

# Bulletin des Sciences Géographiques

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

N° 17



Région d'Alger vue par QuickBird © Digital Globe™, distribuée par Eurimage, 2004

Avril 2006 - 1<sup>er</sup> Semestre • 9<sup>ème</sup> année • Prix 40 DA • Etranger 15 € • ISSN 1112-3745



# INCT BULLETIN DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

N° 17  
Avril 2006

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

Fondée en Octobre 1997  
N°17 - Avril 2006  
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

#### Publicité :

ANT Vertriebs GmbH  
Postfach 210403 80764  
Munich Allemagne .

#### Tirage :

500 Exemplaires

#### Comité de Rédaction :

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

- Mr DROUAI Fethallah  
Chef de Département de la  
Documentation, CDCIG, INCT.

- Mr DEGAICHIA Fethi  
Chef de Département des Travaux  
Spécifiques, C.T, INCT.

- Mr CHOUDER Med Tahar  
Chef de Département Analyses  
et Synthèses, CDCIG, INCT.

#### Comité de Lecture :

- Mr ABDELLAOUI Hassen  
Magister, INCT, (Président)

- Mr BOURIAHI Djelloul  
Ingénieur, SGT-ANP.

- Mr OMRANE Nacer  
PHD, INCT.

- Mr BELBACHIR Mohamed Faouzi  
Professeur, USTO.

- Mr AYADI Abdelkrim  
Directeur de recherche, CRAAG.

- Mr OUGUINI Rachid  
Maître de recherche, ASAL.

- Mr KAHLOUCHE Salem  
Directeur de recherche, CNTS.

- Mr GHEZALI Boualem  
Chargé de recherche, CNTS.

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

- Mr HADDAD Mahdi  
Magister, INCT.

## Sommaire / Contents

Pages

<b>ETUDE COMPARATIVE DES SERIES TEMPORELLES DE COORDONNEES DE STATIONS DORIS ISSUES DE TROIS CENTRES D'ANALYSE.....</b>	<b>2</b>
<i>B. GHEZALI, W. ZERHOUNI, H. TAIBI, A. ZEGGAI, S. KHELIFA</i>	
<b>APPLICATION DES LIGNES GEODESIQUES ET DES EQUATIONS DE LA REGRESSION MULTIPLE POUR LA TRANSFORMATION ENTRE DEUX DATUMS.....</b>	<b>9</b>
<i>A. ZEGGAI, B. GHEZALI, R. AIT AHMED LAMARA, N. KHELOUFI, H. TAIBI, S. TOUAM</i>	
<b>ESTIMATION OF THE SEA STATE BIAS EFFECT ON THE ALTIMETRIC MEASUREMENTS USING A PARAMETRIC MODEL.....</b>	<b>16</b>
<i>ALI RAMI, MHAMED KHELIF, SALEM KAHLOUCHE, TOUFIK DENOUKRI</i>	
<b>CALCULS TOPOMETRIQUES ET LOGICIELS 3D .....</b>	<b>22</b>
<i>CLAUDE MILLION</i>	
<b>CLASSIFICATION CONTEXTUELLE D'IMAGES DE TELEDETECTION UTILISANT LA PROGRAMMATION GENETIQUE.....</b>	<b>31</b>
<i>SALIM CHITROUB</i>	
<b>SIG ET IMAGERIE ALSAT-1 POUR L'ELABORATION DE LA CARTE DE SENSIBILITE A L'EROSION HYDRIQUE : CAS DU BASSIN VERSANT D'ARZEW (ALGERIE).....</b>	<b>39</b>
<i>L. CHELLOUAI, A. DJILALI, M. FOUKRACHE</i>	
<b>ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DES RISQUES LITTORAUUX (LITTORAL ORANAIS, ALGERIE NORD OCCIDENTALE).....</b>	<b>45</b>
<i>D. BOURAS. &amp; Z. BOUTIBA</i>	
<b>CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE DE ZONES DE MOUVEMENTS DE TERRAINS A PARTIR DE DONNEES DIGITALES : "CAS DE KEF BOU KHELIL PRES DE OUZERA", REGION DE MEDEA, ALGERIE .....</b>	<b>51</b>
<i>KOUIDRI RABIA ET OUGRINE MOUSSA</i>	
<b>APPLICATION DU SIG ET DE LA TELEDETECTION DANS LA GESTION DES FEUX DE FORETS EN ALGERIE.....</b>	<b>54</b>
<i>MOSTEFA BELHADJ-AISSA, AICHOUCHE BELHADJ-AISSA ET YOUCEF SMARA, ALGERIE</i>	
<b>BASE DE DONNEES GEOSPATIALES : CARTOGRAPHIE HYDROGEOLOGIQUE DES MONTS DES KSOUR (ATLAS SAHARIEN OCCIDENTAL, ALGERIE).....</b>	<b>66</b>
<i>H. Mansour, I. Zeroual, M. Foukrache, A. Nadji</i>	
<b>CALENDRIER DES MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES INTERNATIONALES.....</b>	<b>76</b>

# Étude Comparative des Séries Temporelles de Coordonnées de Stations Doris Issues de Trois Centres D'analyse

B. Ghezali, W. Zerhoumi, H. Taibi, A. Zeggai, S. Khelifa  
Centre National des Techniques Spatiales – Division de Géodésie  
BP 13, 31200 Arzew, Algérie - b\_ghezali@yahoo.fr

**Résumé :** Le thème développé à travers cet article consiste à une étude comparative entre trois solutions DORIS, représentant des séries temporelles de jeux de coordonnées de stations DORIS, issues de trois centres d'analyse (IGN-JPL, INASAN et LEGOS/CLS). Le but de ce travail est de déterminer une(s) solution(s) DORIS adéquate(s) parmi celles fournies par trois différents centres d'analyse en vue de la réalisation du système de référence terrestre international (ITRS) combinée à la détermination de paramètres de rotation de la terre. Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté une méthodologie de comparaison des séries temporelles, basée sur des tests statistiques. Les résultats obtenus ont démontré que les solutions des deux centres d'analyses IGN-JPL et INASAN présentent les mêmes caractéristiques (corrélation, indice de stabilité) et que les combiner reviendrait à doubler le poids de la solution. Dans ce cas, opter pour une seule solution (IGN ou INA) est plus correct.

**Mots-clés :** Série temporelle, DORIS, ITRS, ITRF, corrélation, stabilité.

**Abstract :** The topic developed through this paper consists with a comparative study between three DORIS solutions, representative of the time series of DORIS stations coordinates, resulting from three analysis centers (IGN-JPL, INASAN and LEGOS/CLS). The goal of this work is to find a single sufficient solution of DORIS or more, which those provided by three various analysis centers for the realization of the International Terrestrial Reference System (ITRS) combined with the determination of the earth rotation parameters. To achieve this goal, we adopted a methodology of comparison of the time series, based on statistical tests. The results obtained showed that the solutions of the two analysis centers of IGN-JPL and INASAN show the same characteristics (correlation, index of stability) and that to combine them would amount doubling the solution weight. In this case, to choose only one solution (IGN or INA) is more correct.

**Key words:** Time series, DORIS, ITRS, ITRF, correlation, stability.

## 1. Introduction

L'exploitation des séries temporelles de coordonnées de stations issues des techniques spatiales a un double objectif :

- ces séries permettent de mettre en évidence, à partir de méthodes d'analyse, les phénomènes géodynamiques liés à la réponse de la croûte terrestre aux diverses excitations qu'elle subit (déplacements des masses océaniques et atmosphériques ou excitations locales, ...).

- Elles sont également intégrées dans la réalisation du Système de Référence Terrestre International (ITRS) combinée à la détermination des paramètres de rotation de la terre.

Dans le cadre de l'effort collectif pour la mise en place de réseaux mondiaux, le travail présenté dans cet article s'est focalisé autour du deuxième point qui consiste principalement à un traitement statistique de séries temporelles de coordonnées de stations DORIS pour déterminer une(s) solution(s) DORIS adéquate(s) parmi celles fournies par différents centres d'analyse en vue de la réalisation du système de référence terrestre international (ITRS).

Le traitement des mesures DORIS en vue de l'amélioration des coordonnées des stations et de la mesure de leur variation est assuré actuellement par trois centres d'analyse dans le monde (IGN-JPL, INASAN et LEGOS/CLS).

Afin d'assurer l'accord interne entre les trois solutions, nous avons mené une étude comparative entre les trois solutions DORIS avant de les intégrer directement au calcul combiné des paramètres géodésiques. Il s'agit essentiellement de définir les outils de comparaison permettant de savoir si la combinaison des trois solutions DORIS est nécessaire dans la réalisation de l'ITRS ou alors le choix d'une seule solution jugée de meilleure qualité est plus judicieux et suffisant.

## 2. Technique DORIS

DORIS (Détermination d'Orbite et Radio positionnement Intégrés par Satellite) est un système radioélectrique bi-fréquence ascendant, bénéficiant d'un fonctionnement tout temps. Le système est basé sur la mesure Doppler de grande précision représentant la variation de distance satellite-balise, c'est-à-dire la composante du mouvement d'éloignement ou de rapprochement, qu'on appelle "vitesse radiale". L'erreur maximale commise sur la mesure de la fréquence Doppler est de l'ordre de  $1.65 \times 10^{-3}$  Hz (1<sup>ère</sup> génération des récepteurs : Topex/Poseidon, Spot2 et Spot4), ce qui correspond à une erreur sur la vitesse de 0.24 mm/s (erreur de l'ordre 5 cm sur la composante radiale). Pour les nouvelles missions telles que JASON1 et SPOT5, l'erreur maximale sur la fréquence Doppler est de  $10^{-5}$  Hz (0.015 mm/s sur la vitesse radiale) qui correspond à une erreur de l'ordre de 0.1 cm sur la composante radiale [3]. La modélisation de la mesure DORIS fait intervenir principalement la marche des horloges, la propagation du signal radioélectrique et le battement des phases. L'expression des relations d'observation DORIS peut être formulée soit en nombre de cycles N, soit en vitesse radiale  $V_r$ , telle que [5] :

$$N = (\overline{f_b} - \overline{f_s}) \Delta T_c - \frac{\overline{f_b}}{C} (\rho_2 - \rho_1) + \Delta N_{corr}$$

$$V_r = \frac{C}{f_b} \left[ (\overline{f_b} - \overline{f_s}) - \frac{N}{\Delta T_c} + \frac{\Delta N_{corr}}{\Delta T_c} \right]$$

Avec :

N : comptage de cycles ou différence de phase ( $2\pi N$ ) pendant  $\Delta T_c$

$\Delta T_c = (t_2 - t_1)$  : durée de comptage (7 à 9 s)

$(\overline{f_b} - \overline{f_s}) \Delta T_c$  : Terme de battement

$\frac{\overline{f_b}}{C} (\rho_2 - \rho_1)$  : Terme de l'effet Doppler

$\rho_1$  : Distance entre les centres de phase des antennes de la balise à l'instant d'émission  $t_{e1}$  et de l'instrument embarqué à l'instant de réception  $t_{r1}$

$\rho_2$  : Distance entre les centres de phase des antennes de la balise à l'instant d'émission  $t_{e2}$  et de l'instrument embarqué à l'instant de réception  $t_{r2}$

$\overline{f_b}, \overline{f_s}$  : Fréquences théoriques de la balise "b" et du satellite "s"

$\Delta N_{corr}$  : Terme correctif rassemblant les effets dus:

- aux phénomènes locaux (mouvement des plaques, marées terrestres et océaniques, surcharge atmosphérique, marée polaire),
- au milieu de propagation des ondes (ionosphère, troposphère),
- à la déviation de l'onde électromagnétique en présence d'une masse d'un corps du système solaire (relativité générale),
- aux forces agissant sur le satellite (modèles d'orbite),
- et aux horloges (synchronisation, dérive, biais de fréquence, relativité), à la géométrie de l'antenne et à la propagation instrumentale.

Le modèle de la mesure DORIS [1] [2] a été conçu pour obtenir divers produits de haute qualité tels que les orbites de satellite, la position des balises et du pôle de rotation terrestre. On peut étendre le champ d'applications jusqu'à l'estimation des paramètres des phénomènes locaux tels que le retard zénithal troposphérique et le biais de fréquence des horloges.

## 3. Données utilisées pour l'analyse DORIS :

La communauté entourant DORIS s'agrandit, le nombre des centres d'analyses se développe (tableau 1). En effet, ces derniers exploitent les mesures DORIS pour ses diverses applications et ils contribuent à la réalisation de l'ITRS en fournissant des solutions de positions/vitesses des stations DORIS en format SINEX (Solution (Software/technique) INdependent EXchange format) avec les matrices de variance covariance.

Tableau 1. Centres d'analyse DORIS.

CENTRES D'ANALYSE	PAYS	LOGICIEL UTILISE
Opérationnels	LEGOS/CLS (LCA)	France GINS-DYNAMO
	IGN/JPL (IGN)	Usa GIPSY-OASIS
	INASAN (INA)	Russie GIPSY-OASIS
En cours de développement	Geosciences Australia	Australie MICROCOSM
	CNES	France ZOOM
	Geodetic Observatory Pecny	Republic Tchèque BERNESE

Les données DORIS utilisées dans le traitement sont constituées de 03 séries hebdomadaires de jeux de coordonnées résiduelles (dE, dN, dU) issues des 03 centres d'analyse (IGN-JPL, INASAN et LEGOS/CLS) conduites entre 1993 et 2004. Durant cette période, un total de 107 stations DORIS ont été observées.

Ces séries de jeux de coordonnées résiduelles sont exprimées dans le repère local, après enlèvement du modèle ITRF2000 de positions et vitesses.

#### 4. Méthodologie adoptée pour l'analyse des séries temporelles DORIS

L'objectif de cette application consiste à définir les outils statistiques nécessaires à l'étude comparative entre les 03 solutions dans le but de confirmer la (es) solution(s) qui soit (sont) conforme(s) aux critères de réalisation de l'ITRS.

La méthodologie adoptée est composée de trois étapes :

**1<sup>ère</sup> étape :** Représentation graphique des séries temporelles qui nous permet d'avoir une idée générale sur la répartition des coordonnées résiduelles pendant la période d'observation.

**2<sup>ème</sup> étape :** Calcul des coefficients de corrélations intra centres afin de déterminer le degré d'indépendance des solutions fournies par chaque centre d'analyse.

**3<sup>ème</sup> étape :** Indices de stabilité des stations de chaque centre d'analyse.

#### 5. Résultats :

**1<sup>ère</sup> étape :** *Présentation des graphes des séries temporelles DORIS.*

Cette étape consiste à représenter sur un graphique les coordonnées résiduelles (dE, dN et dU) des stations en fonction du temps afin d'effectuer un examen a priori sur la répartition de la série pendant la période d'observation.

Les graphes suivants (figures 1, 2, 3, 4, 5 et 6) représentant les coordonnées résiduelles (dE, dN, dU) de quelques stations Doris (KERB, KRUB, LIBB, SPIB, TLHA, YARA) qui ont été sélectionnées sur la base des critères suivants :

- Stations situées sur *différentes plaques*
- Stations observées durant de *longues périodes*
- Stations observées durant de *courtes périodes*
- Stations présentant des *trous d'observations*

Nous remarquons (figure 1) d'une part, que la composante Est (dE) est beaucoup plus perturbée que les deux autres composantes Nord (dN) et verticale (dU) et d'autre part, qu'au cours de l'année 1997 il y a un trou d'observations pour cette station et ce pour les 3 centres d'analyse.

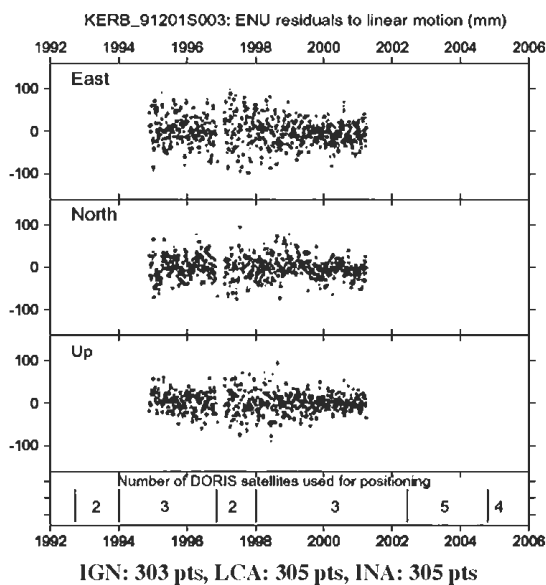


Fig. 1 Représentation des trois séries temporelles (station KERB)

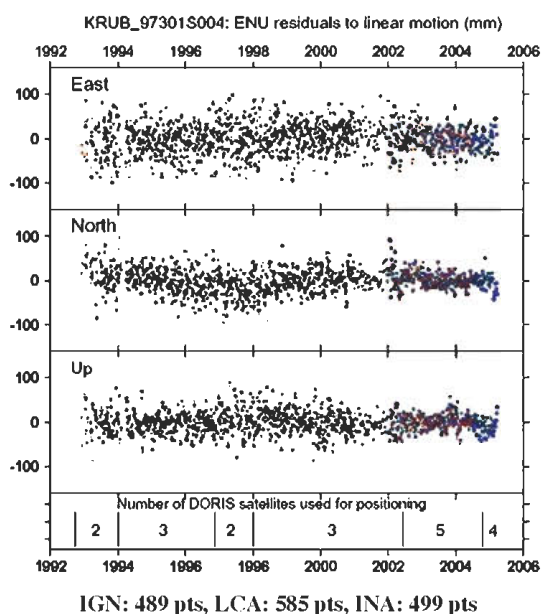


Fig. 2 Représentation des trois séries temporelles (station KRUB)

La durée des observations pour cette station est longue (≈12 ans); sa composante Est (dE) est beaucoup plus perturbée que les deux autres composantes. Aussi pendant la période 2001-2002 les deux centres d'analyse (IGN et INA) ont des trous d'observations, ce qui n'est pas le cas pour le centre d'analyse LCA.

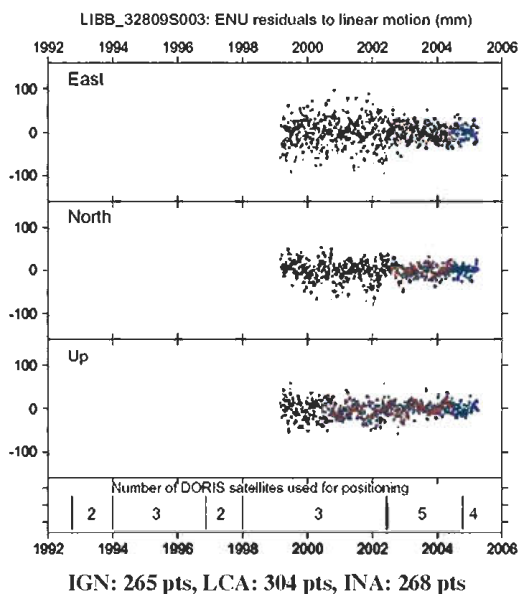


Fig. 3 Représentation des trois séries temporelles (station LIBB)

Il est clair que les deux composantes Nord (dN) et verticale (dU) sont plus stables que la composante Est (dE) durant la période 1999-2003. Par contre, à partir de l'année 2003, la composante Est (dE) s'est relativement stabilisée ce qui est probablement dû au fait que le nombre de satellites a augmenté à 5.

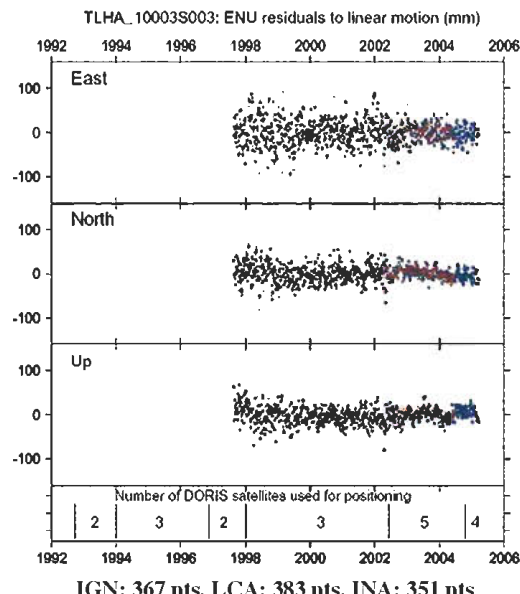


Fig. 5 Représentation des trois séries temporelles (station TLHA)

TLHA est une station maîtresse située à Toulouse, dont les composantes Nord (dN) et verticale (dU) sont beaucoup plus stables que la composante Est (dE) en particulier à partir de l'année 2002 jusqu'en 2005, ce qui est probablement dû à l'augmentation du nombre de satellites d'observation.

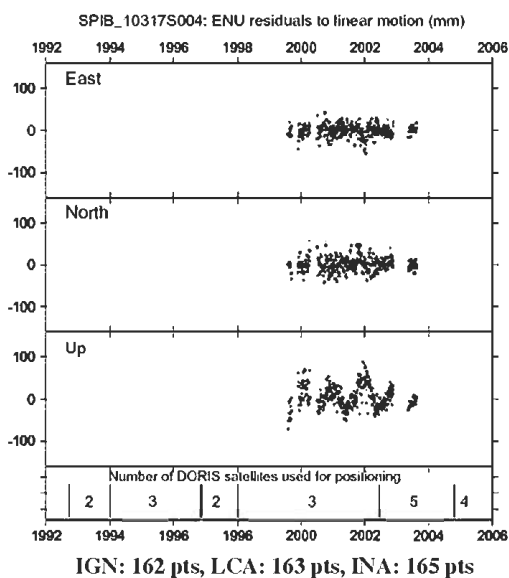


Fig. 4 Représentation des trois séries temporelles (station SPIB)

La durée des observations pour cette station est très courte. Mais nous remarquons facilement au niveau de la composante verticale (dU), qu'un signal périodique (annuel) se présente.

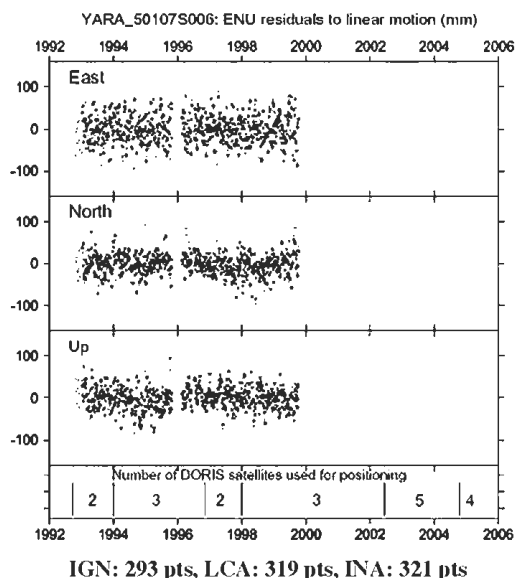


Fig. 6 Représentation des trois séries temporelles (station YARA)

Les composantes Nord (dN) et verticale (dU) sont plus stables que la composante Est (dE); Nous remarquons aussi qu'un trou d'observations se situe durant l'année 1996.

**2<sup>ème</sup> étape : Calcul des coefficients de corrélation Intra centres**

Dans notre cas, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les différents centres d'analyses (IGN, INA, LCA) deux à deux et ce pour pouvoir déterminer le degré d'indépendance entre les séries. Pour cela, nous avons pris les séries de *dates communes* et calculer leurs coefficients de corrélation avec la formule suivante (pour une corrélation entre LCA et IGN par exemple) :

$$r_{(LCA,IGN)} = \frac{Cov(LCA,IGN)}{\sigma_{LCA} \times \sigma_{IGN}} \text{ où } r \in [-1,1]$$

Cov et  $\sigma$  représentent respectivement la covariance et l'écart type.

Le graphe suivant (figure 7) représente les corrélations des 03 centres d'analyse comparés (LCA\_IGN, LCA\_INA, IGN\_INA) suivant les 03 composantes (dE, dN, dU) :

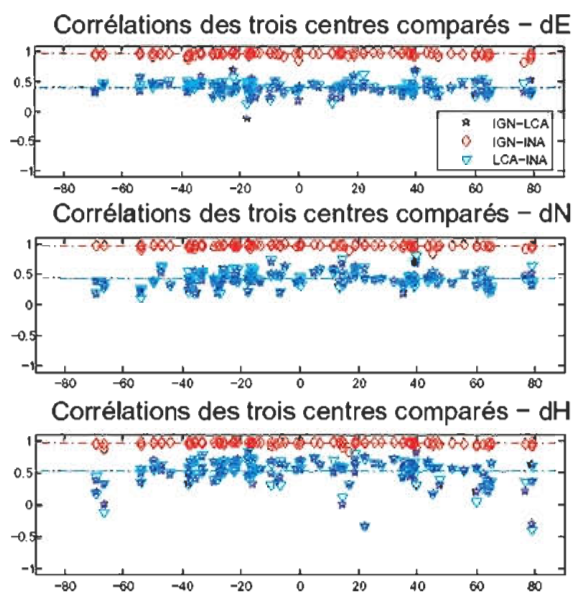


Fig. 7 Corrélations IGN\_LCA, IGN\_INA et LCA\_INA pour (dE, dN, dU)

Les intervalles de corrélation des trois centres comparés et pour les trois composantes (dE, dN, dU) sont fournis par le tableau suivant :

Tableau 2. Corrélations des 03 centres comparés.

	IGN_LCA	IGN_INA	LCA_INA
dE	[-0.20, 0.60]	[0.75, 0.99]	[0.18, 0.60]
dN	[0.20, 0.65]	[0.80, 0.99]	[0.15, 0.70]
dU	[-0.35, 0.75]	[0.75, 0.99]	[-0.40, 0.75]
Moy.	≈ 0.46	≈ 0.88	≈ 0.46

Nous constatons qu'il y a une forte corrélation entre les deux centres d'analyses IGN et INA qui atteint les 0.99. Par contre, la corrélation entre LCA et les deux autres centres IGN ou INA est relativement faible (en moyenne de l'ordre de 0.46). Ceci est dû principalement que les solutions de l'IGN et de l'INA utilisent le même logiciel d'ajustement (GIPSY-OASIS). Par contre, le centre d'analyse LCA utilise un autre logiciel (GINS-DYNAMO).

**3<sup>ème</sup> étape : Indice de stabilité**

Cette étape de traitement nous renseigne sur la stabilité des stations de chaque série. Plus l'indice de stabilité est petit, plus stable est la station. Les indices de stabilité des stations sont comparés entre deux centres d'analyses : (LCA\_IGN), (LCA\_INA) et (IGN\_INA) [4].

Les graphes suivants (figures 8, 9 et 10) représentent les indices de stabilité des stations comparés entre deux centres d'analyses : (LCA\_IGN), (LCA\_INA) et (IGN\_INA).

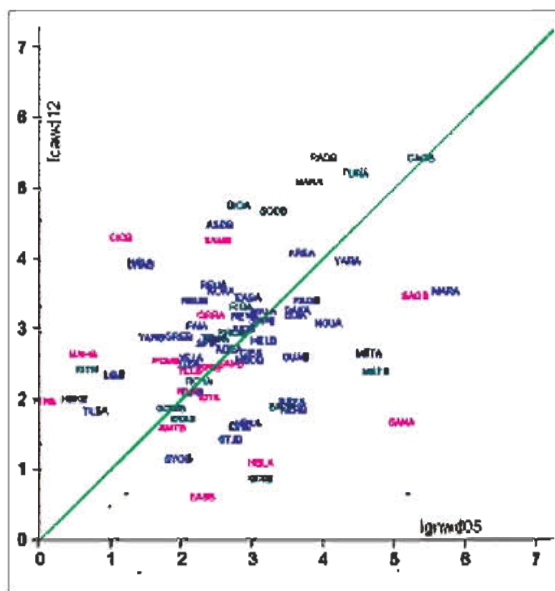


Fig. 8 Indices de stabilité des stations (IGN\_LCA).

L'axe des abscisses représente l'indice de stabilité des stations de la solution IGN

L'axe des ordonnées représente l'indice de stabilité des stations de la solution LCA

Nous constatons à partir de la figure (8) que la plupart des stations ont un indice de stabilité inférieur à 4. Cependant, la répartition des indices de stabilité de quelques stations par rapport à la diagonale (ligne verte) n'est pas homogène.

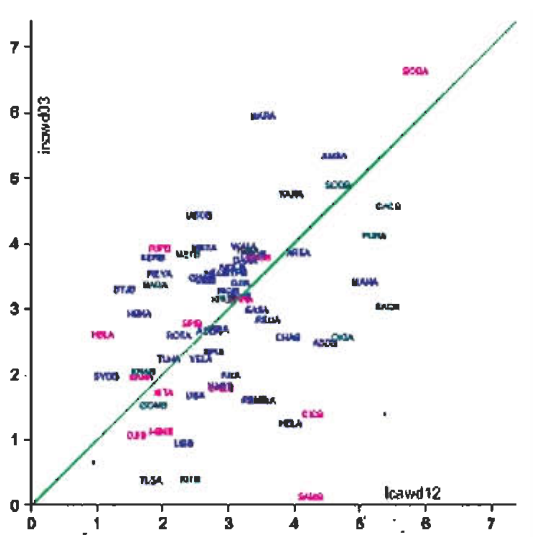


Fig. 9 Indices de stabilité des stations (LCA\_INA).

L'axe des abscisses représente l'indice de stabilité des stations de la solution LCA

L'axe des ordonnées représente l'indice de stabilité des stations de la solution INA

Nous remarquons à partir de la figure (9) que la répartition des indices de stabilité par rapport à la diagonale (ligne verte) n'est pas homogène. Ce qui montre que les deux centres (LCA, INA) sont en désaccord.

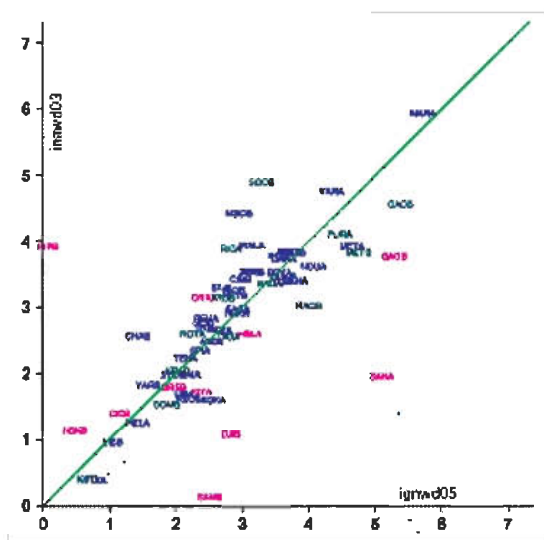


Fig. 10 Indices de stabilité des stations (IGN\_INA).

L'axe des abscisses représente l'indice de stabilité des stations de la solution IGN

L'axe des ordonnées représente l'indice de stabilité des stations de la solution INA

La figure (10) montre que la majorité des stations des deux centres d'analyse (IGN et INA) ont quasiment le même indice de stabilité.

### Remarque

Les stations pour lesquelles les séries sont courtes ou si elles comportent un trou d'observations important sont à prendre avec précaution car l'indice de stabilité n'est pas calculé avec suffisamment de données, il peut donc être faux (mal déterminé).

Plus l'indice de stabilité est bas, plus stable est la station. Dans les graphes précédents, nous avons mis en relation les indices de stabilité pour deux centres d'analyse. Si les stations montrent le même indice de stabilité pour les deux centres, elles sont sur la diagonale (la droite verte). Donc, plus les stations s'éloignent de cette droite, plus les deux centres sont en désaccord.

## 6. Analyse des résultats

Nous pensons que la mise en évidence des signaux (séries temporelles) et leur caractérisation peut nous aider à connaître la nécessité de combiner les solutions ou pas.

Après la détermination des coefficients de corrélation, nous avons constaté que les deux centres d'analyse IGN et INA sont fortement corrélés. Ce qui peut être expliqué par le fait qu'ils utilisent le même logiciel d'analyse de données Doris et adoptent la même méthodologie de traitement. Cela induit qu'on ne peut pas combiner leurs solutions car elles apportent les mêmes informations, et les combiner reviendrait à doubler le poids de ces solutions. Dans ce cas, le choix de la solution se fera sur IGN ou INA.

Par contre, les coefficients de corrélation entre le centre d'analyse LCA et l'IGN ou INA, ne sont ni trop forts, ni trop faibles (tableau 2). Cela est probablement dû au fait qu'ils n'utilisent pas le même logiciel (tableau 1) et n'adoptent pas la même stratégie de traitement.

De ce fait, dans le cadre de la réalisation de l'ITRS (ITRF : International Terrestrial Reference Frame), le choix de la (des) solution(s) la (es) plus adéquate(s) nécessite une étude sur la stabilité des stations de chaque centre d'analyse. Les figures (8, 9 et 10) représentent les indices de stabilité des stations comparés entre deux centres d'analyses : (LCA\_IGN), (LCA\_INA) et (IGN\_INA). La plupart des stations ont un indice de stabilité inférieur à 4.



La figure (10) montre bien que les deux centres d'analyses IGN et INA sont en parfait accord puisque les indices de stabilité de la majorité des stations sont quasiment identiques. Ce qui n'est pas le cas pour le centre d'analyse LCA (figures 8 et 9) avec les deux autres centres, puisque la répartition des indices de stabilité de la plupart des stations n'est pas linéaire.

## 7. Conclusion

Le choix entre la solution fournie par l'IGN et celle de INA est évident, puisque les séries correspondantes présentent les mêmes caractéristiques (corrélation, indice de stabilité). Dans ce cas, opter pour la solution de l'IGN ou celle de INA est exactement pareil.

Par contre, l'étude comparative entre la solution LCA et celles des deux autres centres (INA et IGN) reste difficile dans la mesure où les coefficients de corrélation ne sont ni trop forts ni trop faibles (tableau 2) et que la répartition des indices de stabilité par rapport à la diagonale n'est pas homogène (figures 8 et 9).

Pour atteindre l'objectif fixé, il est plus judicieux de considérer d'autres paramètres tels que la qualité de la modélisation de la mesure DORIS utilisée dans les logiciels de LCA (GINS) et IGN, INA (GIPSY), la stratégie de traitement adoptée par chaque centre d'analyse et éventuellement le taux de pourcentage de rejet de stations de chaque centre d'analyse.

## Références

- C. JAYLES, December 2004 : Modelling of DORIS instruments. Document technique CNES, 03/12/2004, Référence CO-SP-D0-OP-2460-CN
- C. JAYLES, P. SENGENES, December 2004: Modelling of DORIS 2GM and CRYOSAT instruments. Document technique CNES, 07/12/2004, Référence CO-SP-D0-OP-14815-CN
- Florence BOUILLE, 2000 : Etude des systèmes actuels et futurs de positionnement spatial DORIS Détermination des mouvements du centre de masse de la Terre et interprétations géophysiques, Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier en Géophysique et techniques spatiales, soutenue le 07 Janvier 2000
- Martine FEISSEL VERNIER, Karine LE BAIL : Stability of DORIS stations, 1993-2005, Article soumis pour communication en AUSTRALIE, AOUT 2005
- K. LE BAIL, 2004 : Etude Statistique de la stabilité des stations de géodésie Spatiale -Application à DORIS, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris en Dynamique des Systèmes Gravitationnels, Spécialité : Géodésie Spatiale, soutenue le 12 Décembre 2004.
- ZERHOUNI W., 2005 : Etude du signal et analyse des séries temporelles DORIS, Mémoire d'Ingénieur d'Etat en sciences géodésiques et travaux topographiques, Option: petites Echelles, CNTS / Arzew, Juin 2005.

# Application des lignes géodésiques et des équations de la régression multiple pour la transformation entre deux Datums

A. Zeggai, B. Ghezali, R. Ait Ahmed Lamara, N. Kheloufi, H. Taïbi, S. Touam  
Centre National des Techniques Spatiales - Division de géodésie  
BP. 13 Arzew - 31200 – Algérie.

**Résumé :** Les modèles globaux (Molodensky Badekas, Bursa Wolf, Veis, etc.) sont généralement les plus utilisés dans la résolution des paramètres de transformation entre deux systèmes géodésiques. Dans le cas du système géodésique Algérien (Nord Sahara 59), le calcul des paramètres est altéré par le manque d'information sur l'ondulation du géoïde au dessus de l'ellipsoïde astro géodésique de Clarke 1880A. Pour palier à ce problème, deux approches basées sur les lignes géodésiques (Azimut et longueur) et les équations de la régression multiple sont proposées dans cet article. Les tests effectués ont porté sur la détermination des paramètres de transformation entre WGS 84 et Nord Sahara 59. Les données utilisées sont constituées de 16 points répartis dans le Nord de l'Algérie (08 points d'appui et 08 points de contrôle). Les résultats des différents modèles de transformation sont illustrés.

**Mots clés :** Transformation, datum, correction d'azimut, variation d'échelle, équations de la régression multiple.

**Abstract :** The global models (Bursa Wolf, Molodensky Badekas, Veis...) are the most used to solve the transformation parameters between geodetic systems. In the case of North Sahara datum (Algeria), the parameter computation is altered by the insufficient information of the geoid's undulation above astro-geodetic ellipsoid (Clarke 1880 A). Two solutions using geodetic baselines (azimuth, geodetic length) and Multiple Regression Equation(s) are proposed. The application related to the determination of the transformation parameters between WGS 84 and North Sahara 59. The used data are constituted of 16 points distributed in the North of Algeria (08 points of reference and 08 points of control). Finally, the results of the various models are illustrated.

**Key words :** Transformation, datum, azimuthally correction, scale variation, Multiple Regression Equation(s).

## 1. Introduction

Malgré la facilité d'utilisation du système GPS (rapidité, précision), l'obtention de meilleurs résultats, nécessite les moyens mis en œuvre et l'adoption d'une méthodologie respectant les spécifications telles que la modélisation des erreurs liées aux mesures GPS, la définition d'une stratégie d'observation (redondance, réoccupation, nature des récepteurs...), l'introduction de modèles de traitements adéquats, etc.

En revanche, l'établissement des réseaux géodésiques classiques est basé sur les mesures de triangulation et de nivellement dont la valeur du réseau est impérativement liée à la qualité de ces mesures.

L'exploitation des données fournies par le GPS dans le référentiel WGS 84 (World Geodetic System 1984) pour des travaux géodésiques exprimés dans le système géodésique national (Nord Sahara 59) nécessite la mise en place de procédures particulières, tenant compte de la méconnaissance du géoïde local, telles que la résolution des équations de la régression multiple ou l'application des lignes géodésiques.

## 2. Les modèles globaux de transformation

La transformation des données GPS dans le système géodésique local, qui est la base du système cartographique en vigueur et dans lequel les résultats des travaux géodésiques doivent être exprimés, nécessite la connaissance des paramètres de passage. Le choix du modèle de transformation, c'est à dire la détermination des paramètres de passage, requiert la disponibilité d'un jeu de données connus dans chacun des deux systèmes. La transformation est généralement présentée sous la forme d'une similitude à sept paramètres appelée transformation d'Helmert.

Deux principaux modèles globaux de transformation sont présentés dans cet article :

### 2.1 Le modèle Cartésien de Bursa Wolf

C'est un modèle à sept (07) paramètres dont l'équation générale est donnée par :

$$\vec{X} = \vec{T} + (1 + \Delta k).R.\vec{x}$$

Avec :

$\vec{X}$  : vecteur des coordonnées GPS.

$\vec{x}$  : vecteur des coordonnées Nord Sahara.

$\vec{T}$  : vecteur des trois (3) translations ( $T_x, T_y, T_z$ ).

$R$  : matrice exprimée en fonction des trois petites rotations ( $E_x, E_y, E_z$ ) entre les deux systèmes.

$\Delta k$  : variation relative du facteur d'échelle.

Pour un point, nous avons :

$$\begin{pmatrix} X-x \\ Y-y \\ Z-z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x & 0 & z-y \\ 0 & 1 & 0 & y-z & 0 & x \\ 0 & 0 & 1 & z & y-x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ \Delta k \\ E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

Pour plusieurs points, l'équation générale est donnée comme suit :  $AX + B = V$

Et peut être résolue par l'ajustement des moindres carrés ( $V^T.V = \text{minimum}$ ) dans un système normal :

$$\frac{\partial V^T.V}{\partial X^T} = A^T.A.X + A^T.B = 0$$

La solution donne :

$$X = (A^T.A)^{-1}.A^T.B$$

Où X représente le vecteur à 07 paramètres ( $T_x, T_y, T_z, \Delta k, E_x, E_y, E_z$ ).

### 2.2 Le modèle géographique de Molodensky

A chaque système de référence géodésique est associé un ellipsoïde de révolution défini par ses composantes (a,b), (a,e) ou (a,f).

Les coordonnées géographiques (longitude, latitude et altitude ellipsoïdique) sont des valeurs plus représentatives dans la pratique que les coordonnées cartésiennes (X, Y, Z). La transformation mise en œuvre est alors à neuf (09) paramètres dans laquelle s'ajoutent deux autres paramètres (Da et Df ou De) ; où Da, Df et De représentent respectivement la variation du 1/2 grand axe ( $a_2 - a_1$ ), la variation de l'inverse de l'aplatissement ( $f_2 - f_1$ ) et la variation de l'excentricité ( $e_2 - e_1$ ).

Il existe des formules permettant de s'affranchir des coordonnées géocentriques liées aux deux ellipsoïdes et d'aboutir à une transformation directe issue des équations différentielles de Molodensky.

En pratique si les systèmes de coordonnées X et x sont identiques, on obtient un modèle :

$$\vec{X} = F(\vec{x}, \vec{\alpha})$$

$$\vec{X} = {}^t(X, Y, Z)$$

$$\vec{x} = {}^t(\lambda, \varphi, he)$$

$$\vec{\alpha} = {}^t(a, f)$$

L'équation différentielle devient :

$$d\vec{X} = \frac{\partial F}{\partial x} d\vec{x} + \frac{\partial F}{\partial \alpha} d\vec{\alpha}$$

$$d\vec{X} = J.d\vec{x} + K.d\vec{\alpha}$$

Où J et K représentent les Jacobiens de la transformation.

Avec :

$$d\vec{x} = {}^t(\lambda_2 - \lambda_1, \varphi_2 - \varphi_1, he_2 - he_1)$$

$$d\vec{\alpha} = {}^t(da, df) = {}^t(a_2 - a_1, f_2 - f_1)$$

$$\vec{X} = F(\vec{x}, \vec{\alpha}) = \begin{pmatrix} (N + he). \cos \varphi. \cos \lambda \\ (N + he). \cos \varphi. \sin \lambda \\ (N(1 - e^2) + he). \sin \varphi \end{pmatrix}$$

N représente la grande normale ou normale principale.

$$d\vec{X} = U.d\vec{\theta}$$

$$d\vec{\theta} = {}^t(T_x, T_y, T_z, \delta k, E_x, E_y, E_z)$$

Nous pouvons écrire que :

$$d\vec{x} = J^{-1}.U.d\vec{\theta} - J^{-1}.K.d\vec{\alpha}$$

Où  $A = J^{-1}.U$  ,  $B = -J^{-1}.K$ .

L'équation différentielle de Molodensky s'écrit finalement :

$$d\vec{x} = A.d\vec{\theta} + B.d\vec{\alpha}$$

Ces équations peuvent également être simplifiées en formules dites de Molodensky-DMA, telles que

$$\lambda_2 - \lambda_1 = -\frac{\sin \lambda}{(N+h)\cos \varphi} \cdot Tx + \frac{\cos \lambda}{(N+h)\cos \varphi} Ty - (1-2f)tg\varphi(\cos \lambda \cdot Ex + \sin \lambda \cdot Ey) + Ez$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{\sin \varphi \cdot \cos \lambda}{(\rho+h)\cos \varphi} \cdot Tx - \frac{\sin \varphi \cdot \sin \lambda}{(\rho+h)\cos \varphi} Ty + \frac{\cos \varphi}{(\rho+h)} Tz + \sin \lambda \cdot Ex - \cos \lambda \cdot Ey$$

$$h_2 - h_1 = \cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot Tx + \cos \varphi \cdot \sin \lambda \cdot Ty + \sin \varphi \cdot Tz + a \cdot \Delta k - da + (adf - fda) \sin^2 \varphi$$

C'est l'écriture matricielle pour un seul point. Pour le cas de n points, la solution est donnée par la méthode des moindres carrés.

### 3. Approche des lignes géodésiques

L'utilisation des lignes géodésiques, dans le calcul des transformations ou passage entre coordonnées WGS 84 et coordonnées du système géodésique en vigueur dans un pays (Nord Sahara 59 pour notre cas), présente l'un des grands avantages dans la détermination des coordonnées transformées pour les bases usuelles d'applications topographiques.

La méthode nécessite au moins un point double contrairement aux méthodes tridimensionnelles (3 points > 7 paramètres). La précision se dégrade dès que la longueur de la géodésique devient importante. La précision, des éléments tels que l'azimut et la longueur, doit s'imposer avec rigueur.

#### 3.1 Principe

La solution envisagée pour le problème de la transformation passe par la détermination d'abord des éléments de la géodésique dans le système GPS relatif à l'ellipsoïde WGS84 (aspect inverse : figure 1) puis le calcul des coordonnées de l'extrémité du point B dans le système Nord Sahara (aspect direct : figure 2).

La précision de la transformation réside dans le calcul précis de la correction angulaire entre les azimuts sur les deux ellipsoïdes et du facteur d'échelle.

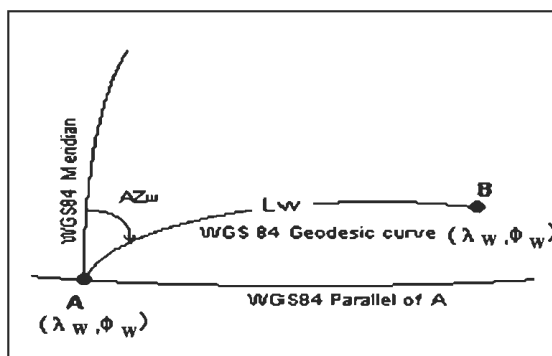


Fig. 1 Problème inverse des géodésiques.

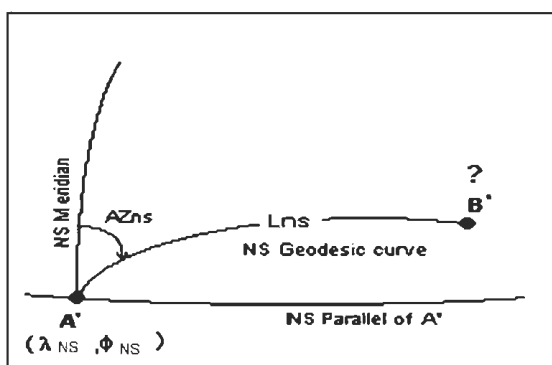


Fig. 2 Problème direct des géodésiques.

#### 3.2 Détermination de la correction d'azimut de la géodésique

La détermination de la correction d'azimut est basée sur la comparaison des azimuts obtenus par GPS et des azimuts calculés dans le système NORD SAHARA.

$$az_{NS} = az_w + \Delta az$$

$$\Delta az_o = \frac{\sum \Delta az_i}{n}$$

$$\Delta az - \Delta az_o = a_i^T x + v_i$$

Avec :

$\Delta az_o$  : solution moyenne.

x : vecteur (nx1) des paramètres inconnus.

$a_i^T$  : matrice (nx5) coefficients connus.

$v_i$  : vecteur (nx1) des résidus.

Comme la différence  $(\Delta az - \Delta az_o)_i$  est très petite, la fonction F peut être supposée linéaire et peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\Delta az_i - \Delta az_o = F_i(\Delta\lambda, \varphi, az, D) = \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} + \mathbf{v}_i$$

Avec :

$$\mathbf{a}_i^T \mathbf{x} = F_i = \mathbf{a} \cdot az + b\Delta\lambda + c\varphi + d \cdot D + e$$

Les coefficients a, b, c, d et e sont traités par moindres carrés et sont valables pour chaque station connue. La solution exige au moins six points d'appui connus dans les deux systèmes.

### 3.3 Calcul du facteur d'Echelle

L'échelle est définie comme étant le rapport :

$$k_i = \left( \frac{\text{Géodésique Nord Sahara}}{\text{Géodésique WGS84}} \right)_i$$

Comme les longueurs exprimées dans les deux ellipsoïdes sont voisines, le rapport ou facteur d'échelle est voisin de l'unité et par conséquent égal à :

$$k_i = 1 + \Delta k_i$$

Comme la différence  $\Delta k_i$  est très petite, la fonction G est supposée linéaire et peut être écrite comme suit :

$$\Delta k_i = G_i(\Delta\lambda, \varphi, az, D)$$

$$\Delta k_i = \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} + \mathbf{v}_i$$

$$\mathbf{a}_i^T \mathbf{x} = G_i = \mathbf{a}' \cdot az + \mathbf{b}' \Delta\lambda + \mathbf{c}' \varphi + \mathbf{d}' D + \mathbf{e}'$$

Les coefficients a', b', c', d', e' sont obtenus par moindres carrés et sont valables pour chaque station connue. La solution exige au moins six points d'appui connus dans les deux systèmes.

## 4. Approche des équations de la régression multiple (MRE(s))

### 4.1 Cas général de la transformation

La transformation polynomiale entre deux systèmes géodésiques est appliquée dans le cas où l'un des systèmes ou bien les deux à la fois présentent une incohérence en orientation et en échelle. La petite distorsion est approximée par une fonction polynomiale en coordonnées géographiques (latitude et longitude) ou en composantes locales (Est et Nord).

La plus simple des fonctions polynomiales est la fonction polynomiale générale. Pour éviter les

problèmes d'instabilité numérique, ce type de polynôme doit être utilisé après réduction des valeurs de coordonnées dans les deux systèmes. Ce qui revient à faire un changement de repère (translation) dont l'origine est le point central d'évaluation (barycentre, point d'appui, point le plus proche du milieu, ...). Ainsi, le point d'évaluation est choisi dans le référentiel d'origine ( $x_0, y_0$ ) et dans le deuxième référentiel (X, Y). Souvent, ces deux jeux de coordonnées ne se réfèrent pas au même point physique mais deux points sont choisis de telle sorte qu'ils aient les mêmes coordonnées dans les deux systèmes.

Le choix de ce point dans les deux référentiels, nous permet de réduire les coordonnées des points comme suit :

$$(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0), (\mathbf{y} - \mathbf{y}_0) \text{ et } (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0), (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0)$$

Les différences de coordonnées sont exprimées dans leurs propres unités de mesure.

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \mathbf{k}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \\ \mathbf{V} &= \mathbf{k}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_0) \end{aligned}$$

Où

$\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0$  : Coordonnées origine (1<sup>er</sup> système).

$\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0$  : Coordonnées origine (second système).

$x, y$  : Coordonnées du point d'évaluation dans le système d'origine.

$k$  : Le facteur d'échelle appliqué dans le premier système.

Les coordonnées normalisées U et V des points dont les coordonnées sont à transformer sont utilisées comme des sorties dans la formule de transformation polynomiale.

Les fonctions polynomiales s'écrivent comme suit :

$$\begin{aligned} d\mathbf{X} &= \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{U} + \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{V} + \dots + \mathbf{A}_5 \cdot \mathbf{V}^2 \\ &+ \mathbf{A}_6 \cdot \mathbf{U}^3 + \dots + \mathbf{A}_8 \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^2 + \mathbf{A}_9 \cdot \mathbf{V}^3 \\ &+ \mathbf{A}_{10} \cdot \mathbf{U}^4 + \dots + \mathbf{A}_{13} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^3 + \mathbf{A}_{14} \cdot \mathbf{V}^4 \\ &+ \mathbf{A}_{15} \cdot \mathbf{U}^5 + \dots + \mathbf{A}_{19} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^4 + \mathbf{A}_{20} \cdot \mathbf{V}^5 \\ &+ \mathbf{A}_{21} \cdot \mathbf{U}^6 + \dots + \mathbf{A}_{26} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^5 + \mathbf{A}_{27} \cdot \mathbf{V}^6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d\mathbf{Y} &= \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{U} + \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{V} + \dots + \mathbf{B}_5 \cdot \mathbf{V}^2 \\ &+ \mathbf{B}_6 \cdot \mathbf{U}^3 + \dots + \mathbf{B}_8 \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^2 + \mathbf{B}_9 \cdot \mathbf{V}^3 \\ &+ \mathbf{B}_{10} \cdot \mathbf{U}^4 + \dots + \mathbf{B}_{13} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^3 + \mathbf{B}_{14} \cdot \mathbf{V}^4 \\ &+ \mathbf{B}_{15} \cdot \mathbf{U}^5 + \dots + \mathbf{B}_{19} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^4 + \mathbf{B}_{20} \cdot \mathbf{V}^5 \\ &+ \mathbf{B}_{21} \cdot \mathbf{U}^6 + \dots + \mathbf{B}_{26} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^5 + \mathbf{B}_{27} \cdot \mathbf{V}^6 \end{aligned}$$

Les coefficients ( $A_i, i=1,n$ ) et ( $B_i, i=1,n$ ) sont estimés par la méthode des moindres carrés. Les écarts ( $dx, dy$ ) sont calculés. La relation entre les deux systèmes de coordonnées peut s'écrire :

$$\begin{aligned}(X - X_0) &= (x - x_0) + dX \\ (Y - Y_0) &= (y - y_0) + dY\end{aligned}$$

D'où l'écriture finale des coordonnées transformées:

$$\begin{aligned}X &= X_0 + (x - x_0) + dX \\ Y &= Y_0 + (y - y_0) + dY\end{aligned}$$

Avec :

$X_0, Y_0$  : Coordonnées origine (1<sup>er</sup> système).

$X_0, Y_0$  : Coordonnées du point d'évaluation dans le second système.

$x, y$  : Coordonnées du point d'évaluation dans le premier système.

$X, Y$  : Coordonnées du point d'évaluation dans le second système.

$dX, dY$  : Sont déduits à partir de la formule polynomiale du facteur d'échelle.

Les coordonnées utilisées peuvent être des coordonnées planes ou des coordonnées géographiques géodésiques, exprimées avec des unités décimales.

#### 4.2 Transformation MRE(s)

La méthode dite transformation par les équations à régression multiple ou MRE(s) a été utilisée par la NIMA (DMA : 1984) pour le passage d'un système géodésique local vers le système WGS 84. La méthode vient pour compléter les formules de transformations issues des équations différentielles de Molodensky.

Les équations de la régression multiple permettent de déterminer ou d'évaluer les distorsions non linéaires dans un réseau appartenant au premier système ou à l'autre.

L'inconvénient majeur de la méthode est la non validité de cette dernière pour des points qui se trouvent à l'extérieur de la zone ou du champ d'application défini par ces limites. Les résultats peuvent être extrêmement peu fiables.

La transformation des coordonnées géographiques géodésiques d'un point s'écrit de la manière suivante:

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= \lambda_1 + \Delta\lambda \\ \varphi_2 &= \varphi_1 + \Delta\varphi \\ h_2 &= h_1 + \Delta h\end{aligned}$$

Avec :

$\lambda_1, \varphi_1, h_1$  : Coordonnées géodésiques (1<sup>er</sup> système).

$\lambda_2, \varphi_2, h_2$  : Coordonnées géodésiques (2<sup>ème</sup> système).

$\Delta\lambda, \Delta\varphi, \Delta h$  : différences en longitude, latitude et hauteur ellipsoïdique.

La forme générale de la différence entre deux Datums en utilisant la MRE pour la latitude  $\varphi$  est donnée comme suit (DMA, 1984) :

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= A_0 + A_1.U + A_2.V + A_3.U^2 + A_4.U.V \\ &+ A_5.V^2 + \dots + A_{54}.V^9 + A_{55}.U^9.V \\ &+ A_{56}.U^8.V^2 + \dots + A_{64}.U^9.V^2 + A_{65}.U^8.V^3 \\ &+ A_{66}.U^8.V^2 + \dots + A_{72}.U^9.V^3 + A_{73}.U^8.V^4 \\ &+ \dots + A_{99}.U^9.V^9\end{aligned}$$

Où :

$A_0, A_1, \dots, A_{99}$  : 100 coefficients possibles déterminés dans la MRE.

$U = k.(\varphi - \varphi_0)$  : Latitude géodésique normalisée.

$V = k.(\lambda - \lambda_0)$  : Longitude géodésique normalisée.

$k$  : facteur d'échelle.

$\lambda_0, \varphi_0$  : Coordonnées origine du premier système.

La forme des relations exprimant les différences  $\Delta\lambda$  et  $\Delta h$  est identique à celle  $\Delta\varphi$ . Il suffit simplement de remplacer  $\Delta\varphi$  par  $\Delta\lambda$  ou  $\Delta h$ .

Le degré de la MRE dépend essentiellement du nombre de points. Pour le degré 18, il faut au moins 100 coefficients avec un minimum de 100 points.

#### 5. Résultats obtenus

Les données utilisées sont issues de plusieurs campagnes d'observations qui ont été menées avec des récepteurs bifréquences Ashtech Z XII, soit total de 16 points répartis au Nord de l'Algérie (08 points d'appui et 08 points de contrôle).

La majorité du réseau a été observé dans le cadre du projet ALGEONET (Algerian Geodynamical Network), mené conjointement par le CNTS et l'INCT (Institut National de Cartographie et de Télédétection).

L'objectif de ce projet est la mise en place d'un réseau GPS précis, couvrant essentiellement la partie Nord de l'Algérie, pour les applications géodynamiques.

Il a été monté en 1998, ré observé en 2002, après l'extension du projet TYRGEONET (Tyrhenian Geodetic Network –ING Italie) en Algérie.

### 5.1 Transformation entre WGS 84 et Nord Sahara 59 : Modèles globaux

Les modèles (Bursa-Wolf, Molodensky-Badekas...) sont les plus utilisés pour calculer les paramètres de la transformation entre systèmes identiques.

Le tableau suivant (1) fournit quelques statistiques sur les coordonnées transformées à partir des modèles globaux.

Faute de manque d'information sur la hauteur du géoïde, la hauteur de l'ellipsoïde relative à Clarke 1880 (ellipsoïde associé au système Nord Sahara 59) est remplacée par l'altitude.

**Tableau 1.** Statistiques sur les coordonnées transformées à partir des modèles globaux.

Modèle	Ecart	Min. (m)	Max. (m)	Moy. (m)	RMS (m)
Bursa Wolf	dX	-1.426	2.686	1.294	1.397
	dY	-0.301	1.164	0.699	0.486
	dZ	-1.491	1.307	0.461	0.970
Molodensky	dλ	-1.417	0.605	-0.841	0.605
	dφ	0.090	0.541	0.404	0.090
	dH	-2.933	2.019	-1.308	1.698

Les écarts (dX, dY, dZ) et (Δλ, Δφ, dH) représentent les différences de coordonnées (cartésiennes et géographiques) sur les points de contrôle.

Les quantités (dλ, dφ) peuvent être exprimées dans le repère local par les relations suivantes :

$$dE = N \cos \phi \cdot d\lambda \text{ (Composante Est)}$$

$$dN = \rho d\phi \text{ (Composante Nord)}$$

La précision obtenue sur les coordonnées des points d'appui est identique à celle obtenue sur les coordonnées des points de contrôle. Elle est inférieure à 3 mètres.

### 5.2 Transformation entre WGS 84 et Nord Sahara 59 : Lignes géodésiques et MRE(s)

Les statistiques sur les coordonnées transformées par les approches des lignes géodésiques et des MRE(s) sont fournies par le tableau suivant :

**Tableau 2.** Statistiques sur les coordonnées transformées (MRE(s) et lignes géodésiques).

Modèle	Ecart	Min. (m)	Max. (m)	Moy. (m)	RMS (m)
MRE(s)	dλ	-0.063	0.224	0.110	0.164
	dφ	-0.407	0.634	-0.164	0.366
Lignes Géodésiques	dλ	-0.083	0.135	0.022	0.082
	dφ	-0.100	0.269	0.060	0.126

La moyenne des écarts en longitude et en latitude (dλ, dφ) obtenue par l'approche des lignes géodésiques est de l'ordre de 0.040 m. L'écart type moyen obtenu sur les coordonnées transformées est de meilleure qualité ≈ 0.104 m. Cette méthode permet de fournir une solution rigoureuse. En revanche, elle exige une grande précision sur l'azimut et la longueur.

La précision obtenue sur les coordonnées des points d'appui par ces deux dernières approches est généralement de bonne qualité. Elle ne dépasse pas le mètre.

## 6. Conclusion

L'introduction des sites TYRGEONET (Alger et Arzew) a permis en revanche d'ajuster tous les réseaux GPS observés et d'améliorer la précision de la transformation entre les systèmes géodésiques WGS 84 et Nord Sahara 59.

La qualité des paramètres de transformation entre les systèmes WGS 84 et Nord Sahara 59 reste tributaire de :

- La qualité des données GPS.
- La qualité des coordonnées Nord Sahara 59.
- L'information et la qualité de la hauteur du géoïde relative à l'ellipsoïde Clarke 1880 (donnée fondamentale).
- La densité et la répartition des points.
- Du choix du modèle de la transformation.

## Références

D. Bouteloup, 2002 : *Systèmes géodésiques. Cours de Géodésie* Chapitre 8. IGN. Version 2.0. 20-11-2002.

N. Kheloufi, 2004 : *Qualité des données et modélisation pour l'estimation des paramètres de passage entre les systèmes WGS84 et le Nord Sahara*. Mémoire de magister. CNTS ARZEW. Novembre 2004.

- J. J. Levallois, 1969 : *La géodésie bidimensionnelle*. Tome 2, Edition Eyrolles - Paris France.
- A. Reyt, 1960 : *Les principales étapes de la géodésie en Afrique du Nord et leur incidence cartographique*. éditeur : imprimerie IGN.
- P. Vanicek– E. J. Krakiwsky, 1986 : *Geodesy : The concepts*. Second edition ISBN: 0-444-87777-0 . Elsevier Science B.V P.O. Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands.
- World Geodetic System, 1984 : *its definition and relationships with local geodetic systems*. NIMA [2000] Technical Report TR8350.2. Department of Defense.
- A. Zeggai, S.A. Benahmed Dahou, S. Kahlouche, A.N. Nabad, S. Touam, A. Ayouaz, 2001 : *Rattachement géodésique par GPS longue base du réseau cadastral de Béchar*. Actes du séminaire sur les nouvelles techniques cartographiques à grandes échelles. ALGER 27-28 juin 2001.
- A. Zeggai, S.A. Benahmed Dahou, S. Kahlouche, A.N. Nabad, S.Touam, 2001 : *Geodetic lines transformations, GPS Levelling and Nord-Sahara Datum. Comparison with Global Models*. Assemblée scientifique de l'Association Internationale de Géodésie - Symposium A: Fine Tuning Reference Frame Implementation - Budapest du 2 au 8 septembre 2001.
-



# Estimation of the Sea State Bias effect on the altimetric measurements using a parametric model

Ali Rami<sup>(1)</sup>, Mhamed Khelif<sup>(2)</sup>, Salem Kahlouche<sup>(1)</sup>, Tonfik Denoukri<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> National Centre of Space Techniques, PO Box 13, Arzew 31200 Oran Algeria

<sup>(2)</sup> Abou Bakr Belkaid University, Faculty of Science Engineering 13000 Tlemcen Algeria

**Abstract :** The sea state bias (*SSB*) which affect the altimetric measurements on the sea surface is estimated using empirical parametric model (*BM4*), calibrated by the analysis of the altimeter data. This model is a simple linear function that links the *SSB* with the significant wave height (*SWH*), the wind speed (*U*) and the backscatter coefficient ( $\sigma_0$ ).

The knowledge of the backscatter coefficient determined by altimetric signal processing allows to determine the significant wave height and the wind speed.

The use of Topex / Poseidon and Jason-1 altimetric data to calculate the sea state bias with the *BM4* model and the comparison of the results obtained with the *SSB* value transmitted in the message of each satellite allowed us the validation of the methodological approach developed.

The proximity of the results obtained with Topex/Poseidon data is sufficient for the most altimetric applications as the determination of the mean sea level which was calculated on the western Mediterranean Sea during a period of 72 cycles.

Concerning Jason-1, the difference of the results in the determination of the *SSB* can be explained by the nature of the instruments on board and also the type of model used.

**Keywords :** Estimation, Parametric model, Empirical, Sea State Bias, Topex / Poseidon, Jason-1.

## 1. Introduction

The principle of satellite altimetry is based on the theory of the interaction of an incidental electromagnetic wave with an uncertain rough surface, in order to determine the physical process and model it by analytic expressions permitting to estimate the different parameters characterizing the surface.

The major mechanism of scattering of an incidental electromagnetic wave is the resonance of BRAGG; an important exception which altimetry, is based is the hopeless impact where the dominant phenomenon is the specular reflection. The mean strength distributed per unit of surface is proportional to the mean number of specular points. The quantity really

measured by the altimeter is the backscatter coefficient which is defined as being the ratio of the distributed strength to the incidental strength, per unit of surface.

## 2. Sea State Bias

The aim of the satellite altimetry is to provide the height of the sea surface with regard to a referential. This height changes on scales of centimetres essentially owing to the waves, a part of the radar wave is sent back by crests of waves and the remainder will be sent back by wave hollows. Besides, the instrument is adjusted so that it can make the mean of these two measures automatically to determine the mean sea surface height by a symmetrical algorithm of the height probability density. The obtained result is biased, this bias called sea state bias, is necessary to understand the phenomenon of sea state bias, based on the study of the physical principle of altimetric measure that use the theory of radio scattering by the surface of the sea [2].

### 2.1 Radio Scatter Theory

#### 2.1.1. Scattering Cross Section

Near the vertical diffusion, the received energy is provided by the reflexion of the wave facets towards the captor. The ratio (incident energy / received energy) is expressed by the Scattering Cross Section. Let a radar illuminating an ocean surface Fig. 1.

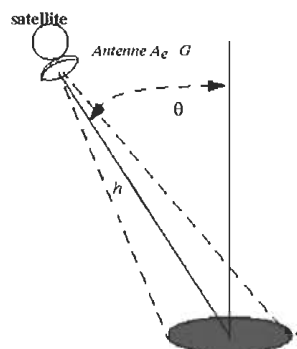


Fig. 1 Geometry of a radar illuminating an A surface according to the incidence angle  $\theta$  at the distance  $h$ .

The scattering cross section of the surface A is defined as  $4\pi$  times the ratio of the radiant intensity  $I_S$  and the incidental strength  $\phi_i$  on the surface, as [12] :

$$\sigma = 4\pi * \left( \frac{I_S}{\phi_i} \right) A \cos \theta \quad (1)$$

Where :

A : The illuminated surface.

$\theta$  : The incidence angle.

The relation between the strength transmitted by the radar  $P_T$  and the strength received  $P$  is given by the equation [3] :

$$P = \frac{P_T G}{4\pi h^2} * \frac{\sigma}{4\pi} * \frac{A_e}{h^2} \quad (2)$$

Where :

G : The gain of the antenna ;

$A_e$  : The efficient surface of the antenna ;

h : The distance.

- The first term of the Eq.2 represents the intensity of the incidental wave along of the distance satellite-level of the sea.
- The second term is the intensity produced in the direction of the radar by the diffusion of infinitesimal target of cross sectional surface  $\sigma$ .
- The last term represents the solid angle of the efficient surface  $A_e$  of the antenna.

If targets are distributed on a surface A, the scatter is described by the scattering cross section per unit surface  $\sigma_0$  defined by [12] :

$$\sigma = \int_A \sigma_0 dA \quad (3)$$

Where :

$\sigma_0$  : backscatter coefficient defined per unit of surface.

So a Lambert surface has a cross section varying with the cosine of the impact angle.

The problem of the scattering intensity becomes a calculating  $\sigma_0$  from the scattering surface known.

### 2.1.2. Specular Points Theory

Mathematically, the approach to calculate  $\sigma_0$  based on facets, is called approximation of the tangent plan. Two general methods to solve the problem can be used [12].

If the solution is found from Maxwell equations, we talk about a physical optics approach.

If we consider waves like a set of rays and then we calculate the diffusion of these rays, we talk about geometric optics.

In the setting of the physical optics, a facet is approached by an elliptic paraboloid of curvature radius  $r_1$  in the plan (X,Z) and  $r_2$  in the plan (Y,Z). We calculate the diffusion of every paraboloid and then, we add these diffusions on the illuminated surface using the probability of slopes distribution of the surface.

For a radar oriented in the direction (OX) we get [3]:

$$\sigma_0 = |\rho(0)|^2 \sec^4(\theta) * P(\tan\theta, 0) \quad (4)$$

Where :

$\rho(0)$  : The Fresnel coefficient with zero incidence, it is equal to 0.785 for a frequency of 13 GHz ;

$P(\tan\theta, 0)$  : The joint probability of the  $\zeta_x$  slopes in the X direction and  $\zeta_y$  in the Y direction, as :

$$\zeta_x = d\zeta/dx \quad \text{and} \quad \zeta_y = d\zeta/dy$$

With a good approximation, the slope distribution can be considered as Gaussian and isotropic in the direction of winds. We get then [3] :

$$\sigma_0(\theta) = \frac{\rho(0)^2}{2S^2} \sec^4(\theta) \exp\left(\frac{-\tan^2 \theta}{2S^2}\right) \quad (5)$$

S is the mean quadratic slope of the surface where [12] :

$$S^2 = \overline{\zeta^2} \quad (6)$$

### 3. SSB Processing

It exists several models which permit to calculate the SSB, we find the physical models based on using the electromagnetic theory and others as an empiric models, calibrated from an analysis of the altimeter data. Actually, the models currently used are the empiric models, which suppose that the SSB can be assigned as a parametric form [6] :

$$SSB = f(X, \Psi) \quad (7)$$

Where :

f : Priors indicated function ;

X : Relative parameters of the state of the sea ;

$\Psi$  : Vector of parameters.

Generally, the function f is formed of simple polynomial, and the components of X are always chosen among the some relative parameters to the sea state that can be measured directly by the altimeter, notably the significant wave height (SWH), the wind speed (U), and the backscatter coefficient ( $\sigma_0$ ).

A process of adjustment by the least square method is used to estimate the vector  $\Psi$  while minimizing the measures deviation of the sea surface height (SSH) on the crossover points [6].

### 3.1 Parametric Model BM4

The parametric models for the determination of the SSB are chosen as a simple linear hierarchy that links the SSB with the significant wave height SWH and the wind speed  $U$  [5].

Currently the best model for the determination of the sea state bias for Topex / Poseidon is the four parameters model BM4.

Given by [7] :

$$SSB = SWH(a_1 + a_2U + a_3U^2 + a_4SWH) \quad (8)$$

**Table 1.** The estimated parameters for the determination of the SSB.

Altimeter	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Topex	-0.0203	-0.00369	0.000149	0.00265
Poseidon-1	-0.0539	-0.00225	0.000097	0.00183

### 3.2 Significant Wave Height

The waves emitted by the satellite are propagated spherically and intersect the surface of the sea, which is a flat surface, as the reflection of these waves are not being instantaneous, the altimeter will receive an extended echo. The delay due to the height of waves justifies the form of the echo received by the altimeter.

The significant wave height is calculated by [11] :

$$SWH = 2C\sigma_S \quad (9)$$

**Table 2.** Polynomial coefficients for the determination of the wind speed.

$\sigma'_0$ limits	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
$\sigma'_0 < 10.8$	51.045307042	-10.982804379	1.895708416	-0.174827728	0.005438225
$10.8 \leq \sigma'_0 \leq 19.6$	317.474299469	-73.507895088	6.411978035	-0.248668296	0.003607894
$\sigma'_0 > 19.6$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

## 4. Processing and analysis

### 4.1 Data Processing

To validate our software, we used the 085 pass number of the cycles (393,394,395) for Topex / Poseidon and the 085 pass number of the cycles (052,053,054) for Jason.

With :

$$\sigma_S = \sqrt{\sigma_C^2 - \sigma_P^2} \quad (10)$$

Where :

$C$  : The celerity.

$\sigma_C$  : The delay caused by the stain in sea expressed in seconds ;

$\sigma_P$  : The length of the echo expressed in seconds.

$\sigma_P = 0.513 r_t$  is a sufficient approximation for  $\sigma_P$  [9].  $r_t$  is the temporal resolution, as the time interval between two samples of the wave form shape of  $B$  length ; it is equal to  $1/B$  [1].

For Poseidon-2 altimeter ( $B = 320$  MHz), the value of  $r_t$  is 3.125 ns .

### 3.3 Wind Speed

The only process which permits to determine the wind speed is the signal analysis received at the satellite, based on the physical characterization of the energy of the wave. Indeed, when the wind at the sea level surface, is stronger, the reflexive signal will be more dispersed, what indicates that its energy will be weaker.

The best adapted model is the operational model proposed for altimeters of the Topex / Poseidon satellite ; this model is gotten by least squares polynomial adjustment of order 5 ; given by [7].

$$U = c_0 = c_1\sigma'_0 + c_2\sigma'^2_0 + c_3\sigma'^3_0 + c_4\sigma'^4_0 \quad (11)$$

Where :

$\sigma'_0$  is the backscatter coefficient, is equal to  $\sigma_0$  for the Geosat and ERS-1 altimeter.

For the Topex / Poseidon altimeter [7] :

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - 0.63 \text{ dBs.}$$

These data are provided on CD by Aviso (CNES) : « Jason-1 and TOPEX/POSEIDON GDR products » (June 5<sup>th</sup> - July 3<sup>rd</sup>, 2003).

The processing of the 085 pass number of the 395 cycle number for Topex / Poseidon satellite and the 085 pass number of the 054 cycle number for Jason-1 gives us the following results :

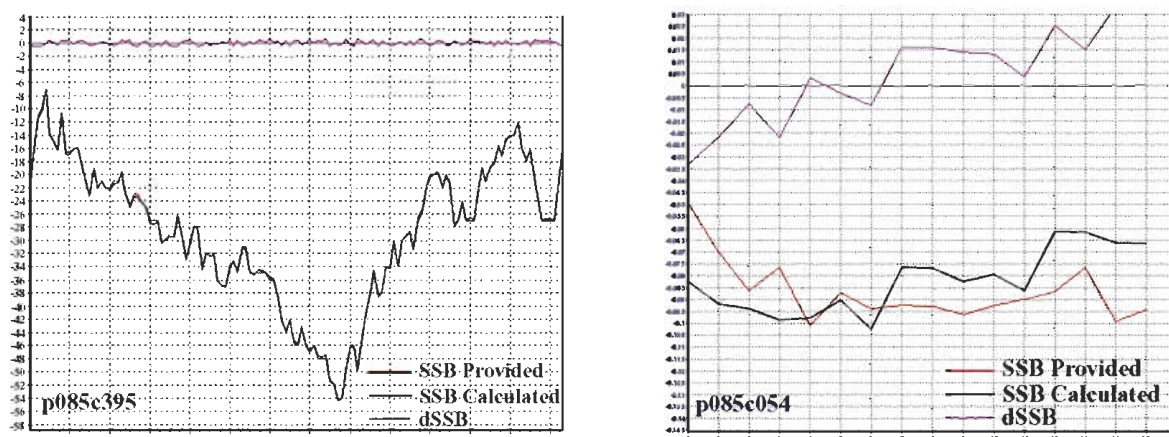


Fig. 2 Difference between SSB provided and SSB calculated.

The results of processing the cycles (393,394,395) for Topex / Poseidon satellite and the cycles

(052,053,054) for Jason-1 satellite are represented in the following table :

Table 3. Means and standard deviation.

Satellite	Cycle	SSB Provided (mm)		SSB Calculated (mm)	
		Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
T/P	Cycle 393	-21.48	0.297	-21.496	0.297
	Cycle 394	-11.71	2.3143E-05	-11.678	2.3571E-05
	Cycle 395	-22.40	6.3714E-05	-22.398	6.3429E-05
Jason-1	Cycle 052	-73.40	0.148	-82.31	0.360
	Cycle 053	-76.52	0.164	-89.38	0.297
	Cycle 054	-86.39	0.163	-96.89	0.350

#### 4.2 Results Analysis

The graph which represents the sea state bias calculated from Topex / Poseidon satellite data is similar to the graph of the SSB provided by AVISO. This convergence is due to the simplicity of the processing model used (BM4). The difference of the standard deviation and means which is a few tenths of millimetres is due to the approximations for processing data provided by AVISO.

Besides, the graph that represents the sea state bias calculated from Jason-1 satellite is shifted to the graph that represents the SSB provided by AVISO, notably when we compare means and standard deviation that present some more important differences (some centimetres).

This divergence is due to the algorithms used which are not necessarily the same and to the problem of defected values.

#### 5. The mean sea level determination

The determination of the altimetric geoid in the western Mediterranean is done from the

Topex / Poseidon data corrected of the different effects used in the precedent model for the correction of the sea state bias effect.

The used data (*GDR-M* passfiles) are those well stocked by Aviso on CD : « *Jason-1 and TOPEX / POSEIDON GDR products* » from April 4<sup>th</sup>, 2002 to the March 28<sup>th</sup>, 2004, what corresponds to 72 cycles.

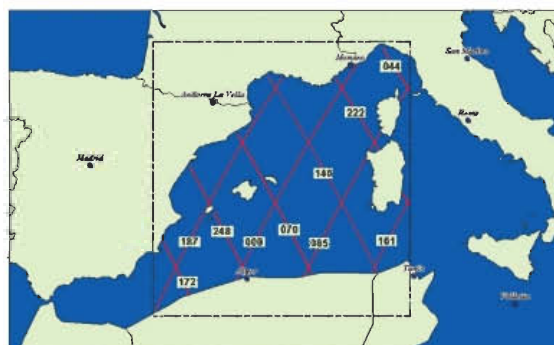


Fig. 3 Traces of the Topex / Poseidon satellite covering the processing zone.

### 5.1 Deviation Correction on the Crossover Points

For the crossover points coincides two different measures of the sea level. The deviation between these two measures must be corrected and must be distributed on the whole of the two profile measures. The used method for the distribution of this deviation on altimetric profiles is the polynomial interpolation method, whose principle is as following [10] :

Let  $N$  a crossover point of one same altimetric profile  $y_1 = f(x_1), y_2 = f(x_2), \dots, y_N = f(x_N)$  where the  $y_i$  represent corrections to bring to the crossover points  $x_i$  and the longitudes of the crossover points. The orbital correction for a point of the longitude profile will be expressed then by the Lagrange classic formula as follows :

$$y = \frac{(x-x_2)(x-x_3)\dots(x-x_N)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)\dots(x_1-x_N)}y_1 + \frac{(x-x_1)(x-x_3)\dots(x-x_N)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)\dots(x_2-x_N)}y_2 + \dots + \frac{(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_{N-1})}{(x_N-x_1)(x_N-x_2)\dots(x_N-x_{N-1})}y_N$$

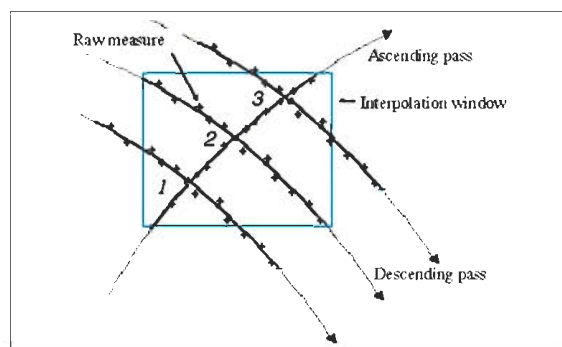


Fig. 4 Crossover point between ascending pass and descending pass.

### 5.2 Model of Processing the Altimetric Geoid

The formulation of the processing model of the altimetric geoid height ( $N$ ) is given as follows [12] :

$$N = Hp\_Sat - (H\_Alt + \Sigma) \quad (12)$$

Where :

$Hp\_Sat$  : Altitude of satellite above the reference ellipsoid ;

$H\_Alt$  : Altimeter range ;

$\Sigma$  : Whole corrections to be added to the altimeter range, given by [12].

$$\Sigma = CG\_Rang\_Corr + Dry\_Corr + Wet\_Corr + Iono\_Corr\_K1 - SSB + INV\_Bar + H\_Eot\_Fes + H\_Set + H\_Pol \quad (13)$$

Where :

$CG\_Range\_Corr$  : Correction to the altimeter tracker range for gravity centre movement ;

$Dry\_Corr$  : Dry tropospheric correction ;

$Wet\_Corr$  : Wet tropospheric correction ;

$Iono\_Corr$  : Ionospheric correction ;

$SSB$  : Sea state bias ;

$INV\_Bar$  : Inverse barometer correction for altimeter measurement ;

$H\_Eot\_FES$  : Height of the elastic ocean tide at the measurement point computed from FES 95.2 model;

$H\_Set$  : Height of the solid earth tide at the measurement point ;

$H\_Pol$  : Geocentric pole tide height at the measurement point.

### 5.3 Results

The nappage of the mean profiles corrected of the orbit error by a regular grid ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) (in longitude and in latitude) permits to have a mean sea surface.

The used method is the linear interpolation (triangulation of DELAUNAY) ; who was used to exclude the regions that have not been observed by altimetry [8].

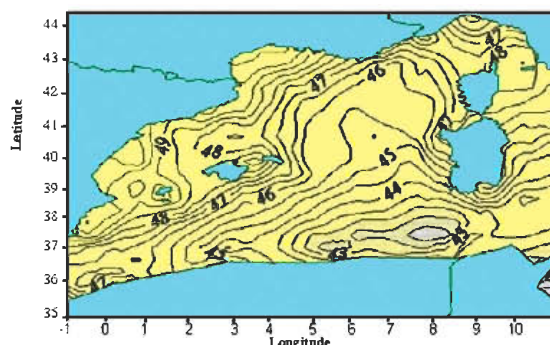


Fig. 5 Altimetric geoid height determined from Topex / Poseidon.

### 6. Conclusion and Perspectives

The  $BM4$  parametric model, which is a function of the significant wave height and the wind speed on the sea surface, is very effective to estimate the sea state bias effect on the altimetric measurements from data of the Topex / Poseidon satellite. The correction of altimetric data of the Topex / Poseidon satellite on a period of two years, from the sea state bias effect using the  $BM4$  model and also the other geophysical effects and orbit errors, permitted us to determine with a good accuracy the mean sea level of the western Mediterranean.

Besides, the BM4 model gave us less satisfactory results for the Jason-1 satellite, then we have to use other models (no parametric models) to improve these results.

### Références

- Amarouche L., et al. A New Estimator of the Sea State Bias using a Three Frequency Radar Altimeter, IGARSS '01, Proceedings, 2001.
- AVISO and PODAAC User Handbook, 2003. IGDR and GDR Jason Products.
- Barrick A. and Lipa. B.J., Analysis and interpretation of Altimeter Sea echo, Satellite Oceanic, Remote Sensing, Advances in Geophysics, Academic Press Inc, New-York, USA, 1985.
- Bonnefond P., Méthode Géométrique de Trajectographie par Arcs Courts Application à l'Analyse des Mesures Altimétriques des Satellites Topex / Poseidon et ERS1 en Méditerranée, Thèse de Doctorat, Observatoire de Paris, 1994.
- Bulusu S., A study of Indian ocean circulation using satellite observations and model simulations, Department of Oceanography Faculty of Science, University of Southampton, India, september, 1998.
- Gaspar P., et al. Analyse and estimation of the Geosat sea stat bias, Report prepared for HUGHES STX CORPORATION, Septembre, 1996.

- Gaspar P., et al. Improving non parametric estimation of the sea state bias in radar altimetry measurement of sea level. Prepared for *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, September 24<sup>th</sup>, 2001.
- Kahlouche S. and Rami A., Topex Altimetric Mean Sea Level and Gravimetric Geoid in the North of Algeria, International Association of Geodesy Symposia, Vol. 126, 73 82, ISSN 0939-9585, Springer Verlag, 2003.
- MacArthur J., *A radar altimeter design description*, Rep. SDO-5232, Appl. Phys. Lab., Johns Hopkins Univ., Baltimore, Md. – 1978.
- Rami A., et al. Détermination du Niveau Moyen Altimétrique de la Méditerranée Occidentale à partir des Données du Satellite JASON-1, *Algerian Journal Of Technology*, 449 458, ISSN 1111-357X, An International Publication of Engineering Science, 2005.
- Rummel R., 1993. Satellite altimetry in geodesy and oceanography, Lecture Notes in Earth Sciences, vol. 50, Springer-Verlag, 453 466, 1993.
- Stewart R.H., *Methods of satellite oceanography*, University of California Press - ISBN 0 - 520 - 04226 - 3, 1985.

# Calculs topométriques et logiciels 3D

Par Claude Millon

## 1. Introduction

Les calculs topométriques ont toujours tenu une place à part dans les activités des topographes. La première place pour certains, pour qui c'était une coquetterie de ne jamais « sécher » sur un problème, quitte à passer trop de temps sur sa résolution, et de perdre de vue que dans la pratique quotidienne seule la bonne solution compte, qu'elle soit élégante ou pas. Ceux qui refusaient d'avouer cette coquetterie rencontraient un jour ou l'autre un échec qui, au contraire des satisfactions d'amour propre des premiers, leur faisait beaucoup de peine.

Tout bien examiné, toutes les professions ont une discipline, dont la pratique correcte et rapide, semble être une part importante, quoique secrète, qui justifie leur qualification professionnelle.

Puis l'informatique s'est imposée dans toutes les disciplines, et les choses ont changé, le médecin qui connaissait son « Vidal » par cœur, trouve instantanément le produit adéquat sur son écran, le notaire, si friand jadis des problèmes juridiques épineux, dispose, « en ligne », de toute la jurisprudence. Toutefois, il est resté en ces domaines des jardins plus ou moins secrets dans lesquels chacun cultive ses petits programmes personnels.

Pour ce qui concerne la topométrie comment pourrait-il en être autrement ?

Il semble, en effet, que tous les logiciels du commerce ne font que reprendre un ensemble de recettes, certes fort honorables, mais qui auraient pu être enrichies.

Il est vrai qu'en ce domaine notre enquête a bien pu ne pas être exhaustive, que ce, et ceux, qu'on aurait oubliés nous pardonnent !

Donnons toutefois un exemple qui nous semble incontestable : Si, dans tous les logiciels du commerce on trouve, bien entendu, un module de calcul du relèvement plan simple sur trois points, aucun de ceux dont la documentation nous est parvenue ne propose de module de calcul du relèvement multiple. Il faut donc que le praticien ait établi un programme « maison », cas, notamment, de l'IGN pour ses travaux spéciaux, ou qu'il se plie aux contraintes du calcul manuel ou, enfin, ce qui est hélas plus courant, qu'il renonce à cette opération faute de pouvoir la calculer.

Dans ce dernier cas il sera mécontent de lui, même s'il ne se l'avoue pas..

Notre objectif est :

- De rappeler les quelques « nouveautés » qu'on n'a pas trouvées dans les logiciels du commerce, avec les réserves concernant l'étendue de notre enquête.

- De montrer l'intérêt qu'il y a, pour les opérations à courte portée, à ne plus travailler dans un référentiel 2D+1, obligatoire pour les opérations à longue distance en raison de fantaisies de la réfraction, mais de passer directement aux calculs en 3D.

Sur ce dernier point, il semble qu'un enseignement donné à l'E S G T, et peut être celui des autres écoles, ait comblé cette lacune. Toutefois, aucun menu d'un logiciel du commerce ne fait mention de ces méthodes qui sont, comme on le montrera, facilement accessibles à tous. De plus, tout le monde n'a pas eu le privilège de suivre ces cours.

Il est également nécessaire de préciser que tous les logiciels du commerce semblent « descendre » d'un ancêtre commun : le logiciel COGO, d'IBM, apparu dans les années 1960-1970. La diversification qui s'est faite tient à la variété des éditeurs de logiciels (mensura...etc) et des utilisateurs de topographie qui ont tous un logiciel propre qui s'impose à leurs fournisseurs : E D F-G D F, SETRA...etc, surtout en raison de la présence d'un volet graphique pour présenter les plans.

## 2. Généralités

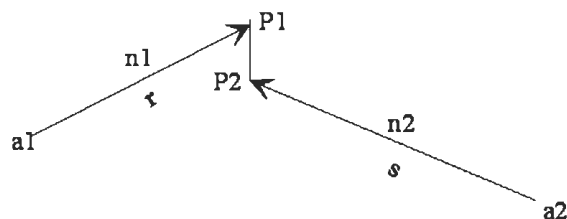
Les problèmes que les calculs topométriques ont pour vocation essentielle de résoudre sont les suivants :

- Calculs des levés de terrain.

- Calculs des implantations.

Généralement, il est entendu que ces opérations sont à courtes distances. On peut donc mesurer valablement les distances zénithales Z. Ce qui fait qu'on a intérêt à travailler dans un espace 3D et non 2D+1 comme paraissent le faire les logiciels du commerce. Il existe, de plus, quelques petits problèmes préliminaires à régler concernant l'écriture du calcul vectoriel :

Un vecteur est être mathématique particulier, c'est une droite dans un espace de dimensions "n" quelconque.



Il a à la fois une longueur, son module, une direction et on dit aussi un sens, mais cette notion nous paraît déjà comprise dans la direction. On représente habituellement un vecteur par une flèche et on le note généralement par une lettre minuscule **grasse** surmontée d'une flèche  $\vec{a}$  quand il est bien nécessaire d'indiquer que c'est un vecteur, autrement on le note **a**, quand rien ne s'y oppose, par une simple lettre minuscule grasse. Un vecteur de même module et de sens opposé se notera  $-\vec{a}$  et  $\vec{a}$ .

On peut réaliser des opérations algébriques sur les vecteurs telles que l'addition, la soustraction et les multiplications, ces dernières ont des définitions appropriées telles qu'on a inventé des notations particulières, un gros point • pour le produit scalaire, et  $\wedge$  ou  $\times$  dans les textes Américains pour le produit vectoriel, les règles étant différentes de celles appliquées en arithmétique courante, la multiplication ordinaire (petit point), sur le corps des réels, par exemple. Les opérations algébriques entre des vecteurs et des scalaires suivent les règles habituelles de l'arithmétique.

Tout vecteur peut être décomposé en autant d'éléments qu'il y a de dimensions dans l'espace utilisé : 2, 3, ..., n, suivant des directions arbitraires imposées. Ce sont les composantes du vecteur, les directions forment la base. On ne traitera que des bases orthogonales ou cartésiennes,  $i, j, k$ , ou  $X, Y, Z$ , perdant ainsi un caractère de généralité. On devra garder dans l'esprit que pour certains problèmes on peut recourir à des bases quelconques. Dans les situations que nous avons retenues, un vecteur peut s'écrire, dans  $R^3$ , de la manière

suivante :  $\vec{a} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ , mêmes règles pour toutes les

autres dimensions, dans ces notations  $x, y, z$  sont des scalaires, des vecteurs unitaires formant la base, il donnent les directions de  $x, y, z$  qui, par conséquent, par le produit avec des vecteurs unitaires deviennent aussi des vecteurs et peuvent ainsi être additionnés.

Il s'agit de référencer un vecteur dans une base donnée (un système de coordonnées), afin de déterminer ses composantes (ses coordonnées) dans cette base.

Un vecteur a pour origine un pôle, il a une longueur, un sens et une direction.

**Origine** on peut confondre un vecteur et les coordonnées de position d'un point.

$\vec{a} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ . Alors son pôle est à l'origine des coordon-

nées. Dans la majorité des cas des problèmes de géométrie on recherchera une origine qui simplifie le problème posé, en effectuant une translation, qui devra rester licite. La plupart des propriétés géométriques intrinsèques restent invariantes pour une translation.

**Longueur** : C'est évidemment  $\|\vec{a}\|$ , c'est-à-dire  $\|\vec{a}\| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}$  ou norme ou plutôt **module**, par simple application du théorème de Pythagore, bien qu'une nouvelle définition de la norme soit venue jeter le doute : Norme ( $\vec{a}$ ) =  $a_1^2 + a_2^2 + a_3^2$ , on n'en fera pas usage.

**Sens et direction** : On a :

$$\cos(\alpha) = \frac{a_1}{\|\vec{a}\|}, \quad \cos(\beta) = \frac{a_2}{\|\vec{a}\|}, \quad \cos(\gamma) = \frac{a_3}{\|\vec{a}\|},$$

ce sont les cosinus directeurs du vecteur

$$\cos^2(\alpha) + \cos^2(\beta) + \cos^2(\gamma) = \frac{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}{\|\vec{a}\|^2} = 1,$$

les trois cosinus directeurs ne sont pas indépendants. Deux suffisent pour indiquer une direction. Exemple : un azimut  $Az$  et une distance zénithale  $Z$ , le troisième est alors *conclu*. Voir figure

Exemple :

$$\cos(\alpha) = \frac{a_1}{\|\vec{a}\|} = \sin(Az) \cdot \sin(Z), \quad \cos(\beta) = \frac{a_2}{\|\vec{a}\|} = \cos(Az) \cdot \sin(Z), \quad \cos(\gamma) = \frac{a_3}{\|\vec{a}\|} = \cos(Z),$$

$$a_1 = \|\vec{a}\| \cdot \sin(Az) \cdot \sin(Z), \quad a_2 = \|\vec{a}\| \cdot \cos(Az) \cdot \sin(Z), \quad a_3 = \|\vec{a}\| \cdot \cos(Z),$$

$Az = \text{Azimut ou Gisement}, Z = \text{dist}^{\text{c}} \text{Zénithale}$

### 3. Les opérations topométriques négligées

Ce ne sont pas, à proprement parler des «nouveau-tés» bien nouvelles mais des opérations bien utiles qu'il est étonnant de ne pas trouver dans les logiciels du commerce. On commencera par la plus utile de toutes :

#### 3.1 l'Intersection 3D

En effet, il arrive fréquemment que l'angle *horizontal* d'une intersection soit trop faible pour donner un résultat valable, alors que l'angle d'intersection, dans le plan des visées, est tout à fait correct, c'est le cas de visées quasi verticales.

Dans ce cas l'utilisation de l'intersection 3D s'impose :



De deux points connus 1 et 2 par leurs coordonnées  $a_1$  et  $a_2$  on a visé un point commun P et mesuré les azimuts et les distances zénithales des directions  $a_1 \rightarrow P$  et  $a_2 \rightarrow P$

On forme le polygone  $(\bar{a}_2 - \bar{a}_1) + r \cdot \bar{n}_1 + P_1 P_2 - s \cdot \bar{n}_2 = 0$

On fait une prémultiplication scalaire de tous les termes par  $n_1$  :  $\bar{n}_1 \cdot (\bar{a}_2 - \bar{a}_1) + r + 0 - s \cdot \bar{n}_1 \cdot \bar{n}_2 = 0$ ,

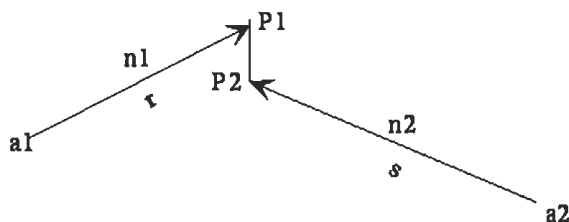
On fait une prémultiplication scalaire par  $n_2$  :

$\bar{n}_2 \cdot (\bar{a}_2 - \bar{a}_1) + r \cdot \bar{n}_1 \cdot \bar{n}_2 - s = 0$  on pose  $\bar{n}_1 \cdot \bar{n}_2 = p$ ,

et on multiplie la seconde relation obtenue par  $p$  :

$p \cdot \bar{n}_2 \cdot (\bar{a}_2 - \bar{a}_1) + p^2 \cdot r - p \cdot s = 0$  dont on retranche :

$\bar{n}_1 \cdot (\bar{a}_2 - \bar{a}_1) + r + 0 - p \cdot s = 0$



$(p \cdot \bar{n}_2 - \bar{n}_1) \cdot (\bar{a}_2 - \bar{a}_1) + (p^2 - 1) \cdot r = 0$ , d'où :

$$r = \frac{(p \cdot \bar{n}_2 - \bar{n}_1) \cdot (\bar{a}_2 - \bar{a}_1)}{1 - p^2}, \quad s = \frac{(p \cdot \bar{n}_1 - \bar{n}_2) \cdot (\bar{a}_2 - \bar{a}_1)}{1 - p^2}$$

$$P_1: \bar{p}_1 = r \cdot \bar{n}_1, \quad P_2: \bar{p}_1 = s \cdot \bar{n}_2, \quad P: \bar{p} = \frac{\bar{p}_1 + \bar{p}_2}{2}$$

C'est simple net et efficace. on calcule aussi l'angle des deux visées pour savoir si l'intersection est bonne soit :  $\cos(\alpha) = p$  si  $\bar{n}_1$  et  $\bar{n}_2$  sont unitaires, enfin on calcule la distance entre les deux visées au point d'intersection P, pour vérifier que l'écart est tolérable :

$$d = \|\bar{p}_1 - \bar{p}_2\|$$

Pourquoi cela n'est pas devenu courant dans les logiciels du commerce ? On l'ignore.

On va simplement décrire quelques autres opérations « manquantes » :

### 3.2 Intersection 3D en référentiel géocentrique

C'est une variante du problème précédent.

Il est possible à partir des stations G P S, qui sont par nature des points stationnés, de déterminer par des opérations traditionnelles, très rapides, des points non stationnables habituels, qui sont des balises naturelles, tels que clochers, châteaux d'eau, antennes, pylônes, pignons de bâtiments etc... lesquels serviront, eux-mêmes, à faire des relèvements à partir d'autres points stationnés.

Il faudra disposer des mesures de distances zénithales mesurées les plus exactes possible, sinon

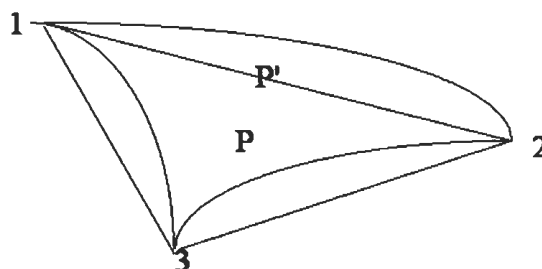
on obtiendra simplement un point qui sera celui de la plus petite distance dans l'espace entre les deux visées ce qui est, toutefois, souvent bien meilleur qu'une intersection 2D.

Pour être ramené au problème précédent il suffit de faire un changement de base pour transformer les mesures locales, faites sur les stations, dans le système général.

Les stations étant connues par leurs trois coordonnées géocentriques X, Y, et Z on peut calculer leurs coordonnées géographiques  $\Lambda$  et  $\Phi$  mais, attention, il s'agit des longitudes et latitudes des points ( $h = 0$ ) et non de leurs projections sur un référentiel éloigné ( $\lambda$  et  $\phi$ ). On a abondamment traité de ce sujet [MILL78] [MILL97]. Les mesures locales sont transformées en cosinus directeurs locaux (voir exemple plus haut) car c'est le vecteur direction qui est changé de base par une première rotation en  $\Lambda$  autour de l'axe de rotation de la terre suivi d'une seconde rotation en  $\Phi$ , le résultat est :

$$\begin{aligned} a_x &= -a_1 \cdot \sin(\Lambda) - a_2 \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(\Lambda) + a_3 \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\Lambda) \\ a_y &= -a_1 \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(\Lambda) - a_2 \cdot \sin(\Phi) \cdot \sin(\Lambda) + a_3 \cdot \cos(\Phi) \cdot \sin(\Lambda) \\ a_z &= a_2 \cdot \cos(\Phi) + a_3 \cdot \sin(\Phi) \end{aligned}$$

### 3.3 Relèvements 3D



Les relèvements 3D bien que relevant de la même astuce de calcul peuvent permettre soit :

- Calculer un relèvement dans le système géocentrique de G P S ou local, par exemple sur des amers intersectés suivant la rubrique qui précède immédiatement. L'intérêt est d'éliminer toutes les corrections de dV ou d'échelle qui gênent les calculs en projection plane.
- Calculer un relèvement dans un système local avec détermination rationnelle compensée de l'altitude. Comme les calculs du relèvement barycentrique sont basés sur la détermination d'un centre de gravité des coordonnées pondérées de trois points, celui-ci se trouve dans le plan des trois points voir figure ci-dessus.

On peut calculer ce point dans les trois coordonnées, même s'ils ne sont pas dans un plan horizontal. Ce qui fournit un point approché très voisin du point définitif.

On enchaîne ce premier stade par un calcul définitif linéaire, puisqu'on a un point approché qui permet de linéariser les relations. En effet, le calcul de relèvement 3D n'est pas linéaire et doit, par conséquent, être conduit en deux étapes.

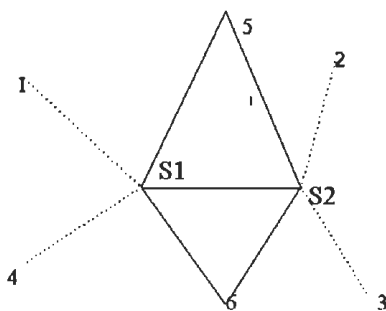
Dans le premier cas les inconnues sont :

$X, Y, Z, Az_0, \Lambda, \Phi$ , donc pour six mesures il n'y a aucun degré de liberté. Dans le second cas :

$x, y, z, G_0$  il y a donc deux degrés de liberté.

### 3.3 Le relèvement multiple 2D

Bien que le principe de ce type de relèvement soit connu depuis plus d'un demi-siècle il est fréquemment ignoré par ce qu'on croit que la distance entre les deux stations doit être mesurée ce qui est inutile, sauf pour s'assurer d'une redondance. De deux stations S1 et S2 inconnues on observe quatre points connus: 1, 2, 3, 4. La distance S1->S2 est inconnue. Cette opération topométrique permet de calculer les coordonnées 2D,  $x$ , et  $y$  des deux points inconnus S1 et S2. Si un point connu est visible des deux stations S1 et S2 il est possible de se relever sur seulement trois points, et même deux si deux points 5 et 6 sur la figure sont visibles des deux stations inconnues S1 et S2. Cette dernière opération est très utile pour densifier une zone dans laquelle on ne connaît que très peu de points.



### 3.4 Le relèvement 3D sur deux points

Il s'agit d'une récente proposition d'une opération topométrique méconnue [MILL96]. En effet il est possible de relever un point inconnu sur deux points connus en mesurant l'angle sous lequel sont vus deux points connus pourvu qu'on mesure simultanément les distances zénithales sous lesquelles sont observés ces deux points. Un premier lieu est un cylindre d'axe vertical ayant le segment capable pour section droite, deux autres lieux sont des cônes, d'axe vertical, centrés sur les points connus, leurs

intersections sur le cylindre développé sont deux arcs de demi sinusoides.

La résolution d'une classique équation trigonométrique mène au résultat cherché.

Toutefois, les précisions sont très variables selon les configurations, et son usage demande des précautions exceptionnelles dans leur choix ; en effet on intersecte sur un cylindre d'axe vertical deux branches de demi sinusoides qui doivent se recouper sous un angle pas trop aigu. Les meilleurs résultats sont obtenus pour un angle horizontal de relèvement le plus voisin de  $\pi$ , ce qui est d'ailleurs normal pour un relèvement, et les distances zénithales doivent permettre un recoupement satisfaisant, le plus voisin possible de  $\frac{\pi}{2}$ .

## 4. Les implantations

C'est le second volet des calculs topométriques, mais aussi le plus vaste, car pratiquement sans autres limites que toutes les formes que les clients veulent nous faire dessiner dans l'espace 3D.

Précisément les implantations traditionnelles sont très orientées 2D+1. Pour donner un exemple concret, on sait très bien planter un arc de cercle dans le plan horizontal, mais pas un cercle dans n'importe quel plan ; croyant planter un arc de cercle en 3D on plante, en fait, un arc d'hélice, ce qui n'est pas du tout la même chose (exemple au CERN le « cercle » est un vrai cercle). Les raccordements courbes 3D de deux droites quelconques ne sont généralement pas traités sauf en 2D+1. Il en résulte une faiblesse qui éloigne les praticiens des implantations de caractère industriel qui sont exclusivement du domaine de la 3D.

Les outils qui manquent sont le calcul vectoriel, et l'algèbre des quaternions pour les rotation quelconques 3D.

## 5. Le calcul vectoriel

Depuis 1950, année charnière, le calcul vectoriel avait remplacé, dans l'enseignement supérieur, la géométrie descriptive de grand papa, seule solution, avant cette date, pour résoudre graphiquement des problèmes en 3D.

Les anticipations sur les possibilités du calcul électronique devaient en être la cause, car, à la main, ou à la règle à calcul, ou encore à l'aide des logarithmes, le calcul vectoriel représentait un énorme pensum. Notons, toutefois, que les dimensions des pièces de la tour Eiffel avaient été calculées à l'aide des logarithmes, mais sans le calcul vectoriel.

Sa percée récente s'est concrétisée, non sans grincements de dents, par un problème en 3D à l'épreuve de mathématique du baccalauréat de 2003 !

A l'aide d'un ordinateur personnel très modeste il est possible d'étendre les solutions qu'apporte la topométrie au domaine 3D.

C'est un cas d'école de créer une classe de vecteurs avec des méthodes telles que l'addition, la multiplication scalaire et vectorielle.

Pour représenter les figures on adoptera leurs équations sous une forme

$$x = f(t),$$

paramétrique :  $\vec{x} = \vec{f}(t) = y = g(t)$ , par exemple pour  $z = h(t)$

représenter une demi droite on adoptera la forme :

$$x = x_a + t \cdot \sin(G) \cdot \sin(Z),$$

$\vec{x} = \vec{a} + t \cdot \vec{n} = y = y_a + t \cdot \cos(G) \cdot \sin(Z)$ , Ce qui représente

$$z = z_a + t \cdot \cos(Z)$$

concrètement, une station de coordonnées

$\vec{x} = \vec{a} = \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix}$  et une visée de gisement G et de

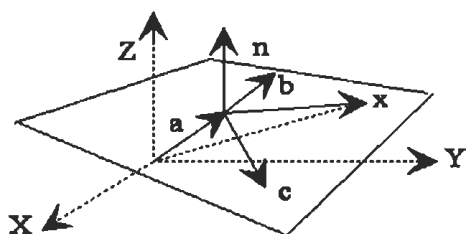
$$\sin(G) \cdot \sin(Z),$$

distance zénithale Z :  $\vec{n} = \cos(G) \cdot \sin(Z)$ , t est la distance

du point courant à la station, soit deux vecteurs :  $\vec{a}$  et  $\vec{n}$  pour écrire l'équation d'une demi droite.

Pour un plan c'est encore plus simple :  $\vec{n} \cdot \vec{x} = d$ ,  $\vec{n}$  est la normale au plan, soit un vecteur n et un scalaire d, cette dernière forme est concise mais non paramétrique. L'équation paramétrique d'un plan dépend de deux paramètres u, et v :

### 5.1 Equation paramétrique d'un plan



II/ Plan passant par un point A de coordonnées a et comprenant deux vecteurs b et c issus de a

$\vec{x} = \vec{a} + u \cdot \vec{b} + v \cdot \vec{c}$ , les paramètres sont les scalaires u

et v. Soit :  $x = a_1 + u \cdot b_1 + v \cdot c_1$ ,

$y = a_2 + u \cdot b_2 + v \cdot c_2$ , voir la figure, la multi-

$z = a_3 + u \cdot b_3 + v \cdot c_3$

plication scalaire par  $\vec{n} = \vec{b} \wedge \vec{c}$  donne :

$\vec{n} \cdot \vec{x} = \vec{n} \cdot \vec{a}$ , soit  $a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z = d$ ,  $\vec{n} \cdot \vec{a} = d$

On est ramené à la première équation proposée.

II/ Plan passant par trois points, non colinéaires P1, P2, P3, de coordonnées  $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3$  étant le point de base qui peut être quelconque :

$\vec{x} = \vec{p}_1 + u \cdot (\vec{p}_2 - \vec{p}_1) + v \cdot (\vec{p}_3 - \vec{p}_1)$ ,  $(\vec{p}_2 - \vec{p}_1)$  n'est pas un vecteur indépendant des deux autres, les paramètres sont encore u et v. En décomposant on a :

$x = x_1 + u \cdot (x_2 - x_1) + v \cdot (x_3 - x_1)$ ,

$y = y_1 + u \cdot (y_2 - y_1) + v \cdot (y_3 - y_1)$ , on peut trouver

$z = z_1 + u \cdot (z_2 - z_1) + v \cdot (z_3 - z_1)$

une autre forme :  $\vec{x} = (1 - u - v) \cdot \vec{p}_1 + u \cdot \vec{p}_2 + v \cdot \vec{p}_3$ , on peut trouver une ressemblance avec l'expression

d'un barycentre : Si  $\begin{cases} a = k \cdot (1 - u - v) \\ b = k \cdot u, \\ c = k \cdot v \end{cases}$   $k = a + b + c$

étant un scalaire, on a :

$$\vec{x} = \frac{a \cdot \vec{p}_1 + b \cdot \vec{p}_2 + c \cdot \vec{p}_3}{a + b + c}$$

III/ Trouver l'équation d'un plan passant par trois points de coordonnées connues :  $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3$  Trois vecteurs sont coplanaires si, et seulement si, le triple produit scalaire est nul. Ces trois vecteurs coplanaires sont :  $\vec{p}_1 - \vec{p}_2, \vec{p}_3 - \vec{p}_1, \vec{p} - \vec{p}_1$

avec  $\vec{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ ,  $\vec{p}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$ , etc... qui sont les coordonnées

du point p courant du plan,  $\vec{p}_1$  sert de point de base.

$$(\vec{p} - \vec{p}_1) \cdot (\vec{p}_2 - \vec{p}_1) \wedge (\vec{p}_3 - \vec{p}_1) = 0$$

$$\begin{aligned} & (x - x_1) \cdot ((y_2 - y_1) \cdot (z_3 - z_1) - (y_3 - y_1) \cdot (z_2 - z_1)) \\ & + (y - y_1) \cdot ((z_2 - z_1) \cdot (x_3 - x_1) - (x_2 - x_1) \cdot (z_3 - z_1)) \\ & + (z - z_1) \cdot ((x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1) - (y_2 - y_1) \cdot (x_3 - x_1)) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{ou d et } \begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0$$

$$\begin{aligned} (y_2 - y_1).(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1).(z_2 - z_1) &= a \\ (z_2 - z_1).(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1).(z_3 - z_1) &= b \\ (x_2 - x_1).(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1).(x_3 - x_1) &= c \\ a.x + b.y + c.z &= a.x_1 + b.y_1 + c.z_1 = d \end{aligned}$$

Ces développements ne sont faits que pour permettre leur transcription informatique.

### 5.2 Courbes planes en 3D

Si on reprend l'équation paramétrique du plan  $\vec{x} = \vec{a} + u.\vec{b} + v.\vec{c}$ , que les deux vecteurs du plan  $\vec{b}$  et  $\vec{c}$  soient orthogonaux, et que les paramètres scalaires  $u$  et  $v$  soient les coordonnées de la courbe dans son plan, on transforme une courbe plane dans un plan quelconque d'inclinaison  $i$  en courbe 3D dans le système général. Par exemple, pour un cercle paramétrique, on a :

$$\begin{aligned} & \sin(G) \\ u &= r.\sin(\theta), \quad b = \cos(G), \text{ horizontal} \\ & 0 \\ & \cos(G).\cos(i) \\ v &= r.\cos(\theta), \quad c = \sin(G).\cos(i), \text{ incliné de } i \\ & \sin(i) \end{aligned}$$

d'où

$$\begin{aligned} x &= r.\sin(\theta).\sin(G) + r.\cos(\theta).\cos(G).\cos(i), \\ y &= r.\sin(\theta).\cos(G) + r.\cos(\theta).\sin(G).\cos(i), \\ z &= r.\cos(\theta).\sin(i) \end{aligned}$$

On peut faire que

$\theta$  soit le paramètre du tracé du cercle dans un plan quelconque, pour toute autre courbe on peut aussi choisir la ligne de plus grande pente pour origine de  $\theta$ ,  $G$  est le gisement de la ligne de plus grande pente du plan, et  $i$  son inclinaison. On peut faire la même opération avec n'importe quelle conique mise sous sa forme paramétrique : une ellipse, une parabole, une hyperbole mais également sur des courbes planes, définies par tronçon entre deux points connus telles que les splines de Catmull-Rom qui traitent ainsi le cas général.

### 5.3 Formes primitives

On peut décomposer un objet complexe en formes primitives qui sont, outre le parallélépipède limité par des plans, dont on sait écrire les équations, mais qu'il est plus facile de décrire par les coordonnées de leurs sommets et une matrice de connectivité, des formes simples telles que la sphère, le cylindre et le cône et les formes dérivées de celles-ci l'ellipsoïde, le cylindre et le cône de section droite elliptique etc..

*La sphère* : L'équation implicite est évidemment, pour la sphère centrée sur l'origine :

$$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0 \text{ , alors que son équation}$$

$$x = R.\cos(u).\cos(v)$$

paramétrique est :  $y = R.\sin(u).\cos(v)$  dans les

$$z = R.\sin(v)$$

notations traditionnelles  $u$  a pour origine l'axe des  $x$ , et  $v$  le plan  $xoy$ .

*Le cylindre* : Un cylindre d'axe vertical, centré sur l'origine :  $x^2 + y^2 - R^2 = 0$ ,  $z$  reste quelconque.

$$x = R.\cos(u)$$

équation paramétrique :  $y = R.\sin(u)$  sa normale

$$z = v$$

$$n_1 = \cos(u)$$

sera :  $n_2 = \sin(u)$

$$n_3 = 0$$

Un cylindre d'axe horizontal le long des  $x$  :  $z^2 + y^2 - R^2 = 0$ ,  $x$  quelconque. équation paramé-

$$x = v$$

$$n_1 = 0$$

trique :  $y = R.\cos(u)$  sa normale sera  $n_2 = \cos(u)$  etc..

$$z = R.\sin(u)$$

$$n_3 = \sin(u)$$

*Le cône* : Un cône d'axe vertical, centré sur l'origine a pour équation implicite :

$$x^2 + y^2 - \tan^2\left(\frac{\alpha}{2}\right).z^2 = 0 \text{ , et pour équation para-}$$

métrique:

$$\begin{aligned} x &= \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right).v.\cos(u) & n_1 &= \cos(u) \\ y &= \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right).v.\sin(u) & n_2 &= \sin(u) \\ z &= v & n_3 &= \cos\left(\frac{\pi + \alpha}{2}\right) \end{aligned}$$

$\alpha$  étant l'angle au sommet du cône. Il est facile de déterminer les équations d'un cône d'axe horizontal.

*Changement de base* : les changements de base se font en faisant tourner le solide de  $G$  autour des l'axe des  $z$ , puis de  $i$  autour de l'axe des  $x$  :

$$x' = x.\sin(G) - y.\cos(G),$$

$$y' = x.\cos(i).\cos(G) + y.\cos(i).\sin(G) - z.\sin(i),$$

$$z' = x.\sin(i).\cos(G) + y.\sin(i).\sin(G) + z.\cos(i)$$

on remplace  $x$ ,  $y$ , et  $z$  par leur valeur dans les équations des primitives pour obtenir les équations paramétriques de ces surfaces simples dans le cas général. Noter que dans ce cas il faut remplacer  $x$  par  $x + x_0$ ,  $y$  par  $y + y_0$ ,  $z$  par  $z + z_0$  pour choisir aussi une origine quelconque.

On remarquera que l'axe des x reste dans le plan initial, l'axe des y suit la plus grande pente du plan, et z est incliné de  $i$ . Les intersections de ces surfaces avec des courbes sont assez difficiles à résoudre sous leur forme paramétrique qui ne peut être « inversée ». Pour décrire l'intersection de ces surfaces avec un plan il faut substituer dans l'équation implicite de ce dernier :

$n_1 \cdot x + n_2 \cdot y + n_3 \cdot z = d$ , les valeurs paramétriques des coordonnées  $x', y', z'$  de la surface, on obtient l'équation de la courbe plane d'intersection en fonction des paramètres initiaux  $u$  et  $v$ .

### 5.4 Objets quelconques

On procède généralement par une approximation de la surface par des triangles dont les sommets sont les points de définition de la surface, et on calcule l'intersection d'une droite avec le plan de la facette. Cela est insuffisant pour calculer un point d'intersection qui n'existe pas s'il se trouve en dehors de la facette !

Encore faut-il contrôler qu'il est bien dans la facette, pour cela il faut calculer la distance du point trouvé aux trois segments de droite limitant la facette, et vérifier que ces trois distances sont, simultanément, inférieures aux trois hauteurs du triangle, dans ce cas l'intersection est validée, dans le cas contraire elle est rejetée.

L'intersection d'un plan et d'une facette peut se faire en calculant les intersections des trois segments de droites, limites de la facette, avec le plan, et en ne conservant que les solutions qui se placent entre deux sommets de la facette.

Enfin, les intersections entre facettes se calculent selon les deux méthodes ci-dessus, employées simultanément : les segments de droites d'une facette intersectant le plan de l'autre facette, les solutions ne seront validées que si elles sont à l'intérieur du bord de la facette « intersectante ». Les solutions extérieures à la facette intersectée seront ensuite éliminées.

On ne conservera donc que les intersections intérieures aux deux facettes. Le temps de calcul serait proportionnel à  $n_1 \cdot n_2 \cdot n_1$ , étant le nombre de facettes du premier corps et  $n_2$  celui du second si on ne tenait pas compte de la proximité des facettes. On compare la distance de chaque facette du corps 1 à celles du corps 2, et on élimine celles qui sont trop éloignées l'une de l'autre pour « s'intersecter ». Il s'agit là d'un travail de programmation assez simple. On traite ainsi la majorité des cas pratiques.

### 5.5 Quaternions et rotations 3-D

Les quaternions sont, dans l'espace 3-D, ce que sont les nombres imaginaires dans un espace 2-D. Le problème, qui était un peu plus compliqué qu'en 2-D, a été résolu par Hamilton à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle [MILL92] [MILL93]. Les quaternions sont construits directement à partir des données de la rotation qui sont :

- Un centre de rotation.
- La direction, dans l'espace 3-D, de l'axe de rotation décrite par trois vecteurs unitaires  $n_1, n_2, n_3, \|(n_1, n_2, n_3)^T\| = 1$ . dont seulement deux vecteurs seulement sont indépendants.
- L'angle de rotation  $\omega$ .

On note un quaternion par  $Q = i \cdot q_1 + j \cdot q_2 + k \cdot q_3 + q_4$  seule  $q_4$  est la base réelle, tous les autres termes sont imaginaires. A l'inverse des matrices de rotation, un quaternion se bâtit directement à partir des données de la rotation, on a :

$$q_i = n_i \cdot \sin\left(\frac{\omega}{2}\right); \quad i = 1, 2, 3$$

$$q_4 = \cos\left(\frac{\omega}{2}\right);$$

quelconque des trois composantes imaginaires n'est pas indépendantes des deux autres car :

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \sin\left(\frac{\omega}{2}\right); \quad \text{un quaternion se note comme un}$$

vecteur, mais ce n'est pas  $Q = (i, j, k) \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} + q_4$  ;

mais  $Q = \left( \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}, q_4 \right)$  ; un vecteur, mais un nombre

particulier, avec ses règles d'addition et de multiplication (notée \*), mais c'est aussi un ensemble  $\in$  (...) composé d'un vecteur  $\vec{q}$  et d'un scalaire  $q_4$ . On notera que sa forme informatique est semblable à celle d'un plan, un vecteur, mais non unitaire, associé à un scalaire. Un vecteur ordinaire  $p$  est considéré comme un quaternion particulier sans sa

partie réelle :  $p = \begin{matrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{matrix} + 0$ . Le quaternion  $\hat{Q} = q_4 - \vec{q}$  est le quaternion conjugué de  $Q$ .

Dans le cas particulier qui sera le nôtre  $\hat{Q} = q_4 - \mathbf{q} = \mathbf{Q}^{-1}$  si  $\|\mathbf{Q}\| = 1$  (quaternion unitaire), dans le cas général on a :

$$\mathbf{Q}^{-1} = \frac{\hat{Q}}{\mathbf{Q} \cdot \hat{Q}}, \text{ c'est la règle de normalisation}$$

des quaternions.

A l'aide des quaternions, les rotations d'un vecteur  $\mathbf{p}$ , devenant  $\mathbf{p}'$ , elles se calculent de la manière suivante :  $\mathbf{p}' = \mathbf{q} * \mathbf{p} * \mathbf{q}^{-1}$ , la base  $\mathbf{J}$  tourne dans le sens inverse :

$$\mathbf{J}' = \mathbf{q}^{-1} * \mathbf{J} * \mathbf{q}$$

On fait d'abord  $\mathbf{q} * \bar{\mathbf{p}}$  puis  $(\mathbf{q} * \bar{\mathbf{p}}) * \mathbf{q}^{-1}$ . Le vecteur  $\mathbf{p}'$  est la nouvelle position du vecteur  $\mathbf{p}$  après une rotation d'axe 3-D, absolument quelconque.

Si on écrit ce produit :  $\bar{\mathbf{p}}' = \mathbf{q} * \mathbf{q}^{-1} * \bar{\mathbf{p}}$  étant la valeur de  $\mathbf{q}$  permutée placée alors avant  $\mathbf{p}$ , le produit :

$$\begin{aligned} \mathbf{q} * \mathbf{q}^{-1} &= q_4^2 + \mathbf{q}_i^2 \oplus (-2 \cdot \mathbf{q}_i \cdot q_4) + \hat{\mathbf{q}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i \\ &= 1 \oplus (-2 \cdot \mathbf{q}_i \cdot q_4) + \hat{\mathbf{q}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i \end{aligned}$$

avec  $\mathbf{q}_i$  partie imaginaire de  $\mathbf{q}$ . C'est ainsi qu'on calculera la *matrice de rotation de Rodriguez*.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{11} = q_4^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & r_{12} = 2 \cdot (q_1 \cdot q_2 + q_3 \cdot q_4) & r_{13} = 2 \cdot (q_1 \cdot q_3 - q_2 \cdot q_4) \\ 0 & r_{21} = 2 \cdot (q_1 \cdot q_2 - q_3 \cdot q_4) & r_{22} = q_4^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & r_{23} = 2 \cdot (q_2 \cdot q_3 + q_1 \cdot q_4) \\ 0 & r_{31} = 2 \cdot (q_1 \cdot q_3 + q_2 \cdot q_4) & r_{32} = 2 \cdot (q_2 \cdot q_3 - q_1 \cdot q_4) & r_{33} = q_4^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

On dispose donc de deux méthodes pour calculer des rotations 3-D, le produit d'un quaternion par un vecteur puis par son inverse ou, ce qui est plus connu, la matrice de Rodriguez prémultipliant ce vecteur. La première méthode, la moins connue, est pourtant la plus simple.

### 6. Mise en oeuvre des calculs

Il faut bien se convaincre qu'il est inutile d'entreprendre de tels calculs avec une calculatrice, même programmable. En revanche, la programmation des briques logicielles de base est tout à fait élémentaire : L'addition et le multiplication vectorielle ou scalaire sont dans tous les manuels de débutants, il faut y ajouter le module et la normalisation qui sont les opérations de base auxquelles on songe immédiatement. Il ne faut surtout pas oublier la transformation d'une direction décrite par son gisement et sa distance zénithale en vecteur, et l'opération inverse du vecteur au gisement et à la distance zénithale. De même, pour les quaternions, il faut décrire un quaternion comme une « classe » à quatre éléments, et programmer les « méthodes » qui leur seront

appliquées : normalisation, quaternion conjugué, multiplication, inversion, rotation. Bien que ce soit, sans doute, inutile en raison de la rapidité des processeurs, on peut programmer ces « briques » en assembleur, d'autant que cela a été fait par d'autres depuis bien longtemps !

Il faut, ensuite, s'attaquer aux problèmes de base, tels que la mise en œuvre de ces briques logicielles, en présentant les données et les résultats des calculs sur un tableau dans lequel on peut déplacer à volonté les données et les résultats, qui peuvent devenir eux-mêmes des données pour les calculs suivants. Le premier logiciel d'initiation s'appelle **vect.exe** ou **quaternions.exe**. Outre ce qui a déjà été décrit plus haut pour les vecteurs, il comprend : par exemple le programme calcule les coordonnées d'un point symétrique par rapport à un autre point ou par rapport à une droite ou encore par rapport à un plan. La rotation est calculée autour d'une droite quelconque.

On peut transformer une direction du terrain ou de l'espace en un vecteur nécessairement normalisé : deux paramètres notés *azimut* et *distance zénithale* sont utilisés.

Les rubriques azimut et distance zénithale peuvent être remplacées, terme pour terme, par ascension droite et codéclinaison, longitude et colatitute, dans d'autres applications et dans d'autres référentiels.

Si on sort de la rubrique initiation pour entrer dans la résolution de problèmes plus complexes, qui restent tout de même assez « basiques » on note :

- Droite définie par deux points.
- Plan défini par trois points.
- Droite intersection de deux plans.
- Distance entre deux droites.
- Intersection de deux droites dans le même plan.
- Intersections de deux droites quelconques.
- Bissectrice 3-D de deux vecteurs.
- Bissectrice 3-D de deux plans ( ces deux dernières opérations sont quasiment irréalisables sans le calcul vectoriel ).
- Intersection de trois plans.
- Distance d'un point à un plan .
- Intersection d'une droite et d'un plan.
- Pied de la perpendiculaire d'un point à une droite.
- Pied de la perpendiculaire d'un point à un plan.

Le logiciel correspondant s'appelle **vectoriel.exe**. Les trois logiciels sont documentés dans un mode d'emploi détaillé. Ils offrent, en outre, des jeux de valeurs par défaut pour s'entraîner.

Ces logiciels sont loin de couvrir les besoins de tous les praticiens. Notamment, ils passent sous silence les problèmes de raccordements en courbes et ceux des pénétrations entre solides qui sont beaucoup plus compliqués et qui, à ce titre, seraient trop longs à exposer ici.

## 7. Conclusions

On a répertorié une très modeste partie des moyens qui, à notre sens, pourraient être employés pour enrichir les calculs de topométrie. Si l'intérêt s'en faisait sentir il serait possible de compléter cette énumération.

Ces moyens sont plus ou moins adaptés aux problèmes que chacun va rencontrer, c'est le domaine du topomètre de faire son choix parmi les

moyens qui lui sont offerts. Des logiciels d'essai sont sur mon site [http :perso.wanadoo/claude.million/](http://perso.wanadoo/claude.million/)

## Références

- MILL78 C.M : Tendances actuelles en matière de calcul des canevas de base in X Y Z.  
MILL92 C.M : Les relations de l'algèbre des quaternions GEOTOP n°127(1992).  
MILL93 C. M : Les quaternions corrigés GEOTP n°130 (1993).  
MILL96 C.M : Une opération topométrique méconnue, le relèvement 3D sur deux points, in GEOTOP n°140 (Mars 1996) et résumé dans X Y Z n°67 (Juin 1996).  
MILL97 C.M : L'intersection 3-D in X Y Z n°72 (1997).
-

# Classification Contextuelle d'Images de Télédétection Utilisant la Programmation Génétique

Salim Chitroub

Laboratoire de Traitement des Signaux, Faculté d'Electronique et d'Informatique, U. S. T. H. B.  
B. P. 32, El-Alia, Bab-Ezzouar, 16111, Alger, ALGERIE.  
Fax : (213) (21) 24-71-87, Email: s\_chitroub@hotmail.com

**Résumé :** Une méthode de classification contextuelle d'images de télédétection basée sur le formalisme Markov-Bayes et la programmation génétique est proposée. Le modèle Markovien de l'image pour la classification contextuelle est présenté dans un cadre général facile à utiliser et implémenter. Le formalisme Markov-Bayes permet de reformuler le modèle Markovien de l'image sous forme d'une fonction d'énergie à minimiser. Cette fonction n'est pas convexe et sa minimisation pose le problème d'optimisation combinatoire. Une méthode d'optimisation basée sur la programmation génétique est alors proposée. Les résultats obtenus sur une image réelle de télédétection sont satisfaisants.

## 1. Introduction

La télédétection spatiale, ou l'observation de la Terre depuis l'espace, contribue, dans une large mesure, au suivi et à la compréhension de nombreux processus de l'environnement. Grâce aux images fournies par une large gamme de capteurs embarqués dans les satellites de télédétection civile, cette dernière est devenue une technique de plus en plus utilisée que ce soit pour la gestion de l'environnement, localisation et suivi des ressources naturelles, étude de la diffusion de la maladie ou des parasites des récoltes, localisation de réseaux routiers, identification de failles sismiques, planification de grands projets de construction, etc.. [1]-[3].

La classification d'images de télédétection est une analyse quantitative qui consiste à regrouper, dans une même entité ou classe, tous les pixels ayant la même signature spectrale ou polarimétrique tout en respectant leur localisation spatiale. Le résultat est une image des régions homogènes représentant des classes correspondant aux différents thèmes au sol. Deux catégories de méthodes de classification ont été développées dans la littérature, méthodes de classification ponctuelle et méthodes de classification contextuelle. L'inconvénient de la classification ponctuelle réside dans le fait que le

pixel de l'image est classé en utilisant seulement sa valeur radiométrique sans tenir compte des valeurs des pixels voisins [3]. Le résultat est souvent une image bruitée qui présente l'apparence d'un phénomène communément appelé sel et poivre ("*salt and pepper*" en anglais) nuit à la lisibilité et à l'interprétation de l'image classifiée.

Les méthodes de classification contextuelle se proposent d'être des méthodes plus robustes dans le sens où elles consistent à optimiser les résultats de classification ponctuelle. Ces méthodes reposent sur la notion de l'information contextuelle (spatiale) apportée à un pixel par un voisinage qui lui est approprié, en utilisant des outils mathématiques rigoureux [3]-[9].

En raison de la capacité dont il dispose pour l'incorporation d'information de contexte, le formalisme de la modélisation du contexte spatial par les champs aléatoires de Markov "*Markov Random Fields (MRF)*" est l'outil le plus répandu. Cependant, la classification Bayésienne associée à la modélisation Markovienne d'images présente une fonction d'énergie non-convexe. Le minimum global de cette fonction est la caractéristique de l'image classifiée recherchée. La minimisation de cette fonction pose le problème d'optimisation combinatoire. Pour cela, des méthodes métaheuristiques modernes ont été considérées dans la littérature [9]-[16].

On propose dans cet article une méthode de classification contextuelle d'images de télédétection basée sur le formalisme Markov-Bayes dont la minimisation de la fonction d'énergie déduite est obtenue en utilisant la programmation génétique. La programmation génétique est une branche, mais beaucoup plus puissante, des algorithmes génétiques. La différence principale entre la programmation génétique et les algorithmes génétiques est la représentation de la solution [17]. La programmation génétique fournit une méthode pour créer automatiquement des programmes machines comme solutions de problème posé. La programmation automatique est réalisée en utilisant les principes des opérateurs génétiques.



L'organisation du reste de l'article est donnée comme suit. Le paragraphe 2 est consacré à présenter, dans un cadre général facile à utiliser et implémenter, le modèle Markovien d'image. Le formalisme Markov-Bayes ainsi déduit et la fonction d'énergie correspondante sont détaillés dans ce paragraphe. La méthode d'optimisation basée sur la programmation génétique est donnée dans le paragraphe 3. Les résultats obtenus à l'aide d'une image réelle de télédétection sont donnés et commentés dans le paragraphe 4. On conclut l'article dans le dernier paragraphe.

## 2. Modélisation Markovienne d'Images

Les pixels des images de télédétection ne sont pas indépendants les uns des autres. La classification contextuelle consiste à intégrer, dans le processus de classification, la notion de l'information spatiale apportée à un pixel par un voisinage qui lui est approprié. En raison de la capacité dont il dispose pour l'incorporation d'information de contexte, le formalisme de la modélisation du contexte spatial par les champs aléatoires de Markov "Markov Random Fields (MRF)" est l'outil le plus répandu [6].

### 2.1 Champs aléatoires de Markov

L'utilisation des champs aléatoires de Markov est devenue populaire depuis la publication des résultats de Geman et Geman [18]. En général, on définit le MRF sur les graphes. Soit  $g = (S, \xi)$  un graphe où  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$  est l'ensemble des sommets (sites) et  $\xi$  est l'ensemble des arêtes. Deux points  $s_i$  et  $s_j$  sont voisins s'il existe une arête  $e_{ij} \in \xi$  entre eux. L'ensemble des points qui sont voisins d'un site  $s$  (voisinage de  $s$ ) est noté  $V_s$ . Le système  $V = \{V_s | s \in S\}$  est un système de voisinage pour  $g$  si  $s \notin V_s$  et  $s \in V_r \Leftrightarrow r \in V_s$ . Un sous-ensemble  $C \subseteq S$  est une clique si chaque paire de sites dans  $C$  est voisine. Soit  $\zeta$  note l'ensemble des cliques. A chaque site du graphe, on attribue une étiquette  $\lambda$  appartenant à un ensemble fini des étiquettes  $A$ . Un tel étiquetage est appelé une configuration  $w$  qui a une certaine probabilité  $P(w)$ . La restriction de  $w$  à un sous-ensemble  $T \subset S$  est notée par  $w_T$  et  $w_s \in A$  désigne l'étiquette au site  $s$ . Dans ce qui suit, on utilise les mesures de probabilité assignées à l'ensemble de toutes les configurations possibles  $\Omega$ . La variable est un champ aléatoire de Markov par rapport au système de voisinage  $V$  si:  $w \in \Omega : P(X = w) > 0$ , et  $s \in S$  et  $w \in \Omega$ .  $P(X_s = w_s | X_r = w_r, r \neq s) = P(X_s = w_s | X_r = w_r, r \in V_s)$

Le théorème d'Hammersly-Clifford fait la liaison entre les champs de Markov et la distribution de Gibbs [4], [19]. La variable aléatoire  $X$  est un champ de Markov par rapport au système de voisinage  $V$  si et seulement si  $\pi(w) = P(X = w)$  est une distribution de Gibbs :

$$\pi(w) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_{C \in \zeta} \mathbf{V}_C(w)\right) \quad (1)$$

L'intérêt du théorème d'Hammersly-Clifford est de spécifier un champ de Markov de façon simple à partir d'une formulation énergétique au lieu de caractéristiques probabilistes locales ce qui est généralement plus difficile à calculer. En traitement d'images  $S$ , est considérée comme une grille  $L$  telle que  $\forall s \in S : s = (i, j)$  et on définit les systèmes de voisinage homogènes d'ordre  $n$  :

$$V^n = \{V_{(i,j)}^n : (i, j) \in L\} \quad (2)$$

$$V_{(i,j)}^n = \{(k, l) \in L : (k-i)^2 + (l-j)^2 \leq n\} \quad (3)$$

Il est clair que  $V^0 \equiv S$  et pour tous les  $n \geq 0 : V^n \subset V^{n+1}$ . Les systèmes de voisinage d'ordre un ( $n=1$ ) et d'ordre deux ( $n=2$ ) sont les plus utilisés dans la pratique. Les systèmes de voisinages d'ordre supérieur à deux ne sont pas utilisés car leur fonction d'énergie est trop compliquée et nécessitent un temps de calcul élevé.

### 2.2 Un Modèle Markovien général d'images

On présente ici la formulation mathématique générale d'un modèle Markovien d'image. Soit  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_K\}$  l'ensemble des sites et  $Y = \{Y_r : r \in R\}$  l'ensemble des observations sur ces sites. L'ensemble de toutes les observations possibles  $y = \{y_{r_1}, y_{r_2}, \dots, y_{r_N}\}$  est noté par  $\Phi$ . On a un autre ensemble de sites  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ , chacun de ces sites peut prendre une étiquette de  $A = \{1, 2, \dots, M\}$ . L'espace de configuration  $\Omega$  est l'ensemble de tous les étiquetages possibles  $w = \{w_{s_1}, w_{s_2}, \dots, w_{s_N}\}$ ,  $w_s \in A$ . Le but est de modéliser les étiquettes et les observations avec un champ aléatoire joint  $(X, Y) \in \Omega \times \Phi$ .  $X = \{X_s\}_{s \in S}$  est appelé le champ des étiquettes et  $Y = \{Y_r\}_{r \in R}$  est appelé le champ des observations.

#### 2.2.1 Estimateur Bayésien

Tout d'abord, on construit un estimateur Bayésien de champ des étiquettes. On peut exprimer la probabilité jointe ainsi que la probabilité conditionnelle par les distributions *a priori* et *a posteriori* :

$$P_{X|Y}(w|y) \propto P_{Y|X}(y|w)P_X(w) \quad (4)$$

L'estimateur est donné par la fonction de décision suivante :

$$\delta : \Phi \rightarrow \Omega \Rightarrow y \mapsto \delta(y) = \hat{w} \quad (5)$$

Soit  $C(w, \delta(y))$  la fonction de coût. Le risque de Bayes est donné par :

$$r(P_X, \delta) = E\{C(w, \delta(y))\} \quad (6)$$

L'estimateur doit avoir un risque de Bayes minimal tel que :

$$\hat{w} = \arg \min_{\tilde{w} \in \Omega} \int_{w \in \Omega} C(w, \tilde{w}) P_{X|Y}(w|y) dw \quad (7)$$

On présente ici les estimateurs Bayésiens les plus connus [24].

### 2.2.2. Estimateur maximum a posteriori (MAP)

L'estimateur MAP est le plus souvent utilisé en traitement d'images. Sa fonction de coût est définie par :

$$C(w, \tilde{w}) = 1 - \Delta_{\tilde{w}}(w) \quad (8)$$

où  $\Delta_{\tilde{w}}(w)$  est la masse de Dirac en  $\tilde{w}$ . Il est clair que cette fonction donne le même coût pour chaque configuration différente de  $\tilde{w}$ . En utilisant l'équation (7) et l'équation (8), l'estimateur MAP du champ des étiquettes devient :

$$\hat{w}_{MAP} = \arg \max_{w \in \Omega} P_{X|Y}(w|y) \quad (9)$$

Cet estimateur, pour une observation donnée, fournit les modes de la distribution *a posteriori*. Cependant, l'équation (9) pose un problème d'optimisation combinatoire et par conséquent, exige l'utilisation d'algorithmes spécifique d'optimisation.

### 2.2.3. La distribution a priori

Soit  $X$  est un MRF avec le système de voisinage  $\tilde{V} = \{\tilde{v} : s \in S\}$  dont la distribution est définie par :

$$P(X = w) = \frac{1}{Z} \exp(-\tilde{U}(w)), \quad \tilde{U}(w) = \sum_{c \in \tilde{C}} \tilde{V}_c(w) \quad (10)$$

où  $\tilde{U}(w)$  est la fonction d'énergie. Cette représen-

tation utilise, pour la définition de la probabilité *a priori*, la distribution de Gibbs dont l'avantage est que l'on peut travailler avec les énergies potentielles sur les cliques au lieu de l'énergie globale.

### 2.3. Formalisme Markov-Bayes pour la classification contextuelle d'images

On présente ici le formalisme Markov-Bayes pour la classification contextuelle d'images. Le but est de trouver une image classifiée qui maximise la probabilité *a posteriori*  $P(w|Y)$ , c'est à dire l'estimateur MAP :

$$\hat{w} = \arg \max_{w \in \Omega} \prod_{s \in S} P(y_s | w_s) \prod_{C \in \tilde{C}} \exp(-V_C(w_C)) \quad (11)$$

Les observations sont reliées au processus des étiquettes par le modèle qui modélise la relation entre le champ des étiquettes  $X$  et le processus des observations  $Y$ . La plupart des problèmes peuvent se formaliser par la fonction suivante [20] :

$$Y = \Psi(H(X), B) \quad (12)$$

Au niveau de chaque pixel, on a la fonction suivante:

$$\forall r \in R : Y_r = \Psi(H_r(X_{\Psi(r)}), B_r) \quad (13)$$

où  $\Psi(a, b)$  est une fonction inversible en  $a$ .  $H_r$  est une fonction locale définie sur un petit sous-ensemble  $\Psi(r)$  de  $S$ .  $B$  est une composante aléatoire dont la distribution est telle que  $P_b() = \prod_{r \in R} P_b()$ . On a alors la relation suivante :

$$P_{Y|X}(y|w) = \prod_{r \in R} P_{B_r}(\Psi^{-1}(H_r(w_{\Psi(r)}), y_r)) \quad (14)$$

En supposant que  $P_b() > 0$  en chaque site  $r \in R$ , la distribution conditionnelle du champ des observations  $X$  sachant  $Y$ , est définie par :

$$P_{YX}(y|w) = \exp\left(\sum_{r \in R} -\log(P_{B_r}(\Psi^{-1}(H_r(w_{\Psi(r)}), y_r)))\right) \quad (15)$$

En fin, on a la distribution *a posteriori* se met sous la forme suivante :

$$\frac{1}{Z} \exp\left(\sum_{r \in R} -\log(P_{B_r}(\Psi^{-1}(H_r(w_{\Psi(r)}), y_r))) + \sum_{c \in \tilde{C}} \tilde{V}_c(w)\right) \quad (16)$$

On remarque que la distribution *a posteriori* est aussi une distribution de Gibbs avec le système de voisinage  $V$  le plus petit qui contient tous les cliques dans  $\tilde{C}$  et les ensembles  $\{\psi(r) : r \in R\}$  :

$$\forall s \in S : V_s = \left( \bigcup_{r \in \Psi^{-1}(s)} \Psi(r) \{s\} \right) \cup \tilde{V}_s \quad (17)$$

On note la fonction d'énergie correspondante par  $U(w, y)$  :

$$\begin{aligned} U(w, y) &= \sum_{r \in R} -\log(P_{B_r}(\Psi^{-1}(H_r(w_{\Psi(r)}), y_r))) + \sum_{C \in \mathcal{C}} \tilde{V}_C(w) \\ &= \sum_{r \in R} V_r((w_{\Psi(r)}), y_r) + \sum_{C \in \mathcal{C}} \tilde{V}_C(w) \end{aligned} \quad (18)$$

On définit  $V_r((w_{\Psi(r)}), y_r)$  d'une manière précise [20] :

$$V_r((w_{\Psi(r)}), y_r) = V_r(w_{\Psi(r)}) + \sum_{s \in \Psi(r)} V_{s,r}(w_s, y_r) \quad (19)$$

Donc, elle peut se mettre sous la forme :

$$\sum_{r \in R} V_r((w_{\Psi(r)}), y_r) = \sum_{r \in R} V_r(w_{\Psi(r)}) + \sum_{r \in R} \sum_{s \in \Psi(r)} V_{s,r}(w_s, y_r) \quad (20)$$

$$\sum_{r \in R} V_r((w_{\Psi(r)}), y_r) = \sum_{r \in R} V_r(w_{\Psi(r)}) + \sum_{s \in S} V_s(w_s, y_{\Psi^{-1}(s)}) \quad (21)$$

Finalement, on a la fonction d'énergie suivante :

$$\begin{aligned} U(w, y) &= \sum_{s \in S} V_s(w_s, y_{\Psi^{-1}(s)}) + \sum_{C \in \mathcal{C}} V_C(w) \\ &= U_1(w_s, y_{\Psi^{-1}(s)}) + U_2(w) \end{aligned} \quad (22)$$

La fonction d'énergie globale donnée dans (22) est la somme des deux termes suivants : Terme d'attache aux données caractérisé par la fonction d'énergie  $U_1(w_s, y_{\Psi^{-1}(s)})$ . Ce terme est directement calculé à partir des observations, pour cette raison il est appelé attache aux données. Terme de régularisation caractérisé par la fonction d'énergie  $U_2(w)$ . Ce terme traduit les interactions locales dans un voisinage spatial. C'est à travers ce terme que la classification optimale d'images est obtenue en utilisant des algorithmes d'optimisation.

### 3. Optimisation

La méthode de classification contextuelle déduite du formalisme Markov-Bayes donne une fonction d'énergie non-convexe (expression (22)) qui doit être minimisée pour trouver l'estimateur de champ des étiquettes (image classifiée optimale). Malheureusement, c'est un problème très dur, appelé problème combinatoire. Si on considère, par exemple, une image de taille  $16 \times 16$  avec deux étiquettes (classes) possibles, on doit explorer

un espace de configurations de  $2^{256}$  éléments pour trouver le minimum global de la fonction d'énergie (22) qui correspond à l'image classifiée recherchée. Cependant, ce problème combinatoire peut être exprimé sous la forme générale d'un « problème d'optimisation ».

Pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire, les « métaheuristiques », principalement le recuit simulé, la méthode de recherche tabou et les algorithmes génétiques, se sont imposées comme des moyens efficaces. La méthode du recuit simulé repose sur une analogie avec le processus de recuit employé par les métallurgistes, les algorithmes génétiques s'inspirent de l'évolution des espèces dans la nature, et la méthode de recherche tabou exploite le concept de mémoire. Ces trois approches, totalement différentes, permettent en principe de trouver une bonne solution aux problèmes d'optimisation, moyennant un temps de calcul acceptable.

#### 3.1. Programmation Génétique

La programmation génétique est une autre méthode basée sur la théorie de la sélection naturelle proposée pour la première fois par John Koza [17]. Koza s'est inspiré des concepts des algorithmes génétiques de John Holland [21]. Pour cela, certains disent que la programmation génétique est une branche des algorithmes génétiques. Elle a apporté quelques avantages en permettant la variation des tailles des chromosomes, et en changeant les techniques de croisement. Par exemple, un croisement avec un seul père, en programmation génétique, peut donner deux fils différents, or ce n'est pas le cas dans les algorithmes génétiques. La programmation génétique consiste à générer des programmes informatiques d'une manière aléatoire. Elle est constituée de quatre étapes essentielles :

1. Générer une population initiale.
2. Exécuter chaque programme et lui assigner une valeur qui indique son aptitude à résoudre le problème posé.
3. Créer une nouvelle population des programmes en utilisant les opérations génétiques.
4. Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à atteindre l'optimum.

#### 3.2. Classification contextuelle utilisant la programmation génétique

Tout d'abord, pour rendre le lecteur plus familier avec l'application de la programmation génétique pour résoudre le problème combinatoire posé

on donne les significations des terminologies utilisées par les algorithmes génétiques dans notre application. Dans cette application de la programmation génétique, on démarre à partir d'un individu qui représente une image classifiée ponctuellement (la configuration initiale). La population initiale est constituée de  $N$  images, représentant la même scène observée, générées aléatoirement à partir de l'image classifiée ponctuellement. Soient  $W_1, W_2, \dots, W_N$  les  $N$  images ainsi générées. L'évaluation d'une population consiste à calculer la fonction d'adéquation (expression (22)) pour chaque configuration  $W_i$ . Dans la sélection, on choisit les configurations les mieux adaptés pour générer la prochaine population. Le croisement consiste à permuter, avec une probabilité de croisement, entre deux configurations de la même population. La mutation consiste à changer, avec une probabilité de mutation, plusieurs pixels dans toutes les configurations de la population. Pour le codage, on a opté pour le codage décimal (dans notre cas il s'agit du niveau de gris) où chaque chromosome représente l'étiquette de la classe à laquelle appartient le pixel. Le croisement utilisé est le croisement interne. La politique appliquée est « meilleur de tous » i.e. le croisement se fait entre la meilleure configuration et le reste de  $(N-1)$  configurations de la population. La mutation est une opération assez importante vu son rôle dans notre cas. En fait, le croisement ne rapporte pas de nouveaux changements à la population, tandis que la mutation change des pixels et apporte de nouveaux changements.

La probabilité de sélection de la configuration est calculée en fonction de l'adéquation de la configuration. La probabilité d'adaptation cumulative de la configuration  $W_i$ , notée  $pac_i$ , est calculée en fonction de la probabilité de sélection  $p_i$ , telle que :

$$pac_i = \begin{cases} pac_i = p_i \\ \sum_{j=1}^i p_j \end{cases} \quad (23)$$

La sélection utilise la probabilité d'adaptation cumulative pour sélectionner la configuration convenable.

#### 4. Résultats Expérimentaux

Le but de ce paragraphe est d'évaluer les performances de la méthode d'optimisation basée sur la programmation génétique sur les problèmes de classification contextuelle des images de télédétection en utilisant le formalisme Markov-Bayes décrit dans le sous-paragraphe 2. 2. 4.

Les tests ont été réalisés sur une image radar fournie par le système AirSAR de la NASA/JPL. On remercie Pr S. B. Serpico et Dr F. Melgani, de l'Université de Gênes en Italie, d'avoir eu la bonté de me fournir les images radar du système aéroporté AirSAR. Le système a fourni neuf images radars en trois bandes fréquentielles (bandes C, L, et P) et en trois polarisations chacune (HH, HV, VV). On a choisi l'image de la bande L polarisation HV pour réaliser les expériences (image de la figure 1 après une amélioration du contraste), car elle est la moins bruitée par le speckle. L'image, acquise en juillet 1989, représente une scène d'étude de 250x350 pixels d'une région agricole située près de Feltwell en Royaume Uni (tous droits réservés à *Hunting Technical Services Ltd. (UK)*). Les champs agricoles sont représentés par cinq classes de la couverture terrestre correspondant, respectivement, à cinq types de récoltes : carottes, pommes de terre, sol nu, chaume et betteraves à sucre.

La figure 2 représente le résultat de la classification ponctuelle de l'image radar de la figure 1. Ce résultat a été obtenu en utilisant la méthode de la classification non-supervisée floue proposée dans [22]. Cette image est la configuration initiale à optimiser en utilisant les deux méthodes d'optimisation : recuit simulé et programmation génétique. La méthode de recuit simulé a été utilisée à titre de comparaison avec la méthode basée sur la programmation génétique. Les résultats obtenus avec ces deux méthodes sont donnés dans les figures 3 et 4, respectivement. La température initiale, l'énergie initiale, l'énergie finale (ou le minimum atteint par la méthode), et le temps d'exécution des deux méthodes sont rassemblés dans le tableau 1.

En interprétant les images résultats finaux de la classification contextuelle (figures 3 et 4), on constate que les méthodes d'optimisation : recuit simulé et programmation génétique ont rendu l'image de la configuration initiale (figure 2) plus homogène et plus claire. Ceci se caractérise par le changement du nombre de pixels des différentes classes avant et après le processus d'optimisation (figure 5) ce qui reflète l'immigration des pixels mal classifiés dans les premières configurations d'une classe à une autre. Bien que ces méthodes rencontrent certaines difficultés dans la séparation du bruit (ou pixel mal classifié) et du pixel contour, l'aperçu général de l'image résultat de la classification contextuelle est plus net et plus parlant sur l'état de la surface de la scène imagée que celui de l'image de la configuration initiale. Ces résultats font ressortir des détails qui sont difficiles à discriminer dans l'image de la figure 2.

A titre de comparaison, on constate que les résultats du recuit simulé et programmation génétique se ressemblent, mais leurs temps d'exécution sont différents. La programmation génétique est la méthode la plus coûteuse en temps de calcul (tableau 1). On justifie la qualité de la méthode de la programmation génétique par le fait que la température initiale choisie est relativement petite par rapport à ce qu'il faut pour aboutir à un meilleur résultat de cette méthode [17]. Quoique l'image obtenue soit plus nette et précise, si on augmente la valeur de la température initiale, ceci se fait au détriment du temps de calcul qui devient prohibitif. Les mêmes remarques peuvent être reformulées pour la méthode recuit simulé qui converge théoriquement vers l'optimum global en temps infini [23].

## 5. Conclusion

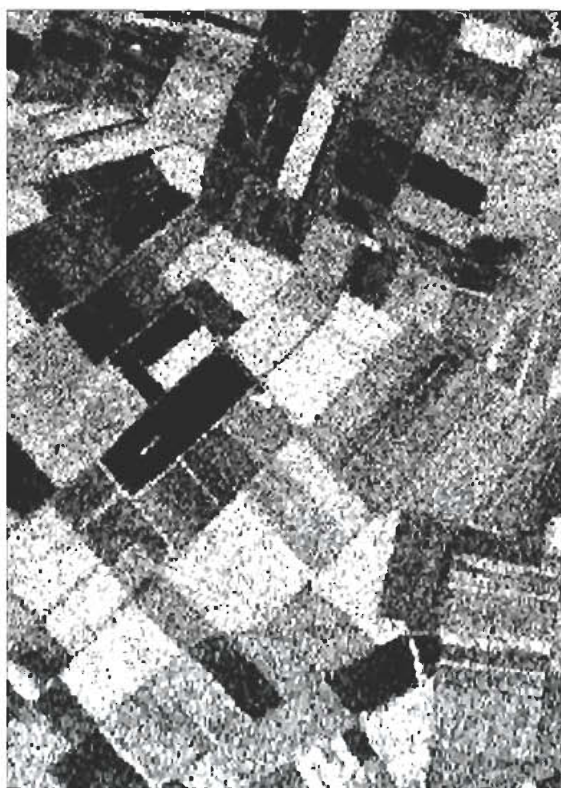
Dans cet article, une méthode de classification contextuelle d'images de télédétection est présentée. En premier lieu, la modélisation Markovienne d'images est abordée et le formalisme Markov-Bayes est déduit. Ceci consiste à utiliser les champs aléatoires de Markov et l'estimation Bayésienne, en particulier l'estimation par le Maximum A Posteriori (MAP).

En second lieu, la méthode de classification contextuelle, déduite du formalisme Markov-Bayes, donne une fonction d'énergie non-convexe qui doit être minimisée pour trouver l'image classifiée optimale. C'est un problème très dur, appelé problème d'optimisation combinatoire qui exige l'utilisation d'algorithmes spécifiques d'optimisation. Parmi les différentes méthodes d'optimisation globale, on est uniquement intéressé aux métaheuristiques « modernes ». L'objectif étant d'apporter une contribution à une plus grande diffusion des méthodes métaheuristiques, dans la résolution des problèmes combinatoires posés par la classification contextuelle d'images de télédétection. Ainsi, la métaheuristique d'optimisation globale basée sur la programmation génétique a été développée. L'application de la méthode dans la classification contextuelle d'images a été alors détaillée ainsi que la procédure de sa mise en œuvre. Les résultats obtenus sont très satisfaisants.

## Références

- P. M. Mather, *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*, John Wiley & Sons, 1987.
- C. Elachi, *Space-borne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*. IEEE Press, New York, 1998.
- J. A. Richards and X. Jia, *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- J. Besag, "Spatial interaction and the statistical analysis of lattice system (with discussion)", *Journal of Royal Statistics Society*, B-36, pp. 192-236, 1974.
- S. Chitroub, R. Khedam, H. Belhadj, and B. Sansal, "Compound deterministic pseudo annealing-Markov random field model for contextual classification of remotely sensed imagery", *Proceedings of SPIE, EUROPTO Series, Image and Signal Processing for Remote Sensing Conference*, 21-25, September 1998, Barcelona, Spain, Vol. 3500, pp. 435-446.
- R. Chellappa and A. K. Jain (Editors), *Markov Random Fields: Theory and Application*. Academic Press, 1993.
- S. Geman and D. Geman, "Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of image", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 6, No. 6, pp. 721-741, 1984.
- Y. Jung and P. H. Swain, "Bayesian contextual classification based on modified M-estimates and Markov random fields", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 34, No. 1, pp. 67-74, January 1996.
- S. Chitroub A. Houacine, A. Allaoua, M. D. Aroua, and B. Sansal, "A New deterministic annealing for image contextual classification," In *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, June 5-9, 2000, Istanbul, Turkey, pp.2243-2246.
- M. Krueger, *Méthode d'analyse d'algorithmes d'optimisation stochastiques à l'aide d'algorithmes génétiques*. Thèse de Doctorat en Informatique et Réseaux, Ecole nationale supérieure des télécommunications, ENST-Paris, France, 1990.
- R. Azencott, *Parallel Simulated Annealing: An Overview of basic Techniques*. In R. Azencott, editor, *Parallel Simulated Annealing: Parallelization Techniques*, pp. 37-46, John Willy & Sons, 1992.
- F. Glover and M. Laguna, *Tabu Search, Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. University of Colorado, Boulder, USA, 1992.
- C.R. Reeves (Ed.), *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Advanced Topics in Computer Science, Chapter 4, McGraw-Hill, 1995.
- Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-Verlag Heidelberg, 1996.

- R. Chelouah and P. Siarry, "Tabu Search applied to Global Optimization", *European Journal of Operational Research*, Vol. 123, pp. 256-270, 2000.
- R. Chelouah and P. Siarry, "Continuous Genetic Algorithm: An algorithm for the global optimization of multi-minima functions", *Journal of Heuristics*, Vol. 6, pp. 191-213, 2000.
- Koza, John R. 1992. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- S. Geman and D. Geman, "Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of image", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 6, No. 6, pp. 721-741, 1984.
- J. Moussouris, "Gibbs and Markov random system with constraints", *Journal of Statistical Physics*, Vol. 10, No. 1, pp. 11-33, January 1974.
- Z. Kato, *Modélisation Markoviennes Multirésolutions en Vision par Ordinateur. Application à la Segmentation d'Images SPOT*. Thèse de Doctorat, Spécialité Sciences de l'Ingénieur, Université de Nice Sophia Antipolis, Nice, France, 1994.
- J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, Internal report, 1975.
- S. Chitroub, A. Houacine, and B. Sansal, "Robust optimal fuzzy clustering algorithm applicable to multispectral and polarimetric synthetic aperture radar images", *Proceedings of SPIE, EUROPTO Series, Image and Signal Processing for Remote Sensing Conference*, 21-25, September 1999, Florence, Italy, Vol. 3871, pp. 325-336.
- P. J. Van Laarhoven and E. H. L. Aarts, *Simulated Annealing: Theory and Applications*. Dordrecht: D. Reidel Publisher Company, Netherlands, 1987.
- J. Marroquin, S. Mitter, and T. Poggio, "Probabilistic solution of ill-posed problems in computational vision", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 82, pp. 76-89, 1987.



**Fig. 1** Image SAR du système AirSAR (tous droits réservés à Hunting Technical Services Ltd. (UK)).



**Fig. 2** Configuration initiale (image ponctuellement classifié).

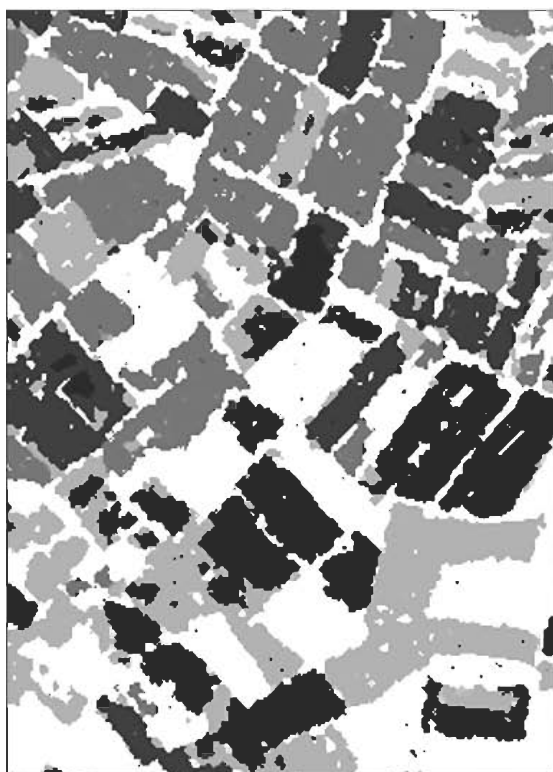


Fig. 3 Recuit simulé.

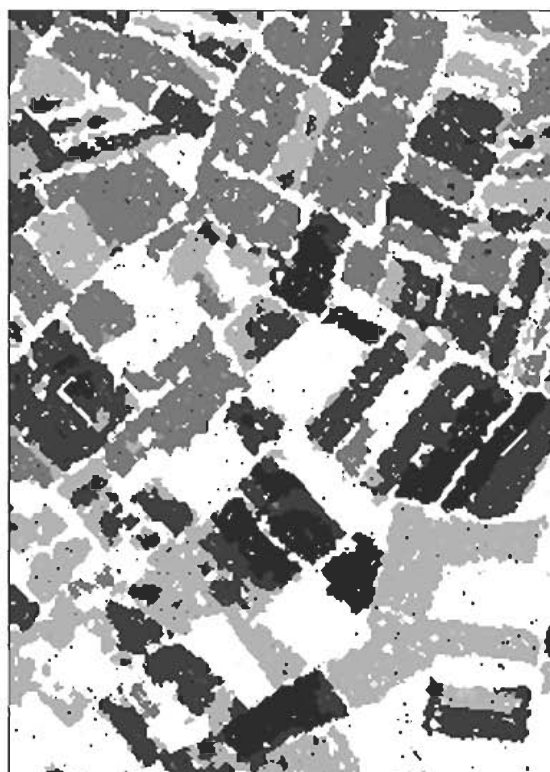


Fig. 4 Programmation génétique.

Tableau 1. Température initiale, Energie initiale, Energie finale (le minimum atteint par la méthode), et temps d'exécution (sur Pentium II, 255 MHZ) des deux méthodes d'optimisation.

Méthodes	Température initiale	Energie initiale	Energie finale	Temps d'exécution
Recuit simulé	5	782845.5	541049	15 min
Programmation génétique	5	782845.5	575940	1 heure 35 min

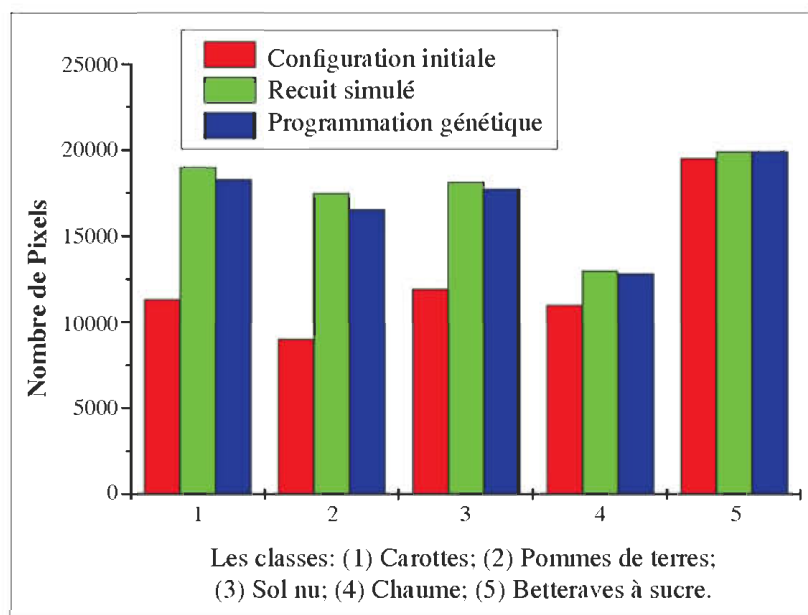


Fig. 5 Nombre de pixels par classe dans les trois images classifiées.

## SIG et imagerie Alsat-1 pour l'élaboration de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique : cas du bassin versant d'Arzew (Algérie)

L. CHELLOUAI (1), A. DJILALI (1), M. FOUKRACHE (2)

(1) Centre National des Techniques Spatiales B.p 13, 31200 Arzew, ALGÉRIE

Tél. : 041-47-22-17 - Fax : 041 47 36 65 - Email : l\_chellouai@yahoo.fr

(2) Faculté des sciences de la terre, de géographie et de l'aménagement du territoire.

Département des sciences de la terre, Université d'Es-Senia Oran Algérie.

**ملخص:** الانجراف المائي هو ظاهرة معقدة منتشرة في مناطق البحر الأبيض المتوسط. و خاصة مناطق الشمال الجزائري فهي الأكثر تضررا من هذه الظاهرة و التي تهدد بشكل خطير الثروة المائية و الترابية. فهي تخضع لعدة عوامل منها الانحدار، التركيبية الصخرية، و الغطاء النباتي ...، و لقد اختير حوض أرزيو-و الذي يتربع على مساحة تقدر ب 68 كلم<sup>2</sup>- لدراسة هذه الظاهرة. فالمنهج المتخذ لدراسة هذه الظاهرة يتمثل في إنجاز خرائط لعوامل مبينة لهذه الظاهرة و من جهة أخرى إنجاز الخريطة الملخصة لإبراز المناطق المهددة بالانجراف وفق أربعة أقسام، ثم مقارنتها مع الخريطة التي تبين الوضع الحالي لمناطق الانجراف. هذه المنهجية طبقت في إطار المنظومة الإعلامية الجغرافية، و التي استفادت من مرونة هذه التقنية في معالجة و تحليل المعطيات.

**Résumé :** L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone méditerranéenne. Le nord de l'Algérie est la zone la plus touchée par ce fléau qui menace gravement les potentialités en eau et en sol. L'érosion est soumise à de nombreux facteurs, parmi lesquels trois facteurs ont été retenus dans cette étude pour caractériser la sensibilité des sols à l'érosion : pente, lithologie et occupation du sol.

Pour valider l'approche méthodologique, nous avons retenu comme zone d'étude, le sous bassin versant d'Arzew, d'une superficie de 70 Km<sup>2</sup> environ. L'approche cartographique adoptée consistait à l'élaboration d'une carte de synthèse sur la sensibilité à l'érosion en intégrant des facteurs explicatifs à l'aide des techniques de Télédétection et des Systèmes d'Information Géographiques.

La comparaison de la carte de sensibilité à l'érosion avec la carte du processus d'érosion actuel a permis de mettre en évidence les potentialités des outils utilisés pour caractériser le phénomène « érosion » et la qualité de l'approche utilisée.

**Mots clés :** SIG, Imagerie Alsat-1, érosion.

**Abstract :** The erosion hydrique is a very wide-spread complex phenomenon in Mediterranean zone. The North of Algeria is the zone the most got with this plague which threatens seriously potentialities in

water and in ground. The erosion is subjected to numerous factors, among which three factors were held in this study to characterize the sensibility of grounds in the erosion : hillside, lithologie and activity of the ground.

To confirm methodological approach, we held a zone of study, under pond overturning of Arzew, a surface of 70 Km<sup>2</sup> about. Adopted cartographic approach consisted in the elaboration of a card of synthesis on the sensibility in the erosion by integrating factors explicatifs by means of the techniques of Remote detection and the Geographic Systems of Information.

The comparison of the card of sensibility to the erosion with the card of the current process of erosion allowed to put in evidence the potentialities of tools used to characterize phenomenon "erosion" and the quality of the used approach.

**Keywords :** GIS, Alsat-1 images, erosion.

### 1. Introduction

L'érosion a été le sujet et l'objet d'études nombreuses et variées à différentes échelles (régionale, locale et détaillée) [2,5,8,9]. Pour préparer, dans le cadre d'un SIG une carte numérique de sensibilité à l'érosion à l'échelle du 1/25000, nous avons élaboré les cartes paramétriques suivantes :



le modèle numérique du terrain, la carte des pentes, la carte hypsométrique, la carte hydrographique, la carte lithologique, la carte d'occupation du sol et La carte du processus d'érosion actuelle à l'aide de documents cartographiques, l'imagerie ALSAT-1 et les photographies aériennes.

La carte finale est obtenue par la combinaison des facteurs retenus selon cinq (5) classes de sensibilité. Cette représentation visualise de façon synoptique le phénomène et permet aux décideurs de localiser rapidement les zones d'intérêt prioritaires et d'apprécier leur importance.

Le travail entrepris dans le cadre de cette étude tente d'appliquer conjointement la technologie de visualisation cartographique, la flexibilité des systèmes d'information géographique et la télédétection.

### 1.1 Présentation de la Zone d'étude

Le bassin versant d'Arzew est un sous ensemble du grand bassin des côtières Oranais, couvrant une superficie d'environ 68.62 Km<sup>2</sup>. Il est compris entre la latitude 35° 47' et 35° 53' Nord et la longitude entre 0° 2' et 0° 3' Ouest (cf. fig.1).

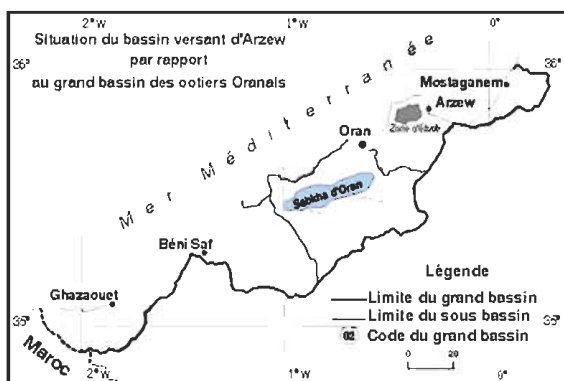


Fig. 1 Localisation géographique de la zone d'étude.

### 2. Démarche d'analyse de la sensibilité à l'érosion

La démarche adoptée est basée sur l'utilisation de la technique de superposition des couches.

Les cartes paramétriques utilisées dans l'analyse de la sensibilité ont été généralisées afin d'éviter le morcellement des objets géographiques lors des croisements de données. Le mosaïquage sous ERDAS des photographies aériennes et l'interprétation photographique, complétée sur le terrain nous a permis d'élaborer la dynamique actuelle et les facteurs de déclenchement de l'érosion.

La carte de synthèse finale est obtenue par superposition des cartes paramétriques, en associant un poids à chaque paramètre en fonction de son potentiel érosif, puis validée par comparaison avec la carte du processus actuel (cf. fig.2).

### 3. Caractéristiques morphométriques, physiques et climatiques

#### • Caractéristiques morphométriques

Les paramètres descriptifs de la géométrie du bassin versant d'Arzew sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Grandeurs morphométriques	
- Surface planimétrique:	68.62 Km <sup>2</sup>
- Périmètre :	38.82 Km
- Indice de forme :	1,31
<b>Rectangle équivalent :</b>	
- Longueur :	14,74 Km
- Largeur :	4,66 Km
- Longueur du plus long talweg :	18,72 Km
- Plus grande longueur entre deux points de frontières:	11.96 Km
- Plus grande largeur perpendiculaire à la plus grande longueur:	7.33 Km
- Altitude maximale:	630 m
- Altitude minimale:	50 m
<b>Hypsométrie :</b> [tranche d'altitude en mètre]	
[500-630]=	5.49 Km <sup>2</sup> , [400-500]= 4.40 Km <sup>2</sup> ,
[300-400]=	10.65Km <sup>2</sup> ,
[250-300]=	8.45 Km <sup>2</sup> , [200-250]=11.82 Km <sup>2</sup> ,
[150-200]=	11.06 Km <sup>2</sup> ,
[100-150]=	12.58 Km <sup>2</sup> , [50-100]= 4.17 Km <sup>2</sup>
- Médiane :	268 m
- Altitude moyenne :	288 m
- Indice de pente globale:	35 m/Km
- Dénivelée spécifique :	293 m
- Classe de relief (ORSTOM) :	R5 (relief assez fort)

#### • Caractéristiques physiques

- **Orographie et Morphologie :** le relief du bassin versant d'Arzew, se caractérise par trois unités morpho structurales : les monts d'Arzew, la dépression Miocène, et la plaine de Sidi ben Yebka.

- **Géologie :** le bassin versant est situé dans une zone constituée par un ensemble métamorphique composé par des calcschistes, schistes et localement par des lentilles calcaires du crétacé inférieur. Les calcaires se manifestent particulièrement en s'extrudant dans le Djebel Bou Arous et les montagnes grises donnant

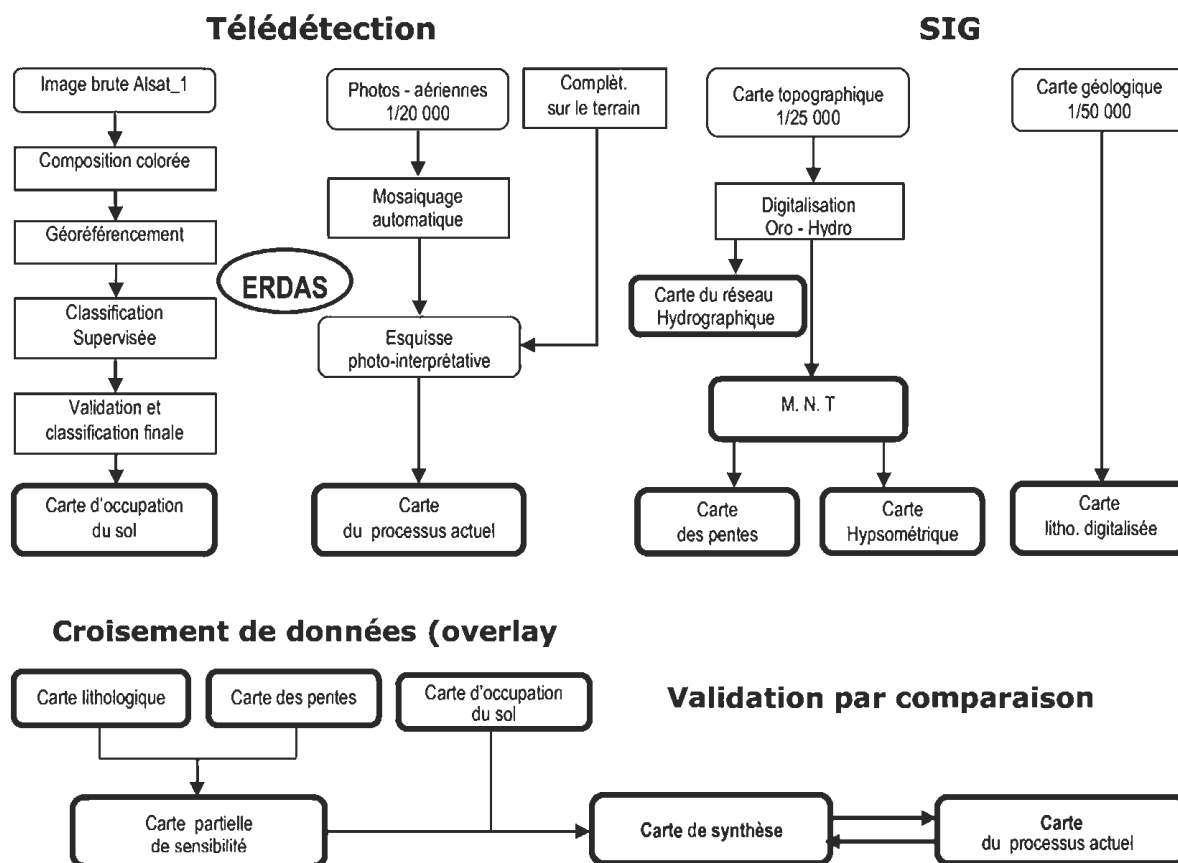


Fig. 2 Démarche d'analyse de la sensibilité.

lieu aux parties les plus élevées du bassin versant. La partie centrale du bassin versant est caractérisée par une lithologie dominée par des marnes grises du miocène supérieur post surrection. En aval du bassin versant, la plaine de Sidi ben Yebka est constituée des formations lithologiques polio quaternaires continentales, l'une gréseuse avec apparition de dalles calcaires, qui occupe 80% de la plaine et d'autre alluviale [6].

- **Couvert végétal :** la carte d'occupation du sol de la plaine de Sidi ben Yebka et la carte du parcellaire forestier (Conservation des Forêts d'Arzew), montrent que le bassin versant est couvert de quatre types de formation végétale : Forêt de Pin d'Alep, Maquis, Jeune reboisement et Zones de cultures annuelles.

• **Caractéristiques climatiques**

- **Régime climatique et thermique :** le bassin versant d'Arzew fait partie de la région du Nord Ouest méditerranéen, le régime du climat est semi aride.

- **Pluviométrie :** l'irrégularité et la variabilité sont deux aspects qui caractérisent la pluviométrie de ce bassin. La majeure partie de ce bassin reçoit en moyenne une pluviométrie annuelle comprise entre 240 et 360 mm et le nombre de jours de pluie par année varie de 60 à 100 jours. [4]

**4. Elaboration des cartes paramétriques**

Les cartes paramétriques ont été élaborées à partir des données issues de la carte topographique de base, de la carte géologique, des photographies aériennes, de l'imagerie spatiale et des observations sur le terrain.

• **Cartes paramétriques topographiques**

Les éléments topographiques : courbes de niveau, points cotés et réseau hydrographique sont extraits de la carte d'Arzew 5-6 à 1/25000.

• **Réalisation du Modèle numérique de Terrain (MNT) et ses dérivées**

La numérisation des courbes de niveau est réalisée sous l'outil Vertical Mapper, à partir des courbes de

niveau à 1/25 000, les points cotés sont utilisés pour le calcul résidu du Modèle Numérique du Terrain.

• **Carte des pentes**

La pente constitue un facteur important pour la détermination de la sensibilité à l'érosion du sol. Elle permet d'indiquer de manière significative le degré d'érosion. La mise en oeuvre du facteur pente nécessite non seulement une carte précise mais aussi à grande échelle (1/25 000 au minimum). Elle implique surtout un choix judicieux des ruptures des pentes acceptables.

Pour assurer une lecture sélective, on a procédé au regroupement de certaines classes tout en tenant compte des particularités de l'érosion hydrique. La classification obtenue permet de dégager cinq catégories de déclivité : très faible, faible, moyenne, forte et très forte.

Selon une étude comparative des cartes des pentes élaborées dans différentes études et travaux sur l'érosion, les seuils de pentes sont très diversifiés, néanmoins on a relevé les points suivants : en aval du bassin la pente varie de 0 à 5%, les pentes intermédiaires varient de 10 à 15 % et de 15 à 25%, les pentes fortes dépassent les 25 %, cf fig. 3.

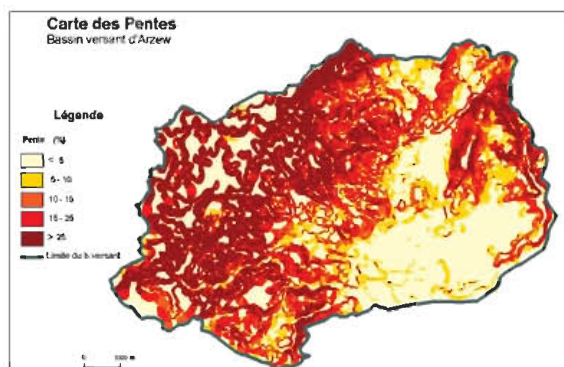


Fig. 3 Carte des pentes.

• **Réseau hydrographique**

Le réseau hydrographique est extrait de la carte topographique. Il permet de quantifier et de donner une idée sur les variations de l'écoulement à l'échelle du bassin. La distribution du chevelu hydrographique peut donner une indication sur la structure rocheuse de la région d'étude.

Pour le cas du bassin versant d'Arzew, le réseau hydrographique est bien développé en amont du bassin, ceci est en parfaite corrélation avec la roche existante (calcschiste et schiste), par contre en aval, le réseau est moins développé ce qui explique

l'existence d'une roche poreuse. Cette dernière est conforme avec la roche existante qui est composée d'alluvions, des sablo marneux et des croûtes calcaires.

• **Carte d'occupation du sol**

La carte d'occupation du sol a été élaborée sur l'ensemble du bassin et afin de vérifier l'influence du type de culture sur l'érosion, on a procédé à la réalisation de trois cartes d'occupation du sol à des dates différentes (1963, 1983, 1997). Elles ont été réalisées, par interprétation visuelle à partir des documents suivants : carte topographique 1/25 000, type 1963, carte topographique 1/25 000, type 1983, photographies aériennes mission 1963/64, 1/25 000; mission 1983, 1/20 000, imagerie spatiale : scène Alsat-1 mai 2003, données issues du terrain et du service forestier de la conservation d'Arzew cf fig.4.

L'interprétation des photographies aériennes (1963, 1983), l'imagerie spatiale (27-5-2003) et l'enquête que nous avons effectuée sur le terrain, montrent qu'en 1963, la culture la plus dominante était le vignoble, puis la céréaliculture a remplacé le vignoble et représente 62% des terres consacrées aux cultures. Ceci représente une superficie de 1106.33 ha exposée à l'érosion.

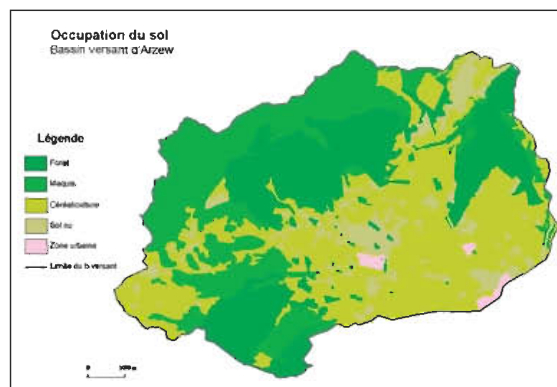


Fig. 4 Carte d'occupation du sol.

• **Carte lithologique**

L'esquisse interprétative est réalisée à partir de la carte géologique n° 127 à l'échelle du 1/50 000, puis digitalisée. Le plus important de ce paramètre est de dégager la relation lithologie-érodibilité. L'examen des résultats de données, montre que les formations dominantes (65.97% de la superficie du bassin) sont à composantes calcschistes et schistes, imperméables et résistantes à l'érosion. Les composantes marseuses sont semi perméables et peu résistantes, par contre, elles sont perméables et très

peu résistantes à l'érosion pour les alluvions du quaternaire. En conséquence, les composantes lithologiques les plus sensibles à l'érosion sont les formations arneuses et alluvionnaires cf fig 5.

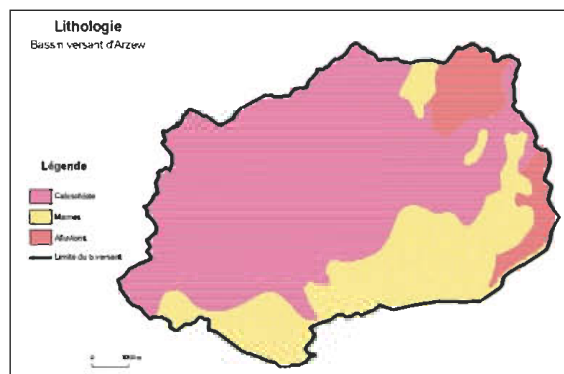


Fig. 5 Carte lithologique.

### 5. Processus d'érosion actuel

Les diverses formes prédominantes de l'érosion sont relevées des photographies aériennes et complétées sur le terrain (présence ou absence de pavage, densité, profondeur et largeur des incisions etc.). En s'inspirant de la classification de VOGT H.[8], six formes ont été retenues: ruissellement diffus localisé, ruissellement diffus généralisé, rigoles, ravineaux, ravins, ravinement généralisé (Bad- lands). Deux signes de type linéaire et surfacique ont été distingués sur la zone d'étude : les signes linéaires (vallons en berceau, vallon en V (actif et inactif) cf. fig.6 et ravinement généralisé), les signes de surface (décapage important, conséquence du ruissellement diffus).

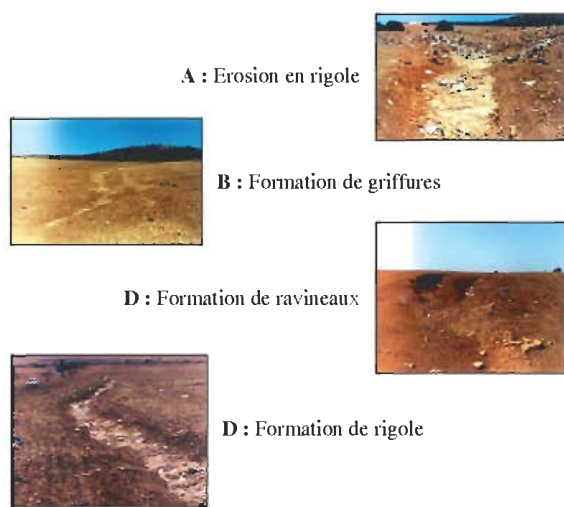


Fig. 6 Quelques photos d'érosion relevées en aval du bassin, (Arzew Algérie, sept. 2003).

### 6. Traitement et réalisation de la carte de synthèse

La classification et le croisement des informations ont été réalisés sous MapInfo. Cinq (5) niveaux de sensibilité sont retenus pour la carte de synthèse. Procédure adoptée :

- Etape 1 : Pondération des paramètres d'évaluation.
- Etape 2 : Croisement spatial par paire de données.
- Etape 3 : Synthétisation spatiale des résultats.
- Etape 4 : Validation des résultats.

#### • Pondération des paramètres d'évaluation

Comparaison par paires de la méthode AHP [8].

Tableau . Matrice originale.

	Lithologie	Pente	Occup. du sol
Lithologie	1,000	0,333	0,143
Pente	3,000	1,000	0,333
Occup. du sol	7,000	3,000	1,000
	11,000	4,333	1,476

Vecteur de priorité : [0.088 0.243 0.669]

Cohérence des jugements :  $\lambda$  max : 3,006,

IC : 0,003, RC : 0,006 < 0,10

RC : ratio de cohérence.

IC : indice de cohérence.

#### • Croisement spatial par paire de données

Le croisement de la couche lithologie et classe des pentes a permis d'aboutir à une carte d'évaluation partielle cf. figure. Afin d'éviter le morcellement excessif des unités géographiques, on a procédé à une généralisation cartographique puis classée selon cinq (5) niveaux de sensibilité.

#### • Synthétisation spatiale des résultats

La carte finale est obtenue par combinaison de la carte d'évaluation partielle et la carte d'occupation du sol. Le résultat obtenu a subi le même traitement que la première combinaison afin d'éliminer les petites surfaces nuisibles à la lecture de la carte cf. fig 7.

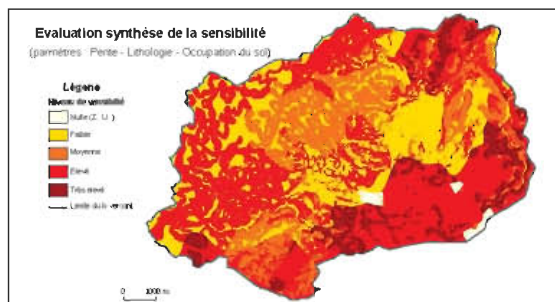


Fig. 7 Carte synthèse de sensibilité à l'érosion.

• validation des résultats

La comparaison de la carte de sensibilité à l'érosion avec la carte du processus d'érosion actuel a mis en évidence les ressemblances des zones érodées cf. fig 8.

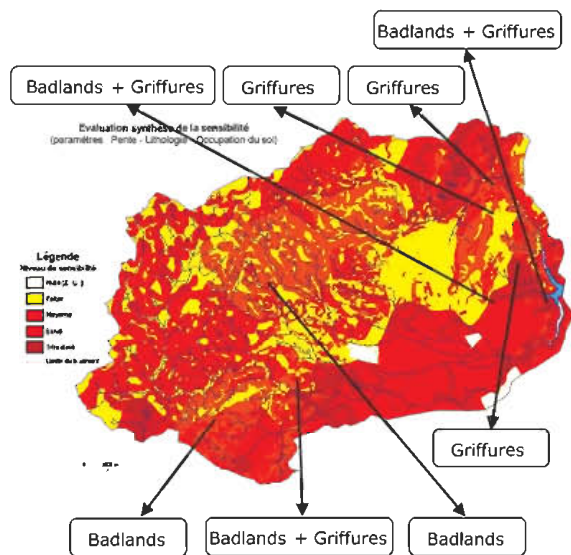


Fig. 8 Quelques formes d'érosion relevées du terrain.

7. Conclusion

La comparaison des deux cartes a donné un résultat satisfaisant par rapport au nombre de facteurs érosifs utilisés. Pour affiner cette étude, d'autres facteurs érosifs liés à la pluie, au sol et aux systèmes de culture peuvent être intégrés pour mieux comprendre ce phénomène. Ces documents cartographiques permettront aux décideurs ainsi qu'aux services concernés de localiser rapidement les zones d'intérêt prioritaire et d'apprécier leur importance afin de prendre les mesures conservatoires susceptibles de limiter la destruction du sol.

Cette étude montre la possibilité de mettre en œuvre une démarche cartographique à l'aide d'un SIG et de l'imagerie spatiale pour la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique. Grâce aux avantages de ces deux techniques, il serait possible d'élaborer une cartographie de sensibilité à l'érosion hydrique à des échelles variées (1/25000, 1/50000 et 1/200000) en intégrant les facteurs érosifs appropriés à chaque

niveau d'étude en simulant plusieurs scénarios et permettre de développer une action efficace de lutte contre l'érosion hydrique.

Références

BOUSSEMA M. R., (1995) Aide à la décision dans une problématique de conservation des eaux et des sols. Symposium International "images satellites pour la cartographie et les systèmes d'informations géographiques" Pages : (13 17) - CFC (n° 142 143 Déc.94 / Mars 95).

BOUSSEMA M. R., (1995) Apport de la télédétection à la gestion et aux aménagements des bassins versants. Symposium International "images satellites pour la cartographie et les systèmes d'informations géographiques" Page : (13 17) - CFC (n° 142 143 Déc.94 / Mars 95).

CHIKH M., (1995) Modélisation hydrologique maillée d'un bassin versant topographique à l'aide d'un système d'information géographique. Application aux bassins versants du barrage d'Arzew (Algérie) et de Houfalise (Belgique). Thèse de Magistère, 1995 - CNTS Arzew.

GOMER D., (1995), Ecoulement et érosion dans les petits bassins versants à sol marneux sous climat semi-aride Méditerranéen. Publication GTZ (Allemagne).

GOMER D., (1990), Projet pilote d'aménagement intégré du bassin versant de l'Oued Mina. Séminaire d'évaluation, Sept. Oct. 1990.

GOURINARD Y., Recherche sur la géologie du littoral oranais. 2. Epirogénèse et nivellement de l'Algérie 1958.

ROOSE E., (1993) Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne Algérienne, réduction des risques et intensification de la production agricole par la GCES. Pages : 289-308. Cahier Orstom, série pédologie, vol. n° 2, 1993.

Saaty, T. (1980). The Analytic Hierarchy Process, McGraw Hill, New York.

VOGT H., (1986) Une méthode d'évaluation du processus physiographique appliquée à l'érosion hydrique des sols. Pages : (204-210). L'espace géographique, n° 3 1986.

Y. LE BISSONNAIS, J. THORETTE, C. BARDET, J. DAROUSSIN (2002), l'érosion hydrique des sols en France. INRA, IFEN, novembre 2002.

## Analyse et Cartographie des Risques Littoraux (Littoral oranais, Algérie Nord Occidentale)

D. BOURAS. & Z. BOUTIBA

Laboratoire Réseau de Surveillance Environnementale.

Dep. Biologie. fac. Sciences. Université d'Oran. BP 1524. Es Senia. Oran. Algérie.

E-Mail : Djilaloran@yahoo.fr

**ملخص:** إن الأخطاء البيئية على مستوى الساحل يمكن تحديدها على عدة خصائص ودرجة التأثير (جغرافية، بيولوجية، صناعية، جيومورفولوجية)، ترتبط بالطبيعة الجيومورفولوجية. الصورة الخرائطية (تحديد المناطق) ترتيبه على الدراسة الكيفية لأخطار التي تعتمد على استعمال المعطيات المتوفرة و تكملها الأعمال الميدانية، والمعطيات يجب أن تحتوي على تاريخ الأحداث ونتائجها والحالة كالوضعية الآنية للبيئة (مناخي، مورفولوجي، هيدرولوجي) ولكن أيضا تأثير عامل الإنسان. وفي النهاية تسبب البيئة مرتبط وبفرض دراسات تأثير الانعكاس الموجه عن طريق فرق متعددة التخصص بالتعاون مع أصحاب القرار والمسيرين.

**الكلمات المفتاح:** الخطر، تحديد المناطق، الساحل، الخرائط، البيئة.

**Résumé:** Les risques littoraux peuvent être envisagés et délimités en fonction de plusieurs critères, et par ordre d'influence comme suit : géographiques, biologiques, géomorphologiques et industriels, cadrant la bande des aléas. En effet, elle dépend de la nature géomorphologique et des symptomatiques des phénomènes en question et des installations anthropiques. L'aspect cartographique (zonage) est assez fondé sur l'étude qualitative des dangers qui s'appuie sur l'emploi des données disponibles, et complétées par des travaux de terrain. Les données doivent comprendre celles du passé (historique des événements et leurs conséquences), et actuelles tel que la situation immédiate de l'environnement naturel (climatique, morphologique, hydrologique...). Mais également l'action anthropique (industrie, population, agglomération, routes, construction...). En définitive, la gestion de l'environnement et l'industrie est intimement liée et exige donc des études d'impact pilotées par des équipes pluridisciplinaires avec la collaboration des décideurs et les gestionnaires.

**Mots Clés:** Risque, zonage, cartographie, littoral, environnement.

**Abstract:** The littoral risks can be considered and delimited according to several criteria and by order of influence as follows: geographical, biological, geomorphological and industrial, tallying the band of the risks. Indeed, it depends on the nature

geomorphological and symptomatic of the phenomena in question and the anthropic installations. The cartographic aspect is rather founded on the qualitative study of the dangers which is based on the use of the data available, and supplemented by work of ground. The data must include those of last (history of the events and their consequences), and current such as the immediate situation of the environment natural (climatic, morphological, hydrological...). But also the anthropic action (industry, population, agglomeration, roads, construction...). Ultimately, the management of the environment and industry are closely dependent and thus require impact studies controlled by multi-field teams with the collaboration of the decision makers and the managers.

**Key Words** Risk, zoning, cartography, littoral, environment.

### 1. Introduction

Les risques littoraux peuvent être envisagés et délimités en fonction de plusieurs critères, et par ordre d'influence comme suit : biologiques, géographiques, géomorphologiques et hydrodynamiques, cadrant la bande des aléas. En effet, elle dépend de la nature géomorphologique et sédimentaire et des symptomatiques des phénomènes en question.

## 2- Délimitation des risques du littoral oranais (fig. 1)

La délimitation des zones de risques doit être bien étudiée, en premier lieu géographiquement, puis appréciée par l'importance des phénomènes :

- naturels, tels que l'érosion, sédimentation, ensablement etc. ;
- liés à l'action anthropique.

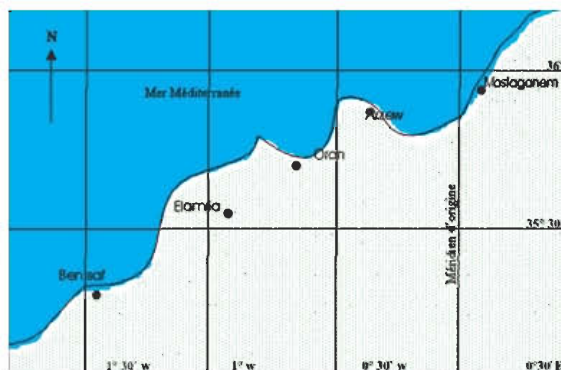


Fig. 1 Localisation des stations côtières du littoral oranais.

Entre Terga et Bouzedjar, les corps sableux aménagent un ensemble de flèches littorales consécutives surmontées de massifs dunaires. La forte exploitation des sables du secteur a largement minimisé l'importance des sables vacants et condamne les échanges avec la plage, en particulier, dans la région de Terga. La dégradation et l'affaiblissement progressif depuis plusieurs décennies, ont eu pour conséquence écologique grave l'anéantissement d'installations dunaires.

En parallèle, dans la région de la Macta, une urbanisation de la dune s'ajoute à une inclinaison des houles de nord-ouest, où les sables sont éparpillés par les courants de marée dans l'estuaire de la Macta. Dans une autre région comme Ain El Turk et Cap Falcon, les sables qui la bordaient il y a quelques années, auparavant, sont actuellement en quantité très insuffisante pour alimenter la plage, voire disparue totalement (Bouras et Boutiba, 2004).

En plus de l'action anthropique, l'érosion littorale de la plage d'Ain El Turk est probablement causée par un changement des profils littoraux.

## 3- Cartographie des risques

L'examen des périls passe par plusieurs étapes :

1. Le bornage de la bande en question ;
2. L'étude bibliographique des manifestations naturelles de la région étudiée;

3. La spécification des risques, accomplissant à la réalisation d'une carte des aléas;

4. Evaluation et cartographie des complications locales.

L'aspect cartographique est assez fondé largement sur l'étude qualitative des dangers. Elles s'appuient sur l'emploi des données disponibles, et complétées par des travaux de terrain. Les données doivent comprendre celles du passé (historique des événements naturels et leurs conséquences), et actuelles tel que la situation immédiate de l'environnement naturel (biologique, climatique, morphologique, hydrologique,...). Mais également l'action anthropique (population, agglomération, routes, construction ...) (utilisation du tableau de surveillance). Dans ce cas, l'étude repose sur l'utilisation simultanée des archives, études anciennes, de photographies aériennes, des photographies au sol, et des travaux sur terrain. Suivant le plan d'examen des dangers, la première étape est de mettre en évidence les aléas menaçant l'écosystème, la flore, la faune, l'homme et ses biens. Notons l'utilisation des cartes topo et géographiques et structurales.

## 4. Cartographie du recul des côtes

Le littoral meuble oranais a largement reculé en raison des aménagements effectués (Macta, Kristel, Ain El Turk), et qui ont affaibli voire brisé l'apport en alluvions des différents cours d'eaux, en particulier la Macta. Par ailleurs, les besoins augmentés en sable et en gravier pour l'industrie et les différentes constructions entraînent une surexploitation des réserves des lits des cours d'eau et celle du domaine côtier, cas de Terga.

De plus de nombreux cours d'eaux ont été déviés (Macta, Arzew, Kristel, Oued El Halouf), provoquant une augmentation de la salinité des eaux. Signalons également l'intensité des travaux de construction sur des espaces non constructibles (Oran, Cap Falcon...), engendrant un fort danger sur l'homme et une déstabilisation et dégradation des reliefs et de l'écosystème. En conclusion, ces aménagements ont perturbé les conditions hydrodynamiques et favorisé une forte érosion aujourd'hui que la sédimentation.

Par ailleurs, il est nécessaire de retracer la dynamique du trait de côte pour une durée bien déterminée. L'empilement événementiel diversifié, de faible fréquence, (érosion, éboulement, glissement), dont l'origine marine ou continentale collabore dans la dynamique et l'évolution du littoral.

L'étude repose sur le rapprochement des documents anciens avec ceux plus récents, donnant une information intéressante sur une durée de l'ordre de plus 100 ans, permettant l'estimation de la vitesse de changement des traits de côte, de l'extension de la ville, de ces reconfigurations et de sa géographie générale (fig. 2). L'évolution de ces dernières est plus faible et plus lente par rapport à celle des côtes basses meubles. De plus, L'utilisation des photographies aériennes est moins efficace et imprécise pour les côtes à falaises par rapport aux côtes basses.

L'identification des facteurs de déséquilibre est très attachante dans l'évolution du trait de côtes. Leur examen et leur cartographie reposent sur l'utilisation des données historiques, les tracés géomorphologiques et des désavantages causés. Les falaises sableuses ou sablo gréseuses de faible hauteur (pas plus de 10 m), reculent comme les côtes basses meubles (Madrague et Terga). Tandis que les falaises à matériaux résistants et hautes, changent selon leur état (falaise vive, falaise morte, etc.)

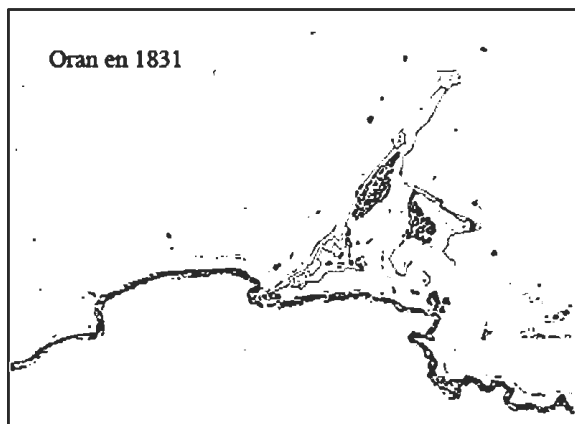
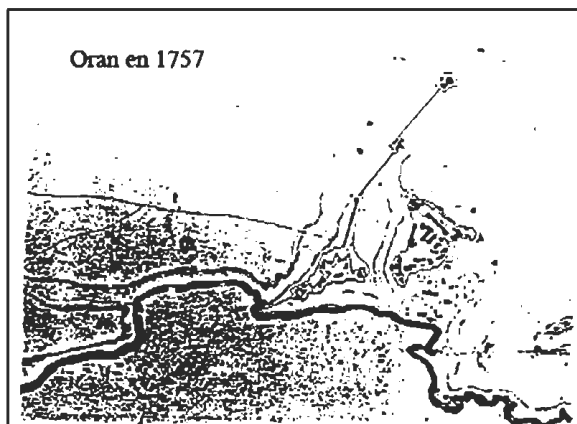
ainsi qu'en fonction de leurs natures, résistance, pendage, fracturation, etc. L'exemple peut être donné par la Corniche d'Oran qui est plus résistante par rapport à celle du secteur côtier ouest (Ain Temouchent), ceci est causé essentiellement par la nature sédimentaire.

L'examen du danger, concerne l'évaluation la zone dégradable, au terme de plus de 100 ans, se fonde sur l'utilisation des données passées ou déclarées (historique), à partir de leur type, de leur date et de leur importance, en fonction des facteurs de prédisposition observés.

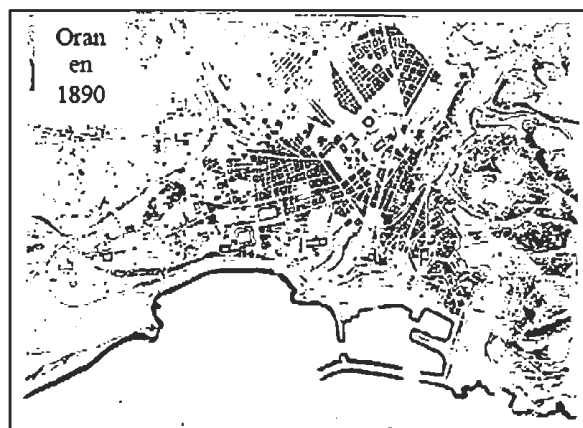
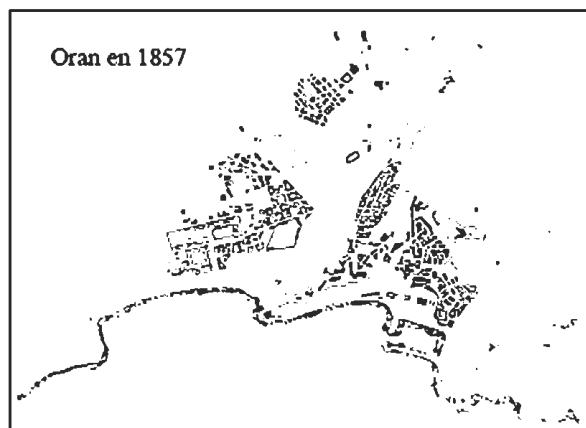
### 5. Zonage des zones de risques (fig. 3)

La variabilité de la vitesse des courants en fonction de la morphologie et la géographie générale. En effet, elle nous conduit à particulariser deux rangs d'aléa :

1. Danger fort, quand la vitesse est puissante ;
2. Danger faible à moyen quand la vitesse est lente.



Evolution de la ville et la côte d'Oran entre 1757 et 1831.



Evolution de la ville et la côte d'Oran entre 1857 et 1890.





Fig. 2 Evolution de la ville et la côte d'Oran et d'El Marsa El Kebir entre 1757 et 2001.

La cartographie se porte sur la délimitation du zonage d'aléas, et à argumenter les recommandations et motivé l'action prise. Le zonage a pour but de constater et recenser les enjeux et le danger (faune, flore, homme et bien public), et à classer les pistes favorables pour comprendre et agir contre ces aléas. De plus, la brutalité de certaines manifestations, qui doivent être cartographiées, (éboulement de falaise, avalanche dunaire, glissements, etc.) représente parfois un véritable danger pour l'ensemble de l'écosystème (monde végétal et animal). Ces événements temporaires peuvent être associés à des situations climatiques néfastes.

### 5.1 Schéma de zonage (fig. 3)

#### a- Principes de réalisation

Le schéma borne les zones ou sont approuvables :

1. Des interdictions ou mesures de prévention ;
2. Des protection et de sauvegarde.

Ces zones sont déterminées sur des critères analytiques et d'observation, ce qui conduit à considérer deux types de zones.

1. Les zones à fort danger ou polluées «rouges».
  2. Les zones à moyen ou faible danger « bleues ».
- Leur délimitation se fonde sur l'origine et la gravité du risque par :

1. La nature et l'intensité des aléas ;
2. La pollution et l'urbanisation effective de la bande;
3. La création crédible d'ouvrages de protection.

Selon le cas, et l'état les zones protégées ou en projet de zone protégée (cas de l'île de Rachgoun, (Boutiba, 1998 ; Bachir Bouyadjra, 2005) seront défendues de tout projet. L'application de ce plan peut conduire à un premier projet de zonage réglementaire qui nécessitera une confrontation aux mesures de protection déjà établies relevant de la Loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement, l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral. Pour sa généralisation et sa crédibilité, le zonage doit être présenté aux

partenaires locaux et instructeurs, ainsi qu'il doit proclamer strictement les cibles visées et les moyens d'oeuvre. De ce fait, les différentes discussions techniques, économiques et scientifiques doivent être justifiées sur les réalités de l'état environnemental. Notons qu'il est indispensable de faire participer au débat d'autres acteurs publics ou privés, qui sont souvent impliqués dans la gestion du littoral, telles que les chambres de commerce, de l'agriculture et de l'industrie, les organismes de développement ou d'aménagement touristique, les associations représentatives, etc. Les limites de zones seront tracées en fonction :

1. Des limites d'aléas quand ils sont déterminants ;
  2. Des limites urbaines comme dans le centre urbain;
  3. Certaines caractéristiques structurantes (route ou défense côtière, falaise, etc.).
- On a désigné généralement le rouge pour les zones à fort risque ou polluées, le bleu pour les zones à moyen ou faible risques (Fig.3). Il est préférable d'envisager quelques exemplaires de ce zonage, destinées aux principaux services de l'administration, ainsi que pour une vulgarisation plus large. Cette dernière démarche est indispensable car le zonage doit tenir compte des contraintes et des limites en matière d'aménagement et d'urbanisation apportées par les différentes lois relatives à l'aménagement et la protection du littoral. Dans cette optique, les aménagements qui pourraient amplifier les risques, comme les déboisements, les surcharges, les glissements de terrains, les assainissements individuels, doivent être écartés et détruits (cas fréquent sur le littoral oranais).

#### b. Zone rouge

Dans cette zone, toutes nouvelles constructions sont interdites, mis à part :

1. Les constructions indispensables à la conservation d'une activité (agricole, sportive, de loisirs, etc.) contribuant à la bonne gestion de l'environnement et compatible avec le risque;

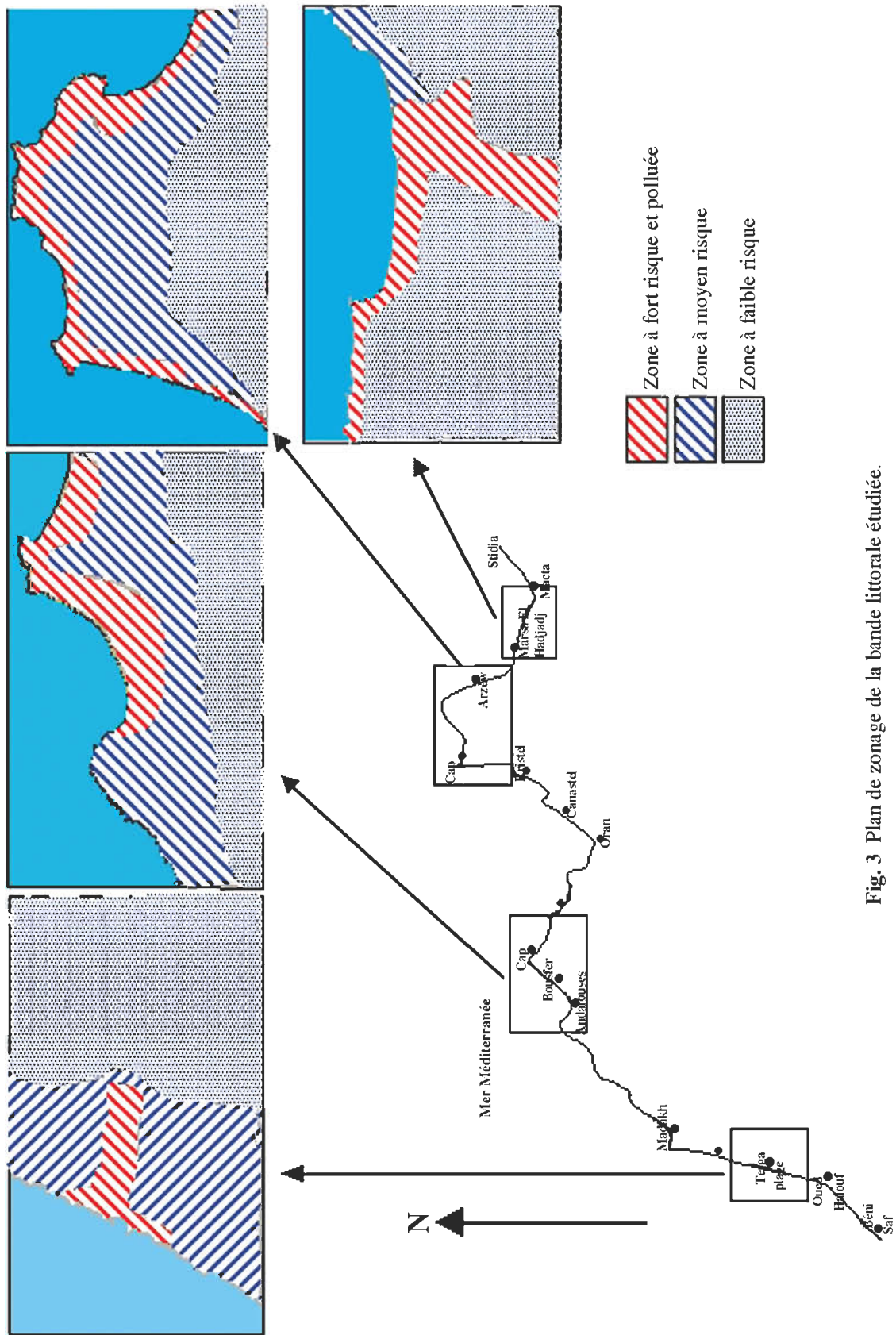


Fig. 3 Plan de zonage de la bande littorale étudiée.

2. Les rétablissements de biens sinistrés (permises par d'autres réglementations), sous réserve que le danger de ces biens soit diminué ;

3. Les tâches et les installations du bâti permettant de briser le risque ;

### **c. Zone bleue**

Dans cette zone certains aménagements ou constructions y sont admises mais avec précautions adaptées au risque. En effet, pour les côtes soumises à des reculs de falaise ou des glissements littoraux, la zone bleue est fixée au delà de la limite de recul du trait de côte à 100 ans.

## **6. Conclusion**

Les Mesures de prévention, de protection et de sauvegarde à prendre doivent, être individuel et d'ensemble. Il peut s'entendre de moyens simples, qui sont à la charge des collectivités :

1. Installation et surveillance de sites ou d'ouvrages ;
2. Examen des risques et des précautions à prendre, sur la fragilité des espaces littoraux (côte, dunes, plages, récif, etc.) ;
3. Cartographie du danger dans les zone d'effondrement, d'éboulement, d'avalanche dunaire, d'inondation, etc. ;
4. Réglementation sur l'accès à la zone littorale sensibles;
5. Exécution de plans d'intervention en cas de danger;

Il est également très important de veiller sur la réalisation d'études et de travaux de défense, et de protection d'espèces et d'espaces littoraux, ainsi que la surveillance et la conservation des richesses existantes. Aussi, la nécessité de l'application des articles et lois en faveur de la protection des ressources marines et côtières. Le risque d'érosion, en particulier de la côte sableuse, a été le souci majeur de plusieurs ouvrages et études. Parmi les formes de protections on peut citer les épis qui correspondent à des oeuvres en pierre ou en béton, qui se rangent orthogonalement à la ligne de côte, créant des obstacles à la dérive littorale. D'autres dynamiques défensives sont : les murs de protection, érigés dans le haut de plage, modifiant les échanges de sable et conservant les infrastructures menacées (Paskoff, 1993 ; Simon, 1994).

En définitive, la protection de la géographie côtière et marine et intimement liée et exige donc des études d'impact pilotées par des équipes pluridisciplinaires avec la collaboration des décideurs et les gestionnaires.

En conclusion on peut prévoir deux types de protection:

**Une protection défensive** qui se porte sur la fixation du trait de côte par des enrochements ou des quais, lorsqu'on a une menace directe des sites. Dans le cas des côtes meubles et les plages la protection, vise les effets humains et naturels, alors qu'en base des falaises, elle intéresse les effets de l'érosion marine.

**Une protection offensive** qui traite les origines de l'érosion. En premier lieu l'impact des actions prises doit être bien étudié afin de prévenir, toute sorte de complication comme le cas de l'amont et l'aval (sens de migration des zones d'érosion) (Bouras et al, 2004). En effet, sur les côtes basses meubles, on peut envisager et discuter des constructions d'épis, de brise-lames. Egalement le rechargement de plage par les sédiments d'apport conduit aux résultats suivants:

- Protéger et favoriser la sédimentation devant le trait de côte ;
- Affaiblit l'énergie des houles ;
- Briser la capacité érosive des vagues.

Le traitement de l'érosion dunaire des côtes par l'action anthropique (exemple : circulation de véhicules, vol des sables, construction, route...) peut être envisagé sur le plan législatif.

## **Références**

- BACHIR BOUYADJRA. B. 2005. Contribution à l'étude d'un site à intérêt écologique pour la Méditerranée, en vue de classement en aire protégée, cas de l'île de Rachgoun. Thèse. Magist. Univ d'Oran, Algérie., 84p.
- BOURAS. D. BOUTIBA. Z. & BENHAMOU. M. 2004a. Géoconnaissance et gestion environnementale, 1<sup>er</sup> Sém Nat, géoscience au service du développement durable, Univ. Tébessa, (Algérie), 26-27 Avril 2004.
- BOURAS. D. & BOUTIBA. Z. 2004. Ecologie discipline d'impact. Edit les 3 Pommes. Oran, Algérie, 117p.
- BOUTIBA. Z. 1998. Projet île de Rachgoun réserve naturelle d'intérêt écologique et faunistique. Conf. Internat. pour la Protection des Mammifères marins en Méditerranée Occidentale (RIMMO 8), Antibes (France), Nov, 1999.
- PASKOFF. R. 1993 Cotes en danger, Masson collection (pratique de la géographie), 250p.
- SIMON. B. 1994. Statistiques des niveaux marins extrêmes le long des cotes de France, service hydrographique et océanographique de la Marine, section géodésie-éophysique, rapport n°001/94. 78p.

## Cartographie automatique de zones de mouvements de terrains à partir de données digitales : cas de Kef bou khélil près de Ouzera , région de Médéa , Algérie .

Kouidri Rabia \* et Ougrine Moussa \*\*

\* Chargée de recherche, géomorphologue : INRF : Ain d'heb, Médéa, Algérie. E-mail : koudri\_rabia@yahoo.fr Ou mugueltjoli@caramail.com

\*\* Master en SIG et télédétection Responsable du département: photogrammétrie INCT, Hussein dey, Alger, Algérie. E-mail : ougrinem@yahoo.fr

**Résumé :** Le présent article a pour objectif de présenter une approche développée pour l'étude des mouvements de terrains dans la région de Médéa ( Kef bou khélil : Ouzera) en utilisant la cartographie automatique à partir de données digitales. A cet effet, certains paramètres géophysiques (carte numérique, le MNT, l'image Raster, ont permis respectivement la caractérisation de l'état des mouvements de terrains (glissement, éboulement, lave torrentielle, ravinement et ensablement des barrages) et de l'état lithologique. La synthèse de l'ensemble des résultats ainsi que leurs confrontations avec d'autres types de données (carte géologique, carte géomorphologique ont permis de dresser une carte des risques d'érosion selon les paramètres suivants : Morphologie, pente, orientation du terrain, végétation, oueds d'où forte érosion. Ces résultats sont indispensables pour l'identification des zones à risques et l'élaboration des plans de suivi et de lutte contre les mouvements de terrains cités ci-dessus.

**Mots clés :** Kef bou khélil, Médéa, mouvements de terrains, MNT, cartographie, suivi.

**Summarized:** This article aims to present an approach developed for the motion study of grounds in the area of Médéa (Kef bou khélil: Ouzera) by using the automatic cartography starting from digital data. To this end, certain parameters geophisic (numerical chart, the MNT, the Raster image, respectively allowed the characterization of the state of the movements of grounds (slip, crumbling, torrential lava, gullyng and silting of the stoppings) and of the lithological state. The synthesis of the whole of the results like their confrontations with other types of data (geological map, geomorphological chart made it possible to draw up a chart of the

risks of erosion according to following parameters': Morphology, slope, orientation of the ground, vegetation, wadis from where strong erosion. These results are essential for the identification of the zones at the risks and the development of the plans of follow-up and fight against the movements of grounds quoted above.

**Key words:** Kef bou khélil, Médéa, movements of grounds, MNT, cartography, follow-up.

### Généralités

#### - Zone d'étude

Kef bou khélil (Ouzera) est située dans le bassin sédimentaire de Médéa, intra-montagnard, au nord ouest du tell algérien, à des altitudes variant entre 1200m et 600m. Il s'étend entre les méridiens 2°50' et 2°60' et entre les parallèles 36°12' et 36°18'. Sa superficie totalise 2 km<sup>2</sup> au niveau du village Ouled Aich

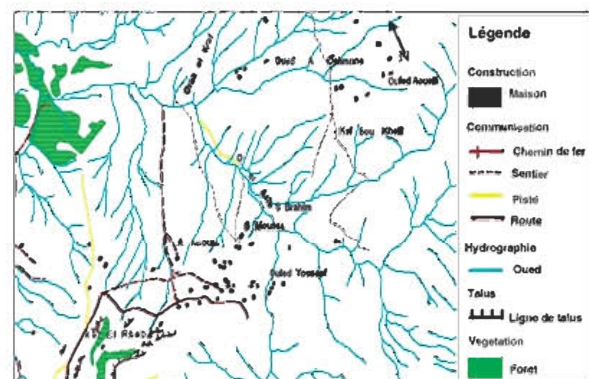


Fig.1 Carte de situation de la région de l'étude

**- Caractéristiques de la région**

**• -Relief montagneux**

Kef bou khélil se situe dans la zone centrale du bassin sédimentaire de Médéa dont l'altitude est de 1240 m. Kef bou khélil étant un ancien plateau, constituée de dépôts d'âge tertiaire d'origine marine.

**• -Climat**

Le climat est de type méditerranéen sub-humide à variante tempérée. La pluviométrie annuelle moyenne est de 800 mm, la température moyenne est de 15,6°C avec 6,75°C au mois de janvier et de 24,6°C au mois d'août. Les températures variant entre -8° et -2° entre février et avril, agissent sur la végétation. La gélifraction s'attaque aux roches de la corniche gréseuse de Kef bou khélil d'où éboulement en avril.

A Ouzera, le 08/02/2005, un enneigement de 2 à 1m de hauteur qui a duré 10 jours, a provoqué sur les versants des ravines existantes de Kef bou khélil, des mouvements de masse et une coulée boueuse. Dans cette région, l'excès ou le déficit d'eau pose un problème en raison de la nature du substrat et des sols. Le surplus d'eau a provoqué les glissements de terrains sur substrat argileux et les ravinements sur sol dénudé.

**• -Fortes érosions**

La zone de Kef bou khélil qui culmine à 1240m, s'abaisse du nord vers le sud jusqu'à l'oued El azib. Les ravines sont actives, ramonées en hiver par des coulées de neige ou des avalanches de pierres, peu à peu approfondies par le gel et les eaux courantes. A l'aval de chacune de ces ravines. Il existe des cônes de déjection où les premiers amas de dépôts meubles seraient susceptibles d'être une proie facile par le ravinement.

**• Mouvements de terrains**

(Glissement, éboulement, lave torrentielle): Les versants de Kef bou khélil sont caractérisés par de fortes pentes 40% à 50% (voir fig2), l'énergie de la pluie ajoutée à la gravité est suffisante pour provoquer des micro-glissements de terrains.

Les mouvements de masse sont liés à la lithologie et à l'état d'altération superficielle: toutes les ravines sont situées sur les marnes gypseuses et argileuses.

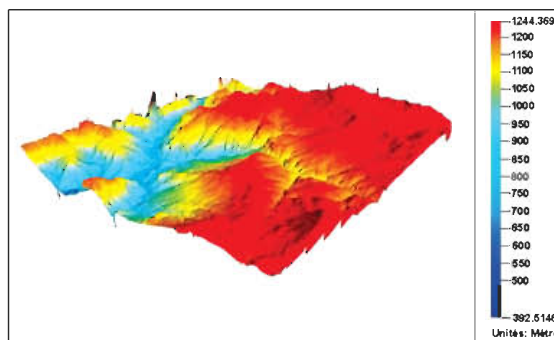


Fig. 2 Image raster du MNT issu des courbes de niveau au 1/50 000 Vectorisées de la carte de Médéa

**Inventaire et cartographie des facteurs d'éboulement et de glissement**

**a -Formations géologiques et lithologiques de surface**

La lithologie représente l'élément moteur dans l'évolution du paysage de Kef bou khélil. Les formes d'érosion décrites précédemment relève de l'extrême variation des faciès géologiques (marnes à gypse, argiles, marno-calcaires, grès, calcaires, grès quartzitiques). (Voir fig3)

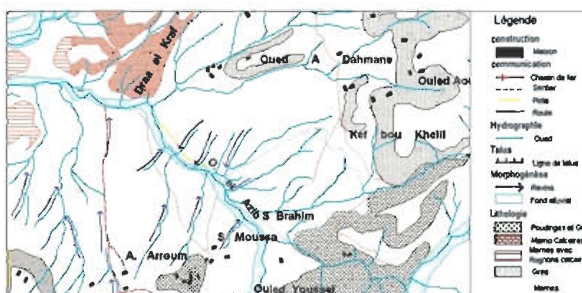


Fig. 3 Carte géomorphologique de la région de l'étude

**Paramètres et facteurs extraits des données numériques**

Données numérique	Produits dérivés
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte digitale des Formations de surface</li> <li>• Modèle numérique de terrain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formations lithologique de surface</li> <li>• Orientation de la pente, morphologie, proximité aux drains de réseau hydrographique</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte géologique digitale</li> <li>• Image Raster de la carte de Médéa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mouvement de terrain</li> <li>• Végétation</li> </ul>

### **b- Angle de Pente**

Les glissements correspondent plus particulièrement aux pentes comprises entre 30 % et 40 %.

### **c- Orientation de la pente**

Elle montre les zones exposées aux ubacs figés par le gel et montre également les versants subissant une altération résultant des cycles humectation / dessiccation. Les sols sont soumis à l'action intense et prolongée du soleil. Cette exposition provoque une dessiccation des sols (cuisson). Le matériau est fragmenté en surface et se prolonge par une fissuration profonde (fentes de retrait visibles sur le terrain).

### **d- Morphologie**

Etude des formes des versants et de leur stabilité. Nous avons trois unités morphodynamiques :

- Le ravinement qui constitue de loin le processus érosif le plus fréquent puisque les entailles actives forment un éventail
- La langue rougeâtre (lave torrentielle): coulée boueuse
- Les glissements de terrain.

### **e- Proximité aux drains du réseau hydrographique**

Les eaux circulant dans la masse du sol emportent les argiles ou les sels solubles et forment des cavités linéaires (tunneling), qui grandissent progressivement jusqu'à l'effondrement du toit.

### **f- Mouvements de terrains**

Bien souvent le ravinement s'organise au pied de zones de glissements de terrains dans ce paysage concave où les versants des ravines forment un éventail, zones de concentrations des eaux de surface.

### **g- végétation**

A cause de la salure très répandue sur la surface du terrain, il n'existe que de l'alfa (stypa - ténacissima). La zone de Kef bou Khéllil est dénudée, soumise à un fort ravinement, est le lieu favorable aux mouvements de terrain.

### **Cartographie des zones d'instabilité**

L'action conjuguée de plusieurs facteurs favorise et augmente le risque d'instabilité. Suivant les facteurs énumérés, on a obtenu ainsi une carte d'aléa de mouvement de terrain. (voir fig.04)

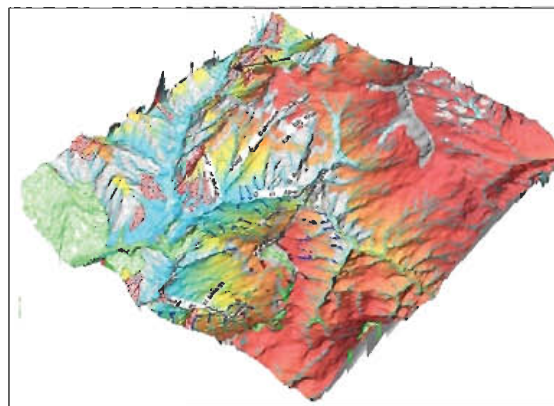


Fig.4 : Les différents paramètres agissant sur les aléas

### **Discussion**

Les aléas se situent sur les glissements de terrains et également sur la grande roubine sous forme d'éventail, alors que les interfluves sont stables. Les aléas proviennent de ces différents paramètres : géomorphologie, pente, orientation, végétation, oueds.

### **Conclusion**

L'analyse de plusieurs facteurs a permis d'établir une carte faisant apparaître en chaque endroit la superposition de données binaires. L'avantage de la cartographie automatique est de donner systématiquement le nombre de facteurs d'aléa présent en chaque endroit, ce qui permet une évaluation chiffrée et reproductible.

### **Références**

- Bufalo M . , 1989 :l'érosion des terres dans la région du BUECH (hautes alpes , France).230 pages.
- Cosandey C., 1993 : la crue du 22 septembre sur le mont Lozère . Revue de géomorphologie dynamique . Strasbourg, XI.II n°2 49-56.
- Gelugne P., Bardintzeff J.M, Guillaude R., Brousse R., Chorowicz J. & Parrot J.F. (1993). Imagerie satellite Spot et modèle Numérique de terrain. Application aux problèmes d'environnement et à la reconnaissance des risques d'instabilité de terrain sur l'île de Tahiti- journées Internationales Pix-iles, Nauméa-Tahiti, 19-24 novembre 1990.6p - <http://plante.scg.ulaval.ca/MNT/intro.html>
- Koudiri R.et al ., 1989 :quantification de l'érosion en ravine . Approche dans le temps et dans l'espace . Réseau érosion , bulletin n° 09 , pages :52 à 54.
- Koudiri R., 2003: l' érosion ravinante sur les terres agricoles MEDEA Algérie - Bulletin des Sciences géographiques , INCT pages 53 à 56 .

# Application du SIG et de la télédétection dans la gestion des feux de forêts en Algérie

Mostefa Belhadj-Aissa, Aichouche Belhadj-Aissa et Youcef SMARA  
Laboratoire Traitement d'Images et Rayonnements  
Faculté d'électroniques et d'information / USTHB  
BP 32 El - Alia Bab Ezzouar, Alger- ALGERIE  
Fax + 213 21 24 71 87 Email: mbelhadjaissa@yahoo.com

**Summary :** Algeria is affected by fourteen major risks and the means for the management of these disasters are limited and often inadequate. The major risks can be divided into two categories :

(i) The first concerns natural disasters and includes earthquakes, landslides, floods, forest fires, storms and violent winds, drought and acridian invasions.  
(ii) The second is related to technological disasters. It includes fires-explosions, pollution, and biologic risks as well as air, sea, railway and road accidents. These risks are managed by highly regulated and technical means, generally conventional, likely to eliminate risks endangering people, property and the environment.

These natural disasters are inevitable, but it is possible to minimise the potential risk by developing disaster early warning strategies using Remote sensing and GIS technologies, by preparing and implementing plans to provide resilience to such disasters and to facilitate rehabilitation and minimise the after effects of the disaster.

In fact, space technologies play a crucial role in efficient mitigation and management of disasters. This communication describes the role of remote sensing and Geographical Information System (GIS) in evolving a suitable strategy for disaster management in Algeria and evolving an occupational framework for the monitoring, assessment and mitigation these disasters and particularly forest fires where we carried out these new technologies with the collaboration of the services of civil protection in our country.

This communication also identifies gap areas and recommends appropriate strategies for forest fires management using these technologies.

**Mots clés:** cartographie, éléments du risque, incendie, forêt, catastrophe, méthodes, besoins, analyse spatiale, données.

## 1. Introduction

La télédétection et les GIS peuvent être des outils très complémentaires avec les méthodes conventionnelles utilisées dans la prévention et la gestion des catastrophes. Ces technologies sont d'autant plus utiles lorsqu'on dispose une connaissance détaillée du risque, la fréquence attendue, le caractère, et l'intensité des événements dans une région. Les images satellitaires donnent une vue globale et fournissent des informations très utiles sur l'environnement, pour une grande gamme d'échelles, de continents entiers aux détails de quelques mètres. La télédétection peut suivre l'événement pendant le temps de la catastrophe. La place du satellite le rend idéal pour l'organisation et la gestion opérationnelle de l'événement. Finalement, la télédétection peut contribuer à l'estimation des dégâts et après cela, elle peut être utilisée pour dresser une carte de la nouvelle situation et mettre à jour la base de données.

Dans cette communication nous nous intéresserons à la présentation de l'utilisation de la télédétection et des SIG pour la gestion des risques de feux de forêts dans lesquels nous avons contribué directement à mettre en place ces nouvelles technologies avec la collaboration des services de la protection civil de notre pays.

## 2. Contexte et objectif recherché

Chaque année plus de 20 000 hectares de forêts sont détruits par les feux en Algérie. Les feux coûtent beaucoup en termes de vies humaines et en biens et nos préoccupations sont orientées vers l'historique des feux de forêts dans le pays, l'inventaire, la prévention et la gestion.

La prévention et l'alarme précoce constituent les seuls moyens de réduire le coût des dégâts causés. Durant les feux de forêts majeurs, les options sont souvent limitées à la bravoure des pompiers qui tentent de lutter contre les feux.

Les indicateurs essentiels qui favorisent ces feux sont principalement le déclenchement (chaleur, absence de précipitation, pyromane, etc), la rapidité de propagation (nature du terrain, de la végétation, humidité), l'orientation des vents et absence d'obstacles naturels (rivières) ainsi que les paramètres géographiques de la région, qui guident la mise en place de plans d'intervention en temps réel à savoir :

- La topographie (terrain accidenté ou non).
- Les accès (réseaux routiers, pistes).
- Les agglomérations (les habitants, les sites stratégiques).

Ces dernières années, les données issues des satellites d'observation de la terre associées aux différents types d'informations liées à ce phénomène intégrées dans un système d'information géographique se sont avérées comme une option viable de suivi des urgences, d'identification des zones à risques et de cartographie de l'étendue des feux.

### 3. Méthodologie et Modélisation

En effet, la cartographie des zones incendiées peut être obtenue par les techniques de détection de changement et la régression des valeurs des indices de végétation (NDVI) avant et après l'incendie.

La méthodologie adoptée a consisté à :

I) traiter et structurer les données, déterminer et établir les indicateurs et paramètres qui favorisent le déclenchement des feux de forêts :

- La première approche est basée sur l'analyse de l'évolution temporelle de l'indice de végétation (NDVI). Une baisse de celui-ci est supposé être en relation avec une augmentation du danger du feu.

- Le second indicateur de danger de feu est dérivé de la relation entre les différentes composantes déterminant l'indice de risque de feu de forêt.

II) Présenter aux secteurs concernés les :

- Cartes d'états de surface à un instant 't' (carte de superficie végétale, carte des accès, carte des altitudes, etc..)

- Carte des indicateurs de zones sensibles à de tels événements par l'intégration des données météorologiques.

Pour notre part nous avons adopté la méthodologie suivante:

- Génération d'une base de données numériques descriptives de toutes les informations d'intérêt.

- Elaboration des outils d'analyse permettant de mettre en évidence les corrélations entre les différentes données et d'apprécier l'adéquation des dispositifs par rapport aux normes de références de la Protection Civile.

- Etablissement d'une carte de risque de feu de forêt. La méthodologie générale adoptée est donnée par le synoptique suivant:

Notre zone d'étude choisie (figure.1), d'environ 835 ha, est située à l'Ouest d'Alger, au cœur d'une zone urbaine. Etant donnée de la superficie moyenne de notre zone d'étude, nous avons focalisé notre étude uniquement sur la combustibilité qui est liée à la nature des espèces végétales de la région, sur l'aspect anthropique et l'aspect topomorphologique.

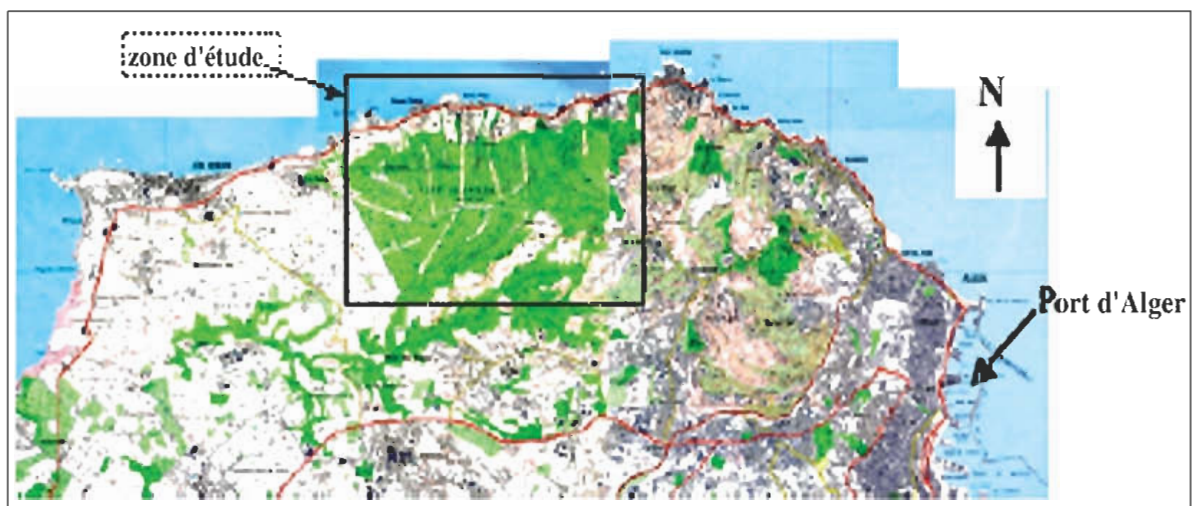
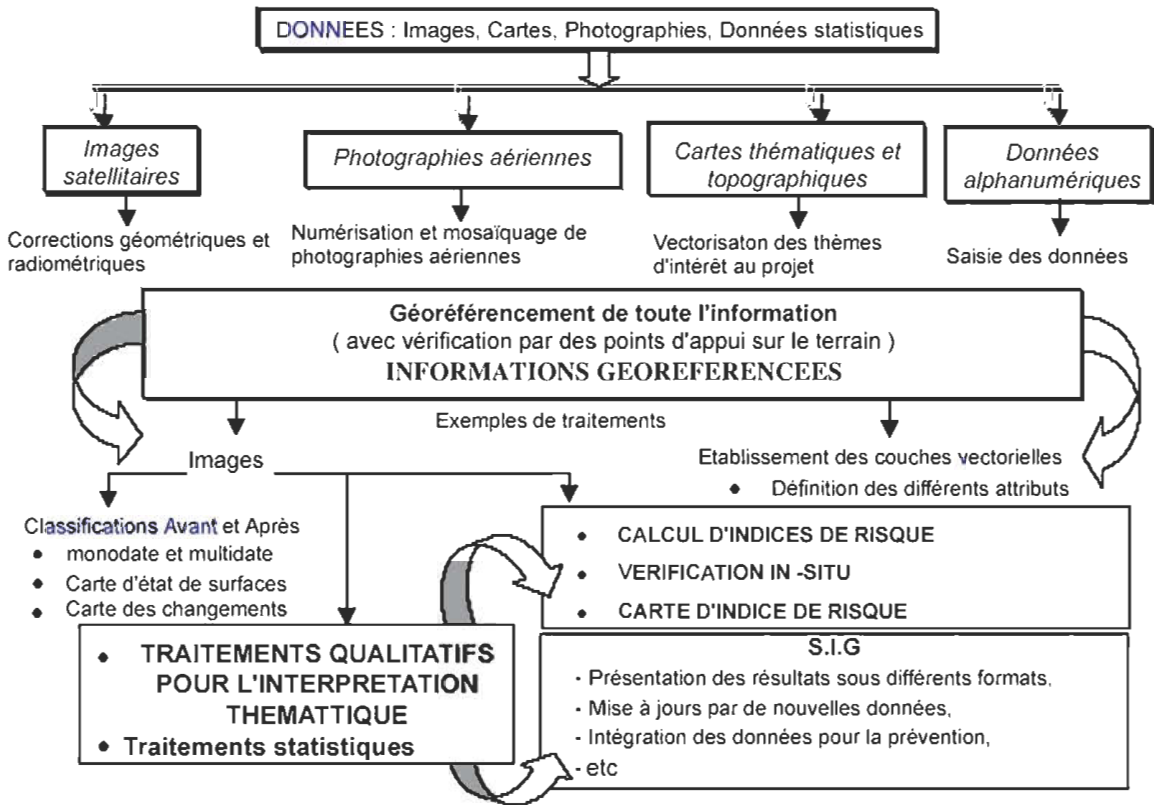


Fig. 1 Zone d'étude. La Forêt de Bainem





Quant aux conditions climatiques qui elles aussi influent sur l'écllosion du feu, interviennent lors de l'analyse thématique par la combinaison des différents éléments qui les caractérisent à savoir la température, l'humidité et les vents. Pour calculer le risque, il est nécessaire de modéliser chacun des éléments du risque. Cette étape consiste à sélectionner les paramètres propres à chaque

élément (type de combustible, pente, etc) puis à utiliser un mode de représentation du risque afin de « l'évaluer ». Les paramètres sont les facteurs du milieu naturel et anthropique qui influencent l'écllosion, la propagation et l'intensité du feu, ainsi que sont déroulement (aspects liés à la lutte). Les principaux paramètres, appelées composantes, sont représentés par le diagramme de la figure 2:

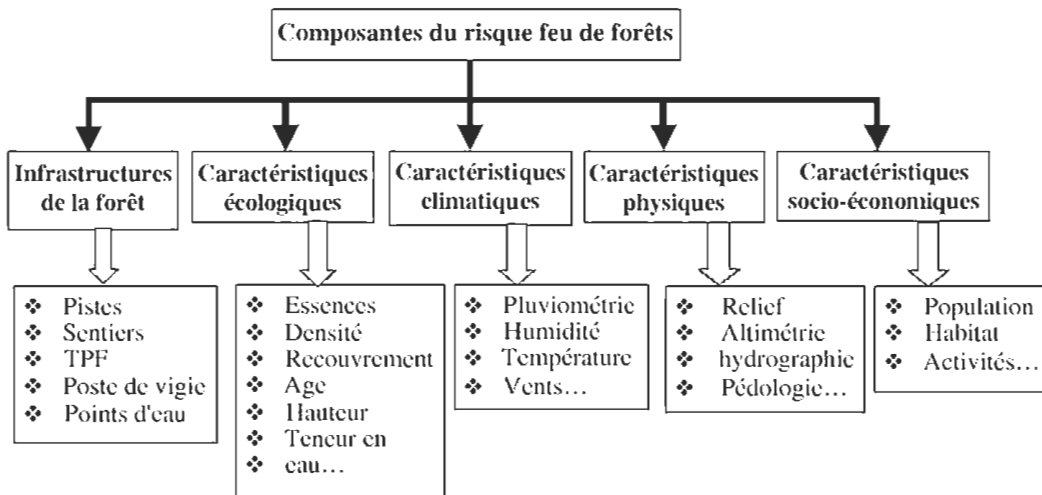


Fig. 2 Les différentes composantes intervenant dans le calcul du risque de feu de forêt

La composante activité humaine peut être utilisée dans trois aspects des éléments du risque: source de départ de feu, enjeux (personnes, biens, installations), moyens de lutte.

Ces différents paramètres sont très corrélés et c'est leur combinaison qui influence ou provoque l'éclosion de l'incendie.

### 3.1 Modélisation de l'indice de risque (IR)

Pour notre application, nous avons utilisé le modèle d'indice de risque mis au point par A.DAGORNE (DAGORNE, 1993), sur des zones similaires sur le côté nord de la Méditerranée. Nous avons adapté cet indice au type de risque en Algérie.

$$IR = 5 IC + IM + 2 IH$$

où **IC**, représente l'indice de combustibilité, **IM**, l'indice topomorphologique et **IH**, l'indice d'occupation humaine.

La caractérisation de cet indice est basée sur la variabilité spatiale du risque d'incendie dont la détermination est issue des paramètres physiques intervenant dans le modèle choisi pour notre application.

En effet, une zone dont l'indice de risque, dû aux composantes citées ci-dessus, étant déterminé, l'aspect climatique ne fait que l'accentuer ou l'atténuer (la température, le taux d'humidité et les vents sont des composantes très corrélées).

Ainsi nous avons retenu, pour cette modélisation, les éléments les plus pertinents, le couvert végétal dont les paramètres descriptifs interviennent dans le calcul de l'indice de combustibilité, le relief représenté par les paramètres topographiques qui interviennent dans le calcul de l'indice topomorphologique, les infrastructures routières et le paramètre anthropique qui sont utilisés pour évaluer l'indice d'occupation humaine.

#### 3.1.1 Modèle de l'indice de combustibilité(IC)

Les principaux critères qui interviennent dans l'apparition d'un feu dans un espace végétal, sont la structure spatiale du combustible (recouvrement horizontal et stratification verticale)

et la nature des espèces dominantes. Les espèces dominantes qui caractérisent les formations en raison de leur importance constitutive influent sur l'inflammabilité et la combustibilité des peuplements intrinsèques (TRABAUD 1980).

Pour évaluer l'indice IC nous utilisons une méthode proposée par A. MARIEL (MARIEL, 1995) pour estimer la gravité potentielle d'un feu démarrant dans un peuplement forestier déterminé.

Cette méthode a consisté en la mise au point d'un modèle, empirique, basé sur l'expérience des sapeurs-pompiers pour pondérer les termes d'une expression mathématique dont les paramètres proviennent d'une description normalisée de la végétation.

C'est ainsi qu'un indice d'intensité potentielle du feu (ou indice de combustibilité) a été exprimé par la relation suivante:

$$IC = 39 + 0.23 BV (E - 7.18)$$

**BV** est calculé à partir du biovolume combustible par addition des pourcentages de recouvrement de chacune des strates biologiques à partir des relevés terrains .

**E** représente la combustibilité moyenne de chaque type de peuplement. Elle est égale à la somme de la note de combustibilité de l'essence prédominant du relevé (**E1**) et la moyenne des notes de combustibilité des espèces abondantes du relevé (**E2**) (tableaux.1a,1b,1c).

Il est important de noter, d'une part, que ce potentiel calorifique n'est qu'un risque « biologique » indépendant de toute action humaine, négative (mise à feu) ou positive (lutte) et, d'autre part, que la combustibilité d'une formation de végétation apparaît ici clairement comme dépendant avant tout des espèces qui la composent.

Le biovolume intervient de façon différente suivant la valeur de **E**. Si cette valeur est inférieure à 7.18 (espèces peu combustibles ou à pouvoir calorifique par unité de biovolume faible), l'indice reste inférieur à 40. Dans le cas contraire, il sera d'autant plus élevé que le biovolume sera important.

**Tableau 1a,1b,1c .** Notes de combustibilité des principales espèces dominantes de la végétation méditerranéenne (Source CEMAGREF)

<b>LIGNEUX HAUT</b>			
<b>Arbousier</b> ( <i>Arbutus unedo</i> )	5	<b>Châtaignier</b> ( <i>Castanea Sativa</i> )	5
<b>Chêne vert</b> ( <i>Quercus ilex</i> )	7	<b>Erable</b> ( <i>Acer palmatum</i> )	5
<b>Hêtre</b> ( <i>Fagus ylvatica</i> )	2	<b>Peuplier</b> ( <i>Populus nigra, poplar</i> )	2
<b>Ome</b>	2	<b>Pin noir</b> ( <i>Pinus nigra Arn.</i> )	7
<b>Pin maritime</b> ( <i>Pinus pinaster</i> )	7	<b>Pin de salzman</b> ( <i>Pinus salzmanni</i> )	7
<b>Pin sylvestre</b> ( <i>Pinus sylvestris</i> )	7	<b>Saule</b> ( <i>Salix alba, Willow</i> )	2
		<b>Cèdre</b> ( <i>Cedrus atlantica</i> )	6
		<b>Épicéa</b> ( <i>Picea abies</i> )	6
		<b>Chêne pubescent</b> ( <i>Quercus pubescens</i> )	5
		<b>Douglas</b> (- <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	6
		<b>Frêne</b> ( <i>Fraxinus spp.</i> )	2
		<b>Robinier</b> ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )	2
		<b>Cyprés</b> ( <i>Cupressus macrocarpa</i> )	6
		<b>Noisetier</b> ( <i>Corylus avellana</i> )	2
		<b>Pin d'Alep</b> ( <i>Pinus halepensis</i> )	7
		<b>Pin pignon</b> ( <i>Pinus pinea</i> )	7
		<b>Sapin</b> ( <i>épicéa</i> )	6

<b>LIGNEUX BAS</b>			
<b>Ajonc épineux</b> ( <i>Ulex europaeus</i> )	8	<b>Amélanchier</b> ( <i>Amelanchier laevis</i> )	3
<b>Bruyère cendrée</b> ( <i>Erica cinerea L</i> )	6	<b>Bruyère à balais</b> ( <i>Erica scoparia</i> )	7
<b>Callune</b> ( <i>Calluna vulgaris</i> )	6	<b>Ciste blanc</b> ( <i>CISTUS albidus</i> )	6
<b>Eglantine</b> ( <i>Rosa canina L</i> )	5	<b>Ciste à f. de sauge</b> ( <i>cistus salvifolius</i> )	3
<b>Genet scorpion</b> ( <i>Genista scorpius</i> )	8	<b>Genet d'Espagne</b> ( <i>Spartium junceum</i> )	5
<b>Lavande à large f.</b> ( <i>Lavandula litifolia</i> )	5	<b>Genet à balais</b> ( <i>Cytisus scoparius L.</i> )	5
<b>Romarin</b> ( <i>Rosmarinus officinalis</i> )	5	<b>Genévrier commun</b> ( <i>Juniperus communis</i> )	7
<b>Térébinthe</b> ( <i>Pistacia terebinthus</i> )	4	<b>Genévrier oxycèdre</b> ( <i>Juniperus oxycedrus</i> )	7
		<b>Chêne kermès</b> ( <i>Quercus coccifera</i> )	8
		<b>Pistachier lentisque</b> ( <i>Pistacia lentiscus</i> )	4
		<b>Ronces</b> ( <i>Rubus fruticosus</i> )	6
		<b>Stachéline</b> ( <i>Stachelina dubia</i> )	3
		<b>Filaria</b> ( <i>Phillyrea latifolia</i> )	5
		<b>Thym</b> ( <i>Thymus vulgaris</i> )	4
		<b>Bruyère arborescente</b> ( <i>Erica arborea</i> )	8
		<b>Bruyère multiflore</b> ( <i>Erica multiflora L.</i> )	6
		<b>Buis</b> ( <i>Buxus sempervirens</i> )	5
		<b>Canne de Provence</b> ( <i>arundo donax</i> )	5
		<b>Epine du christ</b> ( <i>Paliurus spina-christi</i> )	3
		<b>Genet purgatif</b> ( <i>Cytisus purgans</i> )	7
		<b>Lavande stéchade</b> ( <i>Lavandula stoechas</i> )	5
		<b>Prunellier</b> ( <i>Eriogaster catax</i> )	4

<b>HERBACEES</b>			
<b>Agrostis</b>	1	<b>Anthyllide</b> ( <i>Anthyllis vulneraria</i> )	1
<b>Brachypode des bois</b> ( <i>Brachypodium sylvaticum</i> )	1	<b>Aphyllanthe</b> ( <i>Aphyllanthes</i> )	1
<b>Canche flexueuse</b> ( <i>Deschampsia flexuosa</i> )	1	<b>Brachypode rameux</b> ( <i>Brachypodium ramosum</i> )	1
<b>Fromental</b> ( <i>Arrhenatherum elatius</i> )	1	<b>Brachypode penné</b> ( <i>Brachypodium pinnatum</i> )	1
		<b>Dactyle</b> ( <i>Dactylis glomerata</i> )	1
		<b>Fétuques</b> ( <i>Festuca</i> )	1
		<b>Fougère aigle</b> ( <i>Pteridium aquilinum</i> )	2
		<b>Inule visqueuse</b> ( <i>Inula viscosa</i> )	1

### 3.1.2 Modèle de l'indice topomorphologique (IM)

Trois paramètres topographiques interviennent dans le modèle ; la pente, l'exposition, et l'altitude qui est exprimée dans le modèle de l'indice par les paramètres topomorphologiques. Tous ces paramètres sont déduits à partir du modèle numérique de terrain (M.N.T ) de la région. Cet indice est exprimé par la relation suivante:

$$IM = 3p + (m \times e)$$

Où *p* représente la pente, *m* le paramètre de topomorphologie et *e* l'exposition. La pente modifie l'inclinaison relative du front des flammes par rapport au sol. Cela favorise le transfert thermique par rayonnement entre le front de flamme et la végétation encore intact, lors d'une propagation ascendante où la pente facilite la montée de l'air chaud. Ainsi elle constitue un facteur déterminant pour la vitesse de propagation des feux de forêt sur les versants. Cependant, une forte pente pourra contribuer soit à accélérer soit à ralentir la propagation d'un feu selon que l'orientation coïncide ou non avec la direction de propagation.

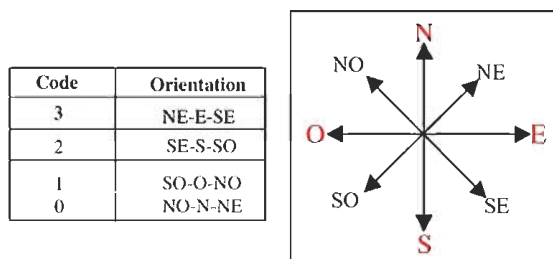
L'exposition au soleil nous renseigne sur la répartition, possible, des végétaux. Elle agit sur l'humidité des végétaux et leurs inflammabilité et combustibilité d'une manière indirecte.

L'Altitude prend de l'importance quand on se trouve dans une zone montagneuse. La connaissance du relief nous renseigne sur le comportement du feu et , de ce fait, permet le choix efficace de la méthode de lutte contre l'incendie. L'extension du feu est fonction de sa position sur la montagne ou le versant et de la configuration topographique susceptible d'augmenter ou de freiner sa propagation.

Certaines informations, comme celle de la pente, de l'exposition et de la topomorphologie, nécessitent un codage pour être exploitables dans notre application. Ainsi, en tenant compte des possibilités d'exécution des travaux forestiers (DAGORNE , 1993), quatre classes de pente sont à envisager pour la couche des pentes:

Code	Classes de Pentes	Critères
1	Moins de 15%	Zone où les machines agricoles peuvent intervenir
2	Entre 15 et 30%	Zone où les engins chenillés de type TP peuvent travailler
3	Entre 30 et 60%	Zone qui convient aux engins spécialisés
4	Plus de 60%	Zone où uniquement l'intervention manuelle est possible

L'expositions est déterminée par rapport aux quatre points cardinaux. Ces valeurs sont exprimées en degrés avec le nord comme origine. Dans ce cas aussi, nous utilisons un codage pour faciliter l'opération de calcul de l'indice de risque.



Dans le modèle que nous utilisons, l'information d'altimétrie est exprimée par les paramètres topomorphologiques. La topomorphologie est en relation direct avec la pente. Suivant le degré d'inclinaison on détermine les différentes classes morphologiques. Nous avons: la plaine, bas piémont, le haut piémont et la montagne (plus de 25%).

Code	Intervalle de Pente	Classe morphologique
1	Moins de 3%	Plaine
2	Entre 3 et 12,5%	Bas piémont
3	Pente entre 12,5 et 25%	Le haut piémont
4	Plus de 25%	Montagne

### 3.1.3 Modèle de l'indice d'occupation humaine (IH )

La présence de l'être humain et des habitations près des forêts constituent l'enjeu dont l'importance détermine le degré de vulnérabilité du milieu: il s'agit de la protection des vies humaines et des installations. Ainsi le paramètre anthropique est le principal terme dans le modèle de l'indice IH.

Donc, cet indice dépend de l'occupation humaine de l'espace et de son activité. La composante activité humaine peut être utilisée dans trois aspects des éléments du risque:

source de départ de feu, enjeux (personnes, biens, installations), moyens de lutte . N'ayant pas trouvé, dans la littérature, une expression qui nous permet de le calculer, nous avons proposé une démarche faisant intervenir deux aspects ; source de départ de feu et enjeux.

Le premier basée sur l'impact anthropique sur le proche voisinage forestier sur une profondeur de 100m.

Nous supposons que l'être humain exerce une « pression » sur le proche voisinage forestier (figure .3).

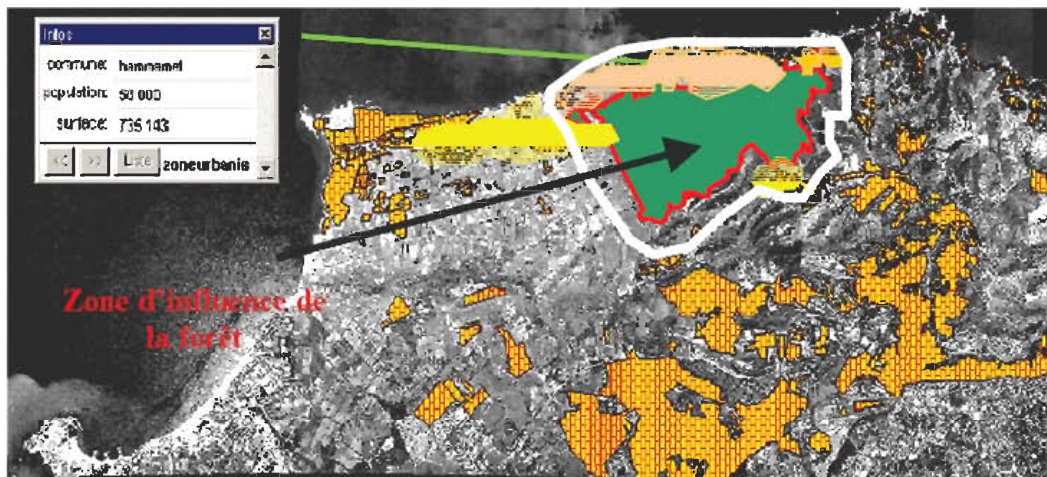


Fig. 3 Photo aérienne de la forêt de Bainem et ses alentours et la Couche bâti et sa table d'informations

Cette pression, nous l'exprimons par une densité (exprimé en pourcentage) : le rapport du nombre de personnes par unité de surface forestière voisine. La surface forestière que nous considérons est égale à l'intersection entre la zone d'influence de l'espace urbain et la zone forestière. Ainsi nous obtenons le premier paramètre que nous appelons (indice de voisinage IV) (figure 4). Par ailleurs, Il est important de tenir compte des infrastructures routières. En effet, la rapidité des interventions contre le feu est directement liée à la pénétration dans la zone.

Les réseaux routiers jouent le rôle de « coupe combustible » et permettent l'arrivée des secours. Cependant les éclosions d'incendie sont beaucoup plus fréquentes près des routes et des chemins de parcours des forêts.

Le deuxième paramètre ID (figure. 5), nous l'exprimons directement par la densité de l'intersection de la zone d'influence de la forêt et des zones urbaines voisines. Il exprime le degrés de présence humaine à l'intérieur ou à proximité de la forêt.

L'indice d'occupation humaine sera, alors, exprimé par la combinaison linéaire des deux indices (figure .6) soit:  $IH = IV + ID$

Où: IV: indice de voisinage et ID: indice de présence humaine. Le processus de calcul de l'indice de risque de feu de forêt est donnée par le diagramme de la figure.7

### 3.1.4 Réalisation de la carte de Risque de feu de la forêt de Bainem

En se basant sur le Diagramme de la procédure de calcul de l'indice de risque de feu de forêt (Figure.7) nous avons procédé par étape. La première étape a consisté en le géoréférencement de toutes les images utilisées à savoir:

les cartes (au 1/50000 et 1/7500), les schémas (de l'enquête terrain de la forêt de Bainem) et les photos aériennes (au 1/40000) scannées, et les images satellitaires IRS de l'année 2000, SPOT pancromatique et XS de l'année 1997. Ce travail a été effectué à l'aide du logiciel ENVI.

Dans la deuxième étape nous avons réalisé les différentes couches en mode vecteur. Pour se faire nous avons utilisé MapInfo (version 7) pour réaliser la base de données et les différentes couvertures (figure 8):

- courbes de niveaux pour la génération du MNT
- routes qui passe dans la forêt
- les tranchées pare feu
- zones d'habitations. Pour réaliser cette couverture nous avons utilisé la carte au 1/25000 et une image obtenue par fusion des images IRS et SX de SPOT [Wald, 2000] [Pohl, 1997] (figure. 9) pour une mise à jour des zones habitées.
- zones des différentes sections de la région de la forêt de Bainem dont l'enquête terrain a été faite ainsi que la base de données correspondantes.

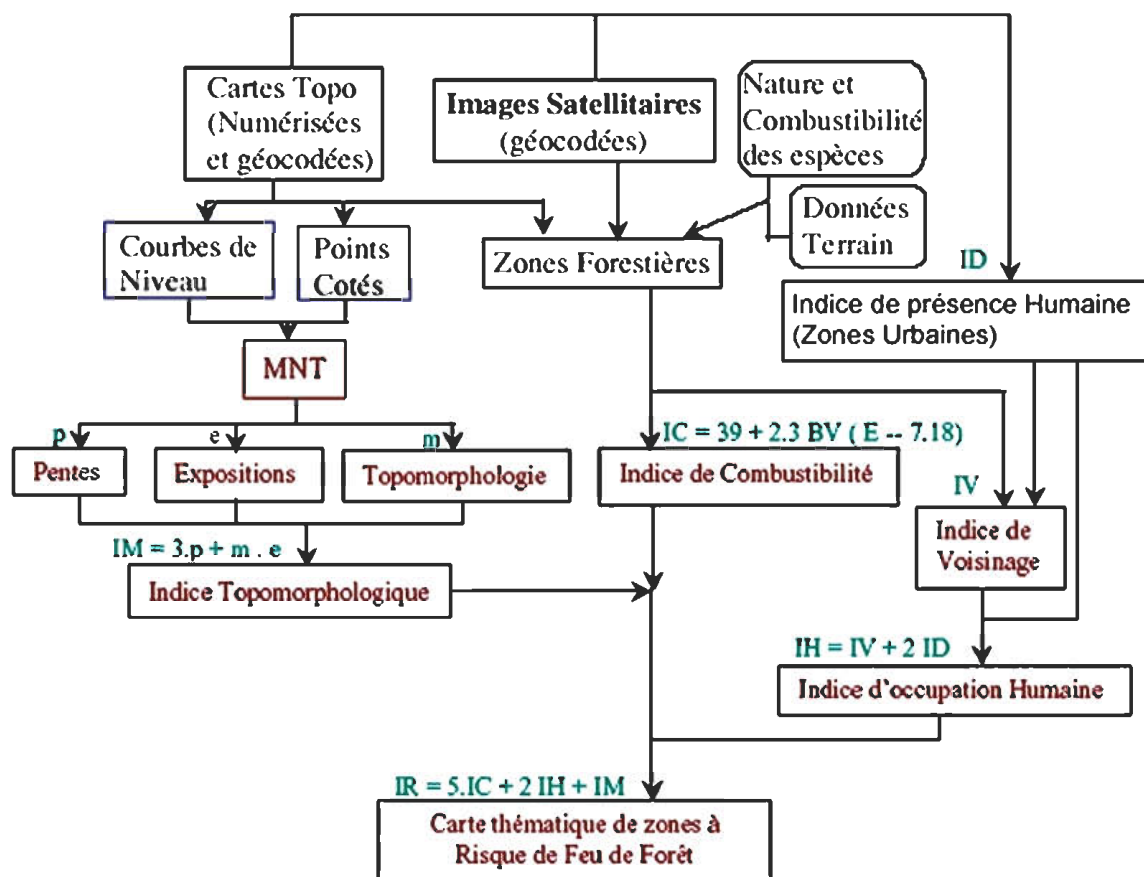


Fig. 7 Diagramme de la procédure de calcul de l'indice de risque de feu de forêt

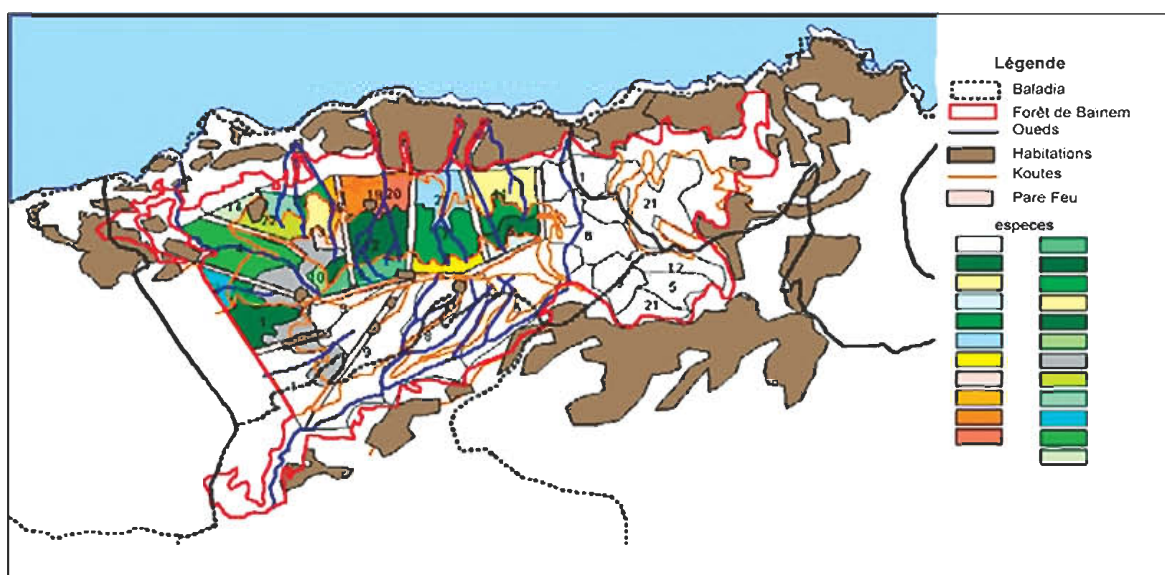


Fig. 8 Les différentes couches vecteur réalisées pour notre étude

Pour les zones restantes de la forêt nous avons utilisé des anciennes données (figure 10). En même temps nous avons réalisé la base de données auxiliaires du tableau 1.

Après intégration de l'ensemble des informations auxiliaires dans la base de donnée nous obtenons le tableau 2.

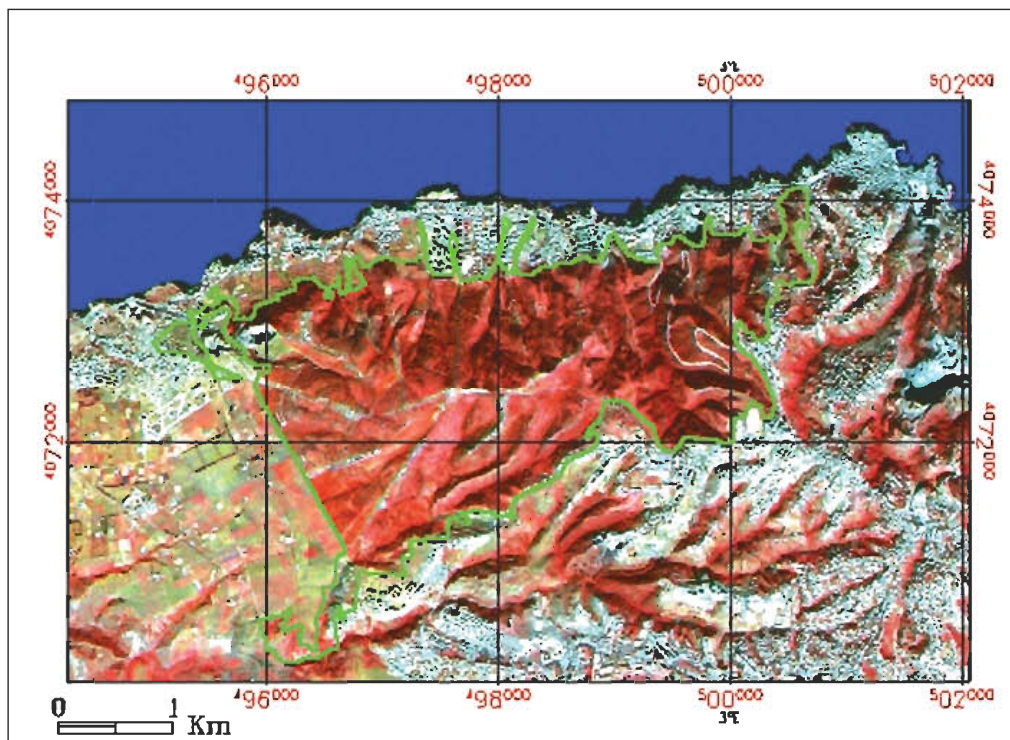


Fig. 9 Fusion d'images satellitaires: SPOT XS97 et IRS 2000

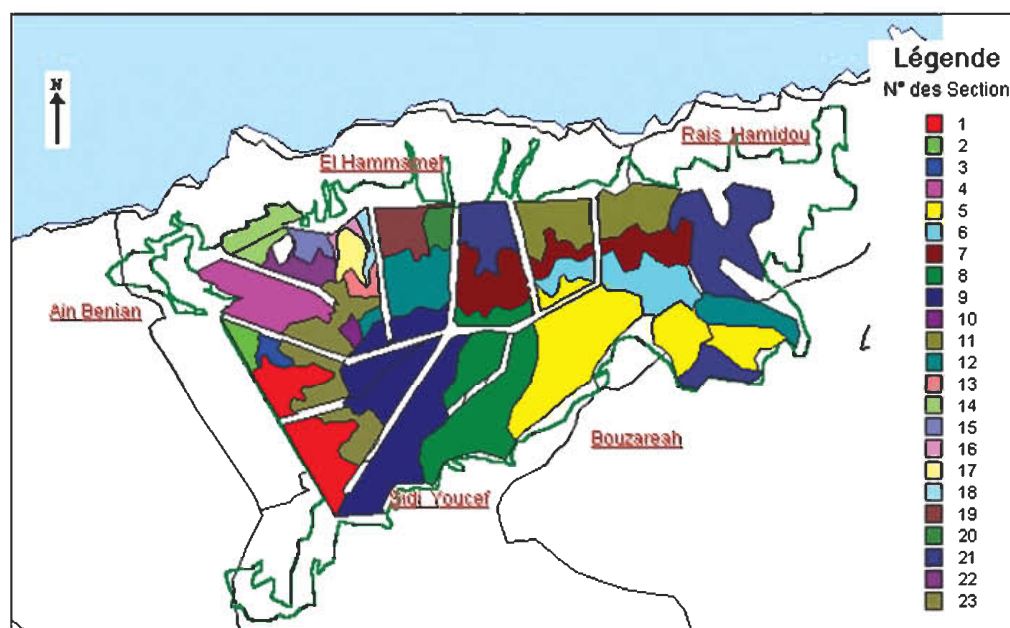


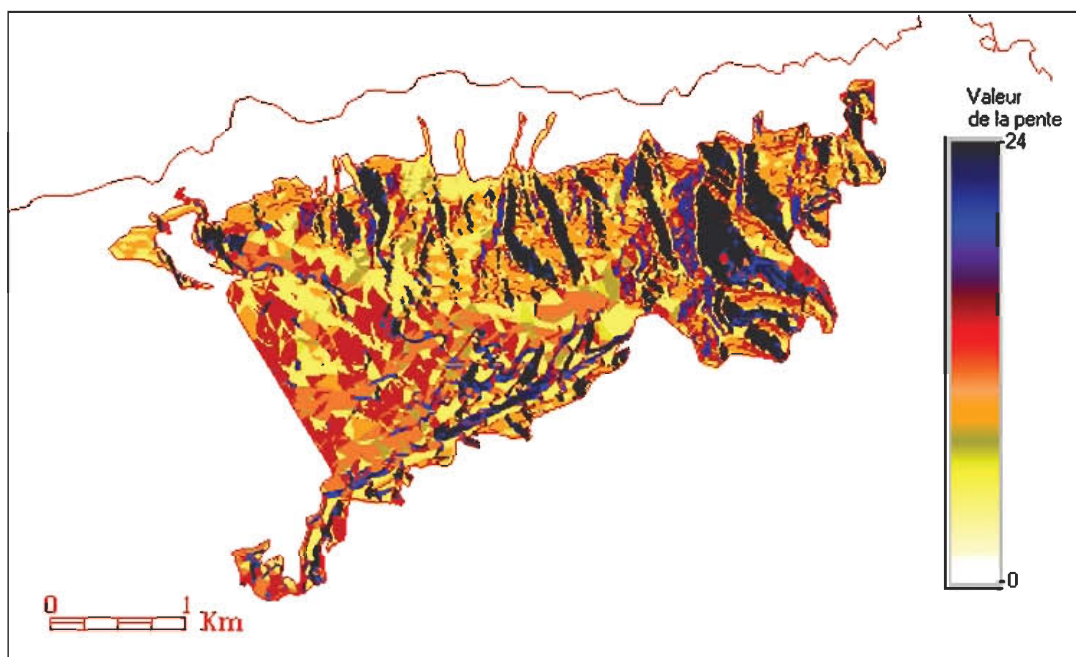
Fig. 10 Les différentes sections utilisées dans notre application

**Tableau 2.** Tableau indiquant les différents espèces dans chaque section avec la note de combustibilité.  
L'astérisque indique l'espèce dominante

N°_Section	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Espèce																							
Densité du sous bois	3	2	2	3	3	1	1	1	2	2	2	3	1	3	3	1	1	1	1	1	1	3	
Ampelodesma mauretanicus												7				7	7						
Arbutus unedo					5	5	5	5	5	5			5		5		5					5	
Calycotome spinosa		3		3																			
Chamaerops humilis																					7		
Cistus monspeliensis	3		3	3	3			3	3					3									
Eucalyptus										7*													

Ainsi, après la mise à l'échelle convenable de la couche de l'indice IM, nous obtenons la couche représentée par la figure.11. Sur cette figure nous avons représenté, à l'aide d'une palette de couleur adaptée, les différentes facettes de pentes. Plus la couleur est foncée plus la pente est accentuée. Après l'obtention de la couche de l'indice IC, par les différentes requêtes effectuées sur la couche des différentes sections forestières utilisées dans notre

application, nous obtenons, après rasterisation et codage, le résultat de l'indice de combustibilité. La combinaison des trois couches résultantes nous donne la carte de risque d'incendie de la forêt de Bainem (figure.12). Cette carte est Basée principalement sur la combustibilité de la combinaison végétale (espèce dominant et formation du sous bois) des différentes espèces de chaque section.



**Fig. 11** Couche de l'indice IMaves les différentes facettes de pentes



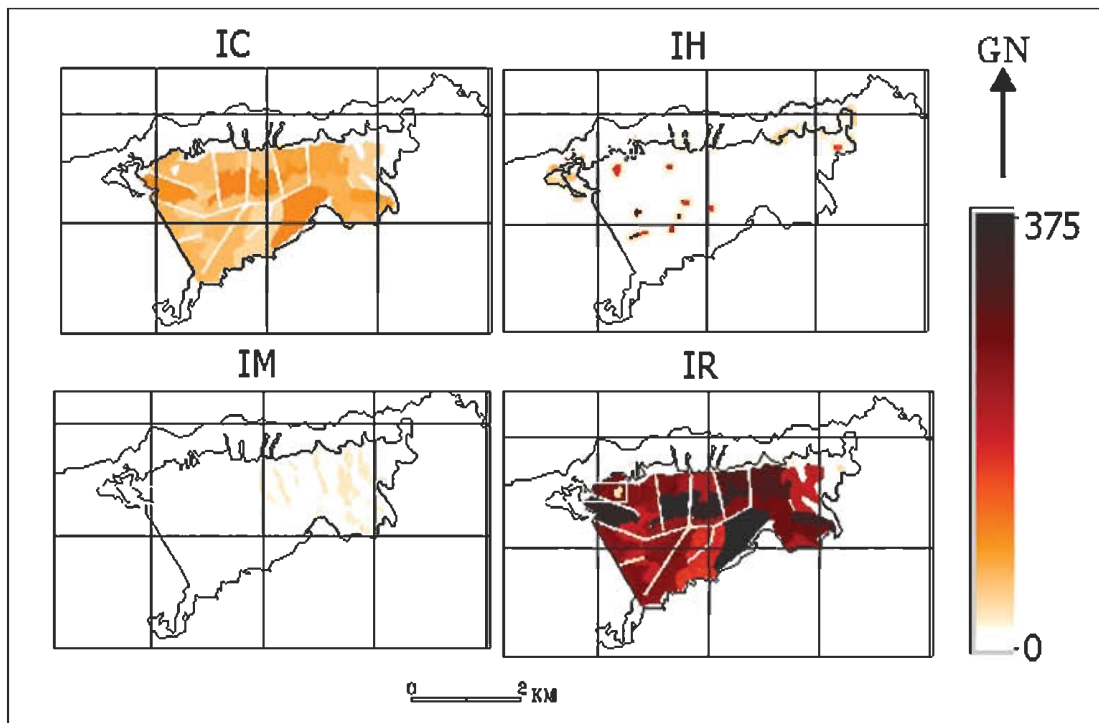


Fig. 12 représentation des trois indices formant l'indice de risque de la forêt de Bainem

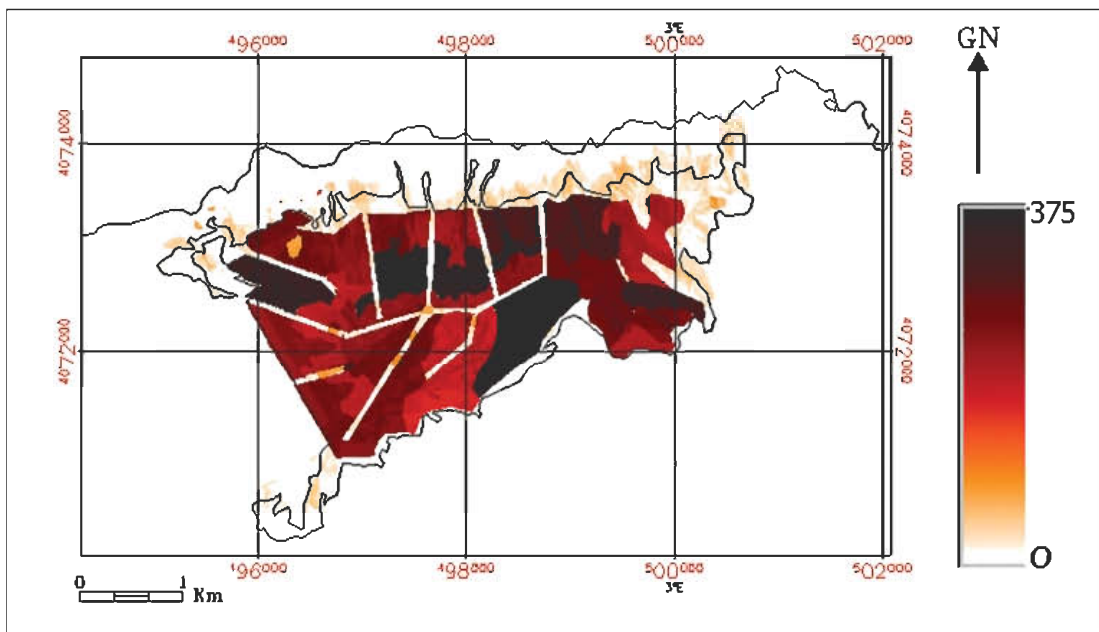


Fig. 13 Carte de l'indice de risque de la forêt de Bainem

#### 4. Conclusion

Dans cette communication, nous avons présenté les méthodes utilisées pour établir une cartographie des zones vulnérables et élaborer une stratégie de prévention en se basant sur une étude scientifique utilisant les nouvelles technologies.

La cartographie du risque incendie pose deux problèmes majeurs:

L'expression des besoins en la matière est souvent confuse et les concepts employés peuvent recouvrir des significations très différentes.

Il ressort cependant que deux types de besoins sont actuellement prépondérants: un besoin lié aux problèmes d'urbanisme en zone à risque et un besoin lié à l'aménagement des forêts contre les incendies. Ces besoins existent à une échelle locale et régionale.

L'actualisation des données: plus les méthodes d'évaluation du risque sont complexes, plus la quantité et la qualité des informations requises augmentent. C'est pour cette raison que de nombreuses méthodes d'actualisation des cartes utilisées sont étudiées. Ces méthodes vont de la simple visite sur le terrain, à l'utilisation de photos aériennes ou satellitaires. Cependant l'utilisation d'un système SIG global qui peut intégrer des modèles de mise à jour quelque soit le type de changement, devient nécessaire. L'Algérie éprouve un grand besoin dans l'usage des technologies de l'Espace pour la gestion des catastrophes.

En effet, la télédétection et le GIS peuvent fournir les renseignements utiles, et une aide aux politiciens à la prise de décision dans la gestion de la catastrophe. À un tel niveau général, l'objectif est d'établir une cartographie des régions à risque ou affecté pour le pays entier. Dans ce cas nous devons déterminer les régions:

- à faible ou sans risque pour le développement.
- à risque élevé où la plupart du développement devrait être évité.
- hasardeuses où le développement a déjà eu lieu et où le besoin de prendre des mesures pour réduire la vulnérabilité devient nécessaire.

#### Références

- Alonso, F.G. & Casanova Roq J.L., 1997. *Application of NOAA-AVHRR images for the validation and risk assessment of natural disasters in Spain*. Remote Sensing '96, Spiteri editors, Balkema, Rotterdam.
- Cova, T.J., 1999. GIS in emergency management. In: *Geographical Information Systems, management and applications*.
- DAGORNE, A DUCHE .Y.et al , 1993. Protection des forêts contre les incendies & Système d'information Géographique. Application à la commune d'Auribeau sur Siagne (Alpes Maritimes) article
- Harms, J., Pierre, G. & Cazaux J.C., 1997. *Use of space technologies for majors risks management*. Remote Sensing '96, Spiteri editors, Balkema, Rotterdam.
- Longley, P.A.; Goodchild, M.F.; Maguire, D.J. and Rhind, D.V. Pearson, E. Wadge, G, and Wiscoski, A P, 1991. An integrated expert system/GIS approach to modeling and mapping hazards. Proc European conference on GIS, session 26, pp 763-771.
- MARIEL, A. 1995. Cartographie du niveau de risque d'incendie: exemple du massif des Maures, CEMAGREF, article.
- Pohl, C. ,1997. Operational issues of data fusion for visual image exploitation. Expert Meeting on Data Fusion Techniques, Freiburg, Germany, p. 10-15.
- SMARA .Y., BELHADJ-AISSA .M & BELHADJ-AISSA .A...2002. *Application des nouvelles technologies pour la prévention et la gestion des feux de forêts*. Séminaire national sur la prévention et la lutte contre les incendies de forets, Batna, ALGERIE.
- TRABAUD, L. 1980 Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l'organisation, la structure et l'évolution de la végétation des zones de garrigues du bas-Languedoc . Thèse de doctorat d'état Montpellier.
- Wald, L., 2000. A Conceptual Approach to the Fusion of Earth Observation Data. Survey in Geophysics, vol. 21, p. 177-186.

## Base de Données Géospatiales : Cartographie Hydrogéologique des Monts des Ksour (Atlas Saharien Occidental, Algérie)

Par H. Mansour, I. Zeroual, M. Foukrache, A. Nadji  
Faculté des sciences de la terre, de géographie et d'aménagement du territoire,  
Université d'Oran, BP 1524. E-mail : l\_mansou\_l@yahoo.fr

### ملخص :

الطريقة التي اعتمدها هي نتاج لتجميع و تنظيم المعطيات الهيدروجيولوجية المتوفرة عن الطبقات المائية لمرتفعات القصور، المترجمة من خلال الخصائص الهيدروديناميكية و الهيدروكيميائية و الشروط الحدية ؛ وذلك من أجل صياغة شكل جريان المياه الجوفية.

في هذا الصدد، كانت أول عملية هي إعادة بنية الشكل الهندسي للطيات المقعرة لمرتفعات القصور على أساس المقاطع الجيولوجية و الخرائط التركيبية. و بعد ذلك انطلاقا من نظام الإعلام الجغرافي، كانت هناك محاولة لاعادة خرائطية هيدروجيولوجية مكنت من تتبع شكل جريان المياه الجوفية في مرتفعات القصور. بالفعل فهو عبارة عن جهاز هيدروليكي ضخم محكوم بديناميكية مائية معقدة و نسق جيوتركيبي خاص بالنمط الأطلسي. وهكذا، فقد تم إنشاء معلوماتية جيوحيزية لاعادة خرائط تحليلية قابلة للمراجعة.

كلمات دالة : هيدروجيولوجية، جيوتركيبية، خرائطية، قاعدة معلوماتية جيوحيزية.

**Résumé :** La démarche que nous adoptons découle par la collecte et l'organisation des données hydrogéologiques disponibles du système aquifère des monts des Ksour, traduites en terme de propriétés hydrodynamiques (isopièzes), hydrochimiques (isoteneurs) et de conditions aux limites (conditions de lithologie et de structure) en vue de l'édification de schéma d'écoulement souterrain. La première approche a été de reconstituer la géométrie des synclinaux des monts des Ksour par l'établissement de coupes géologiques et cartes structurales. Ensuite grâce à l'apport des SIG, une réflexion et une optique régionale ont été tentées par l'élaboration d'une cartographie hydrogéologique, qui a permis de retracer la configuration des grands écoulements des eaux souterraines dans les monts des Ksour. Il s'agit en effet d'un immense appareil hydraulique, régit par un hydrodynamisme complexe, commandé par un contexte géostructural propre au style Atlasique. Ainsi, une Base de Données Géospatiales a été constituée pour élaborer des cartes de synthèses révisables.

**Mots clés :** Hydrogéologie, Géostructural, Cartographie, Base de Données Géospatiales.

**Summary :** The step that we adopt rises by the collection and the organization from the hydrogeologic data available of the aquiferous system of the

mounts of Ksour, translated into term of hydrodynamic properties (isopièzes), hydrochimic (isoteneurs) and of boundary conditions (conditions of lithology and structure) for the construction of diagram of underground flow. The first approach was to reconstitute the geometry of synclinal mounts of Ksour by the establishment of geological cuts and charts structural. Then thanks to the contribution of the SIG, a reflexion and a regional optics were tried by the development of a hydrogeologic cartography, which made it possible to recall the configuration of the great underground water run-offs in the mounts of Ksour. It is indeed about an immense hydraulic apparatus, governs by a complex hydrodynamism, ordered by a context géostructural suitable for the Atlasique style. Thus, a Data base Géospatiales was made up to work out revisable charts of synthèses.

**Key words :** Hydrogeology, Géostructural, Cartography, Géospatiales Data Base.

### 1. Introduction

Afin d'œuvrer à une gestion intégrée des ressources en eau, il est nécessaire de mettre à la disposition des décideurs une cartographie hydrogéologique de synthèse leur permettant d'apporter une réponse réelle à la gestion des espaces, notamment en matière de projection des champs de captage destinés à

l'alimentation des besoins en eau et de protection des ressources aquifères contre la pollution sous ses différentes formes. La carte hydrogéologique de la partie centrale des monts des Ksour, regroupant la coupure au 1/100.000<sup>e</sup> de Ain Séfra a été élaborée sur la base d'une combinaison d'unités spatiales (découpage) représentées par la topographie, la structure des couches, les affleurements, les écoulements des eaux (souterraines et superficielles) et l'hydrochimie.

## 2. Considérations générales

### 2.1 Les monts des Ksour dans leur contexte régional (fig. 01)

l'Atlas Saharien se raccorde à l'Ouest depuis le moyen et le haut Atlas Marocain jusqu'à la bordure occidentale des Aurès à L'Est. Cette suite de chaînes forme une barrière naturelle géographique et climatique, séparée de la plate forme Saharienne avec beaucoup de netteté par une série d'accidents en coulisses de plis failles et de failles (flexure Sud Atlasique).

### 2.2. Cadre géologique et structural

Les affleurements, essentiellement Jurassique, forment des structures anticlinales longues et étroites, séparés par de larges synclinaux où les unités gréseuses du Crétacé inférieur constituent les grands systèmes hydrogéologiques.

Les alignements morpho-tectoniques sont l'expression en surface d'accidents profonds de la chaîne et traduisent également des failles inverses et des chevauchements.

L'érosion différentielle a façonné les reliefs de façon à donner des cuestas et des anticlinaux érodés.

La variété du style tectonique qui diversifie la région plissée des monts des Ksour a créé un relief monoclinale en éventail ou en pli coffré.

Parfois le pli est de type diapir. Souvent le Trias salifère crée une échancrure au sommet de l'anticlinal et se répand sur les roches plus récentes (Dj. Chemarikh et Dj. Melah).

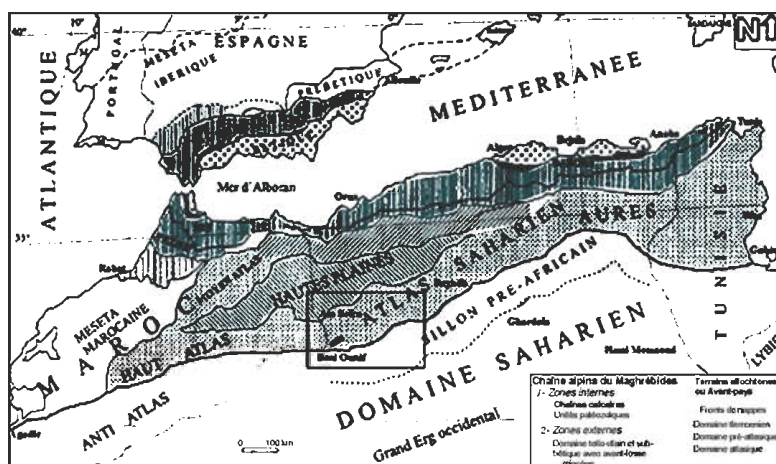


Fig. 1 Les monts des Ksour dans leur contexte régional, (Benest, 1985) - Partie méridionale de l'Atlas Saharien et piémonts de la plate forme Saharienne.

### 2.3 Cadre hydrogéologique

Les monts des Ksour dont les bassins d'alimentation sont particulièrement étendus, renferment des systèmes aquifères aux structures et formations lithostratigraphiques complexes.

Ces aquifères sont pour la plupart multicouches, à nappe libre, intercalés par des formations semi perméables. Les principales ressources en eaux souterraines sont localisées dans le système aquifère gréseux du Continental Intercalaire.

Deux faits majeurs conditionnent la genèse des grands écoulements souterrains: le rôle hydrodynamique de l'accident Sud Atlasique (Béni Ounif -

Djenien Bourezk - Moghrar) et la fonction capacitive des cuvettes synclinales (Ain Séfra - Asla - Naâma).

#### 2.3.1 Zone de l'accident Sud Atlasique (Béni Ounif - Djenien Bourezk - Moghrar)

Ces unités affleurent le long de l'accident Sud Atlasique et constituent un aquifère un peu particulier de par sa structure morphotectonique.

Cette particularité lui confère une zone d'alimentation privilégiée pour les grès du *Continental Intercalaire*, par l'intermédiaire d'un réseau de fractures jouant le rôle de drains.

L'émergence d'un certain nombre de sources le long de ces accidents en relais témoigne de la liaison hydrodynamique entre les formations du Jurassique moyen et celles du Crétacé inférieur (*Continental Intercalaire*).

En faite, on ne peut pas parler dans cette région d'aquifères du Jurassique sans faire allusion à ceux des grés du Crétacé inférieur.

Les deux unités sont en relation hydrodynamique, l'un réalimentant l'autre par l'intermédiaire de cassures profondes.

A Béni Ounif, la coupe levée au droit de la flexure Sud Atlasique (fig. 02) montre le renversement de la série gréseuse du Crétacé inférieur (*Continental intercalaire*) sous les calcaires et dolomies du Jurassique moyen.

Cette structure est remarquable le long des Djebels Mélias, Tarhla et Si Youssef.

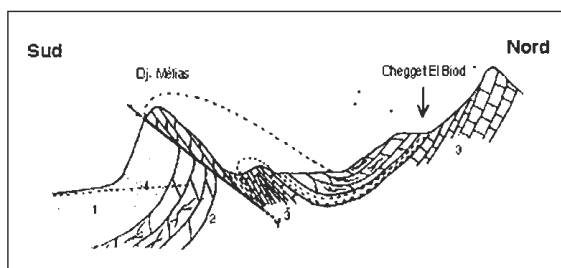


Fig. 2 Coupe hydrogéologique schématique au droit de la flexure Sud Atlasique (Béni Ounif).

1 : Grés du C.I (Crét inf) – 2 : Calcaires (Jur. moyen) – 3 : Calcaires et dolomies fissurés (Jur. inf) – 4 : NP

### 2.3.2 Les synclinaux de la partie centrale des Monts des Ksour

Les formations à matrice gréseuse dominent et sont souvent entrecoupées de bancs argileux, diminuant localement la perméabilité. C'est dans les grés aquifères du Barrémo-Albo-Aptien que les ressources en eaux sont les plus importantes. C'est le cas de la région de Aïn Séfra où s'étendent 02 gouttières synclinales dans lesquelles on retrouve 03 niveaux gréseux aquifères différents. C'est du niveau moyen qu'émergent les grosses sources qui constituent les exutoires naturels de cette nappe (ex : sources de Tiout et de Breïdj).

Les coupes hydrogéologiques schématiques établies sur la base des données de forage et de la prospection électrique montrent l'existence de 03 horizons aquifères inter stratifiés (fig. 03) :

- Grés compacts à porosité d'interstices et de fissures d'âge Jurassique supérieur, affleurant particulièrement sur les piémonts du Djebel Mekhter (coupe B-B'). Ils sont reconnus par la géophysique à partir de 500 mètres au centre des cuvettes synclinales.

- Grés massifs à double perméabilité, voir triple (interstices, fissures et chenaux de dissolution) attribués au Barrémo-Albo-Aptien, associés le plus souvent à des intercalations argileuses et argilo-gréseuse rouges, conférant à l'ensemble une semi captivité de la nappe (coupes A-A' et C-C') et où l'alimentation par drainance à partir des grés du l'infra - Crétacé joue un rôle important.

- Formations Quaternaires formées d'alluvions, de terrasses et de dunes.

## 3. Bases de Données Géospatiales

### 3.1 Introduction

Dans ce travail nous proposons une modélisation conceptuelle de données hydrogéologiques afin de produire une Base de Données Géospatiale.

Un SIG contenant des données **topographiques**, **géomorphologiques** (relief, nature du sol, structure de sol), et **hydrogéologiques** doit permettre une analyse spatiale et environnementale très précise pour la prise de décision.

L'intégration de ces données pour une cartographie dite « **Cartographie des monts des Ksour** » est réalisée à l'aide du SIG Mapinfo.

### 3.2 SIG

Un SIG est un ensemble d'équipements informatiques de logiciels et de méthodologies pour la saisie, la validation, le stockage et l'exploitation de données dont la majorité est spatialement référencées.

Les Fonctionnalités d'un SIG s'articulent autour de 05 modules dont l'Acquisition des données, la numérisation, la manipulation de données, la Gestion, l'Analyse spatiale et enfin l'édition des données.

Les caractéristiques particulières des données hydrogéologiques et la constitution de base de données géospatiales sont nécessaires à étudier (HD93).

Un Système d'Information Géographique (SIG) est souvent utilisé comme un logiciel offrant des capacités de cartographie numérique, de gestion de Base de Données et d'analyse spatiale.

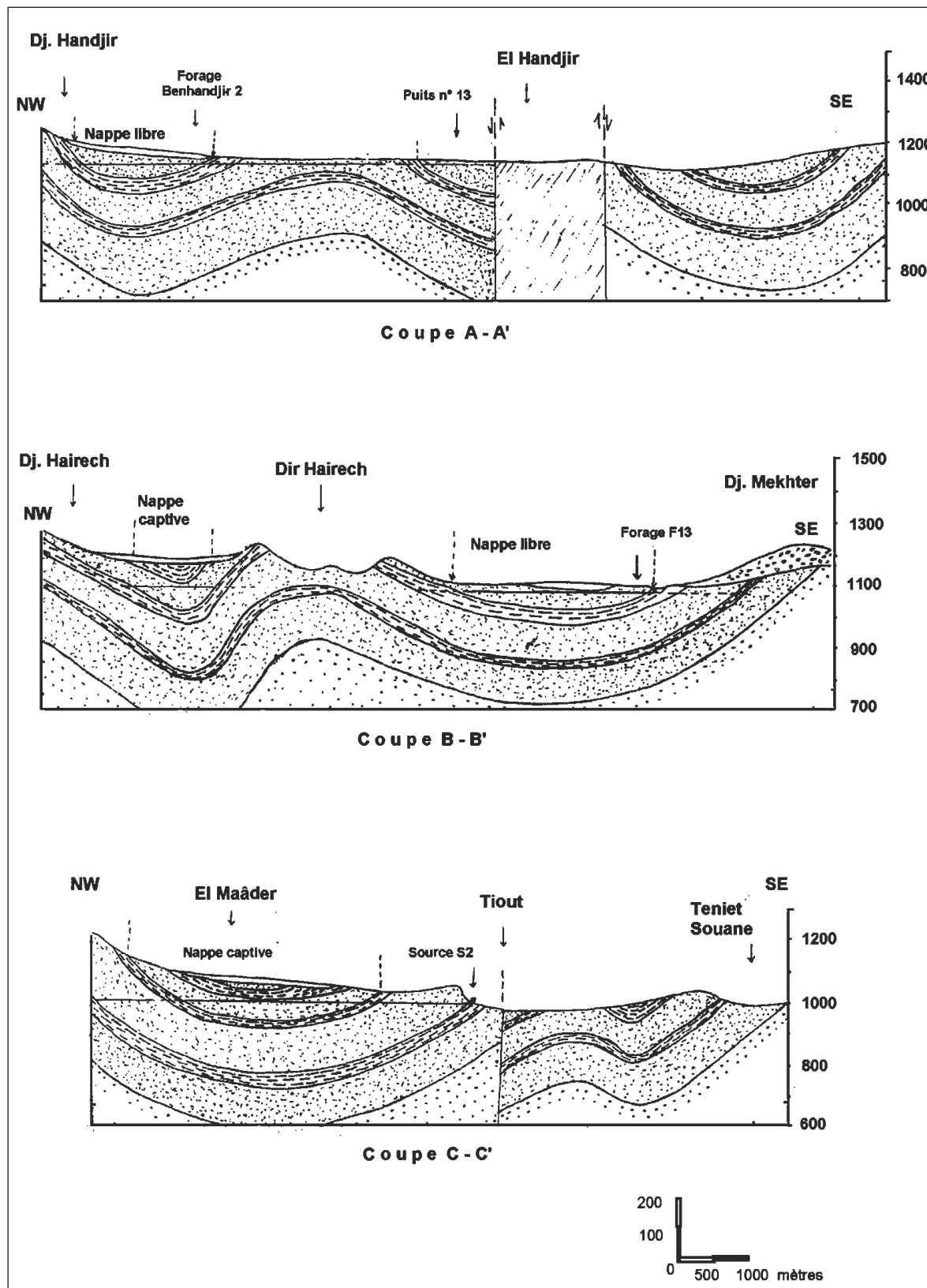
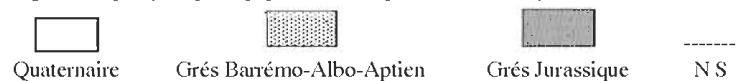


Fig. 3 Coupe hydrogéologique schématique à travers du synclinal de Ain Séfra.



### 3.3 Mise en œuvre

• **MapInfo** : c'est un système d'information géographique (SIG) vecteur installé sur PC destiné pour automatiser, manipuler, analyser et visualiser les données géographiques. Ce logiciel a la possibilité de gérer à la fois des données géographiques et descriptives.

• **Saisie de données** : pour géoréférencer notre support cartographique, nous avons choisi la projection Lambert nord Sahara pour l'ensemble des cartes de notre zone d'étude. Pour assurer la continuité cartographique, nous avons équipé chaque planche de quatre (04) points de calage appelés souvent (tic).

La convivialité du logiciel permet un contrôle sur le choix des points de calage avec l'affichage de l'erreur admissible.

• **Manipulation des données** : les couches numérisées dans Mapinfo ont été produites à partir de cartes géologiques au 1/100.000<sup>e</sup>, scannées au format A0. On distinguera 02 niveaux :

\* **Niveau géométrique** : la puissance de MapInfo nous a permis de compléter l'ensemble des couches d'information du M.C.D. En se basant sur les éléments de ce modèle, les entités ont été numérisées sur écran de la façon suivante :

- **Les couches géologiques** : Trias (gypses), Jurassique (calcaires), Crétacé (grès).

- **Hydrogéologie** : les points d'eaux, les courbes isopièzes, les lignes de courant, les axes de drainages, les lignes de partage des eaux souterraines.

- **Hydrochimie** : analyses chimiques, courbes isovaleurs.

- **Morphologie structurale** : fracturation, anticlinaux et synclinaux.

- **Hydrographie** : le réseau superficiel (oueds, Chott, Sebkh).

- **Les lieux habités et voies de communications.**

Toutes les entités spatiales et leurs données descriptives, peuvent être entachées d'erreurs ou d'imprécision. L'opération consiste à établir le lien entre données spatiales et descriptives afin de vérifier les erreurs de saisies.

\* **Niveau descriptif** : les données attributaires sont organisées sous forme de tableaux. Les noms d'attributs sont introduits champ par champ selon leurs types (caractère, entier, flottant, virgule fixe, date, logique).

Les tables sont gérées par un système de base de données relationnelles (SGBDR) qui permet de les manipuler facilement (mise à jour colonne et modification de la structure des tables).

#### Analyse spatiale :

les fonctionnalités de sélection SQL (Structured Query Language) font la véritable puissance des SIG, car permettant de formuler les requêtes reflétant les préoccupations des gestionnaires des données par couche univariée ou couches multivariées.

L'Analyse univariée concerne les traitements sur une couche et avec les opérations de types statistiques (nombre, moyenne, minimum, maximum, intervalle, variance, écart-type), opérations arithmétiques, opérations logiques.

L'analyse multivariée est la combinaison de deux ou plusieurs couches afin d'élaborer une carte de synthèse ou des cartes thématiques.

A titre d'illustration, vous trouverez ci-après la carte de synthèse de Aïn Sefra (fig.04), basée sur les couches suivantes : Aïn Sefra\_ID (géologie), table Aïn Sefra (puits et forages), table fracturation (morphologie structurale) et table courbes minéraux (hydrochimie).

La carte hydrogéologique de Aïn Séfra, couplée à un support hydrochimique montre l'existence de 02 lignes de partages des eaux souterraines, liées aux conditions structurales, qui ont généré l'étranglement de la cuvette de Aïn Séfra en gouttières synclinales.

On observe ainsi la mise en place de 03 directions de l'écoulement des eaux souterraines :

- Un écoulement de direction WSW, orienté vers la cuvette piézométrique d'El Hendjir.

- Un écoulement de direction ENE, orienté vers la cuvette de Dalaât Tiout.

- Un écoulement de direction NNE, orienté vers le synclinal de Tirkount – Mékalis.

On est donc en présence de 03 bassins hydrogéologiques dont les limites sont à rechercher vers Forthassa (carte de Forthassa Gharbia) à l'ouest pour le bassin hydrogéologique d'El Hendjir et vers Naâma (carte de Mékalis) au Nord pour les bassins hydrogéologiques de Dalaât Tiout et de Mékalis.

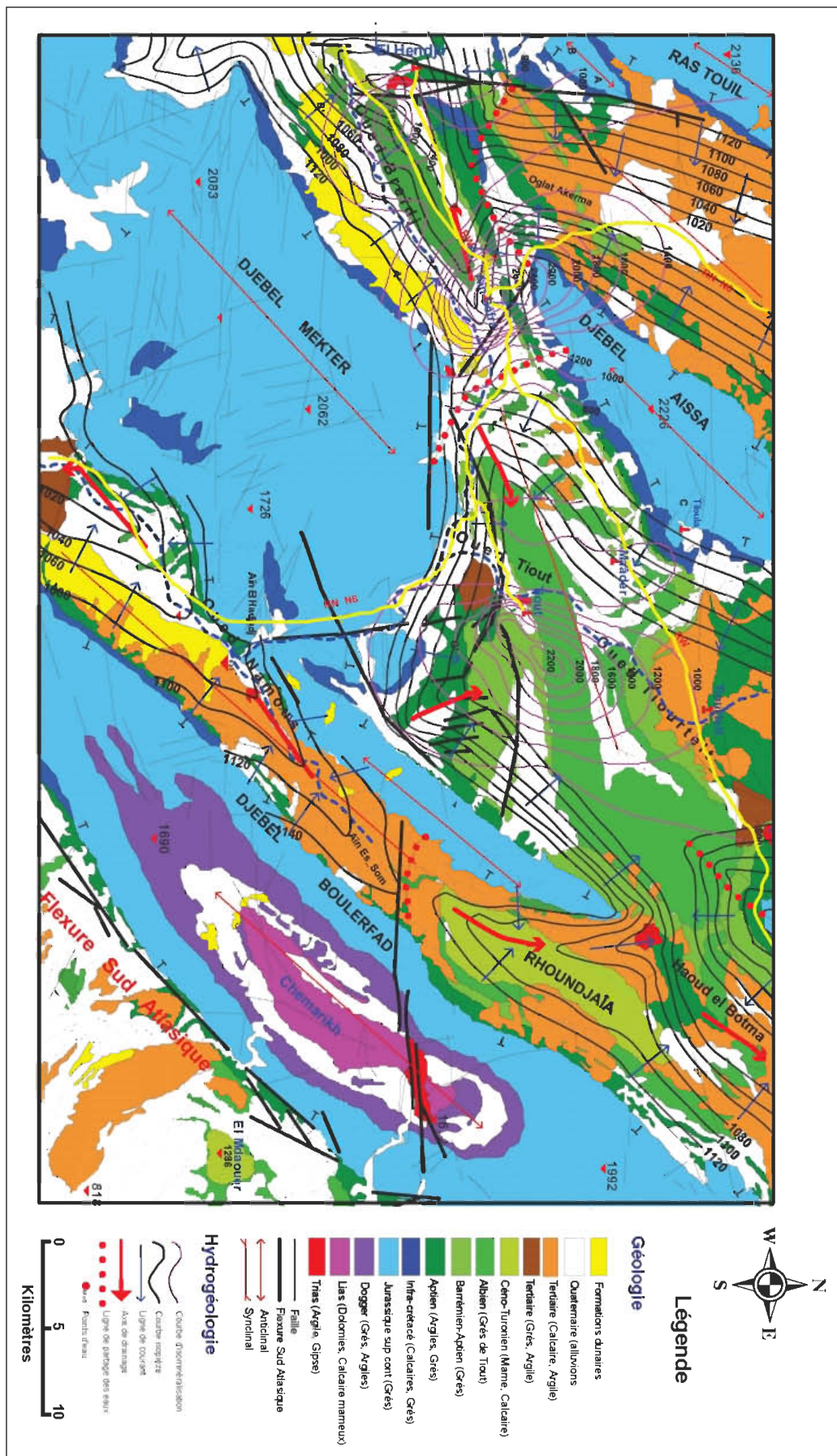


Fig. 4 Carte hydrogéologique de Ain Séfra.



Au droit des cuvettes piézométriques (Dalaât Tiout, El Hendjir), des anomalies hydrochimiques sont observées (concentrations anormalement élevées de 3000 à 4000 mg/l de sels dissous).

La mise en place de cette anomalie paraît correspondre à la présence d'accidents non décelés par la géophysique, affectant les grés Albo-Aptiens.

### 3.4 Application

• **Modélisation (modèle global) :** Le résultat de l'analyse de l'inventaire des données hydrogéologiques à permis de dégager un premier modèle conceptuel simplifié pour éviter d'alourdir le schéma.

La définition d'un prototype global permet d'expliquer les données pertinentes de la Base de Données Geospatiales (fig. 05).

• **MCD :** le schéma conceptuel de données a permis d'extraire le Modèle Physique de données suivant (fig. 06).

La version initiale de la Base de Données Geospatiales permet la mise en place d'une cartographie thématique pour les besoins de l'hydrogéologie.

Une amélioration de la carte géologique des monts des Ksour est une perspective pour les futures versions.

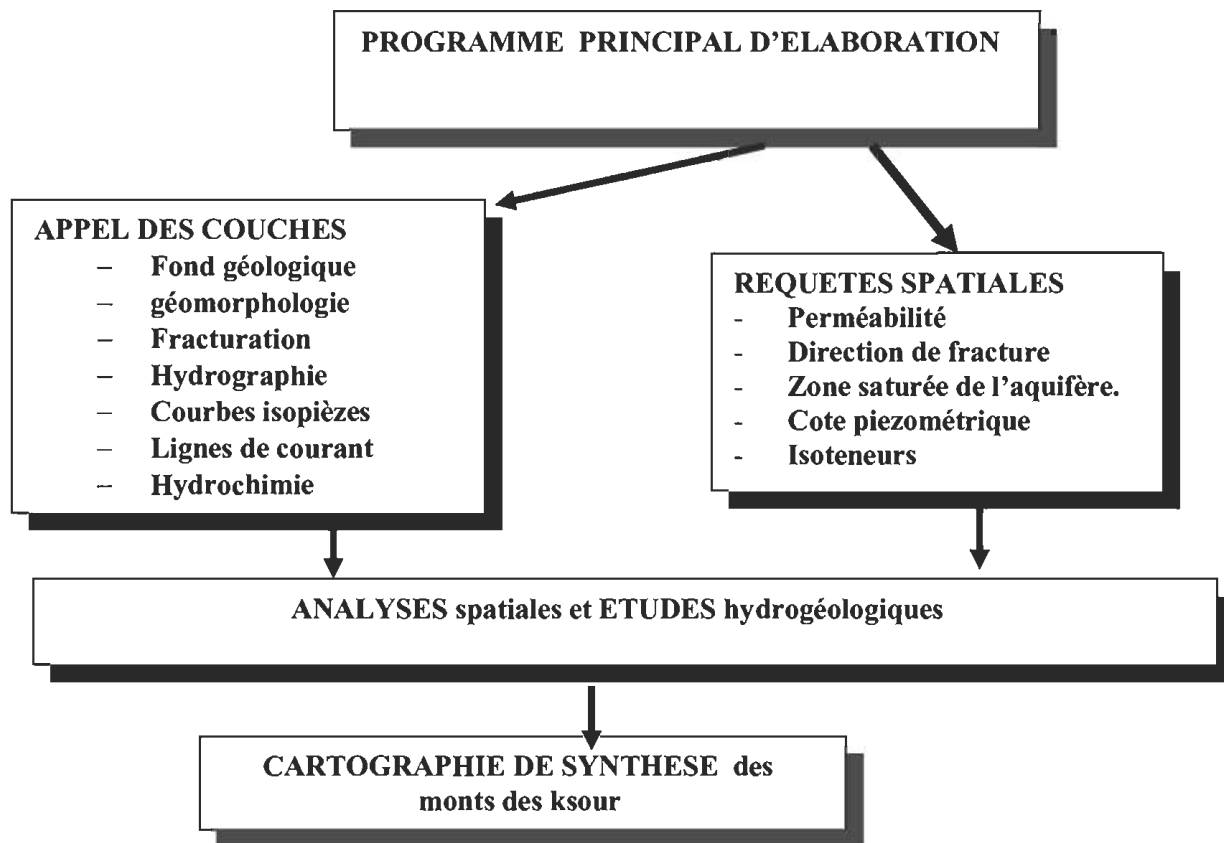


Fig. 5 Modèle conceptuel simplifié.

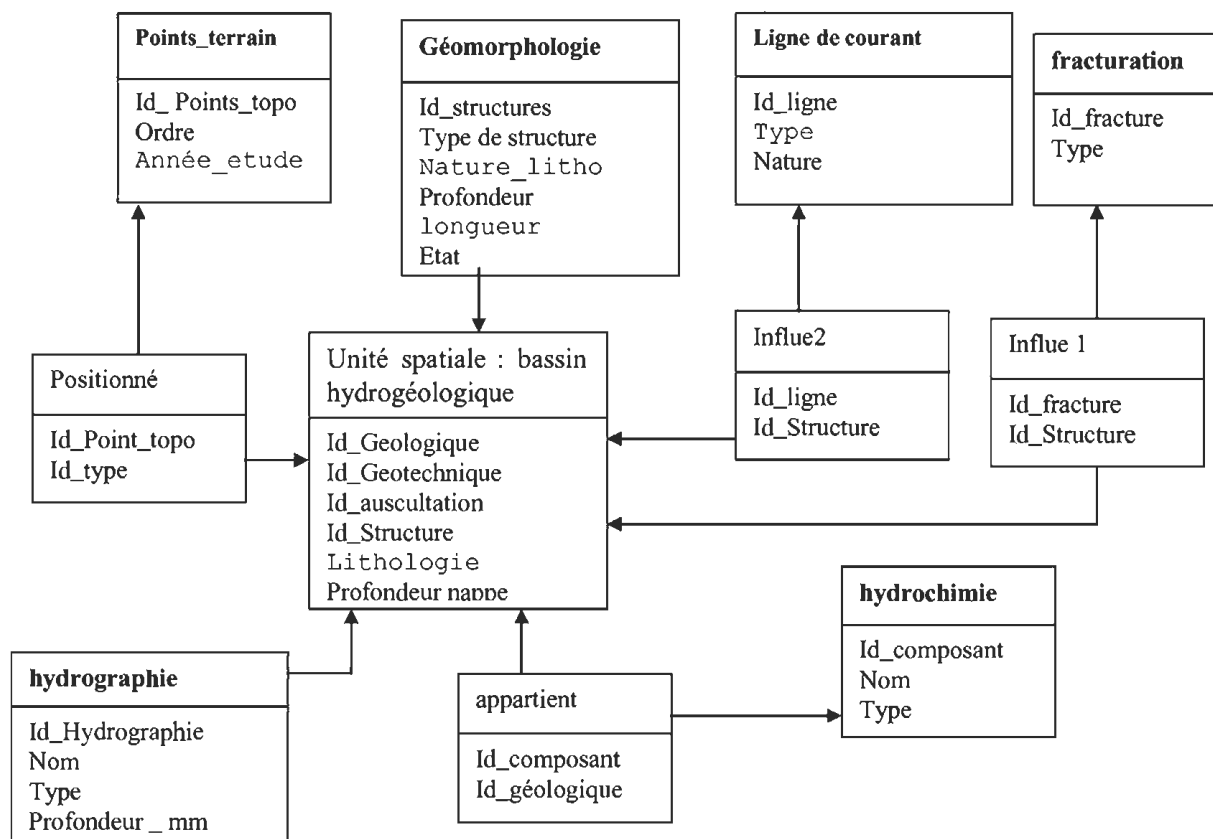


Fig. 6 Modèle conceptuel de données (MCD).

#### 4. Conclusion

Le résultat de ce travail pourra servir à l'élaboration d'une politique visant à suivre le comportement du système hydrogéologique des formations aquifères de la partie centrale des monts des Ksour.

Cette cartographie sera utilisée pour établir les priorités d'action en ce qui concerne la gestion des champs de captage, la surveillance de la qualité des eaux souterraines et la restauration des sites pollués.

Par ailleurs, les données géospatiales obtenues serviront à l'amélioration du Modèle Conceptuel des Données pour la gestion des ressources en eaux souterraines.

La carte de Aïn Séfra à elle seule demeure insuffisante pour comprendre la dynamique des grands écoulements souterrains au sein de la partie centrale des monts des Ksour.

Pour cela, une carte de synthèse regroupant plusieurs coupures hydrogéologiques s'impose.

#### Références

Benyamina M. Ighil L., 1999 : Etablissement d'un système d'information hydrogéologique (HYGIS) appliqué à un bassin endoréique : cas du Chott Chergui. Mém. Ing. Univ-Oran, 111 p, 46 fig.

Dindon E., 1990 : Systèmes d'information géographiques : Concepts, Fonctions, applications, Laboratoire commun de Télédétection, CEMAGREF / ENGREF (Montpellier).

Galmier D., 1970 : Photogéologie de la région de Aïn Séfra (Atlas Saharien, Algérie). Thèse doctorat d'état. Fasc. Sc. De Paris. 320 p, 9 cartes.

Gardarin G., 1988 : Base de données, les systèmes et leur langage, Edition : Eyrolles (Paris).

Hadji F., 2003 : Hydrochimie des eaux du Sahara Nord Occidental (Algérie). Thèse magister – Univ. Oran. 151 p, 82 fig, 50 tab, 2 pl.

Kebir L. W., 1999 : Apport de la télédétection et les SIG à l'étude hydrogéologique. Thèse de Magistère (PGS). Centre national des techniques spatiales, Arzew.

- Kradchi B., Mesbahi K., 2001 : Essai de synthèse cartographique des écoulements souterrains des synclinaux des Monts des ksour (Atlas Saharien occidental). Mém. Ing. Univ – Oran, 81 p, 57 fig.
- Mansour H., Safa A., Bekhedda B., 1998 : La flexure Sud Atlasique et son rôle hydrodynamique dans la réalimentation de la plateforme Saharienne (cas du synclinal de Béni-Ounif). Journées d'études sur les zones arides, retroverspectives, enjeux et réalités ; Adrar.
- Motet S., 1992 : Systèmes d'information géographique. CNTS. (Arzew).
- Nathalie D., 2000 : Base de données vectorielles à l'échelle conceptuelle de 1 :250 000. Définitions des données. Document Référence : TOP250v-GIS, IGN-B (Belgique).
- Rahmani A., 1993 : Contribution à l'étude hydrogéologique du synclinal El Hendjir – Aïn Séfra - Tiout (partie centrale des Monts des Ksour, Atlas Saharien). Mém. Ing. Univ – Oran, 100 p, 55 fig.
- Razack M., 1984 : Application des méthodes numériques statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés. Thèse d'état. Univ. Sc. Et Tech. Languedoc. Montpellier.
- Sidi Yacoub A., 2002 : Traitement et interprétation des données de géophysiques par prospection électrique appliquées à l'hydrogéologie. Exemple: Forthassa Gharbia et Djenane El Adham (Chott El Gharbi). Mém. Ing. Université D'Oran, 112 p, 51 fig.
-

# 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 présentent 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 sur Disquette ou CD ROM et écrits 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 RÉSUMÉ** : 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, s'il est jugé recevable par le rédacteur en chef, 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 peuvent être 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](mailto:inct99@wissal.dz) ou par voie postale à l'adresse suivante: **Bulletin des Sciences Géographique, INCT, 123, rue de tripoli, Hussein-Dey 16040, BP 430, Alger, Algérie.**

## CALENDRIER DES MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES INTERNATIONALES

2006			
DATE	Manifestation	SITE	CONTACT
3 - 6 July 2006 "NEW" Confirmed by Council	Commission I Symposium <a href="http://www.commission1.isprs.org">www.commission1.isprs.org</a>	Marne-le-Valle, FRANCE	Alain Baudoin (President Comm I) P: +33-1-44767810 F: +33-1-44767867 E: <a href="mailto:alain.baudoin@cnes.fr">alain.baudoin@cnes.fr</a>
4-5 July 2006	9th Symposium on the 3-D Analysis of Human Movement <a href="http://www.univ-valenciennes.fr/congres/3D2006/">http://www.univ-valenciennes.fr/congres/3D2006/</a>	Valenciennes, FRANCE	Franck Barbier P: +33-3-2751-14 60 F: +33-3-2751-1316 E: <a href="mailto:franck.barbier@univ-valenciennes.fr">franck.barbier@univ-valenciennes.fr</a>
8 July 2006 "NEW"	ICA Workshop on Geospatial Analysis & Modeling <a href="http://www.hig.se/~bjg/ica/workshop/">http://www.hig.se/~bjg/ica/workshop/</a>	Vienna, AUSTRIA	Bin Jiang P: +46-26-64-8901/ F: -8828 E: <a href="mailto:bjg@hig.se">bjg@hig.se</a>
10-12 July 2006 "NEW"	12 <sup>th</sup> International Symposium on Spatial Data Handling <a href="http://www.agile-secretariat.org/docs/12th_SDH.pdf">http://www.agile-secretariat.org/docs/12th_SDH.pdf</a>	Vienna, AUSTRIA	Programme Committee E: <a href="mailto:greg.elmes@mail.wvu.edu">greg.elmes@mail.wvu.edu</a>
12-14 July 2006 "NEW" Confirmed by Council	Commission II Symposium "GICON 2006 - Geoinformation Connecting Societies" <a href="http://www.commission2.isprs.org">www.commission2.isprs.org</a> <a href="http://www.gicon2006.at/">http://www.gicon2006.at/</a>	Vienna, AUSTRIA	Wolfgang Kainz (President Comm II) P: +43-1-4277 -48640 F: +43-1-4277-9486 E: <a href="mailto:wolfgang.kainz@univie.ac.at">wolfgang.kainz@univie.ac.at</a>
31 Jul-4 Aug 2006	IEEE/IGARSS 2006 <a href="http://www.igarss06.org">http://www.igarss06.org</a>	Denver, CO, USA	Ms. Lisa A. Ostendorf P: + 1-540-658-1676 F: + 1-540-658-1686 E: <a href="mailto:ieeegrss@adeiphia.net">ieeegrss@adeiphia.net</a>
7- 8 Aug 2006 "NEW"	International Workshop on 3D Geoinformation 2006 (3Dgeoinfo '06) <a href="http://www.fksg.utm.my/3dgeoinfo2006/">http://www.fksg.utm.my/3dgeoinfo2006/</a>	Kuala Lumpur, MALAYSIA	Alias Abdul Rahman P: +60-7-5530563/F : -5566163 E: <a href="mailto:alias@fksg.utm.my">alias@fksg.utm.my</a>
19-22 Sep 2006 "UPDATED" Confirmed by Council	Commission V Symposium "Photogrammetric Computer Vision PCV'06" <a href="http://www.commission3.isprs.org">www.commission3.isprs.org</a> <a href="http://www.ipb.uni-bonn.de/isprs/pcv06">http://www.ipb.uni-bonn.de/isprs/pcv06</a>	Bonn, GERMANY	Wolfgang Förstner (President Comm III) P: +49-228-7322713/F:-7322712 E: <a href="mailto:wf@ipb.uni-bonn.de">wf@ipb.uni-bonn.de</a>
20- 22 Sep 2006 "NEW" Confirmed by Council	Commission III Symposium <a href="http://www.commission3.isprs.org">www.commission3.isprs.org</a>	Bonn, GERMANY	Hans-Gerd Maas (President Comm V) P: +49-351-463-33680 F: +49-351-46337266 E: <a href="mailto:hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de">hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de</a>
25-27 Sep 2006 "NEW" Confirmed by Council	Commission V Symposium "Image Engineering & Vision Metrology" <a href="http://www.commission5.isprs.org">www.commission5.isprs.org</a>	Dresden, GERMANY	Hans-Gerd Maas (President Comm V) P: +49-351-463-33680/F: -463-37266 E: <a href="mailto:hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de">hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de</a>
27-30 Sep 2006 "NEW" Confirmed by Council	Commission IV Symposium "Geospatial Databases for Sustainable Development" <a href="http://www.commission4.isprs.org">www.commission4.isprs.org</a>	Goa, INDIA	Shailesh Nayak (President Comm IV) P: +91-79-26914141 F: +91-79-26915825 E: <a href="mailto:shailesh@sac.isro.org">shailesh@sac.isro.org</a>
1- 4 Oct 2006 "NEW" Confirmed by Council	Joint Meeting with Commission Presidents & Council Meeting	Goa, INDIA	Secretary General Dr. Orhan Altan E: <a href="mailto:oaltan@itu.edu.tr">oaltan@itu.edu.tr</a>
8- 13 Oct 2006	FIG XXIII Congress and XXIX General Assembly <a href="http://www.fig2006.de/">http://www.fig2006.de/</a>	Munich, GERMANY	Thomas Gollwitzer (Congress Director) P: +49-9-414022-200 F: +49-9-414022-101 E: <a href="mailto:congress.director@fig2006.de">congress.director@fig2006.de</a>

## 2007

DATE	Manifestation	SITE	CONTACT
28-31 May 2007 "NEW" Confirmed by Council	IC WG IV+V/I, WG I/2+3 5 th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2007) <a href="http://www.cirgeo.unipd.it/sitocirgeo/mmt_frst.html">http://www.cirgeo.unipd.it/sitocirgeo/mmt_frst.html</a>	Padua, ITALY	Dr. Naser El-Sheimy (Chair IC WG IN) P: +1-403-220-7587 F: + 1-403-284-1980 E: naser@geomatics.ucalgary.ca
tbr June 2007	IEEE/IGARSS 2007 <a href="http://ewh.ieee.org/soc/grss/igarss.html">http://ewh.ieee.org/soc/grss/igarss.html</a>	Barcelona, SPAIN	IEEE Conference Services E: conference-services@ieee.org
2-6 July 2007	FIG XXX General Assembly and Working Week <a href="http://www.fig.net/events/events2007.htm">http://www.fig.net/events/events2007.htm</a>		FIG Office E: fig@fig.net
tbr Aug 2007	XXXIII ICA International Cartographic Conference <a href="http://www.icaci.org/">http://www.icaci.org/</a>	Moscow, RUSSIA	ICA Secretary General Ferjan Ormeling E: f.ormeling@geog.uu.nl

## 2008

DATE	Manifestation	SITE	CONTACT
14-19 June 2008	FIG XXXI General Assembly and Working Week <a href="http://www.fig.net/events/2008/fig_2008_stockholm.pdf">http://www.fig.net/events/2008/fig_2008_stockholm.pdf</a>	Stockholm, SWEDEN	FIG Office E: fig@fig.net
3-11 July 2008 "UPDATED" Confirmed by Council	XXI Congress of ISPRS <a href="http://www.isprs2008-beijing.com">http://www.isprs2008-beijing.com</a>	Beijing, CHINA	CSGPC P: +86-10-68339095 F: +86-10-68311564 E: fanbsm@public.bta.net.cn

# INSTITUT NATIONAL DE CARTOGRAPHIE ET DE TÉLÉDÉTECTION

## SOUS DIRECTION DES ACTIVITÉS COMMERCIALES

**Pins Maritimes, S.A.F.E.X**

**Tél : 021.21.91.04 - Fax : 021.21.91.11**

### I- Le Barème des prix de vente des Documents Cartographiques

DESIGNATION	UNITÉ	PRIX EN HT	TVA	PRIX DE VENTE
<b>CARTES TOPOGRAPHIQUES</b>				
Alger au 1/5 000 en 13 coupures	coupure	190,58	32,40	222,98
Alger au 1/10 000 en 4 coupures	coupure	190,58	32,40	222,98
Carte d'alger au 1/25000 - 1/200 000 - DR/DG	carte	190,58	32,40	222,98
Carte d'alger au 1/25000 et 1/50 000 DG longue coupure	carte	381,16	64,80	445,96
Carte d'alger au 1/500 000 et CIM 1/1 000 000	carte	234,99	39,95	274,94
Spatio carte au 1/200 000 trait et image	carte	190,58	32,40	222,98
<b>CARTES GÉNÉRALES</b>				
Carte d'alger et ses environs au 1/200 000	carte	188,03	31,97	220,00
Carte touristique de l'Algérie au 1/2 300 000	carte	235,04	39,96	275,00
Carte touristique du nord de l'Algérie au 1/1 000 000	carte	235,04	39,96	275,00
Carte touristique de l'alger au 1/500 000 en 3 feuilles	carte	123,93	21,07	145,00
Carte du grand alger au 1/50 000	carte	188,03	31,97	220,00
Carte du maghreb au 1/5 000 000	carte	136,75	23,25	160,00
Carte du monde arabe (en arabe) 1/13 000 000	carte	102,56	17,44	120,00
Carte des voies de communication au 1/2 000 000 (N - S)	carte	235,04	39,96	275,00
Carte des limites administratives Nord en 2 feuilles (E-W)	carte	128,21	21,79	150,00
Carte des limites administratives Sud	carte	128,21	21,79	150,00
Carte d'afrrique 1/10 000 000	carte	128,21	21,79	150,00
Carte scolaire petit format (arabe & francais )	carte	38,46	6,54	45,00
Jeux circulaires d'afrrique (arabe & francais)	jeu	42,74	7,26	50,00
<b>CARTES THÉMATIQUES</b>				
Plan de ville	coupure	111,11	18,89	130,00
Carte météo	carte	128,21	21,79	150,00
Carte aéronautique 1/1 000 000 et 1/500 000	carte	235,04	39,96	275,00
Carte scolaire sur papier polyart	carte	384,62	65,38	450,00
Carte scolaire sur papier 120 Grs	carte	128,21	21,79	150,00
Carte marine	carte	598,29	101,71	700,00
<b>CARTES EN RELIEF</b>				
Carte en relief 1/2300 000	carte	2000,00	340,00	2340,00
Carte en relief 1/200 000 region d'alger	carte	1196,58	203,42	1400,00
Carte en relief au 1/50 000 de Cherchell	carte	1196,58	203,42	1400,00
<b>PUBLICATIONS</b>				
Bulletin des sciences géographiques	bulletin	37,38	2,62	40,00
Guide d'alger Nounou édition	guide	560,75	39,25	600,00
Guide d'alger EGP	guide	906,54	63,46	970,00
Guide de Tizi Ouzou	guide	280,37	19,63	300,00
Livre de toponymie	livre	280,37	19,63	300,00
Atlas compact	atlas	1327,10	92,90	1420,00
Petit atlas mondial	atlas	831,78	58,22	890,00
Catalogue des cartes nautiques	catalogue	257,01	17,99	275,00
Livre des feux	livre	598,13	41,87	640,00
Atlas DJAZAIROUNA	atlas	2803,74	196,26	3000,00
Catalogue des produits INCT	Catalogue	186,92	13,08	200,00
<b>ACCESSOIRES</b>				
Stéréoscope de poche	stéréoscope	4739,32	805,68	5545,00
Curvimètre RUN MAP	curvimètre	5927,35	1 007,65	6935,00
Globe 25	globe	1316,24	223,76	1540,00
Globe 20	globe	1098,29	186,71	1285,00
<b>LOGICIELS</b>				
SoftMap Pro avec formation incluse pour 2 personnes .	logiciel	96000,00	16 320,00	112320,00
Pack SoftMap Plus avec données Algérie 1/2 300M,1/500M,1/1000000	logiciel	58500,00	9 945,00	68445,00
<b>ATLAS CARTOGRAPHIQUES</b>				
Atlas de la carte d' alger au 1/1 000 000	atlas	4982,91	847,09	5830,00
Atlas de la carte d' alger au 1/500 000	atlas	9914,53	1685,47	11600,00
Atlas des limites administratives	atlas	2905,98	494,02	3400,00
<b>VENTE À L'ÉTRANGER (en EURO)</b>				
Photo contact	photo	10		
Carte d'alger au 1/25000 - 1/200 000 - DG/DR	carte	6		
Carte d'alger au 1/25000 et 1/50 000 DG/Coupure Longue	carte	9		
Carte d'alger au 1/500 000 et CIM 1/1 000 000	carte	9		
Plan de ville	plan	4		
Carte touristique au 1/2 300 000	carte	6		
Carte touristique au 1/1 000 000	carte	4		
Carte touristique au 1/500 000	carte	3		



## II- Le Barème des prix de vente des Prestations de Service

DESIGNATION	UNITÉ	PRIX EN HT	TVA	PRIX DE VENTE EN TTC
<b>GÉODÉSIE</b>				
Répertoire de géodésie	point	162,39	27,61	190,00
Répertoire de nivellement	feuille	162,39	27,61	190,00
Transformation de coordonnées	point	102,56	17,44	120,00
Planche de nivellement	Planche	162,39	27,61	190,00
<b>TRAVAUX DE REPRODUCTION</b>				
Photo contact	photo	307,69	52,31	360,00
Diapositive	diapo	452,99	77,01	530,00
Agrandissement photo (F2) sur papier	agran	1 666,67	283,33	1 950,00
Agrandissement photo (F3) sur papier	agran	1 991,45	338,55	2 330,00
Agrandissement photo (F4) sur papier	agran	2 307,69	392,31	2 700,00
Agrandissement photo (F2) sur film	agran	3 384,62	575,38	3 960,00
Agrandissement photo (F3) sur film	agran	4 017,09	682,91	4 700,00
Agrandissement photo (F4) sur film	agran	4 649,57	790,43	5 440,00
Tirage diazo	tirage	273,50	46,50	320,00
Tirage stabiphane	tirage	1 111,11	188,89	1 300,00
<b>TIRAGE SUR TRACEUR</b>				
Format A0 (carte au trait)	tirage	982,91	167,09	1 150,00
Format A4 (carte au trait)	tirage	797,44	135,56	933,00
Format A3 (carte au trait)	tirage	735,04	124,96	860,00
Format A0 en raster	tirage	2 025,64	344,36	2 370,00
Format A4 en raster	tirage	1 367,52	232,48	1 600,00
Format A3 en raster	tirage	1 170,94	199,06	1 370,00
<b>REPRODUCTION SUR FILM</b>				
Contact à partir d'un négatif	tirage/film	3 153,85	536,15	3 690,00
Contact à partir d'un positif	tirage/film	6 316,24	1 073,76	7 390,00
Contact supplément par pose	pose	675,21	114,79	790,00
Tirage ortho (simple modèle)	tirage/film	3 410,26	579,74	3 990,00
Tirage ortho (double modèle)	tirage/film	6 811,97	1 158,03	7 970,00
<b>REPRODUCTION SUR PAPIER PHOTO</b>				
Contact à partir d'un négatif	tirage/papier	1 923,08	326,92	2 250,00
Contact à partir d'un positif	tirage/papier	3 837,61	652,39	4 490,00
Tirage ortho (simple modèle)	tirage/papier	2 170,94	369,06	2 540,00
Tirage ortho (double modèle)	tirage/papier	4 341,88	738,12	5 080,00

## III- Le Barème des prix de vente des Données Numériques

DESIGNATION	UNITÉ	PRIX EN HT	TVA	PRIX DE VENTE TTC
<b>SCANNE</b>				
Plans - cartes	plan	1 094,02	185,98	1 280,00
Ortho scanné simple modèle	ortho	3 262,39	554,61	3 817,00
Ortho scanné double modèle	ortho	5 433,33	923,67	6 357,00
Carte avec géoréférencement	carte	2 683,76	456,24	3 140,00
Cliché, Diapositive ou Photos Aérienne	photo	1 512,82	257,18	1 770,00
Cartes et plans toutes échelles sous SoftMap	carte	854,70	145,30	1 000,00
<b>CARES VECTORISÉS (Digitalisation en archive)</b>				
Carte au 1/25 000	carte	11 800,00	2 006,00	13 806,00
Carte au 1/50 000	carte	25 800,00	4 386,00	30 186,00
Carte au 1/200 000	carte	28 200,00	4 794,00	32 994,00
Carte au 1/500 000	carte	25 800,00	4 386,00	30 186,00
Carte au 1/1 000 000	carte	39 800,00	6 766,00	46 566,00
Carte au 1/2 300 000	carte	25 800,00	4 386,00	30 186,00
Levé numérique au 1/1 000	ha	900,00	153,00	1 053,00
Fichier numérique des Limites Administratives de l'Algérie	fichier	20 000,00	3 400,00	23 400,00
MNT du nord de l'Algérie	mnt	140 000,00	23 800,00	163 800,00
Ortho numérique Alger	ortho	486 570,00	82 716,90	569 287,00
Ortho numérique Ouargla	ortho	240 000,00	40 800,00	28 080,00





**INSTITUT NATIONAL DE CARTOGRAPHIE ET DE TELEDETECTION**

Crée par ordonnance 211 67 du 17/10/1967 modifiée par les ordonnances 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

- Oui, je souhaite m'abonner au Bulletin des Sciences Géographiques pour une année.**

**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: 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 : .....

Date

Signature

**Retourner ce bulletin accompagné du règlement à  
Monsieur le Directeur Général de l'Institut National de Cartographie  
et de Télédétection, Bulletin des Sciences Géographiques**

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](mailto:inct99@wissal.dz)