le système objet
- c : distance principale
- λ : facteur d'échelle
- R : matrice rotation du repère image dans le repère objet

Les systèmes de coordonnées objet et image n'étant pas parallèles, il faut effectuer une rotation [R] permettant de passer du système image au système objet :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} \quad (2)$$

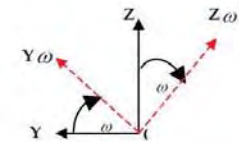
La matrice [R] représente le produit de trois matrices de rotation [3] :

[Rω] : rotation autour de l'axe des X d'un ω angle (site ou roulis)

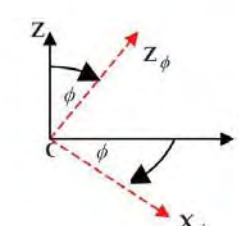
[Rφ] : rotation autour de l'axe des Y d'un angle κ (convergence ou tangage)

[Rκ] : rotation autour de l'axe des Z d'un angle φ (déversement ou lacet).

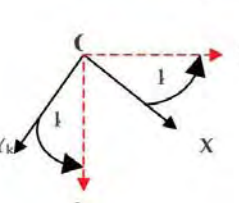
$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$



$$R_{\phi} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}$$



$$R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$R_{\text{total}} = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\omega + \sin\phi\sin\omega\sin\kappa & \sin\phi\cos\omega\cos\kappa - \cos\phi\sin\omega\sin\kappa & \sin\phi\cos\omega \\ \cos\phi\sin\omega + \sin\phi\cos\omega\sin\kappa & \cos\phi\sin\omega\cos\kappa + \sin\phi\cos\omega\sin\kappa & \sin\phi\sin\omega \\ \cos\phi\sin\omega\sin\kappa - \sin\phi\cos\omega\cos\kappa & \sin\phi\sin\omega\cos\kappa + \cos\phi\sin\omega\sin\kappa & \cos\phi\sin\omega \end{bmatrix}$$

En divisant la première et la deuxième composante de l'équation (1) par la troisième, le facteur d'échelle se trouve éliminé pour donner les équations générales de la projection exprimant les coordonnées objet en fonction des coordonnées image :

$$\begin{aligned} X_i &= X_0 + (Z_i - Z_0) \frac{r_{11}(x-x_0) + r_{12}(y-y_0) - r_{13}c}{r_{31}(x-x_0) + r_{32}(y-y_0) - r_{33}c} \\ Y_i &= Y_0 + (Z_i - Z_0) \frac{r_{21}(x-x_0) + r_{22}(y-y_0) - r_{23}c}{r_{31}(x-x_0) + r_{32}(y-y_0) - r_{33}c} \end{aligned} \quad (3)$$

Les paramètres r_{ij} for. K références aux termes de la matrice rotation $R \phi \omega$.

3. Orientation des images

Selon les données dont dispose l'opérateur, l'orientation des images peut être réalisée de 2 manières différentes :

- Si les caractéristiques de la caméra utilisée sont inconnues, la seule solution pour orienter les images est d'utiliser la méthode de la Transformation Linéaire Directe (DLT). Tous les paramètres d'orientation des images sont déterminés en 1 seule étape. Cette méthode nécessite la connaissance d'au moins de 6 points de calage correctement répartis dans l'espace tridimensionnel.
- Si les caractéristiques de la caméra sont connues, l'opérateur a tout intérêt d'utiliser une méthode d'orientation des images qui décompose le calcul en 2 grandes étapes : l'orientation interne et l'orientation externe. Cette méthode permet d'obtenir de meilleurs résultats et les points de calage ne sont pas indispensables (mais conseillés) [1].

3.1 Orientation interne (formation du faisceau)

L'orientation interne se caractérise principalement par une transformation du système de coordonnées; il s'agit de passer des coordonnées comparateur aux coordonnées photo (système de coordonnées des marques repères). Comme on souhaite connaître la précision des opérations, un calcul d'erreur moyenne quadratique est effectué.

Pour cela, il faut au moins pouvoir mesurer 4 marques sur chacune des photos. En général, cette contrainte ne pose pas de problèmes, car les appareils photos ont tous au moins 4 marques repères ou croix du réseau étalonnées.

3.1.1 Acquisition des données

L'obtention de coordonnées clichés se fait sur un comparateur qui est une table plane comportant des axes orthonormés. L'observation de chaque cliché fournit les coordonnées (x', y') rapportées aux axes (o', x', y') de l'appareil utilisé. (fig. 1).

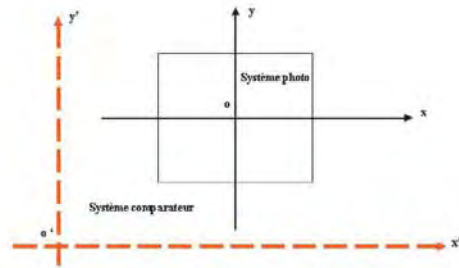


Fig. 1 Passage du système comparateur au système photo.

La formation d'un rayon perspectif impose la connaissance des coordonnées dans le système défini par les repères de la chambre de la prise de vues. Une transformation linéaire simple permet de passer du système (o', x', y') au système (o, x, y) . Les coefficients de la transformation seront calculés grâce à la connaissance des coordonnées des repères de chambre dans les deux systèmes.

La formule de passage retenue pour passer d'un système de coordonnées à l'autre est une transformation plane affine à 6 paramètres avec détermination par excès :

$$X = a_0 + a_1 x + a_2 y$$

$$Y = b_0 + b_1 x + b_2 y$$

(Résolution par les moindres carrés) [10].

On obtient ainsi des coordonnées clichés planes (x, y) qui subiront par la suite des corrections de distorsion, d'étalonnage des chambres, de courbure terrestre et de réfraction atmosphérique. C'est à partir de ces coordonnées qu'est reconstitué analytiquement le faisceau perspectif.

3.1.1.1 Corrections à apporter aux coordonnées clichés

Les corrections à apporter aux coordonnées clichés sont dues à la courbure de la terre; la réfraction atmosphérique et la distorsion de l'objectif.

3.1.1.2 Correction due à la distorsion de l'objectif

Cette correction se compose d'une :

- distorsion radiale (symétrique).
- distorsion tangentielle (asymétrique).

La distorsion radiale moyenne est mesurée lors de l'étalonnage des chambres de prises de vues sur les quatre demi diagonales. Elle est ensuite tabulée et reportée sur un graphique en fonction de la distance radiale [5].

Les valeurs positives de la distorsion signifient que le déplacement de l'image se fait vers l'extérieur de la photographie. La figure (2) représente un exemple de courbe et de table de distorsion avec $c = 88.36 \text{ mm}$:

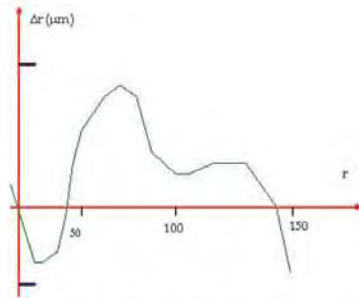


Fig. 2 Courbe de distorsion.

Distance radiale (en mm)	Distorsion (en mm)
20	- 0.024
40	0.018
60	0.046
80	0.004
100	0.014
120	0.018
140	0.001
148	0.002

La distorsion tangentielle est due au décentrement des éléments formant l'objectif. Elle est mesurée par la différence qui existe entre les valeurs de distorsion radiale déterminées le long des demi-diagonales. Les valeurs de ces corrections sont négligeables ($< \pm 5 \mu\text{m}$).

3.1.1.3 Correction due à la courbure terrestre

La courbure de la terre est assimilable à une distorsion radiale entraînant un déplacement des points de la photographie vers l'intérieur en partant du point principal. Le phénomène de la courbure est illustré sur la figure (2), ainsi l'erreur (Δr) engendrée par celui-ci est donnée par :

$$\Delta r = H_v \cdot r^3 / 2Rc^2$$

Δr en μm , r et c en mm, R en km et H_v en m

3.1.1.4 Correction due à la réfraction atmosphérique

L'effet de la réfraction atmosphérique est dû au changement de l'indice de réfraction qui diminue avec l'altitude dans le milieu hétérogène.

Les rayons lumineux ne sont pas des droites, mais des arcs de courbes contenus dans le même plan que les rayons théoriques. Elle a pour effet de créer un déplacement radial sur les points de la photographie vers l'extérieur. Cette variation est donnée par l'expression suivante [8] :

$$\Delta r = d \cdot r \cdot (1 + r^2 / c^2)$$

Δr en μm , r et c en mm.

Pour illustrer l'ordre de grandeur de cette distorsion, un exemple d'une chambre grand angulaire portée par un avion à 4000 m et photographiant un terrain d'altitude moyenne 1000 m, est fourni dans le tableau (1).

Tableau 1. Extrait des tables de l'O.I.A.C

Hv (km)	d	Hv (km)	d
0.5	0.0066	5.5	0.0361
1.0	0.0129	6.0	0.0397
1.5	0.0187	6.5	0.0430
2.0	0.0243	7.0	0.0460
2.5	0.0297	7.5	0.0489
3.0	0.0349	8.0	0.0516
3.5	0.0396	8.5	0.0540
4.0	0.0441	9.0	0.0563
4.5	0.0484	9.5	0.0584
5.0	0.0523	10.0	0.0604

On conçoit donc, l'importance de ces deux distorsions surtout quand la hauteur de vol H augmente.

Après avoir corrigé les coordonnées clichés, le système des coordonnées du faisceau s'obtient simplement en traduisant l'origine du système lié au point principal de la photographie d'une distance égale à la distance principale. L'origine ainsi obtenue est confondue avec le centre de projection O . Tous les points déjà identifiés auront une cote négative [11].

3.2 Orientation externe

Plus connue sous le nom de méthode des faisceaux, cette méthode relie directement les coordonnées photos aux coordonnées objets. Le but de cette orientation est de déterminer pour chaque image, la position $X_0 Y_0 Z_0$ du centre de l'objectif et son orientation (ω, ϕ, κ) par rapport au système de coordonnées des points de calage [7].

La détermination des 12 inconnues s'effectue à partir des relations liant les coordonnées photo aux coordonnées terrain. Les éléments connus sont :

- c : la distance principale
- x_i, y_i et X_i, Y_i, Z_i respectivement les coordonnées cliché et les coordonnées terrain d'au moins trois points.

Le modèle fonctionnel est donné par les relations suivantes :

$$x + v_{xi} = -c \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{21}(Y-Y_0) - r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) - r_{33}(Z-Z_0)} = f(x)$$

$$y + v_{yi} = -c \frac{r_{12}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) - r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) - r_{33}(Z-Z_0)} = f(y)$$

Ces deux dernières équations représentent une droite dans l'espace passant par 3 points o, p et P. Elles sont rigoureuses et non linéaires en fonction des six inconnues X, Y, Z, ω, φ, κ.

3.2.1 Linéarisation

On remplace chaque inconnue par une valeur approchée à laquelle on ajoute une correction :

$$\begin{cases} X_0 = \bar{X}_0 + \Delta X_0 \\ Y_0 = \bar{Y}_0 + \Delta Y_0 \\ Z_0 = \bar{Z}_0 + \Delta Z_0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \omega = \bar{\omega} + \Delta\omega \\ \varphi = \bar{\varphi} + \Delta\varphi \\ \kappa = \bar{\kappa} + \Delta\kappa \end{cases}$$

Les deux équations de colinéarité sont fonction des inconnues :

$$x_i + v_{xi} = f_x(\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0) \tag{4}$$

$$y_i + v_{yi} = f_y(\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0) \tag{5}$$

En différenciant par rapport aux inconnues, on obtient les relations suivantes :

$$x_i + v_{xi} = \bar{f}_x + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial \omega} \Delta\omega + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial \varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial \kappa} \Delta\kappa + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial Z_0} \Delta Z_0 \tag{6}$$

$$y_i + v_{yi} = \bar{f}_y + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial \omega} \Delta\omega + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial \varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial \kappa} \Delta\kappa + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial Z_0} \Delta Z_0 \tag{7}$$

Où $\bar{f}_x = (\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0)$ et $\bar{f}_y = (\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0)$

$$x_i + v_{xi} = \frac{r_{11}(X_i - \bar{X}_0) + r_{21}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{31}(Z_i - \bar{Z}_0)}{r_{13}(X_i - \bar{X}_0) + r_{23}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{33}(Z_i - \bar{Z}_0)} = \frac{Ax_1 \Delta\omega + Ax_2 \Delta\varphi + Ax_3 \Delta\kappa + Ax_4 \Delta X_0 + Ax_5 \Delta Y_0 + Ax_6 \Delta Z_0}{As_6 \Delta Z_0} \tag{8}$$

$$y_i + v_{yi} = \frac{r_{12}(X_i - \bar{X}_0) + r_{22}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{32}(Z_i - \bar{Z}_0)}{r_{13}(X_i - \bar{X}_0) + r_{23}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{33}(Z_i - \bar{Z}_0)} = \frac{Ay_1 \Delta\omega + Ay_2 \Delta\varphi + Ay_3 \Delta\kappa + Ay_4 \Delta X_0 + Ay_5 \Delta Y_0 + Ay_6 \Delta Z_0}{As_6 \Delta Z_0} \tag{9}$$

Où r_{ij} sont les coefficients de la matrice rotation construite à l'aide des valeurs approchées des rotations : ω, φ, κ.

Les équations de colinéarité linéarisées peuvent être représentées en notation matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} Ax_1 & Ax_2 & Ax_3 & Ax_4 & Ax_5 & Ax_6 \\ Ay_1 & Ay_2 & Ay_3 & Ay_4 & Ay_5 & Ay_6 \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\varphi \\ \Delta\kappa \\ \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix}_{ij} = \begin{bmatrix} r_{ix} \\ r_{iy} \end{bmatrix}_{ij}$$

Avec :

$$r_{x_{ij}} = X_{ij} + c \frac{r_{11}(X_i - \bar{X}_0) + r_{21}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{31}(Z_i - \bar{Z}_0)}{r_{13}(X_i - \bar{X}_0) + r_{23}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{33}(Z_i - \bar{Z}_0)} = X_{ij} + \frac{X_{ij}^*}{Z_{ij}^*} \tag{10}$$

Formation de la matrice normale réduite [4] :

Si nous utilisons les notations suivantes :

$$r_{y_{ij}} = Y_{ij} + c \frac{r_{12}(X_i - \bar{X}_0) + r_{22}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{32}(Z_i - \bar{Z}_0)}{r_{13}(X_i - \bar{X}_0) + r_{23}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{33}(Z_i - \bar{Z}_0)} = Y_{ij} + \frac{Y_{ij}^*}{Z_{ij}^*} \tag{11}$$

On aura donc :

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^T(\omega, \varphi, \kappa) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - \bar{X}_0 \\ Y_i - \bar{Y}_0 \\ Z_i - \bar{Z}_0 \end{bmatrix}_{ij} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i - \bar{X}_0 \\ Y_i - \bar{Y}_0 \\ Z_i - \bar{Z}_0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial \omega} = -\frac{c}{Z'} \left[-\bar{r}_{11} \bar{Z}_d + \bar{r}_{21} \bar{Z}_d - \frac{X'}{Z'} (-\bar{r}_{11} \bar{Y}_d + \bar{r}_{21} \bar{Z}_d) \right] \approx -c \frac{X' Y'}{Z'^2}$$

(Pour les valeurs faibles ω, φ, κ).

$$\frac{\partial f_x}{\partial \varphi} = -\frac{c}{Z'} \left[-Z \cos \bar{\kappa} - \frac{X'}{Z'} (\cos \bar{\varphi} X_d - \bar{r}_{21} \text{tg} \bar{\varphi} Y_d - \bar{r}_{11} \text{tg} \bar{\varphi} Z_d) \right] \approx \frac{\partial f_x}{\partial \kappa} = -c \frac{Y'}{Z'} ; \frac{\partial f_x}{\partial X_0} = \frac{c}{Z'} \left[\bar{r}_{11} - \bar{r}_{13} \frac{Y'}{Z'} \right] \approx \frac{c}{Z'}$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial Y_0} = \frac{c}{Z'} \left[-\bar{r}_{21} - \bar{r}_{23} \frac{Y'}{Z'} \right] \approx 0$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial Z_0} = \frac{c}{Z'} \left[\bar{r}_{11} - \bar{r}_{13} \frac{X'}{Z'} \right] \approx -c \frac{X'}{Z'^2} ; \frac{\partial f_y}{\partial Z_0} = \frac{c}{Z'} \left[\bar{r}_{12} - \bar{r}_{13} \frac{Y'}{Z'} \right] \approx -c \frac{Y'}{Z'^2}$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial \omega} = \frac{c}{Z'} \left[-\bar{r}_{32} \bar{Y}_d + \bar{r}_{33} \bar{Z}_d - \frac{Y'}{Z'} (-\bar{r}_{33} \bar{Y}_d + \bar{r}_{33} \bar{Z}_d) \right] \approx -c \left[1 + \frac{Y'^2}{Z'^2} \right]$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial \varphi} = \frac{c}{Z'} \left[Z \sin \bar{\kappa} - \frac{X'}{Z'} (\cos \bar{\varphi} X_d - \bar{r}_{23} \text{tg} \bar{\varphi} Y_d - \bar{r}_{13} \text{tg} \bar{\varphi} Z_d) \right] \approx c \frac{X' Y'}{Z'^2}$$

Les termes barrés sont variables pour les valeurs faibles de ω, φ, κ et

La matrice des coefficients des deux équations de colinéarité s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} -c \frac{X' Y'}{Z'^2} & c(1 + \frac{X'^2}{Z'^2}) & -c \frac{Y'}{Z'} & \frac{c}{Z'} & 0 & -c \frac{X'}{Z'^2} \\ -c(1 + \frac{Y'^2}{Z'^2}) & c \frac{X' Y'}{Z'^2} & c \frac{X'}{Z'} & 0 & \frac{c}{Z'} & -c \frac{Y'}{Z'^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\varphi \\ \Delta\kappa \\ \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + c \frac{X'}{Z'} \\ y + c \frac{Y'}{Z'} \end{bmatrix}$$

3.2.2 Calcul des inconnues : Méthode itérative

La détermination des paramètres inconnus d'orientation (ω, φ et κ, X₀, Y₀, Z₀) est basée sur une méthode itérative. En pratique, trois à cinq itérations suffisent. La résolution du système exige au minimum 03 points connus en coordonnées terrain (X_i, Y_i, Z_i) et cliché (x_i, y_i), puisque chaque point permet d'écrire deux équations, soit 06 équations à 06 inconnues [9].

Une bonne estimation des inconnues (ω, φ et κ, X₀, Y₀, Z₀) requiert d'une part, de bonnes valeurs approchées (X₀, Y₀, Z₀, ω, φ, κ), et d'autre part, que les corrections Δω, Δφ, Δκ, ΔX₀, ΔY₀, ΔZ₀ soient faibles. Pour une photo dont l'axe est quasiment vertical, on peut admettre que :

\bar{Z}_0 = altitude de vol absolue ; $\bar{\omega} = \bar{\varphi} = 0$
 Si la ligne de vol n'est pas parallèle à l'axe des X du système terrain, la valeur de κ peut être très grande. Les valeurs approchées ($\bar{X}_0, \bar{Y}_0, \bar{Z}_0, \kappa$) peuvent être obtenues par transformation linéaire conforme, en utilisant les coordonnées terrain et les coordonnées cliché correspondantes d'au moins de 02 points éloignés. Les paramètres de la transformation sont [3] :

$$a, b, C_x, C_y \quad \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & -y_i & 1 & 0 \\ y_i & x_i & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ C_x \\ C_y \end{bmatrix}$$

$$\bar{\kappa} = \arctg\left(\frac{b}{a}\right) \quad \text{et} \quad \begin{cases} \bar{X}_0 = C_x \\ \bar{Y}_0 = C_y \end{cases}$$

\bar{Z}_0 peut être déterminé comme suit :

$$\lambda = \sqrt{a^2 + b^2} ; \bar{Z}_0 = \frac{Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n}{n} + \lambda.c$$

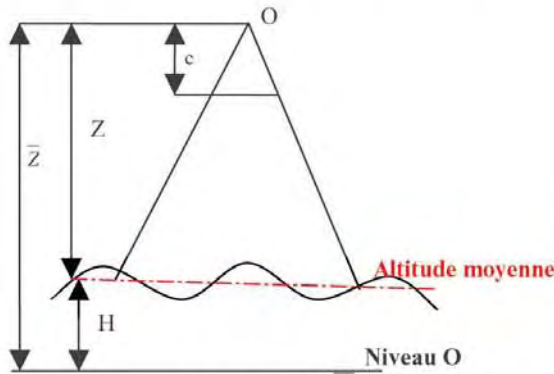


Fig. 3 Altitude \bar{Z}_0

$$\frac{\sum Z_i}{n} = Z : \text{hauteur moyenne du plan de vol.}$$

3.2.3 Critères d'arrêt

Les itérations doivent être arrêtées dès que les corrections aux paramètres d'orientation $\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa, \Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$ deviennent inférieures en valeur absolue à une certaine valeur :

- Rotation ≤ 0.00001 rad
- Translation ≤ 0.01 0/00 Z

En général, afin d'éviter un nombre excessif d'itérations, le nombre maximal est fixé à 7.

3.3 Etapes de calcul

1. Calcul des paramètres de la transformation linéaire conforme, en utilisant les coordonnées terrain (X,Y) et cliché (x, y) d'au moins deux points d'appui : a, b, Cx, Cy
2. Prendre comme valeurs initiales :

$$\bar{\omega} = \bar{\varphi} = 0, \quad \bar{X}_0 = C_x, \quad \bar{Y}_0 = C_y$$

3. Calculer $\bar{\kappa}$ (en radian) : $\bar{\kappa} = \text{tg} \frac{b}{a}$

4. Prendre pour valeur initiale

$$\bar{H}_0 = H_{\text{moy}} + \lambda.c.$$

5. Formation de la matrice orthogonale \bar{R} .

6. Calculer pour chaque point

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_i^* \\ \bar{Y}_i^* \\ \bar{Z}_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{R}^T(\bar{\omega}, \bar{\varphi}, \bar{\kappa}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_i - \bar{X}_0 \\ Y_i - \bar{Y}_0 \\ Z_i - \bar{Z}_0 \end{bmatrix}_{ij}$$

7. Calculer les coefficients des deux équations de colinéarité :

$$\begin{bmatrix} Ax_1 & Ax_2 & Ax_3 & Ax_4 & Ax_5 & Ax_6 \\ Ay_1 & Ay_2 & Ay_3 & Ay_4 & Ay_5 & Ay_6 \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\varphi \\ \Delta\kappa \\ \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix}_{ij} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix}_{ij}$$

8. Formation des équations normales et résolution pour les corrections : $\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa, \Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$.

9. Calculer les nouvelles valeurs approchées pour les 6 inconnues :

$$\begin{aligned} \bar{X}_{0\text{nouv}} &= \bar{X}_{0\text{anc}} + \Delta X_0 \\ \bar{Y}_{0\text{nouv}} &= \bar{Y}_{0\text{anc}} + \Delta Y_0 \\ \bar{Z}_{0\text{nouv}} &= \bar{Z}_{0\text{anc}} + \Delta Z_0 \\ \bar{\omega}_{\text{nouv}} &= \bar{\omega}_{\text{anc}} + \Delta\omega \\ \bar{\varphi}_{\text{nouv}} &= \bar{\varphi}_{\text{anc}} + \Delta\varphi \\ \bar{\kappa}_{\text{nouv}} &= \bar{\kappa}_{\text{anc}} + \Delta\kappa \end{aligned}$$

10. Contrôle des valeurs des corrections ($|\Delta\omega|$, $|\Delta\phi|$, $|\Delta\kappa|$, $|\Delta X_0|$, $|\Delta Y_0|$, $|\Delta Z_0|$) par rapport aux tolérances fixées.

11. Contrôle du nombre d'itérations qui doit être égal au nombre maximal fixé.

La validité de la solution peut être contrôlée en calculant les valeurs des résidus des coordonnées du cliché de la manière suivante :

$$V_{xi} = X_i - c \frac{r_{11}(X_i - X_0) + r_{21}(Y_i - Y_0) - r_{31}(Z_i - Z_0)}{r_{13}(X_i - X_0) + r_{23}(Y_i - Y_0) - r_{33}(Z_i - Z_0)} = f(x)$$

et

$$V_{yi} = Y_i - c \frac{r_{12}(X_i - X_0) + r_{22}(Y_i - Y_0) - r_{32}(Z_i - Z_0)}{r_{13}(X_i - X_0) + r_{23}(Y_i - Y_0) - r_{33}(Z_i - Z_0)} = f(y)$$

Ces résidus doivent être théoriquement nuls ou inférieurs à la tolérance fixée [2].

4. Application

L'application a porté sur l'ajustement par faisceaux d'un bloc de photographies à l'échelle du 1/20000, de la région d'Arzew. Ce site a été choisi pour des raisons de proximité, d'existence d'un canevas de points géodésiques et de stéréopréparation, et de la couverture aérienne de la région.

4.1 Préparation des données et documents

Identification des points : moyennant des fiches signalétiques des points de stéréopréparation et de points géodésiques, nous avons identifié et piqué les points sur support photo en vue de la préparation de la carte d'index et du tableau d'assemblage.

Etablissement du tableau d'assemblage : c'est un document indispensable à la gestion, à l'administration et à la planification des différentes

phases de l'aérotriangulation. Son format est de (80 x 60 cm) et il est conçu à partir des cartes au 1/25000 de la région d'Arzew 2-3, 5-6, et celle de Gdyl 1-2.

Report des points sur photos et leur numérotation : on reporte sur toutes les photographies les points avec leurs numéros correspondants, ainsi que les points principaux qui vont servir comme points de liaison entre modèles adjacents.

Les numéros sont constitués de trois champs : le premier indique le numéro de la bande, le second la position du point (5: Centre, 0: Nord, 10 Sud), et le troisième correspond au numéro de la photo.

Exemple : Le centre de la photo 95 de la bande 3, a comme numéro : [3|5|95], pour le point au Nord : [3|5-5|95] c'est à dire [3|0|95], et pour celui du Sud: [3|5+5|95], soit [4|0|95].

4.2 Observations et traitement

Les observations sont effectuées sur le stéréocomparateur PLANICOMP C 100 (ZEISS) avec deux à trois pointés par point, et même d'avantage, lorsque le contraste est médiocre. La numérotation des marques repères et le sens de leurs observations doivent être conformes au programme de calcul.

Des mesures de distances entre les marques repères ont été effectuées, afin de s'assurer du format des clichés (format WILD 212x212) pris comme référence dans le calcul des paramètres de transformation. A cet effet, et pour prendre en considération la déformation du film (défaut d'orthogonalité), nous avons utilisé la transformation affine. Les coordonnées des points déterminées doivent subir toutes les corrections décrites ci-dessus (§ III.1.1.1).

Le tableau (2) représente les fichiers des mesures sur mono comparateur :

Tableau 2. Coordonnées comparateur.

Photo N° 95			Photo N° 94			Photo N° 93		
N°	X _{comparateur}	Y _{comparateur}	N°	X _{comparateur}	Y _{comparateur}	N°	X _{comparateur}	Y _{comparateur}
1	226642	226181	1	226058	225898	1	225109	227780
2	225867	14219	2	226619	13940	2	229791	15870
3	13910	14982	3	14666	13356	3	17892	11169
4	14678	226953	4	14098	225322	4	13192	223083
276	16501	208187	3093	35088	222873	3092	28531	211773
3094	36586	187642	276	102538	203000	3093	122069	224300
3029	74588	184629	65	74590	172060	276	189656	205889
3095	139504	176608	3029	159507	180326	3031	52078	180316
3096	220474	177815	3095	223310	172930	3030	130790	177159
3594	15532	129179	3593	23730	130059	3094	209827	186160
3595	124792	110218	3594	101733	124936	65	162789	174148
3596	181718	118388	3595	209623	106894	3592	35470	100709
3597	223976	128710	336	82151	76056	3593	112888	131186
4094	21232	15132	4093	24085	32624	3594	190033	127382
4095	126454	28843	4094	107137	10613	336	171689	78264
4096	207502	31670	4095	212129	25045	4092	29292	20181
						4093	114571	34671
						4094	196661	13422

Les tableaux (3 et 4) illustrent respectivement les coordonnées "faisceaux" et "terrain compensées" :

Tableau 3. Coordonnées faisceaux ($Z_1 = -152,53$ mm)

Photo N° 95

Paramètres de transformation:

$a_0 = 119.856111$ $a_1 = -0.001000$ $a_2 = 0.000004$
 $b_0 = 121.036789$ $b_1 = -0.000004$ $b_2 = -0.001000$

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}	V _x	V _y
1	-106.001759	-105.997756	-0.001759	0.002244
2	-105.998241	105.997756	0.001759	-0.002244
3	105.998242	106.002244	-0.001758	0.002244
4	106.001758	-106.002244	0.001758	-0.002244

Précision = ± 0.004032 mm

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}
276	104.110128	-87.240127
3094	83.946859	-66.764889
3029	45.927309	-63.889076
3095	-19.029132	-56.102006
3096	-100.008760	-57.602412
3594	104.791678	-8.217173
3595	-4.556267	10.350891
3596	-61.462384	1.973551
3597	-103.690126	-8.502981
4094	98.675520	105.825706
4095	-6.514789	91.731660
4096	-87.566533	88.610736

Photo N° 94

Paramètres de transformation:

$a_0 = 120.702735$ $a_1 = -0.001000$ $a_2 = -0.000003$
 $b_0 = 119.320163$ $b_1 = 0.000003$ $b_2 = -0.001000$

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}	V _x	V _y
1	-106.001745	-105.997995	-0.001745	0.002005
2	-105.998255	105.997995	0.001745	-0.002005
3	105.998255	106.002005	-0.001745	0.002005
4	106.001745	-106.002005	0.001745	-0.002005

Précision = ± 0.003759 mm

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}
3093	85.014114	-103.495137
276	17.603699	-83.434116
65	45.639647	-52.565285
3094	-2.070832	-63.339688
3029	-39.316180	-60.600299
3095	-103.112108	-53.028406
3593	96.621594	-10.696259
3594	18.616801	-5.358893
3595	-89.246496	12.981492
336	38.332880	43.475920
4093	96.526066	86.756470
4094	13.516258	108.998559
4095	-91.534968	94.851427

Photo N° 93

Paramètres de transformation:

$a_0 = 124.133737$ $a_1 = -0.001000$ $a_2 = -0.000022$
 $b_0 = 116.772536$ $b_1 = 0.000022$ $b_2 = -0.001000$

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}	V _x	V _y
1	-106.004477	-105.998900	-0.004477	0.001100
2	-105.995522	105.998900	0.004478	-0.001100
3	105.995522	106.001100	-0.004478	0.001100
4	106.004477	-106.001100	0.004477	-0.001100

Précision = ± 0.006520 mm

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}
3093	85.014114	-103.495137
276	17.603699	-83.434116
65	45.639647	-52.565285
3094	-2.070832	-63.339688
3029	-39.316180	-60.600299
3095	-103.112108	-53.028406
3593	96.621594	-10.696259
3594	18.616801	-5.358893
3595	-89.246496	12.981492
336	38.332880	43.475920
4093	96.526066	86.756470
4094	13.516258	108.998559
4095	-91.534968	94.851427

Tableau 4. Coordonnées terrain compensées

N°	X _t	Y _t	Z _t	N°	X _t	Y _t	Z _t	N°	X _t	Y _t	Z _t
2016	733650.427	39689847.714	265.18	3030	736577.859	3965051.042	136.96	24	738660.361	3966682.999	139.05
2017	735130.825	3968878.665	227.68	3031	735043.031	3964944.573	191.35	276	737888.987	3965650.330	123.28
2018	736563.061	3969106.353	159.48	3032	733509.516	3964754.733	261.11	3094	738335.302	3965253.987	115.72
2031	734720.346	3968946.974	217.95	3092	734552.231	3965543.104	245.65	3029	739130.941	3965256.360	107.00
2530	736494.138	3966963.830	139.38	65	737354.281	3964941.319	141.73	2019	738299.320	3969393.917	163.97
2531	734639.050	3966730.799	175.97	2019	738300.571	3969391.038	163.73	2020	740304.959	3969253.291	54.94
2532	733267.437	3966859.248	218.40	2529	738507.356	3967433.980	111.94	2021	742157.623	3969859.018	122.49
208	742493.775	3965724.342	238.19	3096	742253.020	3965360.076	96.68	3596	741510.728	3964025.224	99.56
3095	740517.051	3965198.357	95.86	3595	740306.315	3963762.480	95.28	4095	740470.100	3962024.379	87.24
4096	742203.281	3962207.163	110.75	4094	738256.254	3961582.521	84.76	336	737648.902	3962941.622	128.62
11	733634.810	3964816.234	257.71								

4.3 Analyse des résultats

Orientation interne : La précision des orientations internes qui est de l'ordre de 03 à 05 microns est satisfaisante. La qualité des résultats dépend principalement de la qualité des observations qui ont été réalisées avec un grand soin et contrôlées sur le format utile de la photographie.

Orientation externe : Dans l'ensemble, la qualité de l'orientation externe est bonne. Les points douteux présentant certaines anomalies ont été éliminés des traitements. Certains points géodésiques non observables au sol, tels que les points 65, 24, 64 et 11 (châteaux d'eau, torchère dans la zone industrielle, balise au sommet de montagne,...), ont été considérés comme des points nouveaux dans le traitement.

Compensation : La qualité des résultats obtenus à partir de la résolution de la matrice normale réduite est moyenne en certains points. Ceci est due à certains points présentant des anomalies citées précédemment; ce qui traduit la validité du concept théorique stipulant : toute mauvaise identification de points sur photographies se répercuterait sur la précision de l'aérotriangulation.

Pour pallier à ce genre de problèmes, il est recommandé de prévoir dans la phase planification une présignalisation (pour les grandes échelles), ou du moins choisir des points naturels remarquables et facilement identifiables sur photos (par exemple, l'un des quatre angles d'une intersection de deux pistes ou deux routes, bien contrastées,

et non pas l'intersection elle-même). Quant aux points géodésiques, il faut toujours prévoir des points auxiliaires lisibles et rattachés à ces derniers. Ces précautions permettront certainement une identification précise et sans ambiguïté des points sur photographies lors des observations.

5. Conclusion

Différentes approches existent pour la résolution du problème photogrammétrique. Dans notre cas, nous avons exposé une des méthodes les plus employées dans le domaine de l'utilisation des photographies aériennes. L'essentiel est de tenir compte du fait que les différentes approches sont basées sur la colinéarité de l'image, du centre perspectif et du point terrain.

L'existence du rapport de calibration de la caméra et de celui de scanners destinés à la photogrammétrie, nous conduirait à exploiter la méthode dite des faisceaux. Cette méthode, sous certaines conditions relatives au matériel (précision), donnerait des résultats plus précis. Cependant, son utilisation reste fonction du modèle de correction de départ qui s'appuie sur l'hypothèse point_ image, centre projection et point_ objet parfaitement alignés.

Dans le but de contrôler les résultats à chaque étape, l'orientation externe doit être exécutée en phases.

Le programme développé dans le cadre de cette étude permet, pour un bloc de photos, l'estimation des coordonnées terrain d'un nombre de points qui ne peut être limité que par les performances de l'ordinateur utilisé. Afin de répondre aux exigences du concept de l'aérottriangulation, il est recommandé de disposer d'une couverture aérienne récente et d'un canevas de points bien distribués sur l'étendue de la zone d'étude

Références Bibliographiques

- Ackermann R., 1984 : "Digital image" Transformation de coordonnées.
- Albertz, J., Kreiling, W., 1989 : "Photogrammetric Guide". Wichmann, 292p.
- Amer .F, 1998 : "Compensation d'aérottriangulation Première et deuxième partie (ITC 79).
- Benaldin. J : "Applications of photogrammetric and computer vision techniques in shake table testing".
- Bruon .D, 1998 : "The principal point and CCD cameras". Photogrammetric Record ISSN 0031-868X Coden Pgreay vol. 16, no92.
- Debarque B : "Fusion d'images aériennes et terrestres, une compensation par gerbes spatiales" (p 15-20). université Laval.
- Grussenmeyer P. & khalil O. 1998: "Solutions for exterior orientation in photogrammetry".
- Grussenmeyer P., 1996 : "Development of PC-based digital photogrammetric software at the ENSAIS"
- Hottier. p 1972 : Photogrammétrie Analytique-Photogrammétrie Générale tome4 Edition Eyrolles.
- Kraus K., Waldhäusl P., 1998 : "Manuel de photogrammétrie, principe et procédés. Fondamentaux". Editions Hermès, Paris.
- Stefanovic, 1987 : "Aerial triangulation". Part1(ITC).

Méthodes de Correspondance d'Images Numériques

H. BOUNOUR, F. BOUCHENAK, A. DJILALI
Centre des Techniques Spatiales
BP, 13 Arzew-31200 – Algérie
bounour39@hotmail.com

ملخص :

يتمثل مبدأ الرؤية المجسمة في إستعمال عدة صور من نفس المنظر مأخوذة من مناظر مختلفة. يسمح هذا، بإستنتاج معلومات ثلاثية الأبعاد 3D على المنظر ابتداءً من إسقاطه الثنائي الأبعاد 2D على الصور. تطبيقات الرؤية المجسمة متنوعة : الملاحة الآلية ، تشكيل الخريطة و الإستكشاف الجوي، إعادة تشكيل العناصر، إلخ. غير أنه، يمكن تحديد موقع نقطة في الفضاء إذا كان موقع إسقاطها معروف في كل صورة. لا يوجد حل إجمالي لتطابق الصورة المجسمة بسبب وجود الغموض (الكسوف، إنعكاس السطوح، نقص النسيج، إلخ)، عموماً، لحل هذا المشكل، تمّ تفحص عدد من القواعد (على سبيل المثال Géométrie épi polaire) و الفرضيات (الإضاءة الإجمالية الثابتة، السطح المتماثل ، إلخ). تهدف المقالة الحالية إلى شرح بعض طرق تطابق الصور المجسمة التي تسمح بتخفيف مشاكل الغموض .

Résumé : Le principe de la stéréovision consiste à utiliser plusieurs images d'une même scène prises sous différents points de vue. Ceci, permet de déduire des informations 3D sur la scène à partir de ses projections 2D sur les images.

Les applications de la stéréovision sont diverses : navigation pour la robotique, construction de carte et reconnaissance aérienne, reconstruction d'objets, etc.

Néanmoins, la détermination de la position d'un point dans l'espace n'est possible que si la position de sa projection dans chaque image est connue. En raison, principalement des ambiguïtés (occultations, réflexions des surfaces, manque de textures, ...etc.), il n'existe pas de solution globale de mise en correspondance. En général, pour résoudre ce problème, un certain nombre de contraintes (par exemple la géométrie épipolaire) et d'hypothèses (illumination globale constante, surface uniforme, etc.) sont considérées.

Le présent article a pour objectif de présenter quelques méthodes de mise en correspondance d'images stéréoscopiques permettant de pallier le problème d'ambiguïtés.

Mots clés : stéréovision, projections, mise en correspondance, ambiguïtés, géométrie épipolaire.

Abstract : The principle of the stereovision consists in using several pictures of the same scene taken under various points of view. This allows to deduct information 3D about the scene from its projections 2D on the pictures. The applications of the stereovision are different: construction of map and aerial recognition, navigation for the robotics, reconstruction of objects, etc.

Nevertheless, the determination of the position of a point in the space is possible that if the position of its projection in every picture is known. In reason, mainly of ambiguousness appropriate in correspondence (eclipses, reflection of surfaces, lack of textures, ...etc.), it doesn't exist a global solution appropriate of image matching. In general, to solve this problem, a certain number of constraints (for example geometry épipolaire) and of hypotheses (constant global illumination, uniform surface, etc.), are considered. The present article has for objective to present some methods of image matching permitting to palliate problems of ambiguousness.

Keywords : stéréovision, projections, image matching, ambiguities, epipolar geometry.

1. Introduction

La photogrammétrie demeure une technique encore très compétitive, tant par sa précision que par sa fidélité, pour la production de l'information géographique. Cependant, cette technique nécessite l'emploi de matériel coûteux et d'un personnel qualifié pour l'interprétation, l'extraction sémantique et la restitution de l'information photographique.

Ces contraintes ont incité les chercheurs à tenter de rendre la photogrammétrie plus accessible, en essayant d'automatiser le processus photogramétrique. Ainsi, le développement en matière de micro-ordinateurs et de capteurs a rendu les problèmes photogramétriques plus solubles, et ceci par l'utilisation d'algorithmes exploitant des images numériques.

La photogrammétrie numérique, à l'instar des autres processus, est basée sur l'emploi strict d'images numériques et non de photographies conventionnelles.

Parmi les principaux problèmes que doit résoudre celle nouvelle approche, est l'identification des rayons homologues sur une paire d'images d'une manière automatique, connue sous le nom de "mise en correspondance ou corrélation d'images".

L'inconvénient majeur de la mise en correspondance, c'est quelle est sujette à certaines ambiguïtés telles que les occultations, les réflexions des surfaces, le manque de textures, etc. Pour pallier à ce problème, nous proposons à travers cet article quelques techniques de mise en correspondance d'images stéréoscopiques (numériques) qui sont généralement utilisées en aérotriangulation.

2. Notions générales

La mise en correspondance des points homologues pour la reconstitution de surfaces tridimensionnelles de l'espace objet est une opération délicate et fondamentale pour la vision stéréoscopique numérique. Elle consiste à retrouver dans des images à recouvrement, les primitives homologues qui sont la projection de la même entité de la scène. Ainsi, la mise en correspondance d'image serait d'associer à chaque point de la première image, ses correspondants dans les autres images.

Par primitive, nous entendons tout élément simple ou composé appartenant à une image, comme :

- Pixel : plus petit élément d'une image.
 - Segment : défini par ses deux d'extrémités (nœuds) et par son orientation.
 - Contour : ensemble connexe de pixels, appartenant à une même ligne généralement fermée, définissant des objets dans l'image.
 - Région : zone de l'image dans laquelle, les pixels présentent les mêmes propriétés (niveau de gris, moyenne, variance, ...etc.).
 - Point caractéristique : correspondant à un pixel particulier, dont il est extrait généralement des frontières des régions, ou à partir des contours.
- Dans le cadre de ce travail, les primitives sont les pixels des images.

La base de la vision en stéréoscopie repose sur le fait qu'un objet de l'espace est enregistré à partir de deux points de vue différents. Cette différence en position a pour effet de causer l'apparition de parallaxes. C'est à partir de cette dernière et des éléments d'orientations externes que la position tridimensionnelle de l'objet pourra être calculée. Ainsi, tout algorithme de stéréovision est basé sur l'exécution chronologique des étapes suivantes :

- Détection des phénomènes
- Correspondance de ces phénomènes
- calcul 3D
- Interpolation pour la couverture de tout l'objet.

3. Mise en correspondance d'images

La mise en correspondance est caractérisée par ses attributs mis en œuvre et par la technique d'appariement (locale ou globale) qui est répartie en deux catégories [Hahn, 1995] :

- *Mise en correspondance locale* : Technique qui satisfait une mesure de ressemblance entre les primitives d'images.
- *Mise en correspondance globale* : Ensemble d'appariements qui satisfont à des contraintes globales.

3.1 Principes et définitions

Considérons deux images 1 et 2 d'une même scène. Il s'agit de déterminer, pour un élément de l'image 1, l'élément correspondant dans l'image 2. Cette mise en correspondance de primitives qui est un problème fondamental de la vision par ordinateur, est un processus intermédiaire entre les processus dits de hauts niveaux (reconstruction, reconnaissance) et de bas niveaux (extraction d'indices).

La mise en correspondance qui reste ambiguë nécessite l'introduction de contraintes dans la recherche de l'élément correspondant. Une recherche de correspondance sans contraintes pourra donner des résultats ambigus et par conséquent entraînera une mauvaise interprétation. Afin d'obtenir de bons résultats (interprétation), il est nécessaire d'introduire des contraintes dans la recherche de l'élément correspondant. Ce problème est appelé «le problème de la fausse cible» [Grimson, 1981] (fig. 1).

Les règles de la vision naturelle sont définies de la manière suivante :

- Un point donné sur la surface de l'objet n'a qu'une seule position dans l'espace.
- Les surfaces des objets sont en générale continues. Ceci impose des règles en stéréovision sur les parallaxes qui sont l'unicité et la continuité. L'utilisation de ces règles permet de réduire les ambiguïtés dans la mise en correspondance par:
- Des contraintes géométriques sur la position

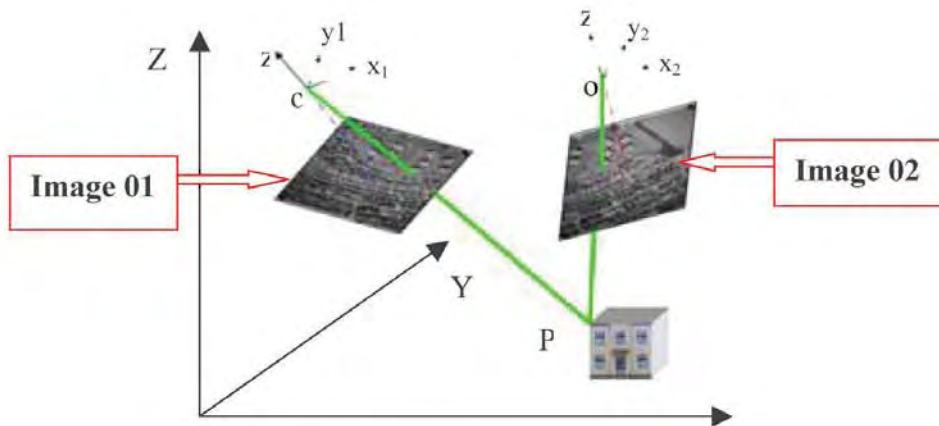


Fig.1 : Mise en correspondance

3.2 Problème d'ambiguïté dans la mise en correspondance

La mise en correspondance des images stéréoscopiques est très difficile à cause des points candidats multiples (fig. 2).

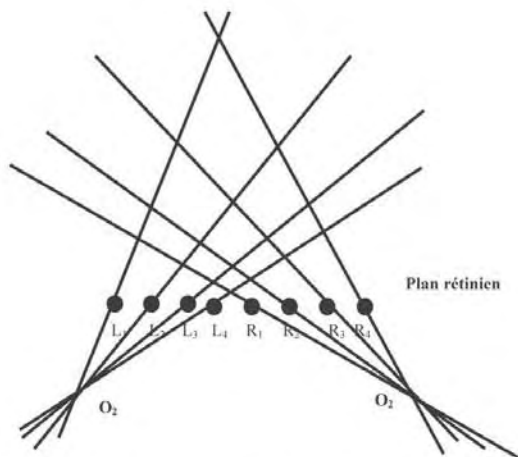


Fig. 2 Problème d'ambiguïté dans la mise en correspondance $O_1 O_2$: axe optique respectivement de la camera 1 et 2.

d'un correspondant dans l'image 2 sont utilisées pour réduire le nombre de correspondants potentiels. - L'introduction d'une mesure de similarité entre les primitifs dans deux images.

3.3 Contraintes de mise en correspondance

Afin de juger la validité de la mise en correspondance, certaines contraintes sont à vérifier ou à imposer.

3.3.1 Contrainte épipolaire

La contrainte épipolaire est une contrainte géométrique intrinsèque au capteur. Elle s'applique aux points et aux segments de droite. Elle réduit l'ensemble des correspondants potentiels d'un point à une droite dans l'image.

Considérons le point P1 de l'image 1 (fig.3). Les points de l'espace ayant pour image le point P1 sont situés sur la ligne de vue de direction d1.

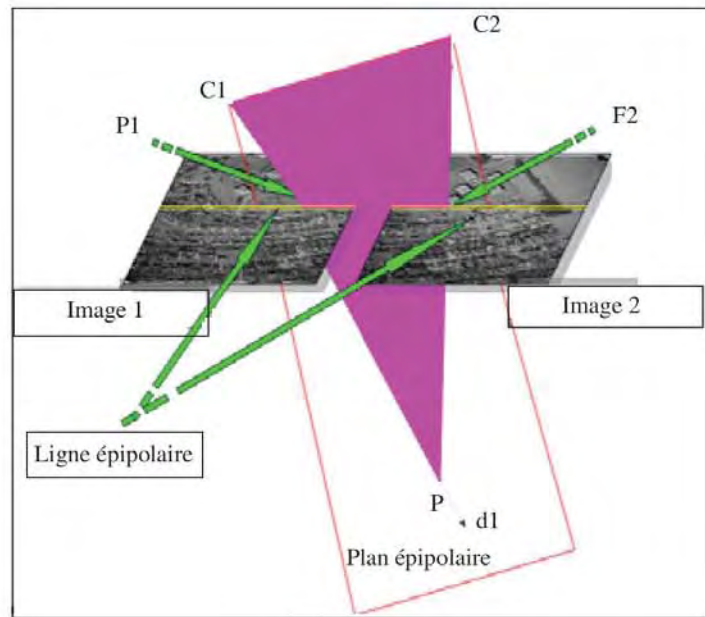


Fig. 3 Plan épipolaire.

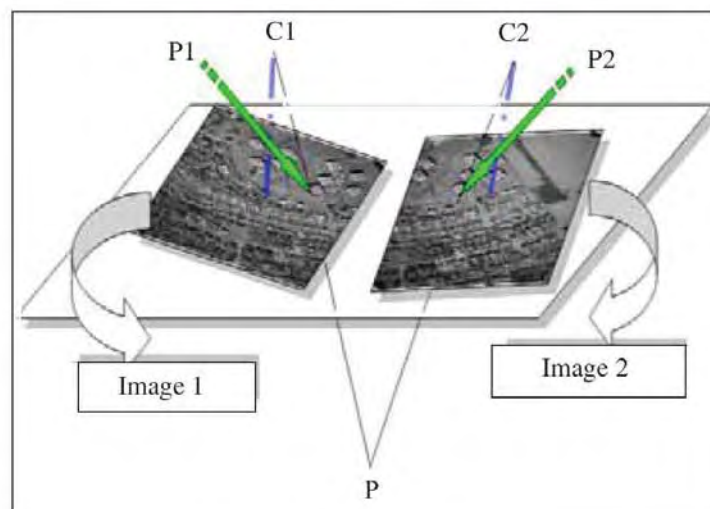
correspondants potentiels de P1 dans l'image 2 est appelée droite épipolaire de P1. Les droites épipolaires dans une image sont l'intersection entre l'image et le plan épipolaire.

3.3.1.1 Rectification d'images en géométrie épipolaire

La rectification d'images consiste à recalculer, pour deux images en position, deux nouvelles images telles que la géométrie épipolaire de ces deux images soit simple; c'est à dire que les droites épipolaires soient horizontales et parallèles à la base de prises de vues. Ceci, implique que les deux nouveaux épipôles soient à l'infini (fig. 4).

Une solution consiste à garder les deux centres de projection et à utiliser comme nouveaux plans rétiniens un seul et même plan contenant la direction de la droite liant les deux centres de projection. Ce plan n'étant pas défini de manière unique, il faut choisir une orientation. On peut alors considérer que le nouveau plan rétinien contient la direction de la droite intersection des plans rétiniens des images originales.

L'utilisation de la géométrie épipolaire s'applique soit pour un échantillonnage afin de redresser l'image, soit pour rechercher le déplacement de la fenêtre référence sur la fenêtre de recherche.



F ig. 4 Rectification d'images.

plan épipolaire de deux vues **1** et **2**. La contrainte d'ordre impose à ce que leurs projections **p** et **p0** apparaissent dans le même ordre chronologique sur les droites épipolaires des images **1** et **2**.

3.3.4 Contrainte d'unicité

Elle impose à ce qu'à tout point d'une image doit lui correspondre un et un seul point de l'autre image.

4. Techniques de la mise en correspondance

Les techniques de mises en correspondance peuvent être classées en deux grandes familles : les techniques *zonales* (area based) et *structurales* (features based).

4.1 Correspondance zonale (Area Based Matching ABM)

4.1.1 Définition

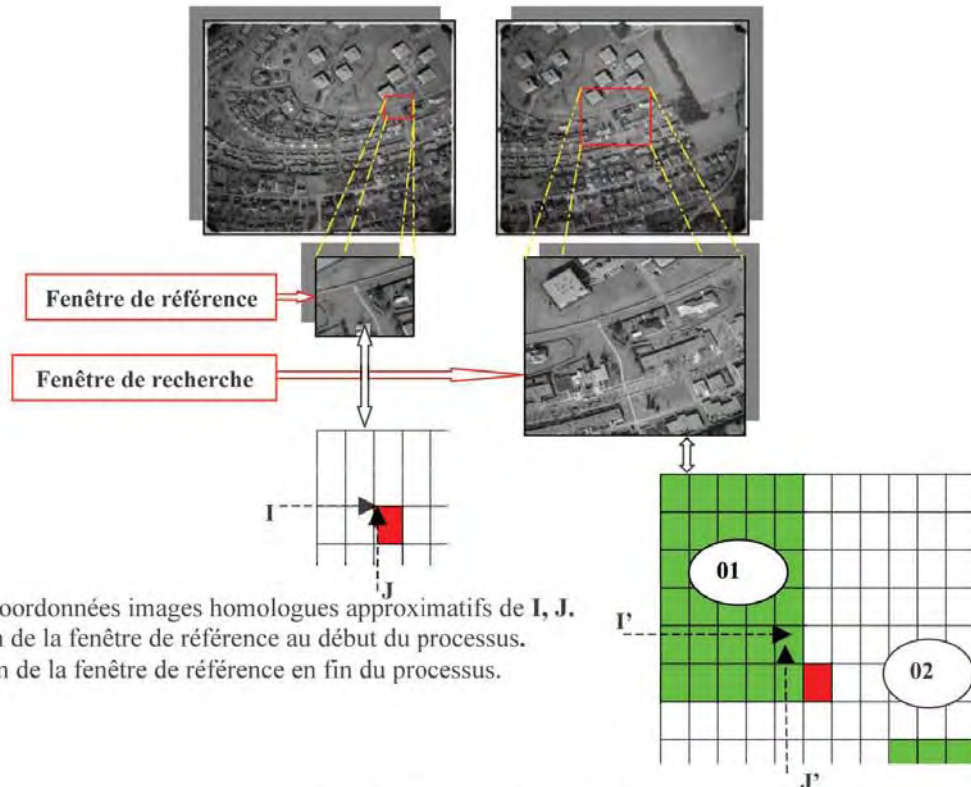
La correspondance zonale est la détermination des points homologues en se basant sur l'évaluation de la ressemblance de deux fenêtres à partir des images gauche et droite.

Cette évaluation est basée sur la comparaison des valeurs du niveau de gris des pixels dans chaque fenêtre respective, et cela en appliquant une analyse statistique ou une similitude spectrale. Le problème principal est de trouver la position géométrique sur une image numérique. Pour cela, on utilise dans un premier temps, la corrélation (cross-correlation) qui donnera une précision au niveau du pixel, et dans un deuxième temps, une corrélation par moindres carrés (least square corrélation) qui donnera une précision au niveau de sub-pixel [Rodriguez, 1992].

4.1.2 Coefficient de corrélation

Le processus de la mise en correspondance basée sur le calcul du coefficient de corrélation utilise des valeurs du niveau de gris des pixels de deux fenêtres appartenant chacune à une image, telle que :

- Choix d'une fenêtre de référence sur l'image de gauche centrée sur un pixel dont on cherche l'homologue.
- Calcul de la position de la fenêtre de recherche sur l'image de droite qui est d'une taille plus grande que celle de la référence (fig. 5).



(I', J') : les coordonnées images homologues approximatifs de I, J.
 (01): Position de la fenêtre de référence au début du processus.
 (02) : position de la fenêtre de référence en fin du processus.

Fig. 5 Fenêtre de référence et de recherche

Le problème de ce choix se pose au niveau de la taille de la fenêtre qui dépend de la nature du terrain, de l'échelle de la photographie, de la résolution et de la texture.

Pour trouver la position de la fenêtre de référence dans l'image de recherche, on calcule le coefficient de la corrélation **R** donné par [Rodriguez, 1992]:

$$R = \frac{\sum_i \sum_j (g_{1ij} - m_1)(g_{2ij} - m_2)}{\sqrt{\sum_i \sum_j (g_{1ij} - m_1)^2 \sum_i \sum_j (g_{2ij} - m_2)^2}}$$

Ce coefficient est calculé pour toutes les positions possibles de la fenêtre de référence dans la zone de recherche. La position recherchée est celle correspondant à la plus grande valeur de **R**.

4.1.3 Mise en correspondance par moindres carrés

Le calcul de **R** permet de trouver la position du correspondant au pixel près. Pour atteindre une précision du subpixel, on utilisera la technique de mise en correspondance par moindres carrés. Le principe de ce processus, dans le cas où on suppose que l'image est normale ou on considère seulement la direction x, est comme suit : Soient **G₁(x)** et **G₂(x)** les valeurs vraies de niveau de gris représentant des quantités inconnues des fonctions images **g₁(x)** et **g₂(x)** qui sont respectivement perturbées par les bruits **n₁(x)** et **n₂(x)**, telles que [Ackermann, 1984] :

$$G_1 = g_1(x) + n_1(x) \tag{1}$$

$$G_2 = g_2(x) + n_2(x) \tag{2}$$

Supposons que **g₂(x)** est une transformation géométrique et radiométrique de **g₁(x)** :

$$g_2(x) = h_0 + h_1 \cdot g_1(a_0 + a_1 x) \tag{3}$$

- h₀ : correction du niveau zéro
- h₁ : facteur d'échelle de luminance
- a₀ : correction géométrique
- a₁ : facteur d'échelle

La linéarisation de la relation (03) donne :

$$(a_0, a_1, h_0, h_1) = (0, 1, 0, 1) \text{ où } g_2^0(x) = g_1(x) \tag{4}$$

On obtient :

$$g_2(x) = g_1(x) + g'_1(x)da_0 + xg''_1(x)da_1 + dh_0 + g'_1(x)dh_1 \tag{5}$$

$$\text{Avec : } g'_1(x) = dg_1(x)/dx \tag{6}$$

$$\Delta g(x) = G_2(x) - G_1(x) = g_2(x) - g_1(x) + n_2(x) - n_1(x) \tag{7}$$

En remplaçant **g₂(x)** par son expression dans l'équation (7), nous aurons :

$$\Delta g(x) - v(x) = g'_1(x)da_0 + xg''_1(x)da_1 + dh_0 + g'_1(x)dh_1 \tag{8}$$

$$v(x) = n_2(x) - n_1(x) \tag{9}$$

L'équation (08) représente, pour chaque pixel, une équation d'observation linéarisée qui relie les différences du niveau de gris observés **Δg(x)** avec les paramètres de transformation inconnus (**a₀, a₁ h₀ h₁**). La solution par moindres carrés minimise la différence résiduelle **v(x)**, et donne la fenêtre de corrélation optimum.

Dans le cas où on considère un repère bidimensionnel (on n'a pas de géométrie épipolaire), l'équation d'observation est la suivante :

$$g_2(x,y) - v(x,y) = g'_x(x,y).da_0 + x.g''_x(x,y)da_1 + y.g'_x(x,y)da_2 + g'_y(x,y)db_0 + x.g''_y(x,y)db_1 + x.g'_y(x,y).db_2 + dh_0 + g_1(x,y)dh_1 \tag{10}$$

$$\text{Avec : } g'_x = \frac{\partial g_1(x,y)}{\partial x} \quad g'_y = \frac{\partial g_1(x,y)}{\partial y}$$

En discrétisant la fonction **g**, les dérivées **gx'** et **gy'** s'écrivent :

$$g'_x = \frac{g_1(x+1,y) - g_1(x-1,y)}{2}$$

$$g'_y = \frac{g_1(x,y+1) - g_1(x,y-1)}{2}$$

$$g_2(x,y) - v(x,y) = g_1(x,y) + g'_x dx + g'_y dy + dh_0 + dh_1 g_1(x,y) \tag{11}$$

A partir de la correction géométrique, on a

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1 x_0 \\ dx = da_0 + x_0 da_1 \end{cases} \quad \begin{cases} y = b_0 + b_1 y_0 \\ dy = db_0 + y_0 db_1 \end{cases}$$

Où **x₀** et **y₀** représentent les coordonnées obtenu par le coefficient de corrélation.

L'équation (11) devient :

$$g_2(x,y) - (g_1(x,y) + g'_x dx + g'_y dy + dh_0 + dh_1 g_1(x,y)) = v(x,y) \tag{12}$$

Où (**dx, dy, dh₀, dh₁**) sont les inconnues

$$\Delta g(x,y) = g_2(x,y) - g_1(x,y) = g'_x dx + g'_y dy + dh_0 + dh_1 g_1(x,y) + v(x,y) \tag{13}$$

Par exemple, pour une fenêtre de référence de taille 3x3, le système d'observation s'écrit :

$$\begin{bmatrix} g'_{x(1)} & g'_{y(1)} & 1 & g_{1(1)} \\ g'_{x(2)} & g'_{y(2)} & 1 & g_{1(2)} \\ g'_{x(2)} & g'_{y(2)} & 1 & g_{1(3)} \\ g'_{x(2)} & g'_{y(3)} & 1 & g_{1(4)} \\ g'_{x(2)} & g'_{y(4)} & 1 & g_{1(5)} \\ g'_{x(2)} & g'_{y(5)} & 1 & g_{1(6)} \\ g'_{x(2)} & g'_{y(6)} & 1 & g_{1(7)} \\ g'_{x(2)} & g'_{y(8)} & 1 & g_{1(8)} \\ g'_{x(9)} & g'_{x(9)} & 1 & g_{1(9)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dh_0 \\ dh_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta g_{(1)} \\ \Delta g_{(2)} \\ \Delta g_{(3)} \\ \Delta g_{(4)} \\ \Delta g_{(5)} \\ \Delta g_{(6)} \\ \Delta g_{(7)} \\ \Delta g_{(8)} \\ \Delta g_{(9)} \end{bmatrix} \tag{14}$$

La solution est estimée par moindres carrés et les coordonnées définitives sur l'image droite sont données par : $x = x_0 + dx$ et $y = y_0 + dy$.

L'image de droite est corrigée radio métriquement par rapport à l'image de gauche par h_0 et h_1 , avec :

$$h_0 = \sum \sum \Delta h_{0(i,j)} \text{ et } h_1 = \sum \sum \Delta h_{1(i,j)}$$

Image droite = $h_0 + h_1$ * Image gauche

4.1.4 Avantages et inconvénients de la correspondance zonale

Avantages [Greenfield, 1989]:

- Plus simple et moins coûteuse,
- Donne de bons résultats dans le cas des surfaces plates et des images ayant des propriétés photogrammétrie similaires,
- Permet d'avoir un grand degré d'invariance contre les distorsions géométriques de l'image.

Inconvénients :

- Exige un temps de calcul long,
- Taille de la fenêtre,
- Ne fournit pas d'information explicite ou sémantique.

4.2. Correspondences structural (Feature Based Matching: FBM)

Cette technique consiste à extraire séparément à partir de chaque image des éléments structuraux primaires en leur appliquant un critère de corrélation basé sur certaines propriétés particulières qui peuvent être résumées comme suit :

- L'emplacement du pixel ;
- L'orientation;
- L'angle entre deux segments consécutifs dans le polygone approximant le trait,
- La force (la magnitude du gradient, la pente du "zéro-crossing"),
- Les moments (le contour est traité comme une fonction de densité),
- Les paramètres de la forme (cercle, ellipse),
- La couleur (si elle est disponible),
- L'emplacement sémantique relatif.

Cette méthode ne fournit pas une bonne précision pour la photogrammétrie. Par contre, elle est généralement appliquée pour la vision artificielle. Deux types de structures sont considérés : le point et le contour. Chacun de ces éléments peut être apparié, ce qui engendre deux types de méthodes :

- Point : opérateur d'intérêt (Point Feature Matching)
- Ligne : correspondance basée sur les contours (Edge Based Matching).

5. Conclusion

En photogrammétrie, la mise en correspondances est utilisée pour divers champs d'applications, notamment pour le transfert de points d'une image à l'autre, le positionnement pour la mesure de points artificiels, l'exécution de l'orientation relative et le calcul de la position tridimensionnelle de points dans l'espace de l'objet.

Généralement, en aérotriangulation, c'est la technique de mise en correspondance zonale (ABM) qui est adoptée car elle donne une très bonne précision et elle est invariante par rapport aux distorsions d'images. En outre, elle permet une analyse statistique directe [Heipke, 1992].

Si le produit photogramétrique recherché est autre que l'information tridimensionnelle (par exemple une restitution planimétrique automatique), différentes techniques peuvent être employées selon une combinaison appropriée. Les résultats de l'application d'une des techniques servent comme éléments d'entrée pour d'autres techniques [Heipke, 1992].

Il existe différentes approches pour la mise en correspondance d'images numériques. Les techniques présentées dans cet article sont celles les plus utilisées en photogrammétrie aérienne basée sur la surface.

La méthode de mise en correspondance zonale (ABM) est la plus utilisée car elle s'adapte le mieux aux travaux de photogrammétrie et plus particulièrement la photogrammétrie aérienne. Elle s'adapte aussi avec les techniques d'estimations par moindres carrés et différents modèles mathématiques.

L'échantillonnage en géométrie épipolaire permet de réduire le domaine de recherche des homologues; cette technique peut faire l'objet d'une étude approfondie sur le redressement en géométrie épipolaire.

Références Bibliographiques

Ackerman F., 1984 : "Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry". "Photogrammetric Record Universidad Stuttgart Vol 11 pp 429-439.

Greenfield, 1989 : "Experiments with edge based stereo matching". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 55 (12): 1771-1777.

Grimson W.E.L., 1981 : "A computer implementation of a theory of human stereo vision," Philos. Trans. R. soc. London, Ser. B, Vol. 292, pp. 217-253.

Hahn M., 1995 : Navigation using Image Sequence, in: k.Linkwitz & U.Hanleiter, Eds., "High Precision Navigation 95", Dummler Verlag, Bonn, pages 464-470.

Heipke C., 1992 : "A global approach for least-squares image matching and surface reconstruction in object space", vol.58, n°3 (49 ref).

Heipke C., 1997 : "Automation of Interior, Relative, and Absolute Orientation". ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing, 52(1): 1-20.

Rodriguez G., 1992 : "Digital image processing". Book Addison- weskey publishing company 716p.

Avis aux Auteurs

Le **Bulletin des Sciences Géographiques** est indexé dans la **Bibliographie Géographique Internationale** à l'adresse suivante : http://prodig.univ-paris1.fr/umr/Poles_comptence/Pole_Documentation%20et%20valorisation.htm

La notice bibliographique de la publication figure dans le volume annuel **n° 112, 2007** qui vient de paraître, ainsi que dans la **base de données FRANCIS-Géographie du CNRS** interrogeable sur les serveurs internationaux Questel.Orbit, OCLC/PICA, RLG et sur CD-ROM (Service payants), et dans la **BGI** publié par l'UMR PRODIG qui paraît tout les ans : http://prodig.univ-paris1.fr/umr/publications_documentaires/bgi_papier.htm

Elle a aussi été mentionnée dans la rubrique Publications du site **Infogéo** consultable sur Internet à l'adresse suivante : <http://prodig.univ-paris1.fr/infogéo/Fichiers/Ouvrages.htm>. La rubrique est actualisée régulièrement.

Le **Bulletin des Sciences Géographiques** est diffusé sur Internet, sur le site portail des revues scientifiques dénommé <http://www.webreview.dz> conçu et administré par le Centre de Recherche sur l'Information Scientifique et Technique (CERIST).

Pour soumettre un article...

Vous souhaitez proposer un article pour le Bulletin des Sciences Géographiques.

Pour faciliter votre démarche, nous vous adressons quelques recommandations :

- Ce Bulletin est un espace scientifique, consacré aux sciences géographiques.
- **NATURE DES ARTICLES :** Les articles adressés pour publication doivent traiter des sujets se rapportant aux Sciences Géographiques.
Les articles se répartissent en deux rubriques:
 - Recherche - développement
 - Synthèse.

LES ARTICLES DE RECHERCHE - DÉVELOPPEMENT : portent soit sur des travaux ayant une originalité et une contribution novatrice aidant au développement des sciences géographiques, soit sur des réalisations et études concrètes qui pressentent un intérêt dans la maîtrise des concepts des sciences géographiques.

LES ARTICLES DE SYNTHÈSES : ont pour but de faire ressortir, les théories, les méthodes, les techniques ou les procédés liés aux sciences géographiques, avec notamment des cas précis d'application.
- **LANGUES :** Les articles paraissent principalement, en Arabe, Français et Anglais.
- **CRITÈRES DE PUBLICATION :** Toute communication présentant de l'intérêt sera diffusée, quelle que soit son origine; l'appartenance de son auteur à l'INCT n'est pas exigée.
Les articles doivent être fournis au format WORD ou équivalent, en colonnes et dans un format A4 en double interlignes, avec une marge de 2,5 cm au maximum sur chacun des quatre côtés.
Chaque communication doit comporter un titre, qui doit être bref et informatif.
- **LE RESUMÉ :** Chaque article doit comporter un résumé en arabe accompagné d'un autre résumé en français et un autre en anglais de 100 à 200 mots.
- **MOTS CLÉS :** Citer 5 à 6 mots clés.
- **BIBLIOGRAPHIE :** Les références doivent être complètes et présentées dans l'ordre alphabétique des noms d'auteurs. La référence doit mentionner le nom et le prénom de l'auteur suivis de l'année d'édition, du titre de l'ouvrage, de l'éditeur et du lieu d'édition. Toute référence doit être clairement mentionnée dans le texte par le nom et prénom de l'auteur suivie des deux derniers chiffres de l'année de publication.
- **MODALITÉ DE PUBLICATION :** Tout article présenté pour publication est soumis à l'évaluation de deux membres du comité de lecture, en cas d'avis contraire, il est soumis à un troisième membre. Les articles non retenus ne sont pas retournés, à moins d'une demande de la part de l'auteur.
Deux exemplaires seront fournis gratuitement à chaque auteur ; d'autres seront fournis à la demande, dans la limite du stock.
- **DATES DE PARUTION :** Le Bulletin paraît deux fois par an, à la fin du mois d'octobre et du mois d'avril.
- **ENVOI DES MANUSCRITS :** Envoyer un courrier à inct99@wissal.dz



INSTITUT NATIONAL DE CARTOGRAPHIE ET DE TELEDETECTION

Crée par ordonnance 211 67 du 17/10/1967 modifiée par les ordonances 84.68 du 23/04/1968 et 73.23 du 05/06/1973 et le décret présidentiel n°98.337 du 29/10/1998.

Siège: 123, rue de Tripoli - BP430 - Hussein Dey - 16040 - Alger

Tél: 213 021 47 00 30 & 021 47 09 20 **Fax:** 213 021 47 00 29 & 021 23 43 81

e-mail: inct99@wissal.dz

Bulletin d'abonnement

Tarif d'abonnement pour une année (comprenant deux numéros):

- Etudiant: 70 DA
- Particulier: 80 DA
- Etranger: 15 Euro

Prévoir en sus pour les frais d'expédition:

- Envoi Recommandé en Algérie : 400 DA
- Pour l'étranger: 10 Euro

Mode de règlement :

Pour l'Algérie :

- Par virement CCP N° 1552.04
- Par virement bancaire : CPA N° 101 401 78505 1
BEA N° Q 22 61 570

Pour l'étranger :

- Par virement bancaire: Banque Deutsche Bank AG Munich
Compte Nr, 85 960 BLZ: 700 700 10

Nom et prénom / raison sociale :

Fonction :

Adresse complète :

N°Tél : N°Fax : Email :

Date

Signature

**Retourner ce bulletin d'abonnement accompagné du règlement à
Monsieur le Directeur Général de l'Institut National de Cartographie
et de Télédétection**

123, rue de Tripoli- BP 430, Hussein Dey- 16040 Alger.
Tél: 213 021 47 00 30 & 021 47 09 20 Fax: 213 021 47 00 29 & 021 23 43 81
E-mail: inct99@wissal.dz,

ou ANT Vertriebs GmbH Fuerstenrieder Str. 166-81377 Munich R.F.A
Fax: 0049 89 71039 449



Bulletin des Sciences Géographiques

Institut National de Cartographie et de Télédétection

123 rue de Tripoli, BP 430, Hussein Dey - 16040 Alger.

Tél: (213) 021 47 09 20 & 021 47 00 30 - **Fax:** (213) 021 47 00 29 & 021 23 43 81

E-mail: inct99@wissal.dz