

# Bulletin des Sciences Géographiques

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

**N°16**



Octobre 2005 - 2<sup>e</sup> Semestre • 8<sup>ème</sup> année • Prix 40 DA • Etranger 15 € • ISSN 1112-3745

Alger vue par QuickBird, résolution 60 cm, date: 23.09.2004



# INCT BULLETIN DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

N° 16  
Octobre 2005

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

Fondée en Octobre 1997  
N°16 - Octobre 2005  
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) 23 43 75  
Fax : (021) 23 43 81  
(021) 47 00 29

E-mail : [inct99@wissal.dz](mailto:inct99@wissal.dz)

#### Publicité :

ANT Vertriebs GmbH  
Postfach 210403 80764  
Munich Allemagne

#### Tirage :

1.000 Exemplaires

#### Comité de Rédaction :

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

- Mr DROUAI Felhallah  
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 MEGHRAOUI Mustapha  
Professeur, IPG / Strasbourg

- Mr, KAHLOUCHE Salem.  
Directeur de recherche, CNTS.

- Mr AYADI Abdelkrim  
Directeur de recherche, CRAAG.

- Mr OUGUINI Rachid  
Maître de recherche, ASAL

- Mr IFTENE Tahar  
Maître de recherche, CNTS.

- Mr BENMOHAMED Mohamed  
Chargé de recherche, CNTS.

- Mr GHEZALI Boualem  
Chargé de recherche, CNTS.

- Mr OUGRINE Aziz  
Master, INCT

- Mr AYAD Ahmed  
Ingénieur, SGT-ANP

## Sommaire / Contents

Pages

<b>SUIVRE L'ÉVOLUTION DU NIVEAU MOYEN DE LA MÉDITERRANÉE.....</b>	<b>02</b>
<i>P. EXERTIER, P. BONNEFOND, &amp; F. BARLIER</i>	
<b>DÉTERMINATION DU NIVEAU MOYEN DE LA MER AU NIVEAU DU PORT D'ALGER À PARTIR DES DONNÉES MARÉGRAPHIQUES.....</b>	<b>12</b>
<i>M. HADDAD</i>	
<b>DÉTERMINATION DU NIVEAU MOYEN ALTIMÉTRIQUE DE LA MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE À PARTIR DES DONNÉES DU SATELLITE JASON-1.....</b>	<b>16</b>
<i>A. RAMI, S. KAHLOUCHE, &amp; M. HADDAD</i>	
<b>UNIFORMISATION DES CAMPAGNES GPS. CAS D'ÉTUDE : OUEST DE L'ALGÉRIE.....</b>	<b>22</b>
<i>H. TAIBI, N. NABED, R. AIT AHMED LAMARA, &amp; C.B KADRI</i>	
<b>LES DONNÉES INCT AU SERVICE DE LA COMMUNAUTÉ DE GESTION DES RISQUES MAJEURS.....</b>	<b>28</b>
<i>N. OMRANE, N. FERGANE, F. DEGAICHIA, &amp; Dj. BENTATA</i>	
<b>GESTION DU FOND CARTOGRAPHIQUE, OUTILS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>31</b>
<i>E.H. TAKKA</i>	
<b>ORBIT SIMULATOR OF THE ALSAT-1 FIRST ALGERIAN MICRO-SATELLITE IN ORBIT.....</b>	<b>35</b>
<i>A.M. SI MOHAMMED, A. BOUDJEMAI, H. BENZENIAR, Y. HASHIDA, H. STEYN, &amp; M.N. SWEETING</i>	
<b>APPORT DE L'IMAGERIE SPATIALE OPTIQUE ET RADAR POUR LA DÉTECTION ET LE SUIVI DES ZONES D'ORPAILLAGE EN GUYANE FRANÇAISE.....</b>	<b>39</b>
<i>N. BAGHDADI, A. BOURGUIGNON &amp; J. L. LASSERRE</i>	
<b>APPORT DE L'IMAGERIE SPATIALE OPTIQUE ET RADAR POUR LA CARTOGRAPHIE DES BANCS DE VASE EN GUYANE FRANÇAISE.....</b>	<b>50</b>
<i>N. BAGHDADI, A. DAVID, C. OLIVEROS &amp; N. GRATIOT</i>	
<b>PHOTOGRAMMÉTRIE SATELLITALE POUR LES CAPTEURS DE HAUTE RÉOLUTION : ÉTAT DE L'ART.....</b>	<b>68</b>
<i>Th. TOUTIN</i>	
<b>COMPARISON OF SEDIMENT YIELD IN TWO CATCHMENTS, NORTHEAST ALGERIA.....</b>	<b>82</b>
<i>K. KHANCHOU, MARGARETA B. JANSSON &amp; Y. SPIGA</i>	
<b>PRÉSENTATION DU BULLETIN DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES.....</b>	<b>98</b>
<b>CALENDRIER DES MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES INTERNATIONALES.....</b>	<b>107</b>

© 2005

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

Le Bulletin des Sciences Géographiques est indexé dans la  
*Bibliographie Internationale Geoabstracts et International  
Bibliography of the Social Sciences*

## Suivre L'Évolution du Niveau Moyen de la Méditerranée

P. Exertier, P. Bonnefond, F. Barlier  
Observatoire de la Côte d'Azur, Département CERGA  
Avenue N. Copernic - 06130 Grasse  
E-mail: P. EXERTIER

Tél: (33-4)/(04)-93 40 53 53 Fax: (33-4)/(04)-93 40 53 33

**Résumé:** La topographie de la surface de la mer, qui est directement reliée à la forme du géoïde et à la signature des effets océaniques, n'est accessible que grâce à la résolution spatiale et temporelle de l'altimétrie satellitaire. En particulier, l'apport des missions altimétriques Seasat (lancé en 1978), Geosat (1985) puis ERS1 (1991) et TOPEX/Poseidon (1992) à l'étude de la Méditerranée est considérable. Les premières cartes du géoïde marin, avec des précisions relatives de 10-20 cm suivant les solutions, ont beaucoup contribué à la compréhension des phénomènes géophysiques. Ensuite, grâce, d'une part, aux réductions d'erreurs d'orbite sous-jacentes à l'amélioration des modèles de champ de gravité et, d'autre part, au développement de méthodes de calcul d'orbite pseudo-géométriques, la précision des déterminations du niveau moyen absolu de la surface de la mer est passée de quelques mètres à quelques centimètres. L'analyse des données de TOPEX/Poseidon (T/P) en Méditerranée, présentée ici, a permis pour la première fois de déterminer l'évolution temporelle du niveau moyen de la mer. L'amplitude des variations inter-annuelles est de l'ordre de 20 cm avec un maximum en octobre/novembre et un minimum en mars. D'autre part, la combinaison des données de ERS1 et de T/P a permis d'améliorer la résolution spatiale des cartes sans perte de précision, faisant apparaître les principales caractéristiques de la circulation en Méditerranée et ses variations saisonnières.

**Mots Clés:** satellite artificiel, altimétrie, TOPEX / Poseidon, Méditerranée, niveau moyen, variations saisonnières

**Abstract:** The sea surface topography, which is directly linked to the shape of the geoid and to oceanic effects, is only measurable thanks to the spatial and temporal resolution of satellite altimetry. The contributions of Seasat (1978), Geosat (1985) followed by ERS-1 (1991) and TOPEX/Poseidon (T/P) (1992) to the study of the Mediterranean have

been considerable. The first maps of the marine geoid, with relative accuracy of 10-20 cm depending on the methods used, have contributed greatly to the understanding of geophysical phenomena. Subsequently, thanks to reductions in orbital errors, improvements in gravitational models, and to the development of pseudo-geometrical orbit computations, the accuracy of determination of the absolute mean sea level has improved from several metres to a few centimetres. The analysis of T/P data in the Mediterranean presented here has allowed seasonal variations in mean sea level to be determined for the first time. Amplitudes are of the order of 20 cm with a maximum in October/November and a minimum in March. Further, the combination of ERS-1 and T/P data has permitted improvements in the spatial resolution of sea surface maps without loss of accuracy, thereby showing the main features of Mediterranean circulation including seasonal variations.

**Keywords:** artificial satellite, altimetry, mean sea level, seasonal variations, Mediterranean

### 1. Introduction

L'océan joue un rôle clé sur le climat global de la Planète et son évolution dans le temps. Pour comprendre ce rôle puis développer des techniques de modélisation du climat, notamment à des fins de prédiction, il est nécessaire de comprendre la dynamique de la circulation océanique globale. Cette compréhension implique une observation précise de la circulation et de ses variations dans le temps qui, pour être réaliste, doit être opérée avec suffisamment de résolution spatiale et temporelle par un satellite altimétrique ou, mieux, une série de satellites. La mesure altimétrique est la mesure de distance par radar entre le satellite et la surface de la mer. L'orbite du satellite servant de référence, l'altimétrie permet de déterminer la surface topographique moyenne des océans, dont les hauteurs sont rapportées à un ellipsoïde de référence (Figure 1).

Toutefois, il faut souligner que la surface de la mer varie en permanence sous les effets conjugués des marées, des vents et de la pression atmosphérique. Aussi, est-il toujours nécessaire de préciser l'intervalle de temps sur lequel on considère la moyenne. La surface topographique moyenne révèle avant tout le relief de la mer créé par les inhomogénéités du champ de gravité terrestre, ce qui contribue d'abord à la détermination du géoïde dans les zones océaniques. Elle incorpore également le relief de la "topographie dynamique" de l'océan, qui est lié à la présence des courants et à la densité inhomogène des eaux océaniques. Comme on le démontre en océanographie, les courants océaniques suivent les courbes de niveau de la topographie dynamique avec une vitesse proportionnelle à la pente locale. Aussi, l'analyse de ce relief apporte-t-elle une contrainte importante dans la détermination de la circulation océanique globale (Fu and Cheney, 1995). Ce dernier signal est cependant nettement plus faible que le signal dû au géoïde aux grandes longueurs d'onde: il est en effet presque partout inférieur au mètre et de longueur d'onde supérieure à 30 km. En particulier, la Méditerranée se caractérise par une topographie dynamique de faible amplitude, d'environ 5 à 10 cm.

Pour établir la cartographie des courants à partir de la mesure altimétrique, une connaissance indépendante et très précise du géoïde est donc nécessaire. Or, si le géoïde à grande longueur d'onde (sur plusieurs milliers de kilomètres) est connu à mieux que quelques centimètres, la précision se dégrade en deçà de 1000 km. Ainsi, la précision avec laquelle le géoïde en Méditerranée peut être connu est, aujourd'hui, très sensiblement inférieure à celle avec laquelle la surface topographique moyenne est déterminée, notamment grâce aux données de TOPEX/Poseidon. Au-delà de l'étude de la circulation océanique, se dessine un objectif très ambitieux pour l'altimétrie: l'étude des variations séculaires du niveau moyen absolu des océans (Minster et al., 1995). Dans ce domaine, il s'agit d'extraire de séries pluriannuelles de mesures, des signaux infimes de l'ordre de quelques millimètres à quelques centimètres par an. Dans le contexte d'un réchauffement de la planète, ces tendances, superposées à la variabilité de la topographie dynamique, mettront en évidence l'élévation lente du niveau moyen de l'océan sous l'effet conjugué de la dilatation thermique, de la fonte des glaces et des glaciers, des précipitations, etc.

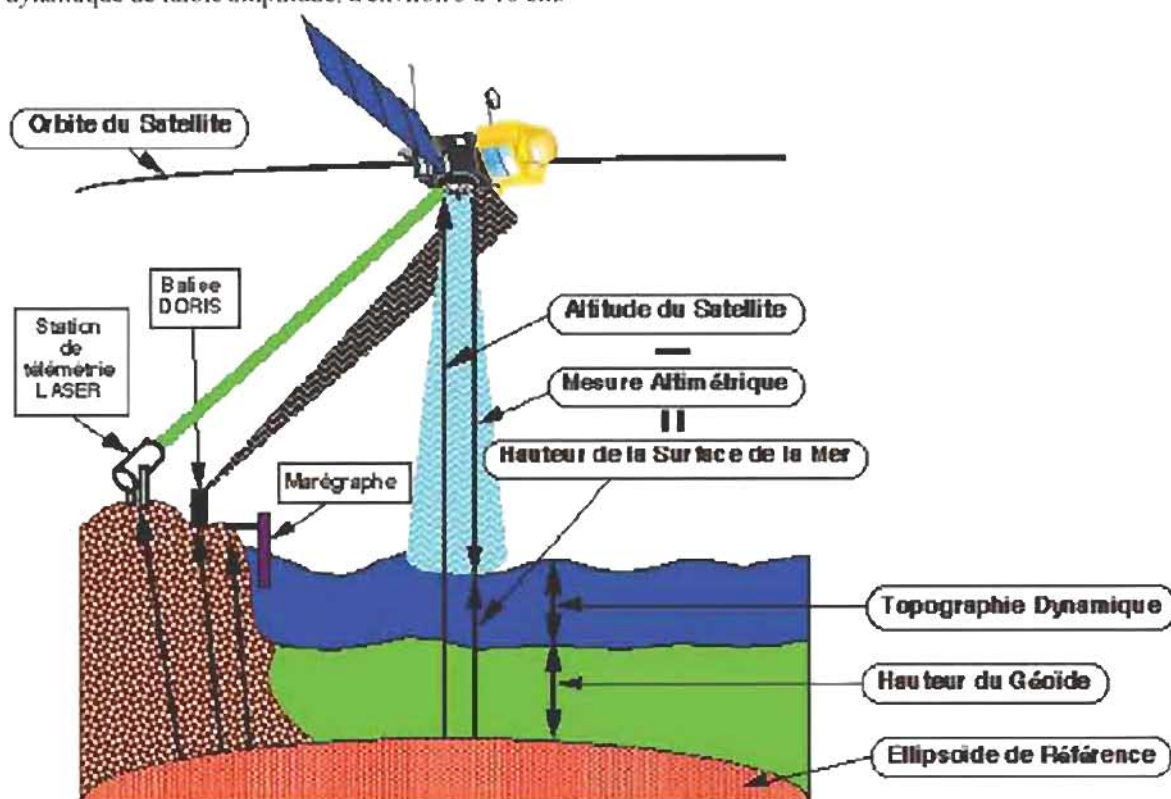


Fig. 1 Principe de la détermination des hauteurs de mer à partir des mesures altimétriques. Par exemple, le zéro du marégraphe de Marseille, référence du nivellement français, est en continuité avec la surface topographique moyenne de la mer.

La mise en évidence des phénomènes océanographiques et géophysiques (zones de fractures, bathymétrie, etc.), qui affectent la forme de la surface de la mer dans l'espace et dans le temps, fait de l'altimétrie un outil puissant pour les sciences de la Terre qu'il est nécessaire de maîtriser du point de vue géodésique. En effet, si le principe de l'altimétrie est simple, la réalisation des mesures et l'exploitation des données restent complexes du fait de la très grande précision nécessaire : la pente de la surface de l'océan peut varier de 1 m sur 100 km à 0.1 m sur 3000 km, et il faut pouvoir la mesurer avec une précision meilleure que dix pour cent (si possible un pour cent). Cela entraîne des contraintes techniques très sévères sur les instruments de mesure ainsi que sur la modélisation des corrections de propagation des signaux. Cela implique aussi un calcul d'orbite très précis et une connaissance approfondie du géoïde, principales sources d'erreurs, qui limitent l'analyse des données altimétriques. Pour réduire ces sources d'erreurs, il convient d'améliorer les modèles orbitographiques de forces perturbatrices, essentiellement d'origine non gravitationnelle, ainsi que la connaissance du champ de gravité de la Terre (Exertier, 1993). Dans l'objectif de la mission d'océanographie spatiale franco-américaine TOPEX/Poseidon (T/P), un effort dans ce sens a été entrepris de façon très large.

C'est ainsi qu'ont été réduits les postes d'erreurs, qui rendaient impossible la mesure des variations du niveau global des océans à partir des missions altimétriques précédentes (Fu et al., 1994). Les progrès réalisés ces dernières années dans la connaissance du modèle dynamique pour le calcul de l'orbite de T/P (coefficients du champ de gravité à grande longueur d'onde et modélisation des forces de surface, essentiellement) ont permis de gagner *environ un ordre de grandeur, portant à 3-4 cm l'erreur estimée sur la position radiale du satellite* (Nouel et al., 1994 ; Tapley et al., 1994). L'utilisation des systèmes de poursuite laser et DORIS a, bien entendu, beaucoup contribué à ce résultat. D'un autre point de vue, le développement de méthodes de calcul d'orbite à caractère pseudo-géométrique - c'est-à-dire indépendantes des méthodes dynamiques classiques -, qui conduisent à l'utilisation de systèmes de poursuite spatiaux continus comme le Global Positioning System (Yunck et al., 1994), a également joué un rôle important pour le contrôle et la validation de la mission. Dans ce sens, la technique d'arcs courts, qui s'appuie sur des observations de télémétrie laser, a été déterminante pour la calibration des deux altimètres

TOPEX (opérationnel) et Poseidon (expérimental), permettant d'atteindre une précision proche de 2 cm sur la position radiale du satellite (Bonfond, 1994).

Le but de notre papier est de montrer l'apport croissant de différentes missions spatiales à l'étude de la Méditerranée et, en particulier, l'apport plus récent des données de T/P particulièrement précises pour la détermination des variations temporelles du niveau de la mer et donc des courants. La section 2 est consacrée à une présentation de Méditerranée, en tant que zone d'étude privilégiée. En effet, satellites d'altimétrie, réseaux de marégraphes et systèmes géodésiques terrestres et spatiaux de positionnement y sont présents pour tenter d'établir une surveillance climatique précise, permanente et à long terme du niveau de la mer. Cette section comporte, en outre, les principaux résultats de l'analyse des données altimétriques de Seasat (lancé en 1978) et Geosat (lancé en 1985) obtenus sur cette zone durant la dernière décennie. La section 3 est dédiée aux résultats de l'analyse de la première année de données de T/P en Méditerranée obtenus en utilisant une méthode géométrique de calcul d'arcs courts d'orbite qui garantit une précision centimétrique des profils altimétriques. Si les variations séculaires ne peuvent être mises en évidence clairement sur une si courte période, l'analyse a permis pour la première fois de caractériser les évolutions saisonnières du niveau moyen absolu par rapport au réseau géodésique régional et de vérifier la cohérence des mesures à mieux que un centimètre (Bonfond et al., 1995). En outre, grâce à la combinaison des données de T/P et de ERS1 (lancé en 1991) qui permet d'obtenir un échantillonnage spatio-temporel plus dense, nous présentons aussi une première observation des principales caractéristiques de la circulation en Méditerranée, notamment les variations saisonnières (Larnicol et al., 1995).

## 2. La Méditerranée: une zone privilégiée

La Méditerranée peut être considérée comme une zone test privilégiée des techniques géodésiques appliquées à la géodynamique et à l'océanographie. Du point de vue géodynamique, d'importantes campagnes de mesures ont été réalisées depuis 1985 dans la partie centrale et orientale en utilisant les techniques modernes de géodésie spatiale: la télémétrie laser sur satellites (Satellite Laser Ranging, SLR), l'interférométrie à très longue base (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) et le Système de Positionnement Global (Global Positioning System, GPS).

Les buts principaux de ces campagnes d'observations étaient l'étude des mouvements tectoniques de cette région mais aussi, plus largement, l'établissement d'un réseau d'appui SLR/VLBI en prévision d'une densification future (voir le projet international WEGENER-MEDLAS). Aujourd'hui, grâce notamment aux actions de la sous-commission EUREF (EUropean REference Frame) de l'Association Internationale de Géodésie (AIG), il existe un réseau européen étendu, dont le nombre de stations de poursuite de satellites est relativement important par rapport à d'autres régions du globe. Du point de vue océanographique, dans le cadre des études menées sur les variations du niveau moyen de la mer, un ensemble de données marégraphiques, certes de qualité inhomogène, sont disponibles sur le pourtour méditerranéen depuis longtemps (plus d'un siècle pour Marseille, par exemple). Cependant, compte tenu de l'influence de facteurs locaux à caractères géodynamique et océanique, ces mesures sont entachées d'erreurs. Aussi est-il nécessaire d'établir un réseau de marégraphes sur la base d'une même référence par rapport au centre de masse de la Terre, afin de séparer proprement les effets de variation du niveau moyen de la mer de tout autre effet, comme celui des mouvements de la croûte terrestre. Le projet européen SELF (SEa Level Fluctuations) a été créé dans le but de connecter certains marégraphes méditerranéens au repère de référence terrestre global, qui est basé sur les différentes techniques (SLR, Lunar Laser Ranging, VLBI, GPS) : l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Une première campagne a été réalisée en 1992 en utilisant le système GPS comme moyen de rattachement (Baker et al., 1993). Ce projet se poursuit aujourd'hui.

Grâce à l'altimétrie, la surface topographique de la Méditerranée a déjà fait l'objet de plusieurs déterminations. Les premières déterminations marquantes ont utilisé les trois mois de données du satellite Seasat, durant l'été 1978 (Barlier et al., 1982 ; Cruz and Rapp, 1982 ; Bernard et al., 1983 ; Exertier et al., 1987 ; Barriot and Vales, 1988).

Cependant, le facteur d'incertitude majeur de cette mission - l'erreur radiale de l'orbite du satellite - atteignait environ 1.5 m, pour une précision instrumentale certes déjà très bonne de 7 cm. Aussi, les méthodes d'amélioration de trajectoire, dites de correction d'erreur radiale d'orbite, ont été largement développées et appliquées. Par exemple, par ajustement des profils altimétriques aux points de croisement de deux arcs de trajectoire

(la hauteur de la surface de la mer doit y être identique, aux effets océanographiques près), la forme de la surface topographique locale a pu être déterminée avec une précision de l'ordre de 0.2 m. Aussi, le géoïde en Méditerranée a donné lieu à plusieurs interprétations géophysiques, notamment sur la structure de la lithosphère dans la partie occidentale du bassin et en mer Égée (Bernard et al., 1983 ; Genthon and Souriau, 1987). Néanmoins, des erreurs systématiques de l'ordre de un à quelques mètres ont été détectées sur la position absolue de la surface topographique Seasat par rapport à l'ellipsoïde de référence, comme peut le montrer la comparaison des diverses solutions entre elles ou encore la comparaison avec un géoïde gravimétrique (Torge et al., 1982 ; Exertier, 1983 ; Arabelos and Tscherning, 1988). Le satellite altimétrique militaire Geosat de l'U.S. Navy a été placé sur une orbite répétitive de 17 jours, fin 1986, pour démarrer des applications à caractère océanographique. Les 2.5 années de données recueillies ensuite ont formé la première base pluriannuelle de mesures altimétriques. Comme dans le cas de Seasat, la plus importante source d'erreur était l'incertitude sur l'altitude du satellite, de l'ordre de 1-2 m. Cependant, ce chiffre a été largement amélioré par la suite (à 0.3-0.5 m) grâce à l'amélioration du modèle de champ de gravité (Haines et al., 1994). Le calcul d'une surface moyenne de l'ensemble de la Méditerranée, pour des longueurs d'onde supérieures à 330 km, a été réalisée par Mazzega and Houry (1989), à partir de ces données. L'approche a consisté à séparer, le plus objectivement possible, le signal altimétrique de l'erreur d'orbite résiduelle dans une méthode directe inverse. La précision de cette surface moyenne Geosat est estimée à 0.12 m. En outre, une amélioration de cette solution, qui inclut des données marégraphiques, a permis d'augmenter la précision pour atteindre 0.10 m sur l'ensemble du bassin (Houry and Mazzega, 1991). Dans ce travail, les données des sites de Marseille, Bastia et Gênes (Italie) ont été moyennées sur quelques mois pour obtenir des hauteurs moyennes de mer qui, rattachées à l'ITRF par une campagne GPS, ont servi à contraindre les grandes longueurs d'onde de la surface moyenne déduite de l'altimétrie.

Les données altimétriques de Geosat en Méditerranée ont également servi à l'observation de la variabilité de la topographie dynamique dans la partie occidentale (travaux de M.C. Rouquet, CLS/Argos, en France et de Manzella et Marullo en Italie).

Cependant, les analyses ont révélé des difficultés sérieuses provenant : (i) de l'amplitude trop faible du signal nécessitant des mesures et corrections géophysiques encore plus précises, (ii) d'une large proportion de données manquantes due notamment à la présence de nombreuses îles (décrochage de l'altimètre). Enfin, l'assimilation des données Geosat dans des modèles de circulation océanique de la Méditerranée se caractérise essentiellement à travers la modélisation de marées et, en particulier, de la marée M2. Les travaux de P. Vincent (GRGS/Toulouse), notamment, ont permis de fournir une correction de marée océanique plus fiable pour les projets altimétriques des années 1990 (Vincent and Canceill, 1993).

Certaines études océanographiques demandent cependant une couverture spatio-temporelle plus dense que celle obtenue par Seasat et, si possible, une précision accrue par rapport à Geosat. Dans la perspective d'une amélioration significative du géoïde (actuellement d'après les rapports de F. Sanso, à l'Institut Polytechnique de Milan en Italie, la précision serait seulement de 0.2 m) par des apports conjoints du positionnement, de l'altimétrie et de la gravimétrie, on peut aussi espérer dans le futur accéder à la valeur de la circulation géostrophique, au moins dans les zones centrales des bassins. De plus, si le satellite altimétrique a une durée de vie supérieure à un ou deux ans, les signaux les plus accessibles sont la variabilité saisonnière et interannuelle de la surface topographique et des courants. Ces idées ont été à la base du projet d'océanographie spatiale TOPEX/Poseidon lancé en 1992.

### 3. L'apport des données de TOPEX / Poseidon

La mission T/P est la première mission spatiale où l'on a cherché à obtenir a priori, notamment grâce à une altitude élevée, une très grande précision dans la détermination du mouvement orbital du satellite ainsi que dans le système de mesure altimétrique. C'est par une amélioration très importante de la connaissance du champ de gravité, mais aussi par l'installation sur la plate-forme spatiale de systèmes de poursuite les plus performants (DORIS, SLR, et GPS à titre expérimental), que les spécifications sur l'erreur d'orbite ont été très resserrées par rapport aux missions antérieures (Nerem et al., 1993). Compte tenu aussi de l'évolution récente des méthodes de traitement, le seuil des 5 cm sur le bilan d'erreur local a finalement été franchi, résultant en une exactitu de

de 4.7 cm pour la détermination du niveau géocentrique de la mer : 3.5 cm pour l'orbite du satellite, au lieu des 13.4 cm initialement spécifiés, et 3.2 cm pour l'altimètre (Fu et al., 1994). Concernant la mesure, la correction ionosphérique est produite par un altimètre bi-fréquence (TOPEX) ou par le système DORIS pour l'altimètre Poseidon. La correction troposphérique (partie humide) est basée sur les mesures d'un radiomètre à vapeur d'eau embarqué. Néanmoins, il est clair que la qualité recherchée pour l'ensemble du système T/P a nécessité la mesure absolue d'un certain nombre de paramètres, avec un étalonnage extrêmement précis des deux altimètres.

L'étalonnage d'un altimètre exige une détermination de la position du satellite par rapport à la surface de la mer, si possible au niveau centimétrique, et cela par principe indépendant de la mesure altimétrique. Dans ce type d'expérience, le satellite est positionné localement par une ou plusieurs stations de télémétrie laser, le niveau de la surface de la mer étant mesuré par des marégraphes. En conséquence, il faut avoir recours à des techniques géodésiques permettant de repérer dans le même système, par GPS ou positionnement géodésique, le satellite et la surface de la mer. La Méditerranée offre une zone de test idéal pour la calibration et la validation de ce type d'instrument, comme pour évaluer la qualité de la restitution des trajectoires de satellites d'observation. Aussi, plusieurs projets y ont été réalisés récemment. C'est le cas de la validation du système spatial T/P et de la campagne de calibration de l'altimètre radar Poseidon au-dessus de l'île de Lampedusa située entre la Sicile et la Tunisie (Ménard et al., 1994 ; Bonnefond, 1994). Ces expériences particulières ont fortement suscité le développement d'une nouvelle méthode de calcul d'orbite locale répondant à des objectifs de précision et d'exactitude de niveau centimétrique. Cette méthode est basée sur un concept géométrique et s'appuie essentiellement sur les données des systèmes SLR. Sa force réside donc dans sa capacité à s'affranchir d'un modèle de forces complexe, pour établir un calcul d'orbite précis sous des hypothèses relativement simples. Contrairement aux méthodes dynamiques, l'exactitude géocentrique de la position du satellite n'est donc plus rattachée à la validité d'un modèle orbitographique et de ses coefficients. Elle est reliée à la qualité du réseau local des stations de poursuite et de leurs mesures de distance. En revanche, ceci a pour conséquence une nette limitation dans le temps, et donc dans l'espace, de la qualité obtenue par la méthode sur le calcul des arcs d'orbite.

Ceux-ci sont d'environ 10 minutes pour T/P, donc d'environ 3000 km. Un bilan d'erreur a été dressé de façon exhaustive et des comparaisons, sur des arcs courts, de différents calculs d'orbite ont montré que la précision et l'exactitude de la solution géométrique s'établissent à 2 cm (Bonfond et al., 1995). Un avantage certain de cette méthode est sa capacité à fournir une même exactitude, quelle que soit la période considérée - début ou fin de la mission -, à condition de disposer de mesures de distance SLR d'une qualité au moins constante pendant la durée de la mission. Elle est donc tout à fait applicable, à long terme, pour l'observation de la variation temporelle du niveau moyen absolu de la mer, par rapport au réseau régional de stations.

Une application majeure de cette méthode a consisté en une expérience de détermination du niveau moyen absolu de la Méditerranée ainsi que de ses variations saisonnière et interannuelle. La surveillance du niveau moyen des mers est certes une application naturelle de l'altimétrie, mais la qualité extrême qu'elle exige des mesures s'est avérée hors d'atteinte des systèmes altimétriques lancés avant T/P. Cette application relève pratiquement de l'altimétrie absolue et requiert des mesures d'une précision nettement sub-décimétrique, d'une

reproductivité exceptionnelle et dépourvues de toute dérive artificielle. Après trois ans d'exploitation en orbite, T/P a prouvé qu'il répondait à ces critères. L'analyse des premiers mois de données altimétriques (de septembre 1992 à fin 1993) révèle déjà toute la potentialité de ce système. L'étude que nous avons menée en mer Méditerranée a permis d'établir, à partir du calcul géométrique des arcs courts d'orbite, une carte très exacte de la surface moyenne de la mer, qui est très proche du géoïde (Figure 2). La précision du niveau moyen est estimée à mieux que 1 cm, permettant de calculer les variations temporelles du niveau instantané par rapport au niveau moyen (Figure 3). C'est la première observation spatiale des variations du niveau de la mer dans cette région à ce niveau de précision (Bonfond, 1994). Si les variations séculaires ne peuvent être mises en évidence sur une si courte période, l'analyse des variations saisonnières et intra-saisonnières du niveau moyen permet de vérifier la cohérence des mesures. Ces variations ont une amplitude pic à pic d'environ 20 cm, avec un maximum et un minimum respectivement en automne et en hiver : ce phénomène est dû pour une large part à l'expansion/contraction thermique de l'eau (effet stérique) sous l'effet de variations de température.

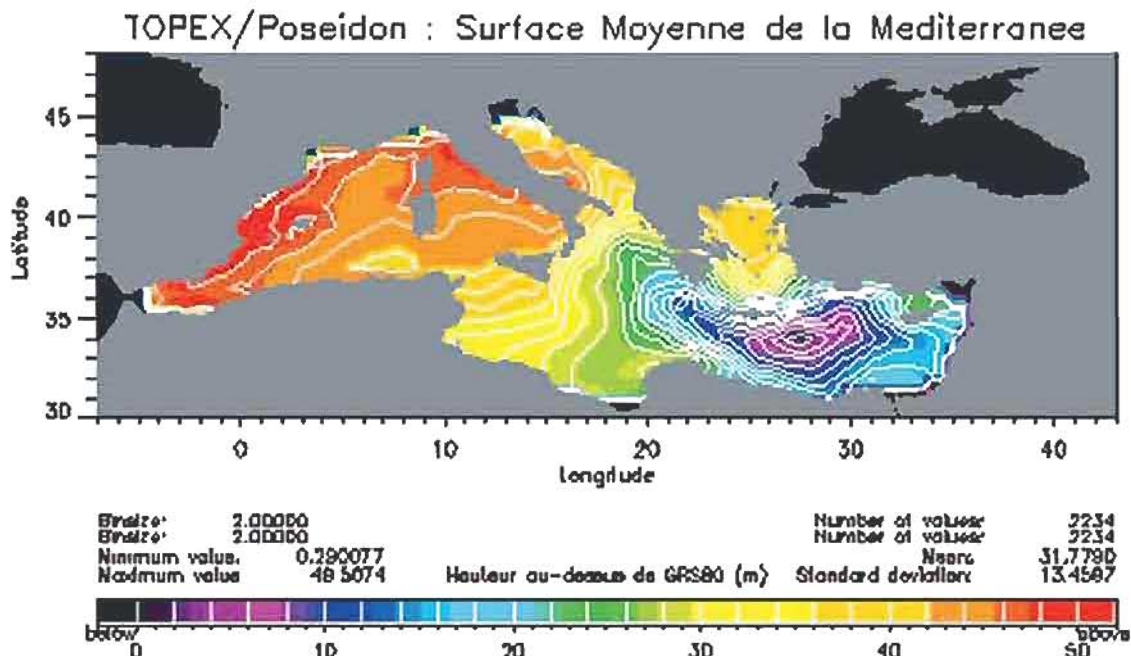


Fig. 2 Surface Moyenne de la Méditerranée référencée à l'ellipsoïde GRS80. Les hauteurs moyennes de la mer au-dessus de l'ellipsoïde sont en mètres. Cette surface a été obtenue à partir des données altimétriques des six premiers mois de la mission de TOPEX/Poseidon (Septembre 1992 à Mars 1993).



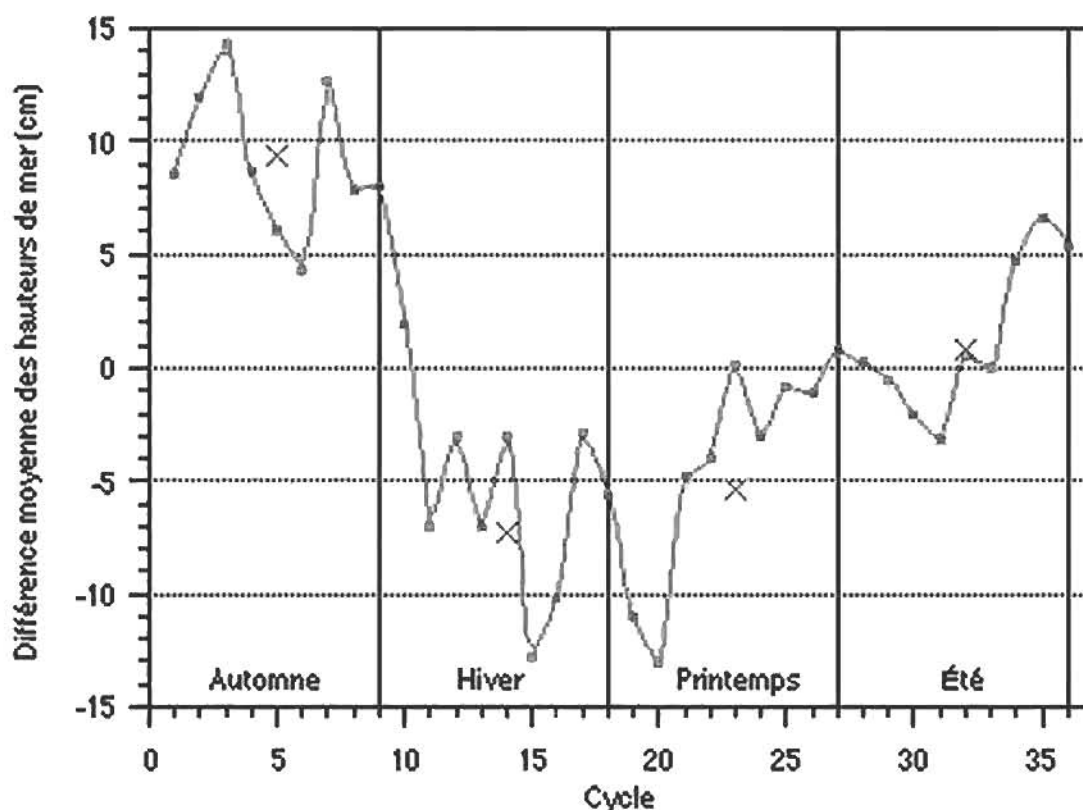


Fig. 3 Différences moyennes par cycle (cercles) des hauteurs de mer issues des profils instantanés de TOPEX/Poseidon par rapport à la surface moyenne annuelle (1-36). Les croix représentent la moyenne des différences de hauteur de mer aux points de croisement des profils moyens issus des surfaces saisonnières par rapport à ceux issus de la surface annuelle (1-36).

Enfin, et dans le but d'augmenter la résolution spatiale des données fournies par T/P, nous avons pu adjoindre à notre analyse les données altimétriques du satellite européen ERS1, lancé en 1991, dont la période de répétitivité est de 35 jours. La grille formée par les profils moyens de T/P a été utilisée pour contraindre les profils moyens issus des données altimétriques du satellite ERS1 en utilisant une technique de points de croisements. Du fait d'une plus grande erreur radiale pour l'orbite initiale du satellite ERS1 (20 cm à comparer à moins de 5 cm pour T/P), la diminution de la dispersion des différences aux points de croisement est très importante : de 26 cm à 6 cm. La résolution de la surface ainsi obtenue est donc

considérablement augmentée (75 km d'intertrace pour ERS1 vs 250 km pour T/P, voir Figure 4), sans altérer la précision globale du positionnement des profils moyens la constituant. Cette augmentation de résolution permet notamment de mettre en évidence certaines structures de la topographie sous-marine (Figure 5). D'autre part, l'analyse conjointe des mesures de TOPEX/Poseidon et ERS1 a permis de déterminer la circulation en Méditerranée avec une précision et une résolution spatiale très importante (Larnicol et al. 1995). Ces travaux, réalisés à CLS/Argos Toulouse, ont permis de cartographier la circulation générale et ses variations saisonnières, tout en mettant aussi en évidence des effets locaux (e.g., le tourbillon de Ierapetra au sud-est de la Crète).

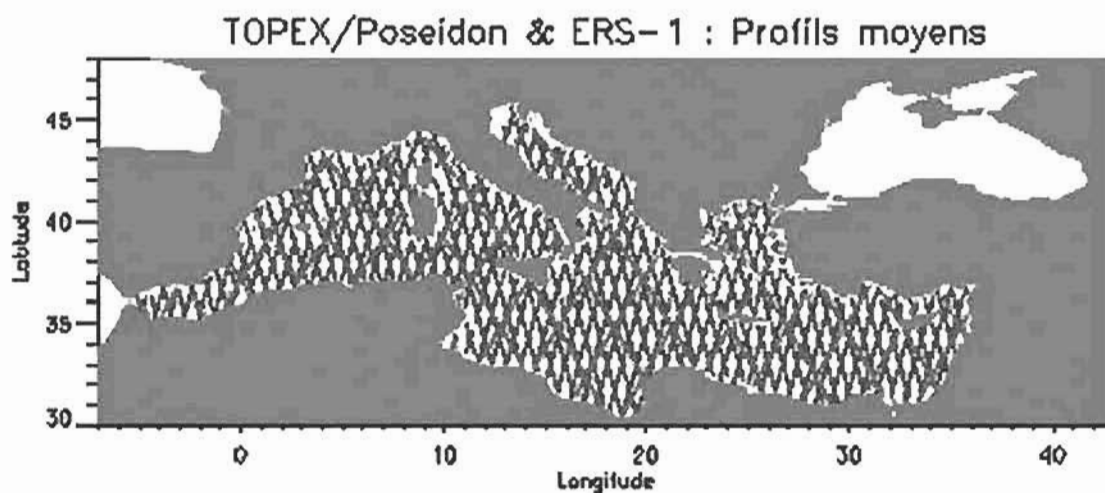


Fig. 4 Profils altimétriques de TOPEX/Poseidon (en rouge) d'ERS-1 (en bleu) en Méditerranée.

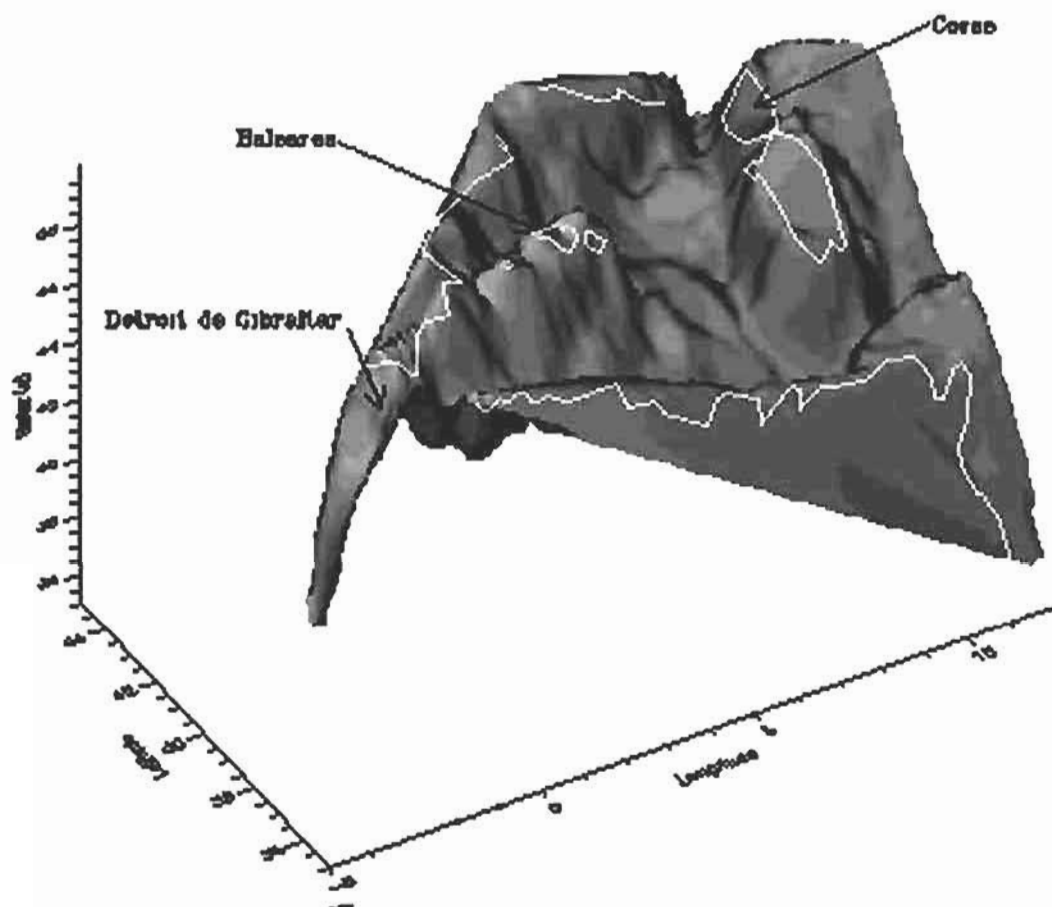


Fig. 5 Surface moyenne de la mer dans le bassin ouest de la Méditerranée obtenue à partir des données altimétriques de TOPEX/Poseidon et ERS1 (référéncée au GRSS0).  
Surface ombrée dont la source lumineuse est située en haut à gauche.

#### 4. Conclusion

L'amplitude faible des phénomènes océanographiques ( $\pm 10$  cm) et la signature complexe des phénomènes géophysiques (courtes longueurs d'onde du géoïde) rencontrées en Méditerranée peuvent être observées plus finement qu'ailleurs grâce à la topographie précise de sa surface. Il en résulte que la Méditerranée est une zone d'étude privilégiée pour la géodésie spatiale, compte tenu, au surplus, de l'ensemble des techniques modernes qui y sont affectées. Notamment, elle constitue un test idéal des nouveaux projets d'altimétrie spatiale, comme TOPEX/Poseidon et ERS1, pour la calibration et la validation de leurs données. Dans le but de déterminer la variation temporelle du niveau moyen absolu de la mer par les données de T/P, nous avons développé une méthode de calcul d'orbite locale, à caractère géométrique, qui permet d'obtenir une exactitude centimétrique sur la position du satellite. L'analyse a permis pour la première fois d'observer des amplitudes fortes du niveau moyen, de l'ordre de 20 cm, avec une période caractéristique d'un an. De plus, la combinaison des données d'ERS1 et de T/P a permis d'observer aussi, pour la première fois par altimétrie, les principales caractéristiques de la circulation en Méditerranée et notamment les variations saisonnières.

Sur une échelle de temps plus grande, certainement avec l'apport des quatrième et même cinquième années de données de T/P, des données d'ERS1 et ERS2 (lancé en 1995) et aussi des données des missions à venir, l'altimétrie en Méditerranée permettra d'avoir accès à la variation à plus long terme du niveau moyen absolu, avec une précision millimétrique.

#### Références

- Arabelos D. and C.C. Tscherning (1988) Gravity field mapping from satellite altimetry, sea-gravimetry and bathymetry in the Eastern Mediterranean, *Geophys. J.*, 92, 195-206
- Baker, T. et al. (1993) Sea Level Fluctuations: Geophysical Interpretation and Environmental Impact (SELF), *Report of the Commission's Programme on Climatology and Natural Hazards*, Ed. by S. Zerbini, Depart. Physics, Univ. Bologna, Italy
- Barlier, F. et al. (1982) The geoid of the Mediterranean sea deduced from Seasat data, *AIG, 2nd Int. Symp. on the Geoid in Europe and in the Mediterranean Sea*, Rome, Italy, pp. 14-35.
- Barriot, J.P. and N. Vales (1988) Détermination Itérative des Géoïdes Altimétriques, *Bull. Géod.*, 62, 17-40.
- Bernard, J. et al. (1983) First Seasat altimeter data analysis on the western Mediterranean sea, *J. Geophys. Res.*, 88(C3) 1581-1588.
- Bonnefond, P. (1994) 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.
- Bonnefond, P. et al. (1995) Satellite Altimetry From a Short-Arc Orbit Technique : Application to the Mediterranean, *J. Geophys. Res.*, 100(C12), 25365-25382.
- Cruz, J.Y. and R.H. Rapp (1982) Sea surface heights in the Mediterranean area from SEASAT altimeter data, *AIG, 2nd Int. Symp. on the Geoid in Europe and in the Mediterranean Sea*, Rome, Italy, pp. 152-156.
- Exertier, P. (1983) Comparaison des Géoïdes Gravimétrique et Altimétrique en Méditerranée. Rapport de stage de DEA, Université de Nice.
- Exertier, P. et al. (1987) L'Altimétrie Seasat en Méditerranée, *Oceanol. Acta*, 14, 73-78.
- Exertier, P. (1993) Geopotential from Space Techniques, *Celest. Mechanics*, 57, 137-153.
- Fu, L.L. et al. (1994) TOPEX/POSEIDON mission overview, *J. Geophys. Res.*, 99(C12), 24369-24381.
- Fu, L.-L., and R.E. Cheney (1995) Application of satellite altimetry to ocean circulation studies : 1987-1994, U.S. national report to international union of geodesy and geophysics, *Reviews of Geophysics*, supplement, 213-223.
- Genthon, P. and M. Souriau (1987) New Constraints on Aegean subduction from Seasat altimetry, *J. Geophys. Res.*, 92(B1), 619-632.
- Haines, B.J., G.H. Born and C.J. Koblinsky (1994) Application of the GEM-T2 gravity field to altimetric satellite orbit computation, *J. Geophys. Res.*, 99(C8), 16237-16254.
- Houry, S. and P. Mazzega (1991) Large Inversions of Altimeter and Tied Tide Gauge Data for the Mediterranean mean surface, *J. Geophys. Res.*, 96(B2), 2417-2429.
- Larnicol, G., P.Y. Le Traon, N. Ayoub, and P. DeMey (1995) Mean sea level and surface circulation variability of the Mediterranean Sea from 2 years of TOPEX/Poseidon altimetry, *J. Geophys. Res.*
- Mazzega, P. and S. Houry (1989) An experiment to invert Seasat altimetry for the Mediterranean and Black Sea mean surfaces, *Geophys. J.*, 96, 259-272.

- Ménard, Y., E. Jeansou, and P. Vincent (1994) Calibration of the TOPEX/Poseidon altimeters at Lampedusa : Additional results at Harvest, *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 24487-24504.
- Minster, J-F., C. Brossier, and P. Rogel (1995) Variation of the mean sea level from TOPEX/Poseidon data, *J. Geophys. Res.*, in press
- Nerem, R.S. et al. (1993) Expected orbit determination performance for the TOPEX/Poseidon mission, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 31 (2), 333-354.
- Nouël, F., et al. (1994) Precise Centre National d'Études Spatiales orbits for TOPEX/Poseidon : Is reaching 2 cm still a challenge?, *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 24405-24419.
- Rapp, R.H. (1986) Gravity Anomalies and Sea Surface Heights Derived from a Combined GEOS 3/Seasat Altimeter Data Set, *J. Geophys. Res.*, 91 (B5), 4867-4876.
- Tapley, B.D. et al. (1994) Precision Orbit Determination for TOPEX/Poseidon, *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 24383-24404.
- Torge, W. et al. (1982) Computation of a high resolution european gravimetric geoid, *AIG, 2nd Int. Symp. on the Geoid in Europe and in the Mediterranean Sea*, Rome, Italy, pp. 437-460.
- Vincent, P., and P. Canceill (1993) Oceanic tides in the Mediterranean Sea, *Int. Geoid Serv. Bull.*, 2, D.I.I.A.R., Polytechnico di Milano, Italy, pp. 84-90.
- Yunck, T.P. et al. (1994) First Assessment of GPS-based Reduced Dynamic Orbit Determination on TOPEX/Poseidon, *Geophys. Res. Lett.*, 21(7), 541-544.
-

## Détermination du Niveau Moyen de la Mer au Niveau du Port d'Alger à partir des Données Marégraphiques

M. Haddad

Institut National de Cartographie et de Télédétection  
123, Rue de Tripoli, BP 430, Hussein-Dey 16040 - Alger.  
Fax : (021) 23 43 81 & (021) 47 00 29

**Résumé :** La présente étude s'inscrit dans le cadre de définition d'une référence altimétrique nationale, et s'intègre naturellement dans tous les programmes de détermination du niveau moyen de la mer. Quel que soit son principe de mesure, un marégraphe est susceptible de fournir à tout instant une information locale de hauteur de la surface de la mer par rapport à une référence choisie de façon arbitraire.

Les principaux points de cet article ciblent l'étalonnage des données du marégraphe électronique d'Alger, la comparaison de ces données par rapport aux données issues du marégraphe analogique installé sur le même site, et la détermination préliminaire d'un niveau moyen de la mer par l'analyse harmonique.

**Mots clés :** marégraphe électronique, marégraphe analogique, étalonnage, niveau moyen, référence altimétrique.

**Abstract:** The present survey comes within the scope in the scope the definition of a national altimetric reference, and integrate naturally in all programs of determination of the mean level of the sea. Whatever is its measure principle, a tide gauge is susceptible to provide a local information of height of the surface of the sea at all times in relation to a reference chosen in an arbitrary way.

The main points of this article target the gauging of the data of the electronic tide gauge of Algiers, the comparison of these data in relation to the data resulted from the analogical tide gauge installed on the same site, and the preliminary determination of a mean level of the sea by the harmonic analysis.

**Key words :** electronic tide gauge, analogical tide gauge, gauging, mean level of sea, altimetric reference.

### 1. Introduction

Parmi tous les moyens d'observation de l'océan, la mesure marégraphique est l'une des techniques

majeures de l'océanographie. Les applications scientifiques liées à la mesure marégraphique couvrent largement le spectre temporel et spatial des variations de la surface océanique : établissement des annuaires des marées, estimation de l'élévation globale du niveau des mers, études de la circulation océanique, validation des résultats de l'altimétrie radar satellitaire, etc.

L'Institut National de Cartographie et de Télédétection a inscrit, dans le cadre de la détermination d'un nouveau référentiel altimétrique national en remplacement de la référence actuelle qui se trouvant en Tunisie, un projet visant l'installation de nouveaux marégraphes à acquisition automatique le long de la côte.

Au port d'Alger, le marégraphe à acquisition automatique (électronique) installé en mai 2003 n'a commencé à produire des données exploitables qu'après son ré-installation (fixation du puit marégraphique) en mai 2004, soit une année après.

Un autre marégraphe électronique a été installé en mars 2005 à Jijel situé à 350 km à l'Est d'Alger. Comme ce fut le cas à Alger, l'équipement est complété avec un marégraphe analogique dans le but de confronter les observations issues des deux sources.

Dans cet article, sera abordé essentiellement l'analyse des données issues des marégraphes analogiques et électroniques d'Alger (fig. 1).

### 2. Description du marégraphe électronique

Le marégraphe à acquisition automatique installé près du marégraphe à enregistrement analogique au niveau du port d'Alger est un prototype conçu par le Dr. Michel Van Ruymbeke de l'Observatoire Royal de Belgique (ORB). Cet instrument enregistre toutes les minutes le niveau de la mer sous forme de fréquence engendrée par le capteur.

Les différentes composantes de cet appareil sont un capteur capacitif à base d'une capsule anéroïde, un module d'enregistrement électronique (nDAS), une alimentation électrique et un flotteur.



Fig. 1 Site marégraphique d'Alger abritant les deux marégraphes électronique et analogique.

### 3. Données marégraphiques

Les données du marégraphe électronique utilisées dans cette étude sont celles collectées dans la période du 01/04/04 à 0h TU au 31/12/04 à 23h TU (après la ré-installation du marégraphe), avec un échantillonnage d'une minute.

L'étalonnage de ces données s'exprimant en fréquence (Hz) est effectué en les ajustant aux mesures du niveau de la mer prises par une sonde lumineuse.

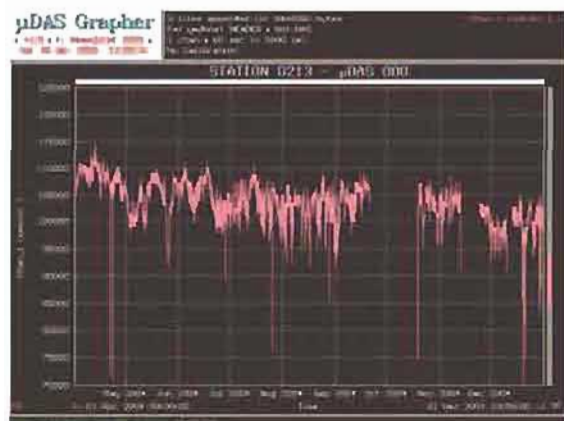


Fig. 2 Enregistrements bruts du marégraphe électronique d'Alger (Période : Avril-Décembre 2004).

### 4. Etalonnage des données du marégraphe électronique

L'expression du modèle utilisée pour le calcul des paramètres d'étalonnage s'exprime sous une forme linéaire comme suit :

$$h = a_0 + a_1 f$$

Où  $a_0$  et  $a_1$  sont les paramètres d'étalonnage,  $f$  la fréquence enregistrée et  $h$  la hauteur de la mer observée par rapport à la référence du zéro hydrographique, déduite des lectures effectuées par la sonde lumineuse.

Le niveau de la mer par rapport au Zéro Hydrographique (figure 2.) se calcule selon l'une des équations suivantes :

$$N_1 + N_3 - \text{Lecture de la sonde intérieure}$$

$$N_2 + N_3 - \text{Lecture de la sonde extérieure}$$

Où  $N_1$  représente l'altitude du sommet du puit du marégraphe par rapport au Niveau Général Algérien (NGA),  $N_2$  est l'altitude de la plate-forme du marégraphe par rapport au NGA et  $N_3$  est l'altitude du Zéro du NGA par rapport à l'altitude du Zéro Hydrographique et qui est fixé à 34 cm.

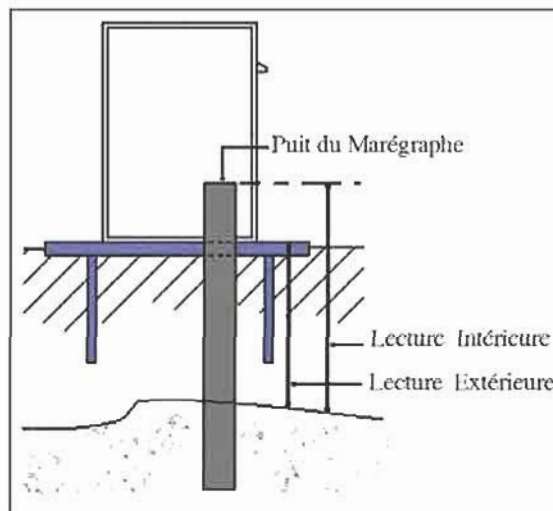


Fig. 3 Principe d'étalonnage des données marégraphiques.

Les paramètres d'étalonnage ont été déterminés à partir des lectures de la sonde lumineuse effectuées le long de la période d'étude :

**Tableau 1.** Facteurs d'étalonnage du marégraphe électronique.

Mois	$a_0$ (cm)	$a_1$
Avril	542.653	-4.671 E-003
Mai	470.012	-4.115 E-003
Juin	386.158	-3.348 E-003
Juillet	84.644	-4.639 E-004
Août	-62.462	1.063 E-003
Septembre	200.322	-1.498 E-003
Octobre	296.410	-2.343 E-003
Novembre	235.479	-1.827 E-003
Décembre	202.371	-1.578 E-003

**5. Vérification par rapport aux données du marégraphe analogique**

Une comparaison externe a été effectuée entre les données du marégraphe électronique sur toute la durée d'observation (avril-décembre 2004) et celles issues du marégraphe analogique à acquisition horaire installé sur le même site.

Pour mener cette opération, un filtrage des données du marégraphe électronique a été appliqué avec une cadence de 60 données (équivalent d'une heure d'observations) avec le logiciel d'édition des données  $\mu$ DAS Grapher (ORB) :



**Fig. 4** Ecart (en vert) entre les données du marégraphe électronique étalonnées (en rouge) et celles du marégraphe analogique (en jaune).

Les résultats statistiques de cette comparaison sont énumérés dans le tableau suivant :

**Tableau 2.** Comparaison entre les données issues du marégraphe électronique et du marégraphe analogique.

Marégraphe	Valeur min. (cm)	Valeur max. (cm)	Moy. (cm)	Ecart-type (cm)
Electronique	8	69	41.996	8.692
Analogique	18	68	41.842	9.374
Différence	-21	36	0.1534	8.664

**6. L'analyse harmonique**

La marée peut être considérée comme la superposition d'une série de fonctions périodiques et d'une fonction aléatoire appelée surcotes-décotes ( $SD$ ). La notation habituelle est la suivante :

$$h(t) = Z_0 + \sum_i A_i \cos(V_i - G_i) + SD$$

Dans cette expression,  $Z_0$  est le niveau moyen,  $A_i$  l'amplitude,  $V_i$  l'argument du cosinus dans le développement harmonique du potentiel générateur de la marée, et  $G_i$  la « situation » de la composante  $i$ . La situation d'une composante harmonique de la marée représente son retard exprimé en angle, par rapport à la composante correspondante du potentiel. Pour obtenir son retard exprimé en temps, il suffit de la diviser par la vitesse angulaire  $dV_i/dt$  Où  $Z_0$ ,  $A_i$  et  $G_i$  sont les constantes harmoniques en un lieu donné.

Seul  $V_i$  dépend du temps et s'exprime à l'aide des éléments astronomiques suivants :

**Tableau 6.** Eléments astronomiques

Paramètre en fonction du temps	Période
Temps lunaire moyen $\tau = 15t + h - s$	24.8412 h
Longitude moyenne de la Lune $s = 218.3165 + 481267.880 \cdot 4 \cdot T - 0.0016 \cdot T^2$	27.3216 jours
Longitude moyenne du Soleil $h = 280.4661 + 36000.7698 \cdot T + 0.0003 \cdot T^2$	365.2422 jours
Longitude moyenne du périégée lunaire $p = 83.3535 + 4069.0215 \cdot T - 0.103 \cdot T^2$	8.8475 ans
Longitude moyenne du nœud ascendant $N' = 234.555 + 1934.1363 \cdot T + 0.0021 \cdot T^2$	18.6134 ans
Longitude moyenne du périégée solaire $P' = 282.9384 + 1.7195 \cdot T + 0.0005 \cdot T^2$	209.40 siècles

$T$  est la date comptée en siècles juliens de 36525 jours à partir de J2000 et  $t$  est l'heure exprimée en temps civil local.

## 7. Niveau moyen

La détermination préliminaire du niveau moyen de la mer au niveau du port d'Alger par l'analyse harmonique a été effectuée en utilisant le Pack IOS Tidal du Dr M.G.G. Foreman de l'Institut des Sciences Océaniques - Canada.

Les résultats obtenus à partir des données des marégraphes électronique et analogiques de la période avril-décembre 2004, ont fait ressortir des écarts par rapport à la référence du Zéro Hydrographique actuelle assez proches, 7.49 cm et 8.16 cm, respectivement.

**Tableau 7.** Niveau moyen et décalage par rapport à la référence du Zéro Hydrographique (Avril-Décembre 2004).

Marégraphe	Niveau moyen (cm)	Différence (cm)
Electronique	41.49	7.49
Analogique	42.16	8.16

L'utilisation de la série annuelle 2004 de mesures du marégraphe analogique, nous a permis d'avoir un niveau moyen de 39.89 cm, soit une différence de 5.89 cm par rapport à la référence du Zéro Hydrographique actuelle.

## 8. Conclusion

L'objectif de cette étude était de déterminer le niveau moyen de la mer au niveau du port d'Alger à partir des données marégraphes.

L'étalonnage des données du marégraphe à acquisition automatique, opération d'une grande

importance, a révélé la nécessité de densifier les mesures du niveau de la mer par l'utilisation de la sonde lumineuse ou de l'échelle de marées. La vérification de la qualité de ces mesures devrait être faite avec soin.

Le niveau moyen préliminaire de la mer déterminé à partir de la série annuelle 2004 de mesures du marégraphe analogique a fait ressortir un décalage de 5.89 cm par rapport à la référence du Zéro Hydrographique actuelle.

L'intégration des données de plus d'un an et l'utilisation de modèle physique tenant compte des corrections astronomiques séculaires nous permettra d'avoir des résultats plus précis.

## Remerciements

L'auteur tient à remercier le Service Hydrographique des Forces Navales, pour avoir mis à sa disposition les données du marégraphe analogique d'Alger.

## Références

- Commission portant sur la détermination de la référence altimétrique et l'installation de marégraphe le long de la côte : *Première partie : Analyse des données issues du marégraphe électronique*, Mai 2004.
- F. Beauducel : *μDAS Grapher Help File*, 2000.
- G. Woppelmann : *rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale* - Thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris.
- M.G.G. Foreman : *Manual for tidal heights - Analysis and prediction*, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay Sidney, B.C.
- Michel Van Ruymbeke, et al. : *Enregistrement par un marégraphe prototype, des variations de niveau de la mer à Alger durant le séisme du 21 mai 2003* - Bulletin des Sciences Géographiques n° 12, Octobre 2003. ISSN-1112-3745.



## Détermination du Niveau Moyen Altimétrique de la Méditerranée Occidentale à partir des Données du Satellite Jason-1

A. Rami, S. Kahlouche

Centre National des Techniques Spatiales, BP 13 Arzew-Oran.

E-mail : ramia@cns.dz , rami\_alidz@yahoo.fr

Fax: (041) 47 36 65.

M. Haddad

Institut National de Cartographie et de Télédétection, BP 430, Hussein-Dey 16400 - Alger

**Résumé :** L'eau est une ressource naturelle très chère et très rare, pour cela il faut trouver des solutions pour la préserver et chercher d'autres moyens voire techniques pour affronter les pénuries d'eau. L'Algérie a adopté une nouvelle politique dans ce domaine cette politique repose sur le dessalement des eaux de mer, cela nécessite la connaissance de la forme de la mer et la compréhension des phénomènes océanographiques et géophysiques.

La forme de la mer peut être déterminée par altimétrie spatiale, la mise en évidence et la compréhension des phénomènes océanographiques et géophysiques qui en découlent représentent aujourd'hui un défi dont la compréhension nécessite la programmation de nombreuses missions successives.

La mission spatiale Jason-1 est prévue pour répondre à ces attentes. L'analyse et le traitement des mesures altimétriques du satellite Jason-1 requiert la recherche d'une très grande exactitude dans la détermination des différents paramètres permettant d'accéder au calcul de la hauteur de la mer au-dessus d'un ellipsoïde de référence.

Dans cet article, nous expliquerons comment les données altimétriques Jason-1 ont été exploitées pour aboutir au calcul d'un géoïde altimétrique précis sur le bassin Méditerranéen. Le modèle de calcul adapté tient en considération les corrections de propagation et les corrections géophysiques.

**Mots clés :** Altimétrie spatiale, Géoïde, Jason-1, niveau moyen altimétrique, ellipsoïde.

**Abstract :** Water is an expensive and yet a rare natural resource, for this it would be better to find solutions to preserve it and overcome shortages. Algeria is adopting a new policy in this field which is based on extracting salt from sea water; this can be

only achieved through the knowledge of the sea properties and the comprehension of the oceanographic and geophysics phenomena.

The sea properties can be determined using space altimetry, the knowledge and the comprehension of the oceanographic and geophysics phenomena which result present nowadays a challenge which comprehension necessitates the planning of successive missions.

The satellite space mission Jason-1 requests the search of a large precision of different parameters allowing access to the determination of the sea height over the ellipsoid reference.

In this article, we explain how altimetric data from Jason-1 can be exploited to achieve a precise altimetric geoid on the Mediterranean basin.

The adopted model takes into account the propagation and the geophysics corrections.

### 1. Introduction

Le dessalement des eaux de mer nécessite la connaissance de la forme de la mer et la compréhension des phénomènes océanographiques et géophysiques.

Le présent article propose une méthodologie de traitement des données altimétriques du satellite Jason-1 dans le souci de déterminer un géoïde altimétrique en Méditerranée Occidentale.

### 2. La mission JASON-1

JASON-1, qui pèse 500kg, a été lancé le 7 décembre 2001 par une fusée Delta II, depuis la base de Vandenberg, en Californie (États-Unis), basé sur la plateforme Proteus, le satellite JASON-1 embarque cinq instruments (un altimètre, un radiomètre, et trois systèmes de localisations). Il a été lancé à 1300 km de la surface, sur une orbite répétitive à 10 jours.

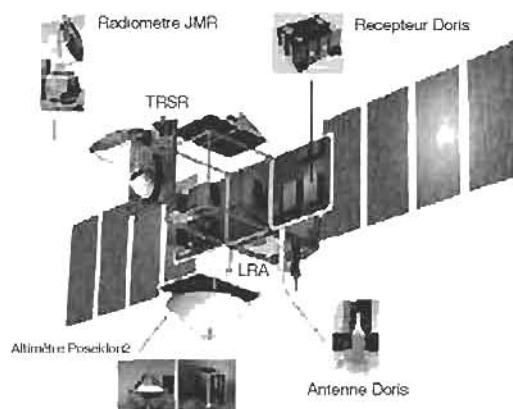


Fig. 1 Le satellite JASON-1

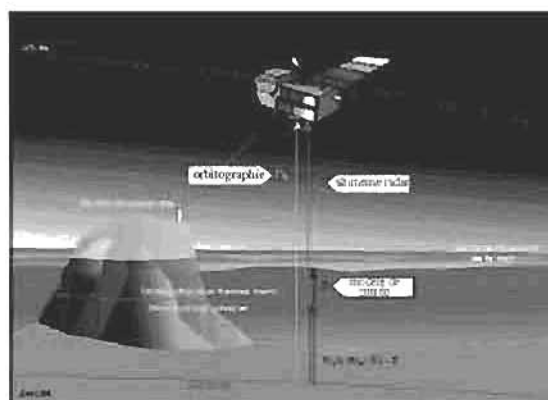


Fig. 2 Principe Géométrique satellite JASON-1

Caractéristiques principales	
Demi-grand axe	7 714.4278 km
Excentricité	0.000095
Inclinaison	66.039°
Données auxiliaires	
Altitude	1 336 km
Répétitivité	9.9156 jours
Nombre de passages	254
Vitesse orbitale	7.2 km/s

### 3. Principe de l'altimétrie

Le radar envoie des impulsions rectangulaires à une fréquence élevée. L'impulsion retour est reçue dans une fenêtre d'écoute proportionnée par une boucle de poursuite grâce aux mesures antérieures.

Comme chaque impulsion est trop bruitée, on n'analyse que la moyenne de 10 impulsions par seconde.

Le principe de la mesure repose sur le temps de retour de ces impulsions, et le rayon de la tache de réflexion au niveau de la surface de la mer.

JASON-1 effectue les mesures dans les bandes Ku et C.

### 4. Biais d'erreurs

Le niveau des mers n'est obtenu qu'après correction des mesures altimétriques des erreurs instrumentales, de propagation (Ionosphérique et Troposphérique) et géophysiques (marée, baromètre inverse...)

#### 4.1 Erreurs Instrumentales

Les erreurs d'origines instrumentales sont dues essentiellement aux effets liés à la géométrie du satellite, aux erreurs d'orbite du satellite et au délai de transmission dans les circuits électroniques.

L'effet de l'erreur orbitale est directement visible au niveau des recouvrements entre traces de mesures ascendantes et descendantes (points de croisement). Il est à noter que les données altimétriques Jason-1 fournies par « GDR-M science data record » sont corrigées de toutes erreurs instrumentales, sauf de l'effet du déplacement du centre de gravité qui est une conséquence du mouvement solaire (Aviso, 2001).

#### 4.2 Erreurs de propagation

Les mesures d'altimétrie radar nécessitent de tenir compte avec soin des effets atmosphériques, qu'ils soient dus à la Troposphère (0 à 50 Km d'altitude) ou à l'ionosphère (50 à 1000 Km d'altitude).

La vapeur d'eau absorbe en effet les rayonnements micro-ondes et retarde les impulsions radar. Jason-1 possède donc un radiomètre micro-onde qui effectue des mesures simultanées des concentrations en vapeur d'eau de l'atmosphère. Leur effet peut ainsi être calculé et retranché des données.

De même, les électrons libérés par l'ionisation des gaz de la haute atmosphère, sous l'effet du rayonnement solaire, produisent un retard sur le temps de trajet des micro-ondes.

Ce délai ionosphérique dépend de la fréquence des micro-ondes utilisées. Il peut être corrigé par l'utilisation d'un radar à deux fréquences, ou par un modèle issu de mesures bi-fréquences, grâce au système d'orbitographie Doris.

La correction troposphérique est donnée comme suit (Rummel, 1993) :

Composante sèche :

$$Dry\_Corr = 2.227 \cdot 10^5 (1 + 0.0026 \cos(2\varphi)) P_s$$

Composante humide :

$$Wet\_Corr = 2.227 \cdot 10^5 \left( \frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) E_s$$

Où :  $\varphi$  est la latitude,  $P_s$  est la pression au niveau de la mer en Pascal,  $E_s$  est la pression partielle de la vapeur d'eau et  $T_s$  est la température en °Kelvin.

La correction ionosphérique pour un altimètre bi-fréquence est donnée comme suit (Rummel, 1993) :

$$iono\_Corr = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{40.2 E}{f_1^2} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{40.2 E}{f_2^2}$$

Où:  $E$  représente le contenu total en électron,  $f_1$  et  $f_2$  les fréquences.

### 4.3 Erreurs Géophysiques

#### a. Vitesse du vent

La vitesse du vent est déduite de l'intensité de l'impulsion réfléchiée par la surface de l'océan.

Le vent agit sur les mini-vagues superficielles. Plus le vent est fort et plus l'énergie sera dispersée dans toutes les directions lors de la réflexion, l'écho sera donc plus faible. La mesure de l'énergie de l'écho donne accès à la vitesse du vent (mais pas à sa direction).

Le modèle fonctionnel de calcul de la vitesse du vent est donné par (Stewart, 1985) :

$$U = \sum_{n=0}^4 a_n (\sigma_{ob})^n$$

Où :  $U$  est la vitesse du vent en m/s,  $\sigma_{ob}$  est le coefficient de dispersion biaisé (biased backscatter coefficient) :

$$\sigma_{ob} = \sigma_o + d\sigma \text{ en décibels}$$

Tel que  $\sigma_o$  est le coefficient de dispersion (backscatter coefficient) et  $d\sigma$  est le biais qui est ajouté pour adapter les données Geosat :  $d\sigma = 0.63dB$

Les coefficients polynomiaux  $a_0; a_1; a_2; a_3; a_4$  sont définis d'après le tableau suivant (Aviso, 2001) :

Tableau 1. Coefficients polynomiaux pour le calcul de la vitesse du vent

	$U > 7.30$	$0.01 \leq U \leq 7.30$	$U < 0.0$
$\sigma_o$ limites	$\sigma_o < 10.8$	$10.8 \leq \sigma_o \leq 19.6$	$19.6 < \sigma_o$
$a_0$	51.045307042	317.474299469	0.0
$a_1$	-10.982804379	-73.507895088	0.0
$a_2$	1.895708416	6.411978035	0.0
$a_3$	-0.174827728	-0.248668296	0.0
$a_4$	0.005438225	0.003607894	0.0

#### b. Biais de l'état de la mer

La hauteur des vagues influe sur la forme de l'impulsion réfléchiée vers l'altimètre. Une mer calme avec des petites vagues renvoi une impulsion "concentrée", alors qu'une mer agitée par de hautes vagues retourne un signal plus élargi.

Cet effet dépendant de l'état de la mer appelé «biais de l'état de la mer», peut être estimé en fonction de la fréquence du radar à l'aide de la hauteur significative des vagues et de la vitesse du vent. L'estimation de ce biais dans la bande Ku est donnée comme suit (Rami, 2002) :

$$SSB_{[Ku]} = -SWH_{[Ku]} \left( a_{Ku} + b_{Ku} SWH_{[Ku]} + c_{Ku} U_{[Ku]} + d_{Ku} \left( r \frac{U_{[Ku]}^2}{SWH_{[Ku]}} \right)^{0.5} + e_{Ku} SWH_{[Ku]}^2 + f_{Ku} U_{[Ku]}^2 \right)$$

Pour la bande C : 5.3 GHz

$$SSB_{[C]} = -SWH_{[C]} \left( a_C + b_C SWH_{[C]} + c_C U_{[C]} + d_C \left( r \frac{U_{[C]}^2}{SWH_{[C]}} \right)^{0.5} + e_C SWH_{[C]}^2 + f_C U_{[C]}^2 \right)$$

Tel que :  $SSB$  est le biais de l'état de la mer en mètres (Bande Ku et C),  $SWH$  est la hauteur significative des vagues en mètres (Bande Ku et C).

$U$  est la vitesse du vent en m/s (Bande Ku et C) et  $r$  est proportionnellement constant ( $r = 0.026$ ).  $rU^2$  représente le SWH que la vitesse du vent génère (Aviso, 2001).

$a_{[Ku]}, b_{[Ku]}, c_{[Ku]}, d_{[Ku]}, e_{[Ku]}, f_{[Ku]}$  sont les constantes de calibration pour la bande Ku :

$a_{[C]}, b_{[C]}, c_{[C]}, d_{[C]}, e_{[C]}, f_{[C]}$  sont les constantes de calibration pour la bande C (Aviso, 2001) :

**Tableau 2.** Constantes de calibration des bandes Ku et C

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Ku	0.0029	0.0	0.0038	0.0	0.0	-0.00015
C	0.0038	0.0	0.0038	0.0	0.0	-0.00013

### c. Effet barométrique inverse

La surface de la mer tend à répondre hydrostatiquement aux variations de la pression atmosphérique. Cette correction instantanée est calculée à partir de la pression au niveau de la mer qui est obtenue indirectement via la correction Troposphérique sèche (Aviso, 2001) :

$$P_{atm} = \frac{Dry\_Corr}{\left[ (-2.277) \left( 1 + \left( 0.0026 \cos \left( 2 Lat\_Tra \cdot 1.10 \cdot \pi / 180.0 \right) \right) \right) \right]}$$

Où :  $P_{atm}$  est la pression au niveau de la mer en mbar,  $Dry\_Corr$  est la correction Troposphérique sèche en mm et  $Lat\_Tra$  représente la latitude géodésique.

La correction barométrique inverse est alors :  $Inv\_Bar = -9.948(P_{atm} - 1013.3)$  en mm.

### d. Marée Océanique

Elle représente la réponse de l’océan aux mouvements de la lune, du soleil et des autres planètes. Elle se traduit par un transport des masses d’eau. Cette correction est calculée à partir de modèles globaux de marée : GOT99.2 de l’Université de Texas, USA et le modèle FES 99 de l’Université de Grenoble, France. (Aviso, 2001).

### e. Marée terrestre

La Terre solide répond aux forces de gravitation externes de la même façon que les océans. La Terre répond assez vite et peut être considérée en équilibre avec la marée générée par les forces externes. Alors, la surface est parallèle avec la surface équipotentielle et la hauteur de marée est proportionnelle au potentiel.

La proportionnalité est caractérisée par un coefficient appelé nombre de Love. Cet effet est calculé en utilisant les tables de Cartwright et Taylor (Aviso, 2001).

### f. Marée polaire

L’axe de rotation de la terre oscille autour de sa direction nominale avec une période apparente de 12 à 14 mois. Ceci crée une force centrifuge additionnelle qui déplace la surface. Cet effet est indiscernable des marées.

L’effet de marée polaire est calculé facilement en connaissant la position du pôle (Aviso, 2001) :

$$H\_Pole = -69.435 \sin(2Lat\_Tra) \times$$

$$\left( \begin{aligned} & \left( (x_{pôle} - x_{pôle-avg}) \cos Lon\_Tra \right) \\ & + \left( (y_{pôle} - y_{pôle-avg}) \sin Lon\_Tra \right) \end{aligned} \right)$$

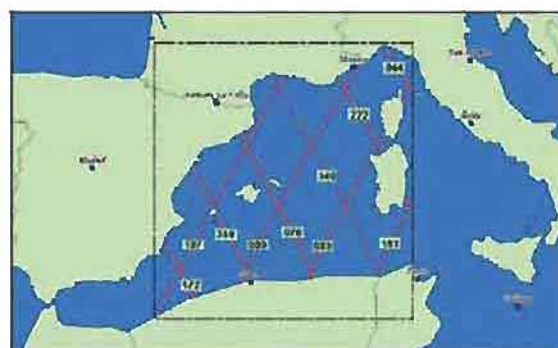
Où :  $H\_Pol$  est la marée polaire en mm, ( $Lon\_Tra$ ,  $Lat\_Tra$ ) sont la longitude et la latitude géodésiques du point de mesure. ( $x_{pôle}$ ,  $y_{pôle}$ ) est la position du pôle.

$x_{pôle\_avg} = 0.042$  arc sec,  $y_{pôle\_avg} = 0.293$  arc sec.

## 5. Traitement des données altimétriques

### 5.1 Données utilisées

Les données utilisées sont celles fournies par Aviso sur CD : « Jason-1 and TOPEX/POSEIDON GDR products », Numéro du volume : « GDR\_JAI\_TP\_a\_015\_1 » (27 Avril – 25 juin 2004). Les cycles Jason-1 sont : 085, 086, 087, 088, 089 et 090.



**Fig. 3** Traces du satellite Jason-1 couvrant la zone de calcul

### 5.2 Correction des écarts aux points de croisement

Le point de croisement est l'intersection de deux arcs : un ascendant et l'autre descendant. A ces points de croisement coïncident donc deux mesures différentes du niveau de la mer. L'écart entre ces deux mesures doit être corrigé et réparti sur l'ensemble des mesures des deux profils.

La méthode utilisée pour la réparation de cet écart sur les profils altimétriques est la méthode d'interpolation polynomiale, dont le principe est le suivant (Haddad, 2004):

Soient  $N$  points de croisement d'un même profil altimétrique  $y_1 = f(x_1), y_2 = f(x_2), \dots, y_N = f(x_N)$  ou les  $y_i$  représentent les corrections à apporter aux points de croisement et les  $x_i$  les longitudes des points de croisement. La correction orbitale pour un point du profil de longitude  $x$  sera alors exprimée par la formule classique de Lagrange comme suit :

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

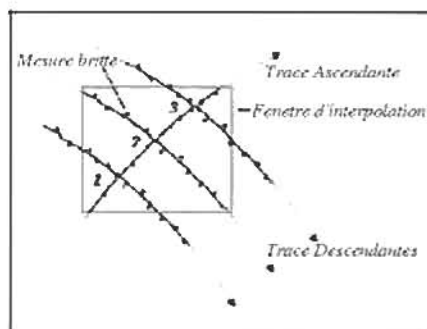


Fig. 4 Points de croisement entre arc ascendant et arcs descendants

### 5.3 Modèle de calcul de la surface altimétrique

La formulation du modèle de calcul des hauteurs ( $H$ ) de la surface altimétrique est donnée comme suit :

$$h = H_p\_Sat - (H\_Alt + \Sigma)$$

Tel que :

$H_p\_Sat$  : Altitude CNES du satellite par rapport à l'ellipsoïde de référence GRSS0 ;

$H\_Alt$  : Altitude du satellite par rapport à la surface de la mer ;

$\Sigma$  : ensemble des corrections à apporter sur la mesure altimétrique

$$\Sigma = CG\_Range\_Corr + Dry\_Corr\_SSB\_corr\_kl + Wet\_Corr + Iono\_Corr\_kl + INV\_Bar + H\_Eot\_FES + H\_Set + H\_Pol$$

Où :

$CG\_Range\_Corr$  : Correction de l'effet de déplacement du centre de gravité ;

$Dry\_Corr$  : Correction Troposphérique sèche

$Wet\_Corr$  : Correction Troposphérique humide ;

$Iono\_Corr$  : Correction Ionosphérique ;

$SSB\_Corr\_kl$  : Biais de l'état de la mer dans la Bande Ku ;

$INV\_Bar$  : Effet barométrique inverse ;

$H\_Eot\_FES$  : Marée océanique calculée d'après le modèle FES 95.2 ;

$H\_Set$  : Marée terrestre ;

$H\_Pol$  : Marée polaire.

### 6. Résultats

Le nappage des profils moyens corrigés de l'erreur d'orbite par une grille régulière de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (en longitude et en latitude) permet d'avoir une surface moyenne.

La méthode utilisée est l'interpolation linéaire (triangulation de DELAUNAY) : qui a été utilisée pour exclure les régions qui n'ont pas été observées par altimétrie.

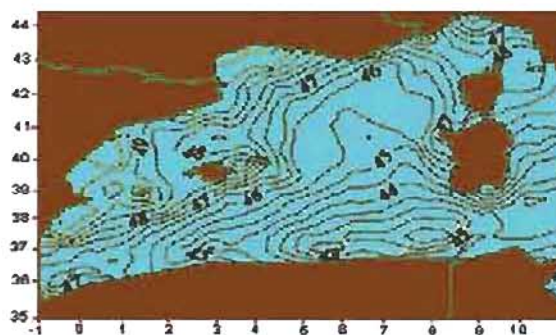


Fig. 4 Surface altimétrique déterminée par Jason-1

### 7. Conclusion

La mission Jason-1 a permis un progrès historique dans l'amélioration de la précision et de l'exactitude tant du point de vue de l'orbitographie que du point de vue de la détermination de la surface topographique de la mer. Dans le domaine de la géodésie spatiale et de ces applications, il s'agit d'un événement majeur.

L'utilisation des données altimétrique de Jason-1 nous a permis de déterminer une surface altimétrique moyenne sur la Méditerranée Occidentale, dont la résolution spatiale entre profils altimétriques est de l'ordre de 119 Km.

Pour l'amélioration de la précision de la solution, on va utiliser d'autres cycles Jason-1.

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le CLS/CNES – France, pour leurs avoir fournis les CD de données : « Jason-1 and TOPEX/POSEIDON GDR products ».

### Références

AVISO and PODAAC User Handbook, 2003. IGDR and GDR Jason Products SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D-21352 (PODAAC)

Bonnefond, P., 1994. 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

Botton, S., 2001. Introduction à la Géodésie. Ecole National des Sciences Géographiques, 2001

Chouteau, M., Géophysique appliquée I – Gravimétrie. Ecole Polytechnique Montréal

Haddad, M., 2004. Détermination du Géoïde par Intégration des Données Gravimétriques et Altimétriques Mémoire de Magistère, Centre National des Techniques Spatiales

Rami, A., 2002. Détermination précise du géoïde marin à partir des données TOPEX/POSEIDON et comparaison avec un géoïde local gravimétrique Mémoire de Magistère, Centre National des Techniques Spatiales

Rummel R., 1993. Satellite altimetry in geodesy and oceanography, Lecture Notes in Earth Sciences, 50, Springer-Verlag, 453-466, 1993.

Stewart Robert H., 1985. Methods of satellite oceanography, University of California Press- ISBN 0-520-04226-3

Numerical Recipes, Cambridge University Press, ISBN 0 521 43719 9.

## Uniformisation des Campagnes GPS Cas d'Etude : Ouest de l'Algérie

H. Taibi, R. Ait Ahmed Lamara, C.B Kadri  
Centre National des Techniques Spatiales / Division de Géodésie  
BP 13, Arzew, 31200, ALGERIE - Fax :041 47 36 65 - E-mail : taibih@cnts.dz,

N. Nabad  
Faculté des Sciences Agronomiques et de Biologie, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef.  
Fax : (213) 027 72 10 65 - e-mail : nabad\_nadir@yahoo.com

**Résumé :** La qualité interne des résultats de nombreuses campagnes GPS effectuées indépendamment les unes des autres à travers le territoire national est liée à la précision des points géodésiques ayant servi comme référence. Le problème majeur qu'on rencontre souvent dans ce type de positionnement réside dans la difficulté de passage du système GPS au système national ou local. Pour garantir une précision satisfaisante et homogène pour des besoins géodésiques, on devra tenir compte non seulement de la qualité des points d'appuis ayant servi de base, mais aussi des paramètres de transformation qui demeurent inconnus pour une partie du territoire national. Pour ce faire, une réflexion d'uniformisation de toutes ces campagnes est proposée et ce, en procédant à leur rattachement et à leur transformation dans le système national. Pour concrétiser cette réflexion, un projet test d'uniformisation des données GPS a été effectué à l'Ouest de l'Algérie sur deux campagnes GPS déjà observées et traitées. L'objectif assigné à ce test, consistera à adopter une méthodologie d'observation, de rattachement et de transformation qui remédiera aux problèmes rencontrés, tels que les distorsions pouvant apparaître lors des rattachements de ces campagnes.

**Mots clés :** GPS, rattachement, transformation, uniformisation.

**Abstract :** Many GPS campaigns are done locally and separately through the national territory. The internal quality of results for every GPS campaign depend essentially to the precision of reference points that served as support to survey new GPS points. The major problem confronted is to relay between these campaigns, considering the lack of parameters transformation between GPS and national system and distortions that can exist within these campaigns. In order to keep an adequate and homogeneous precision for geodetic needs, we must

not only take into account the order and quality of reference points, but also of parameters transformation which are not known yet. For urgent task, a reflection about unification and standardisation between these campaigns is imperative.

In order to concretise this idea, a project test of unification of GPS data has been done in west of Algeria on two different GPS campaigns, observed and treated in the past. The objective assigned, consist to adopt a methodology of observation, of connection to the national network and of transformation in order to remedy the encountered problem such as distortions that can exist in connecting between this different GPS campaigns.

**Key words :** GPS, Transformation parameters, Uniformisation.

### 1. Introduction

La géodésie a pour but principal la détermination de la forme et des dimensions de la terre. Il existe plusieurs techniques de détermination permettant de fournir ces résultats avec une précision qui dépendra de la stratégie d'observations et des traitements utilisée. Chaque technique adopte son propre système de référence géodésique. Le passage d'un système à un autre est réalisé grâce à la connaissance au préalable d'un certain nombre de paramètres permettant le passage entre les différents systèmes. En pratique, ces paramètres sont déterminés par la connaissance d'un jeu de coordonnées de points exprimées dans les deux systèmes, ce qui n'est pas toujours évident.

Le positionnement par satellite occupe une place prépondérante parmi les techniques modernes, telle le système GPS. L'avènement de ce système a donné un grand essor à la géodésie. Les utilisateurs ont su saisir les opportunités qu'offre ce dernier pour les équipements de base, la géodynamique, le génie civil, le cadastre, la navigation ... etc.

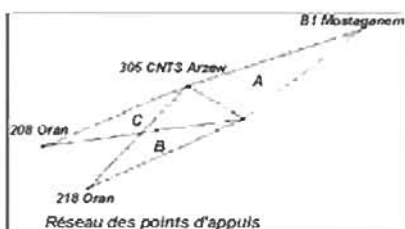
Les différents points géodésiques, servant de référence aux campagnes GPS, ne sont pas tous issus de la même technique de positionnement. En conséquence, les erreurs qui s'accumulent au fil des campagnes qui se succèdent sont dues au choix de l'origine (point de référence) et aux erreurs accidentelles et systématiques. Ainsi, l'hétérogénéité des points de calage (points de référence) est l'une des causes d'un mauvais positionnement. De ce constat, une uniformisation de toutes les campagnes GPS et leur rattachement entre elles s'impose afin d'assurer une précision homogène sur l'ensemble des canevas. Un test a été effectué dans les régions d'Oran, Arzew et Mostaganem, situées à l'ouest du pays. Dans cet article on présentera la méthodologie adoptée, les résultats des différents traitements effectués ainsi qu'une analyse des résultats obtenus. Enfin, une méthodologie d'uniformisation et des recommandations, sont proposées aux différents utilisateurs du système GPS.

## 2. Mise en place du projet d'uniformisation

### 2.1 Analyse de l'archive

La mise en place d'un projet d'uniformisation des données GPS, nécessite la disponibilité et la collecte des fichiers d'observations brutes en format Rinex et les résultats du traitement des campagnes déjà réalisées. Ceci suppose que ces campagnes ont été bien archivées. On procédera ensuite à une analyse et à une vérification générale en prenant en considération les dates de réalisation, les récepteurs utilisés, les stratégies d'observations, les modes d'observations utilisés, le nombre de sessions observées, les points de base choisis, les distances qui séparent ces campagnes, la disponibilité des points de base et les rapports de mission.

### 2.2 Présentation du projet test d'uniformisation



Points d'appuis	Région	Projet à uniformiser	Année de mise en place
305	Arzew	Micro-triangulation	1996
235 B	Mersa El Hadjadj	Micro-triangulation	1996
B1	Mostaganem	Projet routier de Salamandre	2001
218	Oran	Projet cadastral	1995
208	Oran	Projet cadastral	1995

Les points observés pendant la campagne sont :

**305** : situé au CNTS\_ Arzew, stationné en continu pendant toute la campagne.

**235Bis** : situé à Mersa El Hadjadj, stationné en discontinu durant les trois sessions.

**B1**: situé à Mostaganem, stationné durant la session A.

**218** : situé dans la région de Braya (Oran), stationné durant la session B.

**208** : situé dans la région de Meserguine (Oran), stationné durant la session C.

Le point 305 est intégré dans le réseau TYRGEONET et il a été choisi comme référence pour le rattachement des zones à uniformiser. Les zones à rattacher dans le cadre de cette étude sont définies dans le tableau ci dessous.

### 2.3 Planification de la mission

L'utilisation du GPS pour des travaux de grande précision nécessite au préalable une bonne planification des observations. Les principales phases de la mission GPS sont : reconnaissance sur le terrain, modes d'observations et configuration des récepteurs GPS, et déroulement de la campagne d'observations GPS.

Le matériel utilisé lors de cette campagne d'observations GPS est composé de 04 récepteurs GPS de type "Ashtech ZXII3" et les données GPS sont traitées avec le logiciel "WINPRISM 2.0".

### 2.4 Observations et traitements

La phase des observations exige au préalable la reconnaissance sur le terrain pour localiser tous les obstacles pouvant interrompre les signaux émis par les satellites et choisir les sites assez dégagés qui peuvent être des stations de référence.

#### 2.4.1 Stratégie d'observation

Les mesures de phase GPS ont été effectuées en mode statique avec une cadence d'enregistrement de 15 secondes.



Les paramètres météo sont pris par défaut, l'angle d'élevation minimal a été fixé à 15°. Trois (03) sessions d'observations ont été réalisées durant la journée du 08/05/2003 et qui sont fournies dans le tableau suivant :

Session	Triangles observés	Durée	Nombre de Satellites
A	305-235Bis-B1	59 mn	09
B	305-235Bis-218	68 mn	06
C	305-235Bis-208	55 mn	08

Le point 305 a été choisi comme un point de référence afin d'assurer une alimentation continue en électricité. Par contre, l'alimentation du récepteur GPS stationné au point 235bis a nécessité 3 batteries pour les trois sessions d'observations. Le point 235 Bis est situé presque au milieu du réseau de base.

#### 2.4.2 Traitement des données

La mise en place d'un projet d'uniformisation requiert la disponibilité de données des campagnes d'observations bien archivées et des coordonnées de points de base. Ces campagnes nécessitent un traitement GPS bien spécifique relatif au rattachement des points d'appuis. Une fois que le calcul du rattachement est effectué, toutes les campagnes seront retraitées sur la base des nouvelles coordonnées obtenues lors du rattachement.

#### 2.4.3 Choix des paramètres de calcul

Les paramètres utilisés lors du traitement des observations sont les suivants :

- Type d'éphémérides : radiodiffusées.
- Modèle atmosphérique: modèle standard (Hopfield).
- Type de traitement : bifréquence ( Automatique)
- L'écart type a priori est fixé à 10 mm.
- Point d'appui fixé lors du traitement : 305.

Après analyse des résultats, toutes les lignes de base relatives aux trois sessions ont été retenues. Les ambiguïtés sont fixées et les écarts types obtenus sont de l'ordre centimétrique. L'ajustement du réseau a été effectué à l'aide du module *FILLNET* intégré dans le logiciel *WINPRISM*. Ce module permet d'effectuer un ajustement tridimensionnel des réseaux.

Les coordonnées ajustées des points d'appuis (235bis, B1, 218, 208) ont été intégrées dans les jeux de données des anciennes campagnes GPS et un nouveau traitement a été effectué avec le logiciel *WINPRISM* (Process + Ajustement). Le traitement s'est réalisé par campagne et les résultats obtenus ont montré que la précision des nouvelles coordonnées WGS84 est homogène. Ceci nous conduira vers une analyse et une comparaison des nouvelles coordonnées avec celles obtenues antérieurement. Pour une meilleure exploitation des données, il est souhaitable que toutes les campagnes retraitées soient archivées en utilisant la base de données de *WINPRISM* (*SDBM*) ou un autre *SGBD*.

#### 2.4.4 Transformation des coordonnées dans le système local

Toutes les campagnes retraitées ont été utilisées pour transformer leurs coordonnées dans le système local Nord Sahara à l'aide du programme de transformation WGS84NS disponible au niveau de la division de géodésie du CNTS d'Arzew. La méthode de transformation adoptée pour l'uniformisation est basée sur le transfert de la ligne géodésique qui lie chaque point GPS vers le point double initial qui est un point connu dans les deux systèmes (ex : WGS84 et Nord Sahara 1959). Cette transformation n'est valable qu'à l'intérieur d'une zone d'extension limitée de rayon inférieur à 50 km. En revanche, un seul point double suffirait pour transformer les coordonnées planimétriques GPS en coordonnées planimétriques locales et ce en résolvant le problème Inverse et Direct de la ligne géodésique (NABED A.N., GOURINE B., 2000).

### 3. Résultats et analyses

#### 3.1 Résultats de la transformation

Dans ce qui suit, les résultats des transformations obtenus à l'aide du programme WGS84NS sont présentés par campagne :

##### *Région d'Oran (projet cadastral)*

Le tableau suivant illustre les différences en coordonnées géographiques GPS obtenues lors des campagnes (2003-1995) :

N° Point	$\Delta\lambda$ (m)	$\Delta\phi$ (m)	$\Delta he$ (m)
217	1.38	-1.85	-1.76
213	1.08	-1.79	-1.76
219	1.11	-1.85	-1.75
208	1.29	-2.01	-1.91
541	1.04	-1.92	-1.93
557	1.29	-2.02	-1.90
218	1.31	-2.04	-1.93
555	1.40	-2.05	-2.01
549	1.04	-1.58	-1.82

La précision moyenne de la transformation des nouvelles coordonnées dans le système local est de :

$$\Delta X_{\text{moy.}} = 0.030 \text{ m} \quad \text{et} \quad \Delta Y_{\text{moy.}} = 0.055 \text{ m}$$

*Région de Mostaganem (projet routier) :*

Le tableau ci-dessous illustre les différences en coordonnées GPS obtenues lors des campagnes (2003-2001) :

N° Point	$\Delta\lambda$ (m)	$\Delta\phi$ (m)	$\Delta he$ (m)
B1	0.016	0.17	-0.09
13	0.10	0.17	-0.09
15	0.10	0.17	-0.09
19	0.10	0.16	-0.10
21	-0.08	-0.121	-0.06
22	0.10	0.17	-0.09
30	0.10	0.17	-0.09
35	0.10	0.17	-0.37
39	0.10	0.17	-0.09
42	0.09	0.18	-0.09
47	0.11	0.17	-0.09
B8	-0.06	-0.26	0.20
T1	0.01	0.17	-0.09
500	-0.01	-0.11	0.05

Après la transformation des nouvelles coordonnées dans le système local, la précision moyenne obtenue est de :  $\Delta X_{\text{moy.}} : 0.005\text{m}$  et  $\Delta Y_{\text{moy.}} : 0.005\text{m}$

### 3.2 Analyse des résultats

L'analyse des différents résultats a montré que les coordonnées de chaque région uniformisée ont subi presque le même écart par rapport aux nouvelles coordonnées obtenues après rattachement. Ces écarts sont de même ordre de grandeur pour chaque région. Notons par ailleurs, que le projet réalisé dans la région de Mostaganem qui comporte des points

déterminés par le mode cinématique, les écarts sont moins importants que ceux de la région d'Oran. Ceci est dû essentiellement au choix du point de référence : le projet réalisé dans la région de Mostaganem a comme référence le point 305 (CNTS) qui appartient au réseau TYRGEONET, par contre, le point de référence du projet de la région d'Oran est le point 305 mais connu en anciennes coordonnées (avant le projet TYRGEONET). Les autres points étaient déterminés en absolu. Les écarts obtenus après traitement dans la région de Mostaganem sont de l'ordre centimétrique, alors que dans la région d'Oran sont de l'ordre métrique. Nous pouvons conclure que le choix de la référence joue un rôle essentiel dans la qualité des résultats.

Grâce à l'intégration des nouvelles lignes de base ayant servi au rattachement et au nouveau traitement des données du projet de Mostaganem, la précision des résultats s'est améliorée. En plus de l'intégration des nouvelles lignes de base, il est à noter que ce projet comporte des points observés en mode statique avec une précision meilleure que celle des points observés en mode cinématique. La méthodologie adoptée a permis de consolider ce projet.

Le rattachement des deux zones a permis d'assurer une précision homogène sur l'ensemble des points constituant les deux projets (Oran et Mostaganem). Concernant la transformation des coordonnées dans le système local, nous avons remarqué que les coordonnées obtenues dans la région de Mostaganem, lors de la transformation vers le Nord Sahara (système local) en 2003, sont presque identiques à celles transformées en 2001. Ceci, peut s'expliquer par l'ordre de grandeur des écarts obtenus entre ces coordonnées en WGS84 qui est de l'ordre millimétrique. Ceci est dû essentiellement à la bonne répartition des points d'appuis entourant le projet. Ce qui nous a permis de valider la méthode de transformation (2D) qui ne s'applique que dans une zone de rayon inférieur ou égal à 50 Km. L'étendue de la zone de travail influe sur les résultats de la transformation.

### 4. Recommandations

Les tests effectués ont porté sur l'uniformisation des campagnes GPS réalisées à Mostaganem et à Oran. Les discordances déterminées lors des traitements des observations GPS des deux zones sont dues essentiellement à la qualité des points d'appuis (qualité du système local). Pour une meilleure uniformisation des campagnes GPS effectuées sur

une grande étendue, nous recommandons les points suivants :

- Disponibilité des données et des résultats de traitement des campagnes réalisées antérieurement
- Conversion de tous les fichiers de données dans un format standard.
- Analyse des fichiers (détermination des points fixes (points de liaison), calcul des distances séparant les zones et identification des sessions d'observations).
- Planification de la mission (détermination des facteurs DOP et des fenêtres de visibilité à partir des fichiers Almanach, reconnaissance sur le terrain tenant compte de la matérialisation actuelle des points et de la contrainte des masques, etc., et calcul de la durée d'observation adéquate).
- Evaluation du matériel indispensable et du personnel nécessaire.
- Observation et rattachement des points d'appuis des campagnes GPS avec des points de référence connus, choix d'une stratégie d'observation soit par session avec des cotés homogènes ou par ligne de base).
- Traitement des observations (Intégration de tous les points géodésiques déterminés dans le cadre des projets nationaux et internationaux). Le traitement dépend du type des éphémérides et du mode de combinaison.
- Ajustement des nouvelles coordonnées des points d'appuis.
- Retraitement des campagnes.
- Analyse des résultats avec utilisation de points de contrôle.
- Transformation des coordonnées dans le système local, tenant compte de la configuration des points d'appuis et de leurs précisions dans le système local ainsi que de la qualité du point initial.

Le tableau ci - dessous illustre les différents modes de traitement recommandés par *Ashtech* (*Winprism*).

Mode de traitement	Description
L1	Utilisé pour le traitement des données L1 seulement.
L2	Pour des buts de recherche seulement (non recommandé).
L1C	Généralement utilisé sur très longues base où les ambiguïtés ne peuvent pas être fixées.
L1-L2	Pour la recherche seulement (non recommandé).
L1+L2	Pour la recherche seulement (non recommandé).
L1&L2	Généralement utilisées pour les courtes lignes de base où les perturbations ionosphérique ne changent pas significativement.
L1&L2C	Généralement utilisé pour les lignes de base de longueurs (>10 Km) où l'erreur ionosphérique est significative.
AUTO	Solution AUTOMATIQUE et dépend de la longueur de la ligne de base

## 5. Conclusion

Les travaux d'uniformisation et d'unification des campagnes GPS restent l'un des problèmes majeurs en Algérie. En effet, pour réaliser une telle opération, il faudrait avoir une couverture suffisante en points d'appui couvrant la partie nord du pays pour servir de zones à unifier. Cette méthode est pour le moment difficile à réaliser dans le sud du pays en raison de la faible densité des points de référence et de l'hétérogénéité des techniques de positionnement utilisées. Ce sont les principales causes des décalages et des discordances apparaissant lors d'un quelconque rattachement.

Le système GPS s'avère très rentable et efficace pour les travaux de rattachement et de densification. L'utilisation de cette technique pour des travaux de rattachement des campagnes GPS entre elles devient donc nécessaire mais insuffisante pour l'exploiter dans le système local à cause du manque de paramètres de transformation entre le système local et le système WGS84.

Afin de contourner tous ces inconvénients, les utilisateurs du GPS ont recours à des méthodes de transformation locales. En revanche, ces méthodes restent valables que pour des zones de dimensions réduites.

L'ordre de grandeur de la précision obtenue lors des rattachements des campagnes GPS est de l'ordre millimétrique (région de Mostaganem), cas où les points de référence sont déterminés par des méthodes précises, et métrique dans le cas où la précision des points de référence est faible.

Le mode d'observations GPS (statique, cinématique) influe aussi sur la précision de l'uniformisation. A partir des analyses faites précédemment sur les écarts obtenus entre les différentes campagnes, nous avons remarqué que dans le cas où le mode statique a été utilisé, la précision de l'uniformisation est homogène sur l'ensemble des zones à rattacher. Il est bien entendu que l'étendue de la zone ainsi que la répartition des points d'appui influent aussi sur la qualité de la précision.

### Références

- Chorfa, B., Haddouf B., 2001: *Mise en place d'une méthodologie pour l'étude d'un projet de route par GPS*, Mémoire d'ingénieur, CNTS juillet 2001.
- Clifford J., 2001: *Grid and datums. Democratic and popular Republic of Algeria*.
- E. Groten, R. Straib, 1988 : *GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying*.

- El-Kedrouci Kamel, Seddiki Yacine, 2002: *Guide GPS pour l'établissement des réseaux géodésiques*, mémoire d'ingénieur, CNTS.
- Ghali Manar, Messaoudi Hind : *Rattachement géodésique NORD-SUD à partir des sites Tyrgonnet en vue d'une densification*, mémoire d'ingénieur, CNTS juin 1999
- Leick A., 1990 : *GPS Satellite Surveying*, Wiley, New York.
- Levallois J.J.: *Mesurer la terre, 300 ans de la géodésie française*.
- Milles Serge, Logofun Jean: *Topographie et Topométrie Moderne*.
- Nabed Abdelkader N., Gourine Bachir, 2000: *2D transformation of GPS coordinates into national coordinates using Forward and Inverse problem of geodetic lines*. Communication presented in the Seminar "The Mediterranean Surveyor in the new Millennium", Malta, September 2000, 18-21.
- Nabed Abdelkader Nadir, 1996: *Apport du GPS aux travaux cadastraux*, Thèse de magister en techniques spatiales, CNTS, mai 1996.
- Reyt A.: *Les principales étapes de la géodésie en Afrique du nord et leur incidence cartographique*.
- Zeggai Ali, 1992: *Etablissement d'un logiciel de transformation et de détermination de paramètres de passage entre référentiels*, mémoire d'ingénieur, CNTS juin 1992.

# Gestion du Fond Cartographique, Outils et Perspectives

E.H. Takka

Service Géographique et de Télédétection de l'ANP

**Résumé:** L'information géographique est d'une importance majeure dont la conservation et la gestion sont indispensables pour les besoins de recherche, de consultation et de planification des approvisionnements. L'utilisation des bases de données conventionnelles ont vite montré leurs limites dans la gestion de ce type de documents car elles ne prennent pas en charge les relations spatiales et l'aspect géographique que présente le fond cartographique.

Ce travail contribue dans la proposition des prototypes de logiciel pour une meilleure gestion d'une cartoθήque.

**Mots-clés:** Système d'Information Géographique (S.I.G), Base de données cartoθήque, Web.

**Abstract:** The geographical information is of a major importance of which the conservation and the management are indispensable for the purpose of research, consultation and scheduling of the provisions. The uses of the conventional data bases showed quickly their limits in the management of this type of documents because they don't take in consideration the spatial relations and the geographical aspect that the cartographic collection presents.

This work contributes in the proposition of software prototypes for a better management of a map library.

**Key words :** Geographical information System (GIS), map library data base, Web.

## 1. Introduction

La gestion du fond cartographique au sein des centres de conservation de l'information géographique est d'une grande complexité, due essentiellement à la diversité de sa nature (carte géographique, spatio-carte, image satellite, prises de vues aériennes, etc.), de ses supports de conservation (papier, bande magnétique, CD ROM, etc.) et de ses thèmes de représentations.

Les organismes produisant les informations géographiques en général ou les cartes en particulier,

doivent intégrer au sein de leur système d'information une composante qui s'occupe de la gestion de ce type d'information. La gestion du stock cartographique est différente d'une simple gestion de stock.

Cette différence réside dans la nature de l'information géographique. Une telle gestion doit permettre de répondre aussi bien à de simples requêtes de type « il reste deux cartes pour atteindre le seuil de rupture », de répondre « la ville de Tlemcen se trouve aux coordonnées Long:-1.916° Lat: 34.6835° sur la feuille NI-30-XVII à l'échelle 1/200.000 ».

Une base de données conventionnelle est incapable de répondre à ce type de requête, qui traite à la fois l'aspect descriptif et l'aspect géométrique des informations, d'où l'utilisation impérative des logiciels S.I.G ( système d'information géographique ).

L'objectif de ce travail est de proposer des solutions conceptuelles et méthodologiques pour une gestion rationnelle d'une cartoθήque et son déploiement sur intranet pour une gestion coopérative.

## 2. Méthodologie

La démarche consiste à mettre en place une base de données cartoθήque (B.D.C), dédiée à la gestion des différents types de cartes géographiques, implémentées sous le logiciel S.I.G MapInfo. La base de données est de type relationnelle et conçue selon la méthode MERISE. Après implémentation de la B.D.C, on passe à la conception d'une logique d'interface et de traitement. La dernière étape est la présentation des trois conceptions de l'application (monoposte, client lourd/serveur léger et client léger/serveur lourd).

## 3. La base de données cartoθήque

La gestion du fond cartographique est axée sur la notion de cartogramme. Un cartogramme représente un découpage de la couverture cartographique d'une zone donnée, selon une projection qui est souvent différente de celle de ses feuilles composantes. Ces dernières ont toutes les mêmes échelles et représentent la même thématique. On remarque qu'il existe

une relation de composition entre le cartogramme et les différentes feuilles. Un trou dans un cartogramme est défini comme étant l'absence de la feuille concernée de la cartotheque. Cette notion offre la possibilité de calcul du taux de disponibilité ou taux de couverture. La planification des approvisionnements se fait à partir de ces trous avec la prise en compte de leur situation géographique (zone de compétence, proximité à la frontière, zone de manœuvres, etc.). La base de données prend en charge l'aspect de couverture en intégrant pour chaque feuille les quatre points qui délimitent sa couverture.

L'automatisation du processus de gestion doit aussi prendre en charge les cartes scannées. Les cartes scannées doivent être géo-référencées et stockées dans la base de données de façon à être disponible pour une éventuelle intégration dans les différentes applications SIG. Cette organisation offre la possibilité de la navigation sur les cartes, le passage d'une échelle à une autre, la recherche des sites d'intérêts d'une manière automatique, ce qui permet de faire sortir la cartotheque d'une simple conservation, inerte et statique, en lui donnant un souffle de vivacité et en la rendant plus sollicitée par les opérants de l'information à référence spatiale.

#### 4. GESTIONNAIRE DE LA CARTOTHEQUE ( Map's Database Viewer)

En informatique, une application est composée de plusieurs couches de fonctionnalités différentes, implémentées par des programmeurs et déployées sur différentes machines d'une manière optimale. On distingue trois types de couches d'application :

- *Logique de présentation* : Elle a pour but de définir comment l'utilisateur doit interagir avec l'application ; elle est généralement implémentée à l'aide d'une interface utilisateur graphique simple d'utilisation.
- *Logique applicative* : elle vise à définir les mécanismes de traitements de l'application.
- *Gestion de l'accès aux données* : elle s'intéresse au stockage de données et à leur récupération ; il est primordial que l'intégrité des données soit garantie.

La répartition de ces trois logiques définit le type de l'architecture de l'application. On ne considère que trois approches :

##### a. Application monoposte

L'architecture monoposte stipule que les trois logiques seront implémentées au sein du même poste du travail (fig. 1). Elle impose la copie de la base de données au sein du poste du travail, ce qui donne la possibilité d'une éventuelle perte du contrôle de la confidentialité des données et complique l'aspect de mise à jour.

La logique d'interface est implémentée en langage Visual Basic et la logique du traitement en langage MapBasic, qui est le langage de script du MapInfo. L'installation du Map's Database Viewer doit être accompagnée de son moteur cartographique MapInfo.(fig. 3)

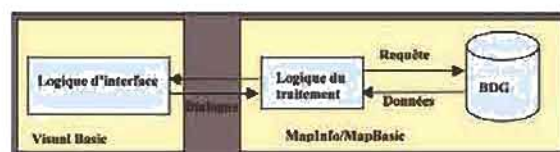


Fig. 1 Architecture monoposte

##### b. Client lourd / Serveur léger

Dans cette architecture, la base de données sera centralisée au niveau du serveur pour faciliter la mise à jour des données, leur intégrité et surtout leur confidentialité. Les logiques du traitement et d'interface sont installées au sein des postes clients (fig. 2). Les postes clients formulent leurs requêtes, qui sont envoyées au serveur. Ce dernier répond par l'envoi d'un ensemble de données demandées. Le poste client est défini comme étant lourd, car il se charge des traitements. Cette solution est lourde et peu flexible, elle exige l'installation au niveau des postes clients l'application accompagnée du logiciel SIG MapInfo.

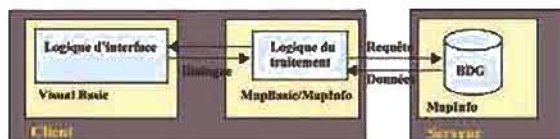


Fig. 2 Architecture Client lourd/Serveur léger

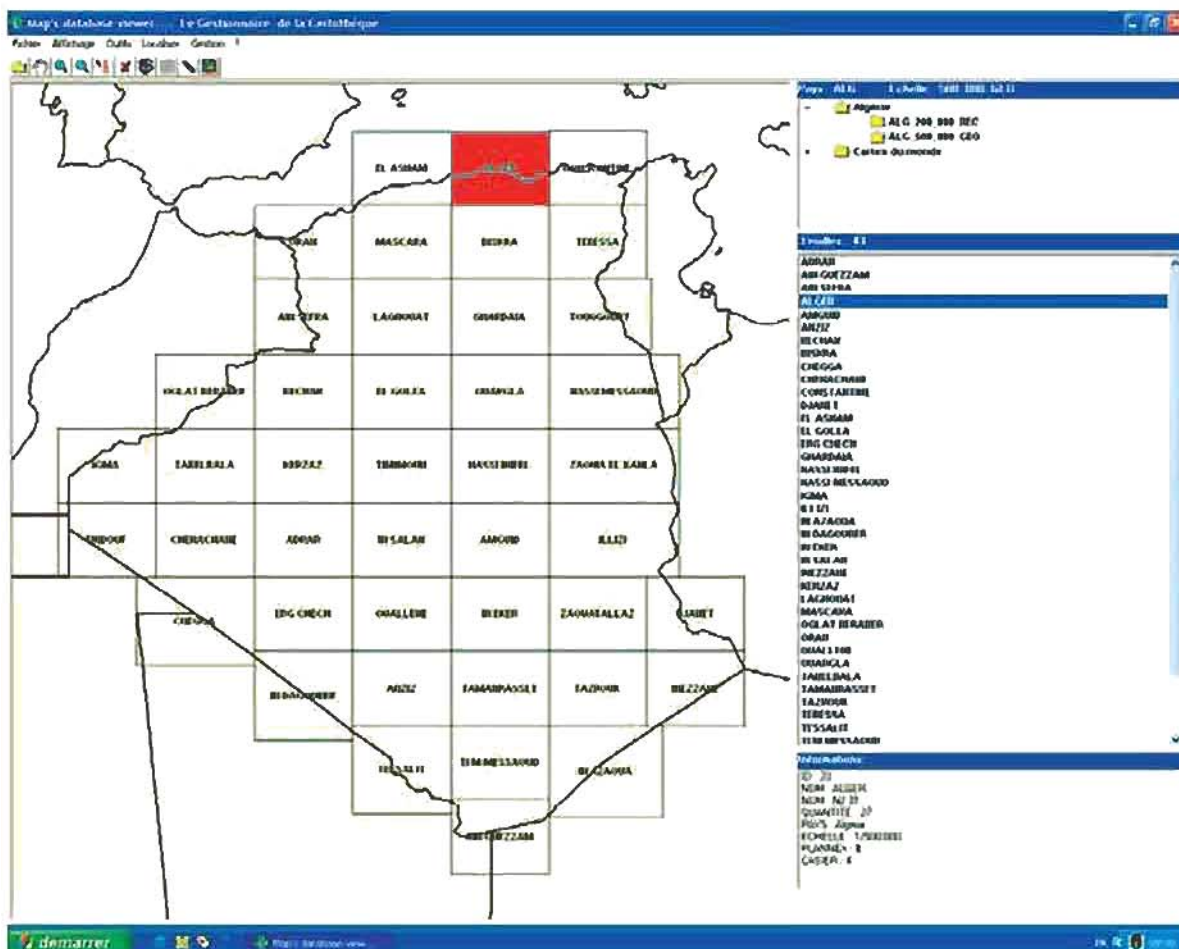


Fig. 3 Copie écran du Map's Database Viewer

### c. Client léger/Serveur lourd

Cette architecture ne nécessite aucune installation car tout est centralisé au niveau du serveur. Elle consiste à déployer « Map's Database Viewer » sous le réseau intranet. C'est une solution web qui offre la possibilité d'accéder à la cartothèque via un navigateur web, le plus courant étant « Internet

Explorer ». Cette conception est de type trois tiers (client, intermédiaire et source de données).

L'implémentation de cette conception nécessite l'installation au niveau du serveur matériel le serveur web « Apache », le serveur spatial « MapServer » et le serveur d'application « PHP/MapScript ». Cette implémentation est basée sur des logiciels gratuits et OpenSource.

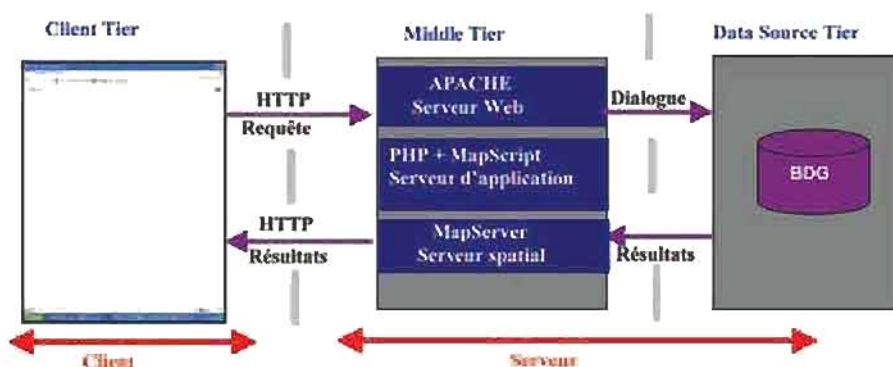


Fig. 4 Principe du fonctionnement de la solution web

Le principe de fonctionnement est simple (fig. 4). Le navigateur web envoie une requête selon le protocole HTTP (Hyper Text Transfert Protocol). La requête arrive au serveur web, et ce dernier exécute l'application PHP/MapScript, en appelant

les fonctionnalités du serveur spatial MapServer pour manipuler les données spatiales en générant le résultat sous la forme d'une image où le serveur web renvoie la réponse au navigateur. (fig.5).

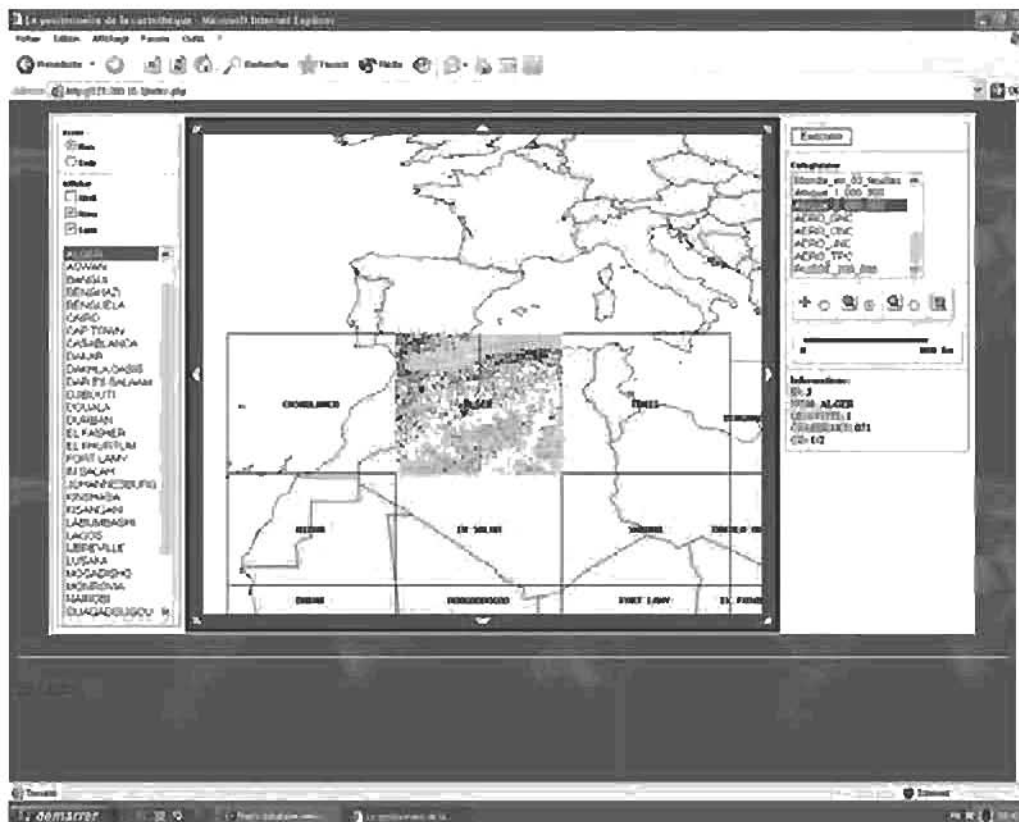


Fig. 5 Copie écran du Map's Database Viewer sous le web

## 5. Conclusion

Dans ce travail, notre contribution a porté sur la proposition de solutions conceptuelles et méthodologiques pour une gestion rationnelle d'une cartothèque. Dans le cadre conceptuel, on a parcouru les trois approches les plus utilisées en l'occurrence le monoposte, le client lourd /serveur léger et le client léger/serveur lourd. Dans le cadre expérimental on a proposé le prototype d'un logiciel gestionnaire de cartothèque baptisé « Map's Data Base Viewer » qui répond aux deux premières approches de la conception. Afin de réadapter ce prototype à la troisième approche, on a proposé son déploiement sur le web. Le déploiement sur intranet a donné des résultats satisfaisants, puisqu'il donne l'accès à un

public plus grand tout en garantissant l'intégrité et la sécurité des données.

Par ailleurs, et afin d'une meilleure exploitation du fond raster dans la localisation des sites d'intérêts, il serait judicieux d'intégrer une base de données toponymique à l'application

## Références

- W. CHOI , A. KENT , LEA, G. PRASAD, C. ULLMAN C. « Maîtrisez PHP 4 » 2001.
- M. MARTIN « Créer son site web » Campus Press, 2001.
- G. GARDARIN « Bases de données » eyrolles, 2003 <http://mapserver.gis.umn.edu>.



# Orbit Simulator of the Alsat-1 First Algerian Microsatellite in Orbit

A.M. Si Mohamed, A. Boudjemai, H. Benzeniar  
Centre National des Techniques Spatiales  
1, Avenue de la Palestine, Arzew, Algeria

Y. Hashida, H. Steyn, M.N. Sweeting  
Surrey Satellite Technology Limited  
Guilford, Surrey GU2 7XH, United Kingdom

**Résumé :** Cet article présente un simulateur d'orbite du premier microsatellite Algérien Alsat-1 qui donne la position et la vitesse orbitale d'Alsat-1.

Le simulateur tient compte des perturbations principales telles que la traînée atmosphérique et la force non sphérique du corps central.

Les résultats de simulation obtenus montrent une bonne cohérence avec les données orbitales d'Alsat-1.

**Abstract :** This paper presents an orbit simulator of the Alsat-1 first Algerian microsatellite which propagates the orbital position and velocity of Alsat-1. The simulator is taking into account major perturbations such as atmospheric drag and the non spherical central body force.

The results out of the simulation were compared and tested with real Alsat-1 tracking algorithm; it was shown that the compared program can then generate same track shape.

## 1. Introduction

Algeria via the National Centre of Space Techniques (CNTS) chooses to develop their technical capabilities through technology transfer by setting a strategy to implement space technology and to meet her known and potential needs. Alsat-1 project translates the awareness and the understanding on the part of the user community of the benefits of space technology.

Algeria's first satellite Alsat-1 was designed and constructed by Surrey Satellite Technology Limited (SSTL) in the United Kingdom within a collaborative program with CNTS.

The simulation of the Alsat-1 orbit runs under C++ code and MATLAB/Simulink environment by returning the position and velocity vectors at corresponding times. The input parameters to the function developed are defined in a vector containing the Kepler elements as well as the Start and End

simulation time. The orbits are propagated using the standard Simplified General Perturbations, SGP4 module for near Earth satellites.

The predicted orbit is used to produce scheduling aids which indicate spacecraft environmental conditions (such as sun or shadow, interference regions and altitude) as well as all potential station-to-station contact times. Using this list of environmental conditions, the experimenter can plan scientific data collection, and knowing the station view periods, can select the times needed to meet mission communications requirements.



Fig. 1 Alsat-1: First Algerian Microsatellite in Orbit

## 2. Theoretical Aspects

### 2.1 Orbit Dynamics

The nature of this investigation requires that the position of a satellite moving under the combined influence of the earth's (non-ideal) gravitational field and a number of other perturbing forces must be calculated. The movement of a satellite under the influence of the Earth's gravity field as well as other perturbing forces is described by the following two first order differential equations

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}} &= \mathbf{v} \\ \ddot{\mathbf{r}} &= -\mu \frac{\mathbf{r}}{r^3} + \mathbf{a}_p \end{aligned} \quad (1)$$

Where :

- r : The satellite position vector;
- v : The satellite vector velocity;
- $\mu$  : The Earth's gravitational constant;
- $a_p$  : The vector sum of all perturbation accelerations acting on the satellite.

## 2.2 Perturbation

### 2.2.1 The Earth Gravitational Effect

Most solar system bodies are known to have figures which depart from the spherical model of the particle. The non sphericity of the gravitational potential may give rise to a significant perturbation of satellite trajectories. Therefore, accurate orbit generation, or propagation, may require the inclusion of non spherical terms. The gravitational potentials of the Earth and Moon are the best known of all solar bodies, because of extensive tracking and analysis of close Earth and lunar satellites.

The method of representing its potential is classical. The gravitational field of the body is derived from a scalar potential U that satisfies Poisson's Equation

$$\Delta U = -4\pi\rho_k(r, \phi, \lambda) \quad (2)$$

Where :

- r : The magnitude of the vector from the body's centre of mass to the satellite;
- $\phi$  : The geocentric, selenocentric, or planetocentric latitude;
- $\lambda$  : The geocentric, selenocentric, or planetocentric longitude.

Above the surface of the perturbing body, the mass density  $\rho$ , is assumed zero, consequently, Equation (2) reduces to the Laplacian,  $\Delta U = 0$ . Standard separation of variables techniques yield to the following solution :

$$U = \frac{\mu}{r} + \mu \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n \frac{a_c^n}{r^{n+1}} P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \quad (3)$$

Where :

- U : The gravity potential;
- r : The magnitude of radius vector ;
- a : The Earth's equatorial radius;
- n,m : The degree and order of spherical harmonics;
- $P_{nm}$  : The Legendre functions;
- $C_{nm}, S_{nm}$  : The coefficients of spherical harmonics;

- $\lambda$  : The geocentric east longitude of the satellite;
- $\phi$  : The geocentric latitude of the satellite.

In the equation above, the first term is the point mass part. The other terms are an expansion of spherical harmonics to represent the non spherical effects of the Earth mass, i.e. the Earth gravitational perturbation.

### 2.2.2 The Atmospheric Drag

Satellites below 1000 km orbit height are strongly affected by drag forces. Although the air density is extremely low at such altitudes, the high velocity of a satellite leads to significant acceleration, obtained by the following equation

$$\ddot{r} = -\frac{C_D A \rho}{m} \frac{\rho}{2} |\dot{r}_a| \dot{r}_a \quad (4)$$

Where :

- $C_D$  : The drag coefficient;
- A : The cross-sectional area of the vehicle perpendicular to the direction of motion;
- m : The mass of the vehicle;
- $\rho$  : The atmospheric density at the vehicle's altitude;
- $|\dot{r}_a|$  : The speed of vehicle relative to the rotating atmosphere;
- $\dot{\theta}$  : The rate of rotation of the Earth.

## 2.3 Orbit Predictions

Orbit prediction involves two steps – (1) Orbit Propagation, (2) Calculation of position and velocity vectors. Orbit Propagation takes into account the various perturbations some which may be secular, short periodic (changing very fast within an orbit) and long periodic (slowly changing with a frequency of many orbits or a few days).

Once the orbital elements are propagated to the new time, the position and velocity vectors in the inertial frame are computed using a set of transformation equations.

The simulator calculates the satellite's acceleration due to the Earth's gravity field with a vector equation derived from the gradient of the potential function expressed as :

$$a_g(r, t) = \nabla U(r, t) \quad (5)$$

This acceleration vector is a combination of pure two-body or point mass gravity acceleration and the

gravitational acceleration due to higher order nonspherical terms in the Earth's geopotential. In terms of the Earth's geopotential  $U$ , the inertial rectangular Cartesian components of the satellite's acceleration vector are as follows:

$$\ddot{x} = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{z}{r^2 \sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial U}{\partial \phi} \right) x - \left( \frac{1}{x^2 + y^2} \frac{\partial U}{\partial \lambda} \right) y \tag{6.a}$$

$$\ddot{y} = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{z}{r^2 \sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial U}{\partial \phi} \right) y + \left( \frac{1}{x^2 + y^2} \frac{\partial U}{\partial \lambda} \right) x \tag{6.b}$$

$$\ddot{z} = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) z + \left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r^2} \frac{\partial U}{\partial \phi} \right) y \tag{6.c}$$

Where  $r = \|\mathbf{r}\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  is the magnitude of radius vector of the satellite and  $(x,y,z)$  its coordinate position.

### 3. Simulation Results

The default inputs of the Alsat-1 orbit generator are given as follows:

Table 1. Orbital Inputs

Semi-major axis [metre]	7024263.281
Eccentricity	0.001344
Inclination [degree]	98.1253
Ascending node [degree]	38.3367
Argument of perigee [degree]	95.5909
Mean anomaly [degree]	264.6702

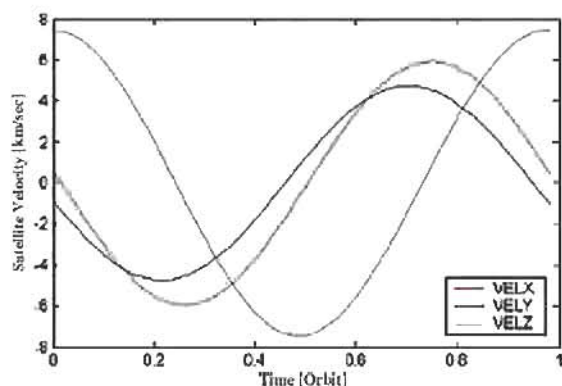


Fig. 2 Satellite Position

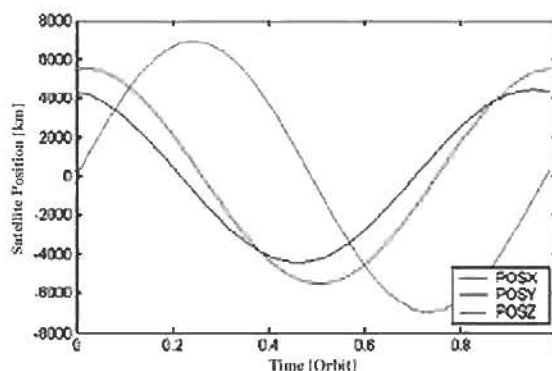


Fig. 3 Satellite Velocity

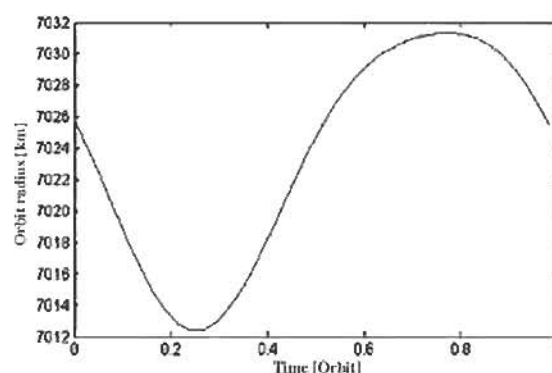


Fig. 4 Radius of orbit satellite

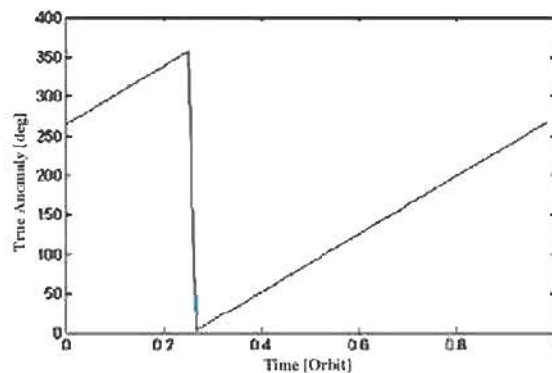


Fig. 5 True anomaly satellite

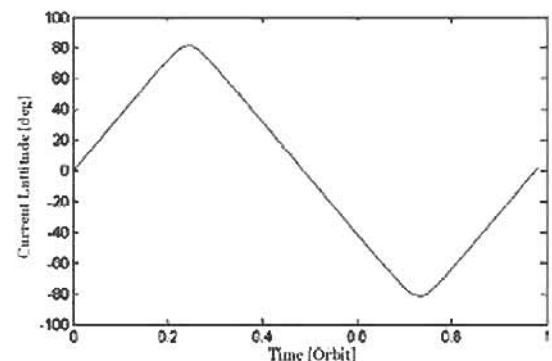


Fig. 6 Current latitude satellite

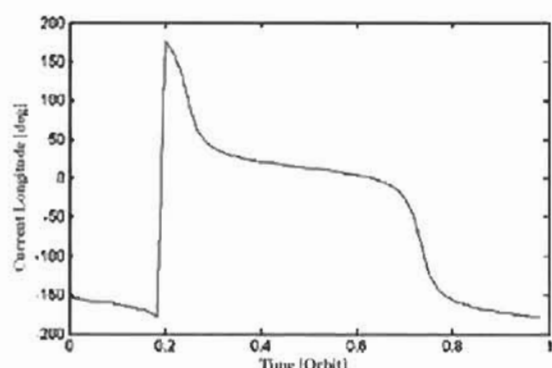


Fig. 7 Current longitude satellite

The orbital elements are no longer constant, they vary with time. Three types of variations

- Secular - linear with time;
- Short period - vary with orbital period;
- Long period - varies with period from days to months.

The atmospheric drag has a significant effect for satellites below 1000 km.

The deviation of the Earth from a perfect sphere is mainly responsible for the changes seen in the Right Ascension of the Ascending Node, Argument of Perigee, Mean Anomaly,...

The Luni-Solar gravitational forces takes into account the effects on an orbit produced by the gravitational pull of the Moon and Sun. These forces contribute to the long-term changes in the Right Ascension of the Ascending Node and the Argument of Perigee, and also produce long-term changes in inclination and eccentricity.

#### 4. Conclusion

The aim of the work presented is to give a real time simulation, which provides support for model development and integration, simulation execution and analysis of Alsat-1 results.

The development presented constitutes a preliminary version of the work whose accent was put especially on the modelling of the Alsat-1 orbit on the one hand, on the other hand this work allows also to :

- Get use for training program and education to spaces techniques;
  - It will help the country Algeria to acquire satellite and approach and learn spacecraft technology;
- The extension of the work to the application of Alsat-2 which is an Earth observation Algerian microsatellite with high resolution imagery.

#### References

- Alsat-1 project documentation, 2003, delivered by SSTL to CNTS under the Know How Transfer Program.
- Battin, R.H., 1987, "An Introduction to the Mathematics and methods of Astrodynamics" AIAA Educational Series, New York, USA.
- Escobal, P. R., 1976, "Methods of Orbit Determination" Krieger Publishing Company, USA.
- King-Hele, D., 1987, "Satellite Orbits in an Atmosphere: Theory and Applications" Blackie and Son Ltd., London, UK.
- Schlarmann, B. K.I., 1994, "Orbit Determination during the BREM-SAT Mission", "45<sup>th</sup> Congress of the International Astronautics Federation, IAA-94-IAA.11.3.769, Jerusalem, Israel, October 9-14.
- Sellers, Jerry Jon., 1994 "Understanding space: an introduction to astronautics" Jerry Jon Sellers, New York; London: McGraw Hill.
- Sommer, Widjaja, Widle, 1989, "Study of on board Orbit Determination", ESA Contact Number 7463/78/D/IM (SC), Bremen 1989
- Valadimir A.Chobotv, 1996 "Orbital Mechanics" Second Edition, Alexander Bell Drive, Reston, Virginia.
- Vincent L. Pisacane and Robert C., 1994, "Fundamentals of space systems" New York; Oxford: Oxford University Press - The Johns Hopkins University/Applied Physics Laboratory.
- Y. Hashida, 2003, "AODCS Design for Future UoSAT Standard Platform", Surrey Space Centre, Guilford, UK.

## Apport de l'Imagerie Spatiale Optique et Radar pour la Détection et le Suivi des Zones d'Orpaillage en Guyane Française

N. Baghdadi, A. Bourguignon, J. L. Lasserre  
Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)  
3 avenue C. Guillemin, B.P. 6009 - 45060 Orléans cedex 2, France  
n.baghdadi@brgm.fr  
Tél. +33 2 38 64 32 02 - Fax +33 2 38 64 36 89

**Résumé :** Les activités minières, parfois clandestines, en Guyane Française sont mal ou pas contrôlées par les autorités. Elles causent des dégâts majeurs à la nature (déboisement sauvage, déversement de mercure, etc.). La recherche d'outils fiables et peu onéreux permettant la cartographie des zones d'orpaillage et le suivi de leurs évolutions dans le temps présente un grand intérêt local. L'objectif de cette étude est d'analyser le potentiel de l'imagerie satellitaire optique et radar pour l'identification et la cartographie des zones d'orpaillage en Guyane française. Des images acquises entre 1990 et 2003 ont ainsi été analysées. L'information issue de l'imagerie satellitaire radar (RADARSAT, SIR-C) et optique (SPOT, LANDSAT) a été étudiée. Les résultats montrent la faible capacité du capteur RADARSAT (mono bande) pour cette application. Quant aux images SIR-C (multi-bandes), elles fournissent une meilleure détection des zones d'orpaillage.

L'interprétation réalisée sur les images SPOT et LANDSAT montre que les capteurs optiques constituent le meilleur outil pour la cartographie de cette activité. L'intérêt des séquences multi-dates pour cartographier l'évolution du paysage soumis depuis quelques années à d'importantes modifications dues à l'activité des orpailleurs a été démontré. De même, on peut procéder à des contrôles pour déterminer si les exploitations cartographiées sont légales ou clandestines et si le concessionnaire exploite la surface allouée par le permis (localisation et étendue).

**Mots-clés:** Zones d'orpaillage, Imagerie Satellitaire radar et optique, Guyane Française.

**Abstract :** Mining activity in French Guiana, illegal in some cases, is poorly or not at all controlled by local authorities. Such activity can cause severe damage to nature (illicit deforestation, mercury spillage, etc.).

The search for reliable and low-cost tools capable of

mapping gold washing sites and monitoring their evolution with time consequently presents a major local interest. The aim of the present study is to assess the potential of optical (SPOT, LANDSAT) and radar (RADARSAT, SIR-C) satellite imagery in identifying and mapping gold washing sites in French Guiana. Images acquired between 1990 and 2003 were analysed for this purpose. The results reveal that the RADARSAT sensor (single band) offers a low detection capacity, whereas the SIR-C images (multi-band) enable a better detection of gold washing sites. Interpretations based on SPOT and LANDSAT images show that optical sensors are more suited to mapping this type of activity. The advantage of multi-date sequences is demonstrated for mapping landscape evolution related to the major modifications inflicted over recent years due to gold washing activities. Similarly, it can be used as a basis for checking whether the mapped workings are legal or not, and whether the claim holder only exploits the area allocated by his permit (location and extent).

**Keywords :** Gold washing sites, optical and radar satellite imagery, French Guiana.

### 1. Introduction

La cartographie des zones d'orpaillage constitue une préoccupation majeure pour les autorités territoriales qui est satisfaite aujourd'hui par des photos aériennes ou par des interventions à intervalle irrégulier sur le terrain. Ces opérations coûteuses et lourdes à mettre en œuvre seraient facilitées et leur planification optimisée par la mise en place d'un suivi via les images satellitaires ce qui faciliterait la tâche des gestionnaires et constituerait un outil efficace d'aide à la décision. La télédétection permet d'acquérir des données décrivant la surface du Globe de façon répétitive, programmable et relativement peu onéreuses.

Si la cartographie des zones d'orpaillage devait être faite à un intervalle de temps régulier et court,

l'acquisition d'images optiques paraît alors problématique compte tenu du climat tropical humide qui règne dans cette région et la présence très fréquente des nuages. Les capteurs radar dits imageurs tout temps permettent quant à eux de s'affranchir des conditions climatiques, ce qui présente un grand avantage lorsque les observations sont impératives quelle que soit la saison. En plus, les capteurs radars qui sont très sensibles à la rugosité de surface, sont susceptibles de traduire la présence des sites d'orpaillage grâce à des coupes dans la forêt ou à un travail du sol.

Dans le but de détecter et de suivre les variations spatiales des zones d'orpaillage, des images satellitaires de type radar et optique seront analysées pour spatialiser des phénomènes supposés être liés à l'activité d'orpaillage (déforestation, petites zones inondées...). L'étude devra montrer l'apport qu'il est actuellement légitime d'attendre des outils de télédétection pour ce type d'application. Le type de capteur approprié (radar et/ou optique) à cette application sera défini en fonction de son potentiel de cartographie. Gond et Nasi (2003) ainsi que Polidori et al., (2001) ont montré le potentiel des images optiques pour la cartographie des zones d'orpaillage en Guyane.

Le but de l'étude est d'étudier le potentiel de l'imagerie radar issue des capteurs RADARSAT et SIRC et de l'imagerie optique issue de SPOT et LANDSAT pour la détection et la cartographie des zones d'orpaillage. Le couplage de l'imagerie avec la carte des permis miniers permettra de montrer la possibilité de réaliser un contrôle de l'activité : (1) cartographie des exploitations clandestines, (2) contrôle de l'activité légale (localisation et étendue de la zone de permis). Des images acquises entre 1990 et 2003 ont été étudiées avec différents paramètres d'acquisition. Dans cet article, nous présenterons successivement une description des zones d'études et des données utilisées, l'interprétation des images radar et optique et les résultats obtenus de la cartographie.

## 2. L'orpaillage en Guyane

### 2.1 Historique de l'activité d'extraction

La découverte de l'or en Guyane en 1857 a rapidement provoqué une ruée vers l'intérieur avec d'abord une multiplication des chantiers artisanaux (orpaillage à la batée) puis à partir de 1880 l'installation de nombreuses sociétés industrielles à gros moyens (exploitation en lit vif par draglines, dragues à godets et exploitation à terre en éluvions).

La production va rapidement s'accroître pour culminer à 5 tonnes en 1894. Cependant à partir de la première guerre mondiale, le déclin de l'activité minière s'amorce jusqu'à son quasi-arrêt entre 1965 et 1985.

Une relance de la production s'amorce alors avec une production essentiellement assurée par l'extraction alluvionnaire et qui remonte au niveau des productions historiques : 3,5 tonnes en 2000, 4 tonnes en 2001 (production déclarée). A partir de 1992, apparition puis rapide extension en Guyane de l'exploitation en barranques d'origine brésilienne. Cette exploitation souvent effectuée sur des chantiers clandestins a un fort impact environnemental : dispersion du mercure dans le milieu naturel, rejets d'eaux de lavage très chargées en matières en suspension directement dans les cours d'eaux.

Entre 1855 et 2002, la production officiellement déclarée d'or en Guyane est de 205 tonnes.

### 2.2 Les enjeux de cette activité en Guyane

L'extraction aurifère représente le second secteur de production en Guyane après le spatial. La production est repartie à la hausse depuis 1990 et a atteint 4000 kg en 2001 (production déclarée). Cependant cette production est essentiellement le fait d'une extraction dans le lit alluvionnaire plat d'une rivière (flats). De plus une grande partie de la production n'est pas déclarée car réalisée sur des sites d'orpaillage clandestins. De fait la production réelle, intégrant production effective des sites déclarés et production des sites illégaux, est très certainement supérieure à 10 tonnes par an.

Cette production doit évoluer dans les toutes prochaines années avec la mise en exploitation de gisements primaires à minerai oxydé qui se fera en carrière avec traitement du minerai par cyanuration en cuve. Ces mines industrielles comme Camp Caïman seront exploitées et gérées selon les standards industriels et environnementaux internationaux.

### 2.3 Les problèmes générés par l'orpaillage clandestin

Réalisée dans un cadre d'activité industrielle normale et régulière conforme aux règles de l'art, l'extraction aurifère représenterait un secteur d'activité et de développement économique très important pour la Guyane.

Cependant, l'activité clandestine importante ne génère pas les retombées socio-économiques normales d'une activité régulière mais au contraire elle

est à l'origine de graves problèmes environnementaux, sanitaires et sociaux.

En effet, l'orpaillage clandestin réalisé sans gestion environnementale des chantiers d'extraction a pour conséquence la dispersion dans le milieu du mercure utilisé pour l'amalgamation au cours des 150 ans d'activité d'orpaillage et encore actuellement. Ce mercure peut ensuite être confiné dans des conditions physico-chimiques permettant sa transformation en méthyl-mercure hautement toxique puis sa re-concentration au long de la chaîne alimentaire jusqu'à des niveaux de toxicité élevés dans certains poissons consommés par la population. Ce problème de santé public fait depuis plusieurs années l'objet d'études scientifiques importantes (Gramick et al., 1998 ; Deheeger et al., 2000).

De même le rejet des eaux de lavage des minerais dans les cours d'eau sans dispositif de décantation génère une importante turbidité des eaux et une altération importante et durable de l'écosystème aquatique. En effet les panaches d'eaux turbides s'étendent sur des distances très importantes en aval des sites étendant ainsi la zone affectée par l'impact des chantiers d'orpaillage bien au-delà du secteur exploité.

Les atteintes à l'écosystème forestier sont également importantes avec déforestation, destruction des sols, absence de réhabilitation des sites (pas de comblement des barranques, pas de restauration des sols, pas de revégétalisation, pas de restauration du cours d'eau, pas de gestion des déchets).

#### 2.4 Les méthodes d'extractions: artisanale et industrielle

L'extraction traditionnelle développée jusque vers 1990 consistait à creuser à la main une fosse de 6-7m x 3-4m dans le lit d'un cours d'eau à quelque distance de la rivière pour éviter l'inondation du chantier. Le recouvrement stérile (parfois plusieurs mètres) une fois extrait, la couche de graviers minéralisée était à son tour extraite pour être lavée à la batée. Ce type de travail artisanal n'a pas généré un impact fort sur le milieu aquatique en particulier. Par contre il a contribué à la dispersion de mercure dans le milieu tout comme l'activité des sociétés industrielles qui ont extrait l'or de 1880 à 1920.

Ces sociétés ont pratiqué l'extraction des minerais alluvionnaires (dragues à godets dans les grands flats) mais aussi à terre avec des essais de mines souterraines exploitant des filons de quartz aurifères (Régions de St-Elie, de Paul-Isnard, de Saül ou d'Adieu-Vat)

Actuellement l'extraction artisanale se développe essentiellement dans les flats des cours d'eaux (accumulations alluvionnaires dans le lit vif des rivières). Cette extraction se pratique selon la technique brésilienne des « barranques » qui comprend les phases suivantes :

- déforestation et décapage du site avec détournement du cours d'eau,
- ouverture de fosses d'exploitation dans le flat par décapage de la couverture stérile argileuse à la pelle hydraulique,
- abattage des graviers et sables minéralisés à la lance "Monitor" (jet d'eau à haute pression),
- pompage des matériaux en suspension dans l'eau par la pompe à graviers et alimentation de la "caisse" (dispositif constitué d'un canal incliné tapissé d'une moquette et surmonté d'une grille métallique permettant le piégeage gravimétrique de l'or),
- récupération des particules d'or par démontage de la caisse puis lavage des moquettes,
- amalgamation au mercure du concentré et constitution de l'amalgame or-mercure,
- distillation de l'amalgame dans une retorte ou au four avec récupération d'une éponge d'or, la cassave.

L'absence de gestion environnementale des chantiers dans le déroulement de ces différentes étapes génère de multiples impacts sur le milieu naturel dont les effets persistent souvent longtemps après l'arrêt des chantiers et affectent des secteurs débordant largement le périmètre des sites miniers.

Rappelons aussi que l'extraction de l'or dans les alluvions du lit vif des cours a été pratiquée au moyen de dragues suceuses avec des plongeurs. Cette activité illégale (interdite par la Loi sur l'Eau) a quasiment disparue actuellement mais a été largement pratiquée entre 1980 et 1995. Elle a entraîné une forte dégradation du lit des fleuves et rivières et un impact important sur le milieu aquatique.

L'exploitation des gisements d'or primaire est conduite à terre selon une technique similaire à l'extraction en carrière. Les terrains stériles sont extraits, évacués et stockés de manière à pouvoir être réemployés lors de la réhabilitation du site. Le minerai extrait de la carrière est concassé, broyé finement puis dans un réacteur, une solution diluée de cyanure est ajoutée afin de dissoudre l'or. La solution enrichie en or passe ensuite sur une colonne de charbon actif permettant la destruction du complexe aurifère soluble et la précipitation de l'or

métal. Il n'existe pas actuellement de sites industriels actifs de ce type. Le premier (Camp Caïman) pourrait voir le jour vers 2006 - 2007.

### 3. Sites d'étude et données utilisées

Trois sites d'études ont été choisis en Guyane française (cf. Fig. 1): le premier (S1) est situé dans la région de Paul Isnard (long. : 54°06'W à 53°39'W et lat. 05°07'N à 04°40'N), le second (S2) dans la région de Saül (long. : 53°37'W à 53°10'W et lat. 04°02'N à 03°35'N), et le dernier (S3) dans la région d'Appouague-Montagne de Kaw (long. : 52°36'W à 52°03'W et lat. 04°42'N à 04°01'N) :

#### *Site de Paul Isnard : Nord de la Guyane*

Découverte en 1873 la région aurifère de Paul Isnard est toujours productrice. Elle a été l'objet de toutes les méthodes d'extraction : exploitation des grands flats par drague sur barge, orpillage traditionnel artisanal, activité ancienne de mine sur filon de quartz aurifère, exploitation actuelle de type « barranque » brésilienne.

#### *Site de Saül : Centre de la Guyane*

La région de Saül dans le centre de la Guyane a aussi été l'objet d'une activité d'orpillage très tôt dès le milieu du 19ème siècle. Cette région comprenant la partie amont du bassin du fleuve Mana a vu se développer ces dernières années une activité extractive très importante dans les flats de la Mana (barranques) ainsi qu'une extraction par barge avec drague suceuse. Ces activités en grande partie clandestines et réalisées sans préoccupation de gestion environnementale laissent des altérations importantes sur l'environnement.

#### *Site du fleuve Appouague : Est de la Guyane*

Cette région est celle de la découverte historique de l'or en Guyane. Les activités d'orpillage s'y poursuivent (barranques) avec de multiples chantiers légaux et illégaux. Il faut noter que certains exploitants légaux commencent à mettre en œuvre une gestion plus rationnelle de leur chantier et prendre en compte les questions de gestion environnementale et de réhabilitation de site. Ce type de site présente une organisation qui doit permettre de le distinguer des sites illégaux exploités très rapidement (en raison d'une menace de plus en plus forte d'intervention de la gendarmerie pour interrompre ces chantiers) sans aucune préoccupation de préservation du milieu naturel ni tentative de réhabilitation après exploitation.

Le climat en Guyane est de type équatorial. A l'exception d'une étroite frange côtière, la Guyane est entièrement couverte par la forêt amazonienne. Elle est parcourue par un réseau hydrographique très dense, tandis que le réseau routier est très peu développé en dehors des grandes villes côtières (Cayenne, Kourou,...). Les campagnes terrain sont donc très difficiles à mettre en œuvre et demandent des moyens appropriés. L'activité minière très gourmande en eau se développe en générale à proximité du réseau hydrographique (fleuves, rivières et cours d'eau).

Les sites d'étude sont constitués de forêt vierge avec un relief modéré.

Pour cette étude, nous disposons d'images spatiales acquises par différents capteurs optique et radar (Tableau 1) et de la carte des permis miniers.

Quatre images LANDSAT (5 et 7), 2 images SPOT 4, 4 images RADARSAT-1 et une image SIR-C ont été utilisées dans le cadre de cette étude. L'image RADARSAT en mode ScanSAR Narrow est la seule à couvrir les trois sites d'étude mais avec une résolution spatiale de 50 m (300 km x 300 km). Les dates d'acquisitions s'étalent de 1990 à 2003.

Afin de les rendre exploitables pour l'analyse thématique, les images radar et optique ont été géoréférencées dans le système géodésique Guyanais CSG67 à l'aide des cartes topographiques de l'IGN au 1:25 000 disponibles sur les régions côtières. Pour référencer les images de Saül qui ne sont pas couvertes par les cartes IGN, nous avons utilisé l'image RADARSAT en mode ScanSAR Narrow référencée uniquement à partir des cartes topographiques des régions côtières (cette image couvre les trois sites). Le référencement absolu des images de Saül n'est donc pas optimal tandis que le référencement relatif d'une image à l'autre est de quelques pixels seulement.

**Tableau 1.** Caractéristiques des images radar et optique utilisées.

Date JJ/mm/aa	Capteur	Nombre De bande	Mode-Incidence	Résolution Spatiale (m)	Sites D'étude
24/07/90	LANDSAT 5	7	-	30/120	S2/S3
03/08/97	LANDSAT 5	7	-	30/120	S1
19/09/02	LANDSAT 7	7	-	30/60/15	S2/S3
26/09/02	LANDSAT 7	7	-	30/60/15	S1
15/08/99	SPOT 4	4	-	20	S3
02/07/01	SPOT 4	4	-	20	S3
07/04/01	RADARSAT	1	F2-41°	10	S3
20/06/02	RADARSAT	1	S7-47°	25	S3
17/07/02	RADARSAT	1	S2-28°	25	S3
29/12/02	RADARSAT	1	ScanSAR Narrow 20° à 46°	50	S1/S2/S3
02/05/94	SIR-C	4 LHH,LHV CHH,CHV	59°	25	S3



## 4. Potentiel cartographique des images optique et radar

### 4.1 Interprétation des images optiques

La photo-interprétation des images a été réalisée conjointement avec la carte des permis. Différents critères ont permis de réaliser l'interprétation des images, notamment la radiométrie (teinte) et la texture des objets (forme) ainsi que leur localisation géographique dans l'image.

Une interprétation de l'image LANDSAT du 19/09/2002 a été réalisée. Un segment de l'image est montré sur la Figure 2. Il s'agit d'une composition colorée utilisant les canaux 4 (0.76-0.9  $\mu\text{m}$ , proche infrarouge), 3 (0.61-0.69  $\mu\text{m}$ , rouge) et 2 (0.53-0.61  $\mu\text{m}$ , vert) correspondant respectivement aux filtres rouge, vert et bleu. Les surfaces couvertes de végétation essentiellement forestière apparaissent de couleur rouge soutenue. Les teintes claires variant du blanc au vert ou au bleu représentent des zones de sols dénudés correspondant aux zones d'orpaillage. Les retenues d'eau qui se trouvent à l'intérieur des exploitations sont en teinte foncée (quelques points noirs). On distingue également des teintes rouge clair qui peuvent être attribuées à des zones de régénération de la végétation après une période de dénudation.

L'étude des images optiques montre qu'il est possible visuellement de différencier les zones d'orpaillage. Ce sont en effet des zones de sols dénudés et même si leur taille est limitée, leur couleur claire offre un contraste fort avec la végétation rouge sombre ce qui permet de les localiser aisément. Pour un traitement plus automatique qui permettrait leur extraction de l'image, plusieurs difficultés sont à prendre en compte. En effet la couverture nuageuse abondante dans les régions équatoriales perturbe la classification de l'image et rend difficile l'application de traitements automatiques pour isoler les zones d'orpaillage. Le NDVI, indice de végétation, permet d'extraire des zones sans végétation mais les nuages, leur ombre et les zones de cultures sont représentées de manière semblable en teinte foncée sur l'image résultante (Figure 3). Des indices combinant différents canaux ont également été appliqués sur l'image LANDSAT du 19/09/2002. Ils n'ont pas permis d'enlever toutes les ambiguïtés entre les zones d'orpaillage, les zones de culture, les nuages et leur ombre. Le rapport entre canal 5 (moyen infrarouge) et canal 1 (bleu) a permis une bonne discrimination entre les zones d'orpaillage et les nuages et leur ombre. Toutefois il n'y a pas de discrimination de teintes entre sols nus cultivés et zones d'orpaillage.

Seuls des critères de forme permettent d'individualiser les zones d'orpaillage des zones de cultures. En effet, les zones d'orpaillage ont des formes linéaires alors que les zones agricoles sont parcellaires et présentent des formes plus géométriques (Figure 3).

Une analyse en composantes principales (ACP) a été également réalisée. La première composante de l'ACP représente 94.5% de l'information contenue dans l'image. L'image résultante permet la discrimination visuelle des sites d'orpaillage qui apparaissent en bleu sur la composition RGB (Figure 4). Les nuages de teinte violet et leur ombre en rouge sont bien individualisés par rapport aux zones dénudées mais la confusion avec les sols nus cultivés persiste sauf si l'on prend en compte la similitude des formes entre les nuages et leur ombre pour les distinguer des sols nus cultivés. L'utilisation de cette image apporte donc essentiellement une lisibilité améliorée par rapport à l'image spectrale brute.

La comparaison entre les images acquises à plusieurs dates montre l'évolution du paysage Guyanais suite aux activités d'orpaillage. En effet, certaines zones se sont agrandies et d'autres ont disparu (Figures 5 et 6, respectivement). Les compositions colorées utilisent soit les canaux 4 (0.76-0.9  $\mu\text{m}$ , proche infrarouge), 3 (0.61-0.69  $\mu\text{m}$ , rouge) et 2 (0.53-0.61  $\mu\text{m}$ , vert) ou bien les canaux 5 (1.57-1.78  $\mu\text{m}$ , moyen infrarouge), 4 et 2 correspondant respectivement aux filtres rouge, vert et bleu. On constate à partir de l'imagerie que les sites d'orpaillage étaient presque inexistantes en 1990 et que l'activité a progressé entre 1999 et 2002. L'activité minière a commencé à prendre un grand essor à partir de la deuxième moitié des années 90. La Figure 6 montre un site d'activité actif en 1997 et qui ne l'est plus en 2002 car l'image de 2002 montre une repousse de la végétation.

### 4.2 Interprétation des images radar

La Figure 7 montre la réponse du signal radar à différents angles d'incidence sur une importante zone d'orpaillage (site S3), en comparaison à l'image LANDSAT. Les images RADARSAT en modes Fine et Standard (résolution spatiale de 10m et 25m, respectivement) ne montrent pas d'influence nette de l'angle d'incidence sur le résultat de la détection. Sur les images radar, on observe à l'endroit des zones d'orpaillage quelques pixels de faible radiométrie qui correspondent à la diffusion spéculaire du signal radar sur l'eau des «barranques» (cf. Figure 7). Cette observation est sans ambiguïté si le site d'orpaillage est assez grand. L'image RADARSAT en mode ScanSAR Narrow (résolution spatiale de 50m),

n'apparaît, elle, pas du tout adaptée à ce type de cartographie. Quant à l'image SIR-C, elle laisse supposer que ce site d'orpaillage est postérieur à 1994, date d'acquisition de l'image (cf. Figure 7).

En conclusion, la cartographie des sites d'orpaillage par l'imagerie radar de type mono-bande (comme c'est le cas pour RADARSAT) reste assez difficile. Les résultats obtenus montrent une modeste corrélation entre l'imagerie radar et l'imagerie optique pour cette grande exploitation.

La Figure 8 montre l'apport des images radar multi-fréquences (bandes C et L) et multi-polarisations (HH et HV) pour la détection des zones d'orpaillage. Les deux zones d'orpaillage identifiées sur l'image SIR-C correspondent bien à un permis légal. Cette image SIR-C montre en particulier le fort potentiel des images radar en bande L multi-polarisations. Sur l'image SIR-C, les zones d'orpaillage apparaissent en teinte rouge avec quelques points noir. On constate cette même radiométrie à d'autres endroits, sur des pixels isolés, sans que ça corresponde forcément à des zones d'orpaillage. Cependant, il est possible de détecter avec des capteurs radar adéquats les zones d'orpaillages si celles-ci s'étendent sur une large surface (plusieurs dizaines de pixels).

Sur les images RADARSAT en modes Fine et Standard, on distingue les zones d'orpaillage par une teinte noire (cf. Figure 8). Cette détection est moins évidente comparativement à celle obtenue par les capteurs optiques ou par le capteur radar de type SIR-C (multi-fréquences et multi-polarisations).

## 5. Contrôle de l'activité

Dans le cadre de cette étude, nous avons étudié la possibilité de contrôler la légalité des concessions et de vérifier l'exactitude des données liées à l'étendue des concessions et à leur localisation. Ce travail nous permet également de détecter les concessions clandestines.

Ce travail de vérification a pu être réalisé grâce à la carte des permis miniers. Les Figures 9 et 10 montrent que l'extension de deux zones d'orpaillage détectées à proximité des permis est bien supérieure à la surface autorisée qui est de 1 km x 1 km. En effet, la surface exploitée est au moins trois fois supérieure à la surface légale. L'exploitation de la Figure 9 s'étend sur environ 2.8 km de long et au moins 0.7 km de large (l'image ne couvre qu'une partie de la zone nord). De même, la concession de la Figure 10 montre que la zone exploitée est d'environ 1.7 km x 1.9 km. Pour cette exploitation qui est plutôt éparpillée, on peut émettre deux hypothèses : (1) le concessionnaire exploite au delà

des limites autorisées, ou bien (2) il y des exploitants clandestins aux alentours de l'exploitation légale.

La Figure 11 montre des exemples illustrant des activités clandestines dans la région de Paul Isnard (S1) car les zones d'orpaillage observées par télédétection sont très loin des concessions légales les plus proches (environ 10km). Les deux zones d'orpaillage n'apparaissent pas sur l'image LANDSAT du 03/08/1997, ce qui laisse penser que l'activité est postérieure à cette date.

Les erreurs de référencement des images satellitaires ne mettent pas en cause ces observations car elles sont de quelques dizaines de mètres dans les endroits où des points de calage ont été trouvés et de quelques centaines de mètres dans les zones où l'on ne disposait pas de points de calage proches. C'est pour cette raison que seules les zones présentant une anomalie cartographique de plusieurs km ont été discutées.

## 6. Conclusion et perspectives

Le contrôle et la gestion des ressources minières en Guyane nécessite des moyens de cartographie adaptés pour suivre l'évolution dans le temps des activités d'orpaillage. L'objectif de cette étude était d'étudier le potentiel des images radar et optique pour la cartographie des zones d'orpaillage, en privilégiant l'établissement d'un diagnostic rapide, pour proposer un outil opérationnel de localisation des zones d'activité. La détection des zones d'orpaillage au moyen d'images radar mono-bande, de type RADARSAT par exemple, n'est pas apparue concluante. Quant aux images radar multi-bandes, comme SIR-C par exemple, elles semblent fournir une bonne détection des zones d'activité. Cependant, l'imagerie optique permet la meilleure détection de ces zones. Dans un tel contexte, les images satellitaires de type optique peuvent constituer un outil privilégié d'acquisition d'information actualisée et répétitive susceptible de fournir une information de suivi utile pour les décideurs. Les images spatiales pourraient ainsi permettre la constitution d'une base de données indispensable à la gestion des ressources et à la surveillance de l'environnement.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de cartographier les activités aurifères clandestines et de contrôler l'étendue des concessions légales. L'utilisation de l'imagerie satellitaire permet un diagnostic rapide et relativement peu onéreux par rapport à la photo aérienne ou à des méthodes de terrain conventionnelles.

Pour une meilleure détection de ces zones,

l'acquisition des images avec des hautes résolutions spatiales est nécessaire. L'imagerie RADARSAT en mode ScanSAR par exemple (50m de résolution) n'est pas du tout adaptée. L'influence de l'angle d'incidence radar sur le potentiel de détection ne semble pas déterminante.

Les nouveaux capteurs radar (ASAR d'ENVISAT) sont multi-polarisation, et ceux qui seront lancés prochainement seront polarimétriques (RADARSAT 2 par exemple), ce qui va sans doute permettre une meilleure caractérisation des zones en activité d'orpaillage. Le potentiel des nouveaux capteurs radar et optique (ASAR et SPOT 5) doit être étudié. La fine résolution spatiale de SPOT 5 et les configurations multi-incidence et multi-polarisation d'ASAR vont sans doute améliorer notre expertise actuelle sur la cartographie de l'orpaillage en Guyane. Des images hyperspectrales issues du capteur HYPERION pourront également être analysées dans le but d'étudier la corrélation entre sites pollués et informations spectrales (sol et eau).

De même, il est nécessaire de réaliser un SIG montrant l'évolution temporelle de l'activité d'orpaillage et comparant ce qui est cartographié par télédétection et ce qui est inventorié comme étant des exploitations légales. Les sites clandestins pourront ainsi être inventoriés.

## Références

- Deheeger M., Fréry N., Boudou A. et Maury-Brachet R. (2000). Enquête alimentaire pour mesurer l'exposition au mercure de la population amérindienne Wayana de Guyane. *Information Diététique*, vol. 2, pp. 28-32.
- Gond V. et Nasi R. (2003) L'orpaillage observé par satellite. *Cirad-info*, no. 133 (mars 2003), pp. 3.
- Grasmick C., Cordier S., Fréry N., Boudou A. et Maury-Brachet R. (1998). La pollution mercurielle liée à l'orpaillage en Guyane : contamination des systèmes aquatiques et impact sanitaire chez les amérindiens du Haut-Maroni. *JATBA, Revue d'Ethnobiologie*, vol. 40 (1-2), pp. 167-179.
- Polidori L., Fotsing J.M., et Orru J.F. (2001) Déforestation et orpaillage : apport de la télédétection pour la surveillance de l'occupation du sol en Guyane française. in *Le mercure en Amazonie. Rôle de l'Homme et de l'environnement, risques sanitaires* (coord. Scientifique : Carmouze J.P., Lucote M., Boudou A. Paris, IRD Editions, pp. 473-494.

## Remerciements

Cet article a été réalisé dans le cadre d'une étude financée par la Direction de la Recherche du BRGM. Certaines images Radarsat ont été fournies gratuitement par RSI dans le cadre du projet ADRO-2. De même une partie des images a été acquise dans le cadre du programme PNEC.

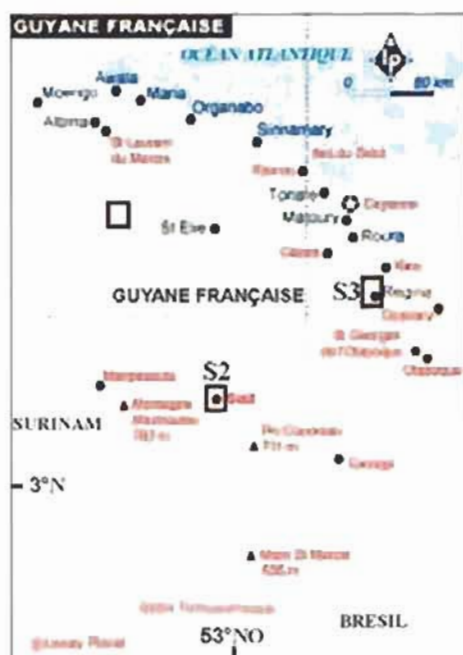


Fig. 1 Localisation des trois sites d'études : S1 (Paul Isnard), S2 (Saul), et S3 (Approuague - Montagne de Kaw).

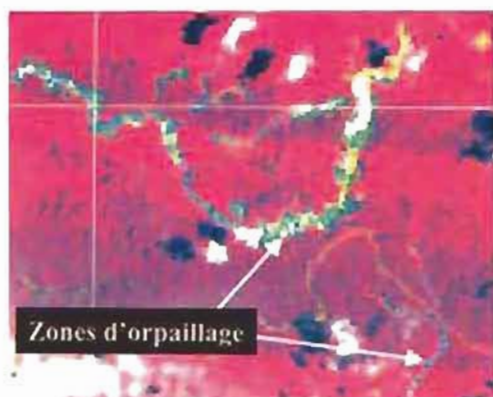


Fig. 2 Segment de l'image LANDSAT acquise le 19/09/2002. Ce segment d'image est situé sur la zone d'étude d'Approuague-Montagne de Kaw (S3), échelle ~ 1:100 000 (RGB = PIR,Rouge,Vert)

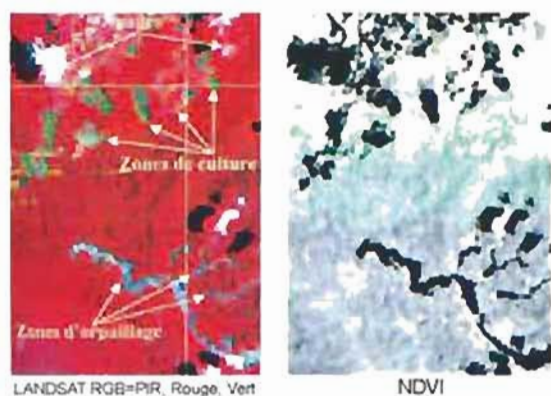


Fig. 3 Illustration de la confusion entre sols nus cultivés et zones d'orpillage pour l'image LANDSAT du 19/09/2002.

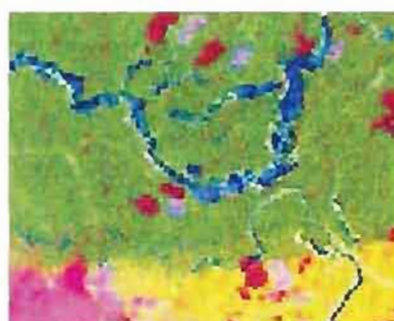
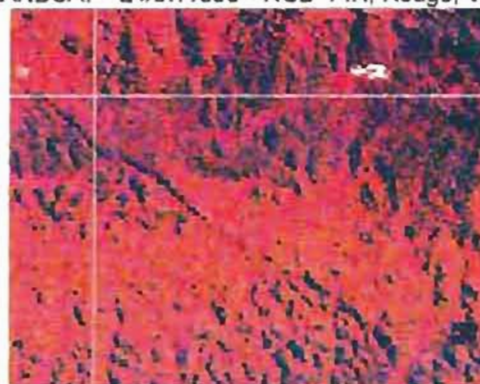
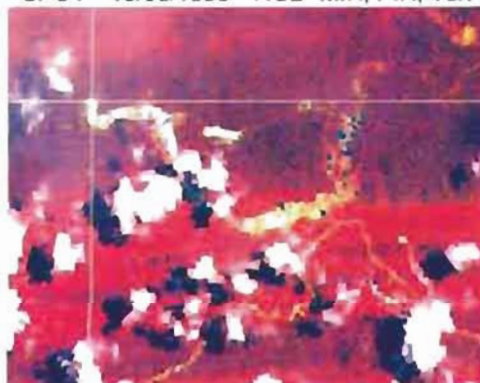


Fig. 4 Composition colorée issue des composantes principales calculées sur l'image du 19/09/2002 (RGB=ACP4,ACP2,ACP1)

LANDSAT - 24/07/1990 - RGB=PIR, Rouge, Vert



SPOT - 15/08/1999 - RGB=MIR, PIR, Vert



LANDSAT - 19/09/2002 - RGB=PIR, Rouge, Vert

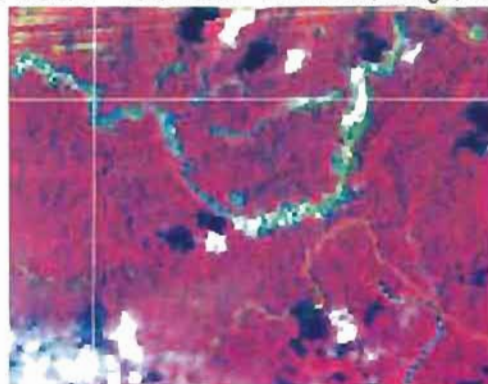


Fig. 5 Exemple de l'évolution du paysage Guyanais suite aux activités d'orpillage. Ce segment d'image est situé sur la zone d'étude d'Approuague - Montagne de Kaw (S3).

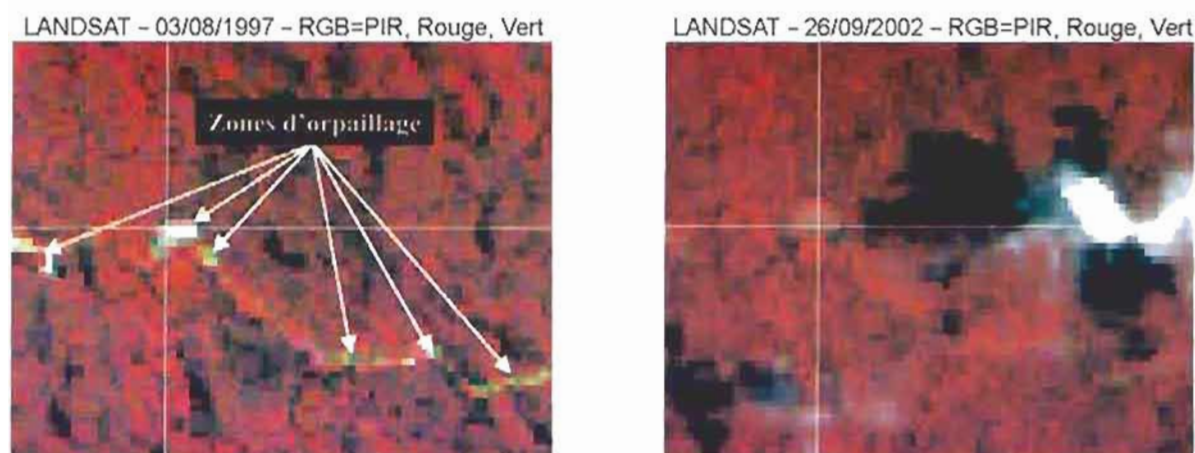


Fig. 6 Exemple de la régénération de la végétation suite à l'arrêt d'un site d'orpaillage. Ce segment d'image est situé sur la zone d'étude de Paul Isnard (S1).

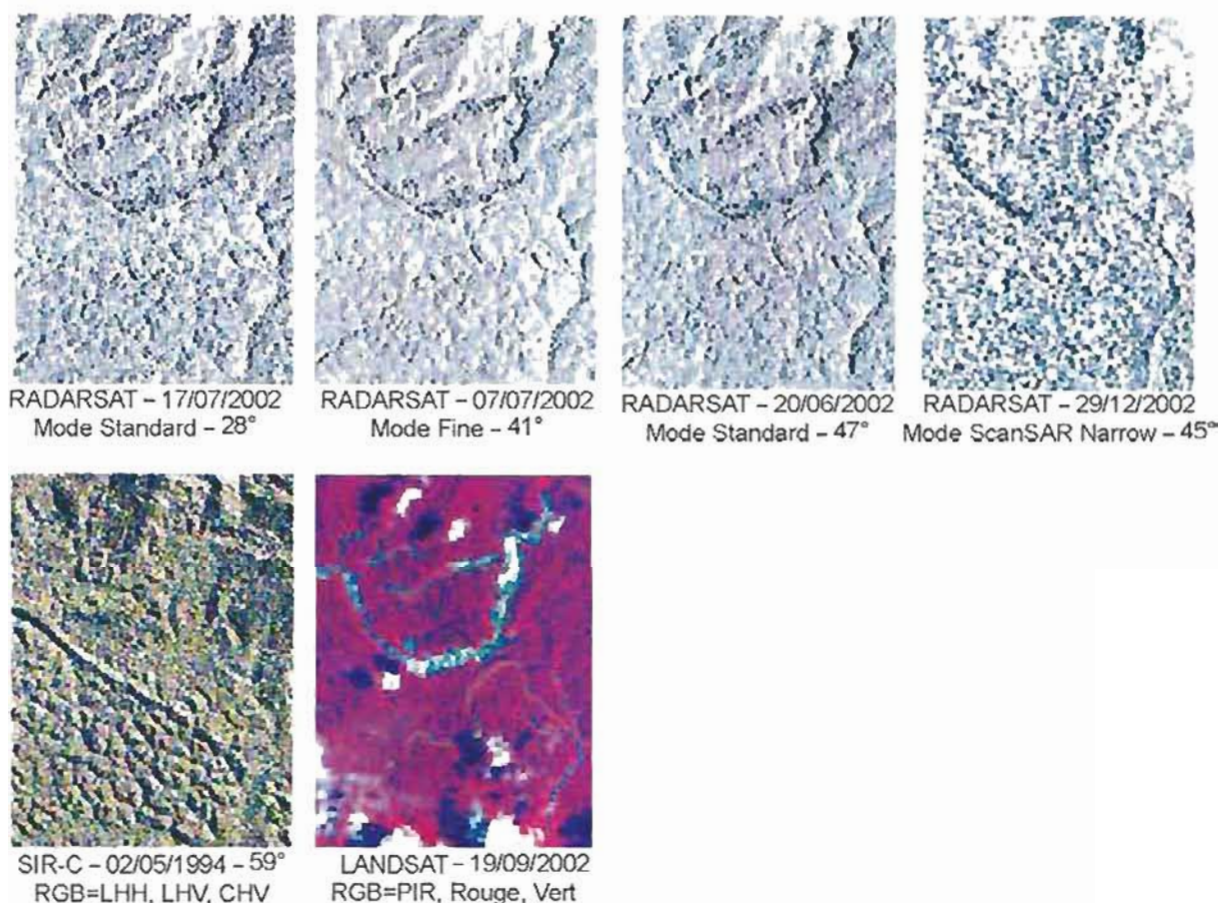
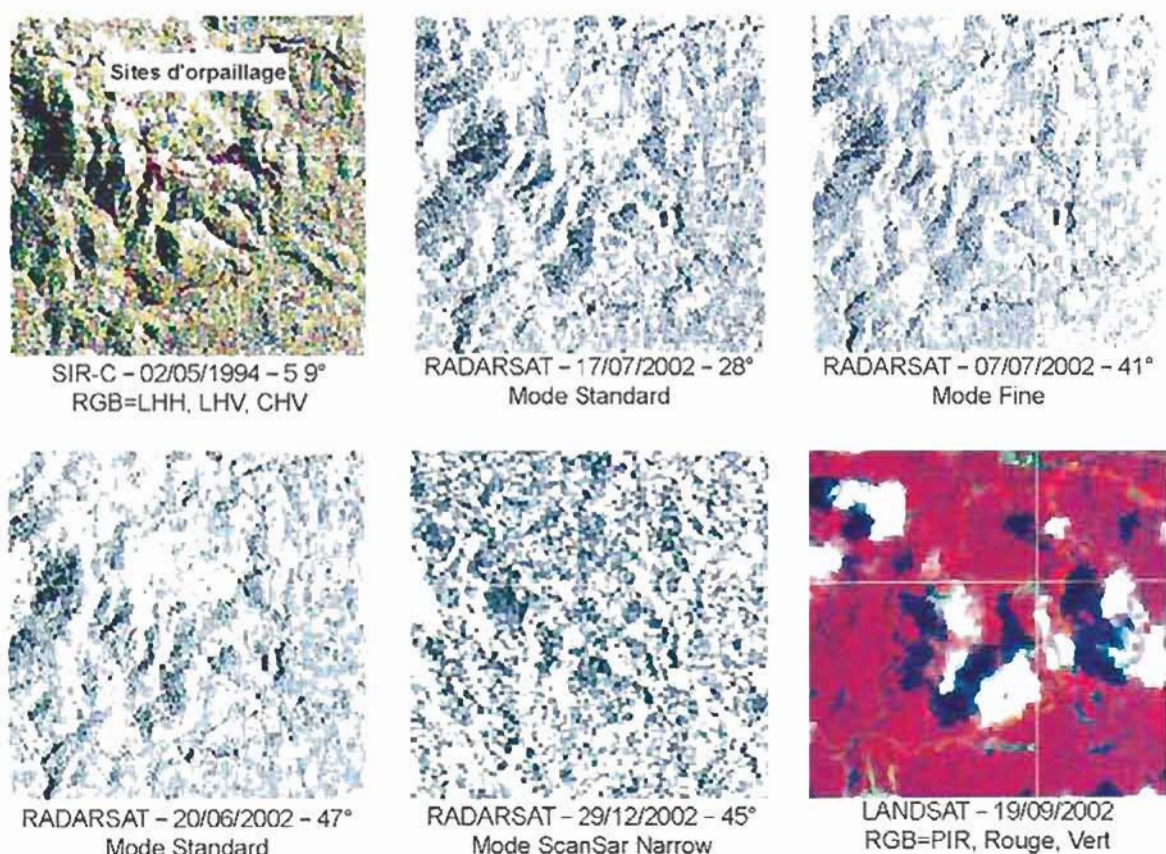
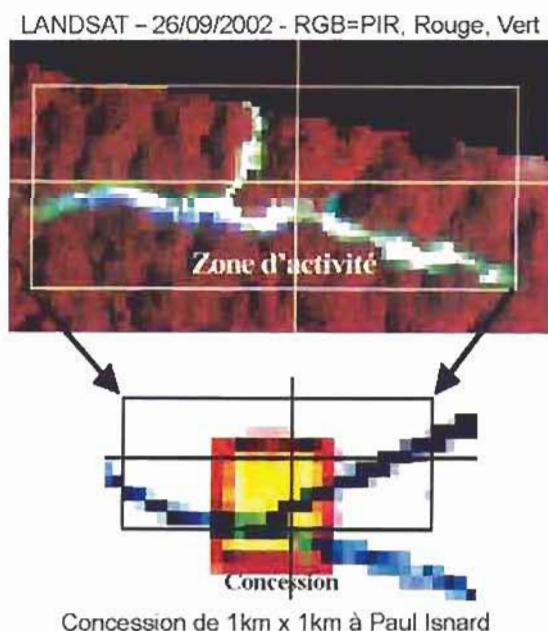


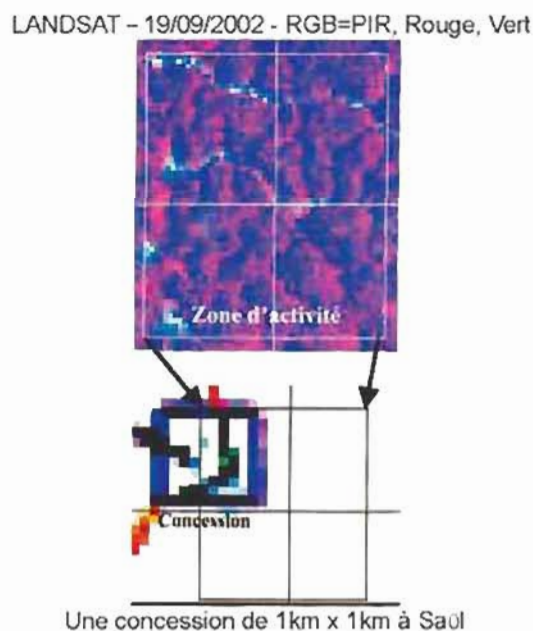
Fig. 7 Comparaison entre imagerie radar (RADARSAT et SIR-C) et imagerie optique (LANDSAT) pour un site d'orpaillage bien répertorié dans la région d'Approuage Montagne de Kaw échelle - 1:200 000.



**Fig. 8** Potentiel de l'image SIR-C pour la cartographie des zones d'orpaillage. Cet exemple montre que l'imagerie radar multi-fréquences (C et L) et multi-polarisations (HH et HV) donne des résultats comparable à l'imagerie optique et est bien meilleure que l'imagerie radar en bande C et avec une seule polarisation (RADARSAT par exemple). Ce site d'orpaillage est bien répertorié dans la région d'Approuague - Montagne de Kaw comme étant un site d'activité ancien (antérieur à 1994), échelle ~ 1:100 000.



**Fig. 9** Exemple de contrôle d'une concession légale dans la région de Paul Isnard (S1). La comparaison entre l'imagerie satellitaire et la carte des permis montre que la zone exploitée est bien supérieure à celle autorisée (en jaune-rouge).



**Fig. 10** Exemple de contrôle d'une concession légale dans la région de Saül (S2). La comparaison entre l'imagerie satellitaire et la carte des permis montre que la zone exploitée est bien supérieure à celle autorisée (en cyan-bleu).

LANDSAT - 26/09/2002 - RGB=PIR, Rouge, Vert

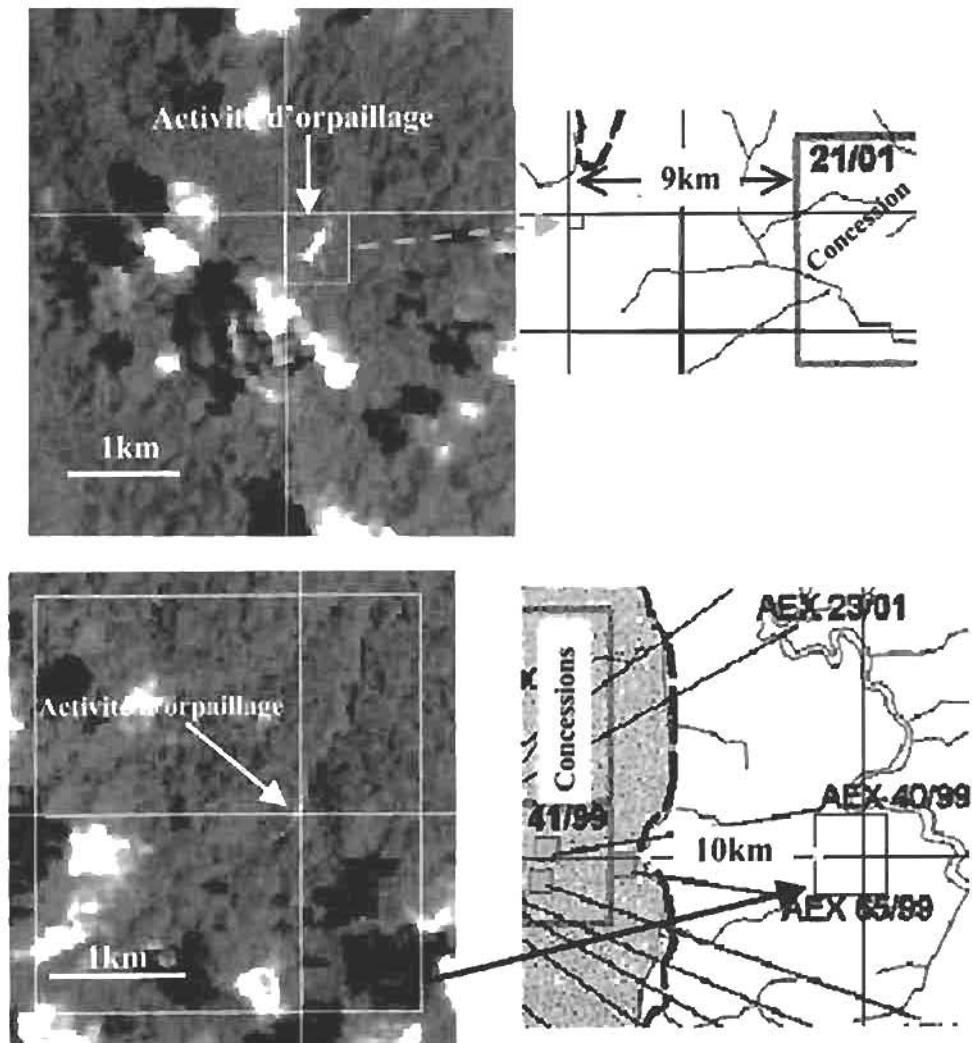


Fig. 11 Comparaison entre les zones d'orpaillage non répertoriées, détectées par LANDSAT, et la carte des permis plus proches dans la région de Paul Isnard (S1). Les deux zones sont à environ 10km des exploitations légales les plus proches.

## Apport de l'Imagerie Spatiale Optique et Radar pour la Cartographie des Bancs de Vase en Guyane Française

N. Baghdadi, A. David, C. Oliveros

BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 3 avenue C. Guillemin  
B.P. 6009 - 45060 Orléans cedex 2, France  
Tel : 02 38 64 32 02 - Fax: 02 38 64 36 89  
E-mail: n.baghdadi@brgm.fr

N. Gratiot

Institut de Recherche pour le Développement,  
165 Route de Montabo, 97323 Cayenne, Guyane

**Résumé :** Le déplacement des bancs de vase en Guyane a un impact important sur l'économie régionale. Aussi, la recherche d'outils permettant la cartographie des bancs présente un grand intérêt. Ceci se traduit par la détection en mer des bancs de vase qui viennent perturber l'accès aux chenaux (ports) ce qui constitue un gêne pour la navigation. Des images satellitaires radar et optique, acquises sur la Guyane française entre 2001 et 2003, ont été analysées pour examiner leurs apports à la détection des bancs de vase. Des mesures bathymétriques ont également été effectuées à des dates proches d'acquisitions satellitaires. La relation entre bathymétrie et information satellitaire a également été étudiée. Les résultats montrent que les bancs de vase émergés ou immergés sous une faible couche d'eau (quelques dizaines de centimètres au maximum) sont facilement détectables sur les images. Les images optiques et radar ont un apport comparable pour la cartographie des bancs. Les images radar à faible angle d'incidence permettent une meilleure détection des bancs de vase comparativement à celles à fort angle d'incidence. Une faible dépendance est observée entre le signal radar et la profondeur de l'eau si cette dernière est inférieure à environ 30 cm. Au-delà de ce seuil, le signal radar devient indépendant de la profondeur de l'eau. Cependant, des relations bien plus nettes ont été obtenues pour les faibles profondeurs (<30 cm) entre la radiométrie optique et la hauteur d'eau dans les bandes du MIR (Moyen InfraRouge) et du PIR (Proche InfraRouge). Cette étude a également mis en évidence l'évolution rapide du trait de côte en Guyane et la possibilité de suivre cette évolution grâce aux images radar.

**Mots-clés :** Bancs de vase, Imagerie Satellitaire radar et optique, Bathymétrie, Guyane Française.

**Abstract :** Potential of optical and radar satellite imagery for mudbank monitoring in French Guiana. The constant migration of mudbanks in French Guiana has an enormous impact on national economy, which has led to a great local interest in finding tools that can be used for mudbank monitoring. This involves the ability to detect submarine mudbanks that interfere with port access and impede navigation. Radar and optical satellite images of French Guiana, acquired between 2001 and 2003, have been analysed and compared so as to assess their potential in mudbank monitoring. Bathymetric data were also recorded at times similar to those of satellite acquisition, which enabled a comparative study between bathymetry and satellite data. The mudbanks that were either emerged or under a shallow layer of water (a few tens of centimetres at the most) are easily detectable on the images, bath radar and optical images showing a similar degree of potential for mudbank monitoring. The mudbanks are more easily detected on low-incidence radar images than on high-incidence ones. A slight dependence is noted between the radar signal and water depth where the latter is less than some 30 cm. For deeper waters, however, the radar signal becomes independent of water depth. Much clearer trends are observed for shallower waters (< 30 cm) between the optical images and water depth using MIR (Mid InfraRed) and NIR (Near InfraRed) bands. The results also revealed the rapid coastline changes occurring in French Guiana and the possibility of monitoring those using radar images.

**Keywords :** Mudbank, Optical and radar satellite imagery, Bathymetry, French Guiana.



## 1. Introduction

Par sa situation géographique, au nord-ouest de l'embouchure de l'Amazone (Cap Orange), et compte tenu de la circulation océanique côtière, le littoral guyanais présente de fortes évolutions morphologiques avec des phases alternatives d'accrétion et d'érosion en relation avec le déplacement des bancs de vase. La dynamique sédimentaire de la côte guyanaise est gouvernée par :

- Le fleuve Amazone qui constitue plus de 90% du stock sédimentaire transporté le long de la côte des Guyanes. Plus d'un milliard de tonnes de sédiments sont drainés annuellement sur le bassin Amazonien et rejetés à la mer [Eisma et al., 1991]. La grande majorité de ces matériaux se dépose immédiatement dans l'embouchure du fleuve mais 15 à 20% vient participer à la dynamique sédimentaire de la côte des Guyanes [Wells et Coleman, 1981]. Le transport s'effectue ensuite pour part égale sous forme de bancs de vase (environ  $10^6$  tonnes/an) et sous forme de suspension diluée (1 à  $1.5 \cdot 10^6$  tonnes/an).
- Le Courant Nord Brésilien qui participe fortement au transport des sédiments en suspension. De direction et de sens sud-est – nord-ouest, il traverse le panache turbide à l'embouchure de l'Amazone et se charge de matières en suspension (MES). Il transporte ensuite ces MES jusque sur la côte guyanaise, où il est relayé par le Courant des Guyanes, de même direction et même sens.
- La houle perpendiculaire au Courant des Guyanes qui prend une large part au système d'accumulations vaseuses et de transport en bancs de vase. Elle crée les conditions nécessaires pour la mobilisation « en masse » des sédiments de fond. Dans une moindre mesure, le Courant des Guyanes joue également un rôle: les bancs sont attaqués et s'érodent du côté sud-est. En revanche, le côté nord-ouest des bancs reste en eaux calmes, ce qui permet une rapide accrétion des sédiments nouvellement arrachés aux bancs [Froidefond et al., 1988].
- Dans une moindre mesure, les courants de marée contribuent au modelage du littoral. La marée présente un signal semi-diurne avec un niveau moyen des basses mers d'environ 1.2 m et un niveau moyen des pleines mers d'environ 3 m. Le marnage (différence de hauteur de la marée entre une pleine mer et une basse mer successives) est de l'ordre de 0.7 mètres en mortes-eaux et atteint 2.5 mètres en vives-eaux. Dans ce contexte mésotidal, l'extension cross-shore de la zone intertidale reste cependant importante et atteint

fréquemment deux à trois kilomètres. Ceci résulte du fait que la pente des zones intertidales des bancs de vase est très faible, de l'ordre de 1/1000ème. Ainsi, une petite diminution de la hauteur d'eau peut donc découvrir de grandes surfaces de banc.

Le déplacement des bancs modifie considérablement la morphologie du littoral guyanais. Le passage successifs de bancs s'accompagne d'avancées et de reculs du trait de côte sur plusieurs centaines de mètres [Allard, 1997 ; Trebossen et al., 2001]. Sous l'action du courant et des houles, Froidefond et al., [1988] estimaient les vitesses de progression des bancs de 320 m/an à 1200 m/an. Les conditions environnementales jouent un rôle important dans la formation et la migration des bancs de vase. Les fortes houles générées de janvier à mai, pendant les saisons des pluies, impliquent une phase active et rapide de migration des bancs. Le forçage des houles se traduit souvent par une accumulation de vase fluide en avant du banc pour former des « lacs de vase » [Baghdadi et al., 2004]. Les « lacs de vase » sont caractérisés par une surface très lisse du fait de la très grande viscosité de la crème de vase qui les constituent. Ils peuvent se désolidariser du banc et être transportés sur plusieurs kilomètres tout en conservant leur identité. La diminution du forçage océanique (courant et houle) de juin à décembre, pendant la saison sèche, favorise la structuration et la consolidation de la partie intertidale des bancs. Les bancs peuvent s'étendre sur 20 à 35 km le long des côtes et se prolonger vers le large jusqu'aux isobathes – 15m, soit à une distance d'environ 20 km de la côte. Ils sont constitués d'entités morphologiques hétérogènes, à savoir : la jeune mangrove côtière ; la zone intertidale constituée de vase nue émergée à marée basse et la zone subtidale, toujours immergée. Le trait de côte est défini par la ligne frontière entre la mangrove mature et la frange océanique.

La zone intertidale présente différents niveaux de structuration. Sa partie jointive à la côte est constituée d'une accumulation de sédiments plastiques permettant la création de modelés pérennes, notamment sous forme de chenaux de marée et de barres côtières. Elle se caractérise de plus par une colonisation algales puis végétale. Cette partie qui reste en place durant la migration du banc est dénommée slikke (zone de vase nue soumise au balancement des marées). La frange extérieure de la zone intertidale forme une ceinture de vase nue faiblement consolidée et donc encore mobilisable. La nature des parties subtidales reste mal connue.

Elle est principalement identifiable par son action d'amortissement de la houle incidente.

Les zones d'interbanc sont, quant à elles, caractérisées par le creusement en dents de scie de la ligne de rivage. L'absence de vase meuble conduit à un amortissement moindre de la houle qui se propage jusqu'à la côte. Son déferlement contribue au recul de la ligne de rivage avec formation de micro falaises. Les arbres situés dans la frange d'érosion sont déracinés. Cette frange présente un talus d'érosion taillé dans la vase consolidée et en contact avec la mer.

Deux entités morphologiques similaires aux slikkes peuvent être observées en zone d'interbanc : les flèches vaseuses et les platiers vaseux. Les flèches vaseuses résultent du piégeage des sédiments en transit à proximité des estuaires. Du fait de la direction de la dérive littorale sur le plateau des Guyanes, ces flèches se forment généralement sur la rive droite des embouchures. Les platiers vaseux résultent quant à eux du piégeage des sédiments par des singularités du trait de côte telles que les anses et les caps.

Les phases successives de bancs de vase et d'interbancs entraînent des évolutions rapides du paysage littoral (trait de côte et bathymétrie de petits fonds) et constituent des obstacles à la navigation. La rapidité des évolutions provoque de réels problèmes pour la gestion de la zone côtière. Pêche, transport maritime, et tourisme doivent s'adapter en continu à ces évolutions. Toutefois, ce sont surtout les implications sur les activités portuaires qui sensibilisent le plus les autorités territoriales compte tenu de leur fort impact économique. En effet l'envasement des chenaux d'accès des ports de Cayenne (capitale économique) et Kourou (centre spatial) implique l'intervention fréquentes des dragues afin d'assurer une navigation normale des bateaux de commerce. Ces interventions quotidiennes sont très onéreuses. La connaissance de l'état d'envasement des chenaux de navigation constitue une préoccupation majeure qui est satisfaite aujourd'hui par un suivi bathymétrique par écho sondeur réalisé à intervalle régulier. Ces opérations lourdes à mettre en œuvre, seraient facilitées et la planification optimisée par une localisation préalable et rapide des bancs. De la même façon, il peut être fondamental, en particulier en période d'envasement et d'érosion des côtes, de pouvoir suivre l'évolution des bancs de vase et de réaliser leur cartographie sur toute la région concernée. La mise en place d'un suivi via les images satellitaires faciliterait la tâche des

gestionnaires et constituerait un outil efficace d'aide à la décision. La télédétection spatiale permet d'acquérir des données d'observation de la terre de façon répétitive, programmable et relativement peu onéreuse.

Sur la zone d'étude, située entre la Pointe de Béhague et Kourou, on comptait en mars 2003 quatre bancs de vase de différentes tailles et un lac de vase (cf. Figure 1).

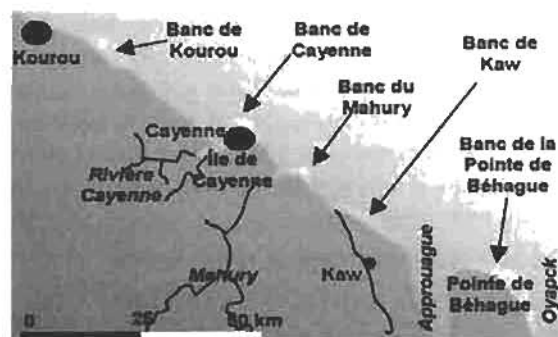


Fig. 1 Bancs repérés en mars 2003 entre le fleuve Oyapok et Kourou.

Compte tenu du climat équatorial humide qui règne dans cette région, l'utilisation des images optiques est problématique à cause de la présence très fréquente de nuages. Ainsi, il est en général difficile d'observer les bancs par imagerie satellitaire optique pendant la saison des pluies, alors que le forçage océanique est le plus fort. Les capteurs radar permettent de s'affranchir des contraintes météorologiques, ce qui présente un grand avantage lorsque les observations sont impératives quelle que soit la saison. Concernant la partie immergée des bancs de vase, les images radar qui sont très sensibles à la rugosité de surface, sont susceptibles de traduire leur présence considérant les deux hypothèses suivantes :

- L'interaction du fond vaseux avec les ondes de surface océaniques (houle formée, mer du vent) est susceptible de modifier la rugosité de surface et par conséquent, la rétrodiffusion du signal radar puisque cette dernière augmente avec la rugosité [Baghdadi et al., 2002 ; Rakotoarivony et al., 1996]. Bien que les lois physiques régissant l'interaction des vagues avec les bancs de vases restent mal connues, l'influence des fonds sera d'autant plus marquée que la profondeur d'eau sera faible vis-à-vis de la longueur d'onde des houles et de leur amplitude. Selon le degré de viscosité et d'élasticité du sédiment de fond,

l'interaction de la houle avec le banc peut se traduire par un amortissement complet des houles ou par leur déferlement. Ces deux phénomènes modifient l'état de surface de la mer, d'où une signature différente dans les images radar. Le premier phénomène (amortissement) rend la surface de l'eau lisse, ce qui se traduit par un coefficient de rétrodiffusion faible. Le second phénomène (déferlement) est détectable sur les images sous la forme d'un « front » qui marque cette discontinuité [Vogelzang et al., 1997].

- La très forte charge solide de l'eau (vases fluides) induite par l'interaction de la partie sommitale du banc avec la houle et le courant tend à atténuer les clapots par modification de la capillarité, ce qui pourrait se traduire par une rétrodiffusion plus faible.

L'objectif principal de cette étude est de tester le potentiel des images RADARSAT, en relation avec les images optiques SPOT et LANDSAT, pour la détection et la cartographie des bancs de vase. Des images acquises en 2002 et 2003 ont été étudiées pour des paramètres d'acquisitions et des conditions de marée variables. Les images radar ont été comparées aux images optiques et aux données bathymétriques. L'étude permet de montrer l'apport qu'il est actuellement légitime d'attendre des outils de télédétection au niveau de la cartographie des bancs de vase.

## 2. Description des données utilisées

### 2.1 Images satellitaires

Des images radar (RADARSAT) et optique (SPOT et LANDSAT) ont été acquises entre 2001 et 2003 pour étudier la potentialité des images satellitaires quant à la détection des bancs de vase et leur suivi. Le tableau 1 récapitule les caractéristiques des images.

Quelques pré-traitements ont été réalisés sur les images afin de les rendre exploitables pour l'analyse thématique. Dans un premier temps, les images radar ont été calibrées radiométriquement, en transformant l'amplitude du signal (compte numérique) en coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma_0$ ). Le géocodage des images radar qui consiste à corriger les déformations géométriques dues aux reliefs n'a pas été réalisé. En effet, ce traitement lourd (nécessitant un Modèle Numérique de Terrain) peut être évité dans les régions à morphologie plane où les distorsions sont faibles, ce qui est le cas dans la zone côtière.

Ensuite, les images radar et optique ont été géoréférencées dans le système géodésique

Guyanaïsi CSG67 à l'aide des cartes topographiques de l'IGN au 1 : 25.000 disponibles sur les régions côtières.

### 2.2 Données terrain

Pour étudier la relation entre la hauteur d'eau et l'information satellitaire, des points de bathymétrie ont été relevés durant la campagne de terrain de mars-avril 2003 (cf. Tableau 2). Ces levés ont été réalisés à des dates proches de l'acquisition des images SPOT du 16/03/2003 et RADARSAT du 25/03/2003.

Les coordonnées planimétriques des points de bathymétrie ont été levés par GPS portatif avec une précision d'environ 15 m. Ces levés sont réalisés dans les systèmes WGS84 et CSG67.

Tableau 2. Description des données bathymétriques

Date	Sites	Nbre de points	Autres mesures
31-03-03	Kourou	76	Concentrations en MES Observations terrain
01-04-03	Cayenne Mahury	68	
03-04-03	Kaw	120	

Les mesures de bathymétrie, réalisées dans la zone intertidale, ont été obtenues à partir d'une embarcation légère par levé au plomb de sonde et par échosondeur 200kHz. La comparaison des deux méthodes de mesures permet de caractériser l'épaisseur de crème de vase. En effet, l'interface eau chargée-crème de vase (appelée lutocline) est suffisamment marquée pour produire l'écho principal du signal acoustique émis à 200kHz tandis que la densité du plomb de sonde (calibrée à 1.27) lui permet de traverser la couche de crème de vase jusqu'à des fonds plus consolidés.

Les mesures bathymétriques vont permettre d'une part, de confirmer ou d'infirmer les conclusions issues de la photo-interprétation et d'autre part, de déterminer s'il existe une relation entre les réponses satellitaires (optique et radar) et la profondeur des bancs. L'incertitude sur la mesure bathymétrique résulte de celle issue des données des marégraphes et de la mesure de profondeur in situ. Elle est estimée à une vingtaine de centimètres.

## 3. Analyse des images radar

### 3.1 Interprétation

La photo-interprétation des images radar a été

réalisée conjointement avec les observations issues de nos campagnes de terrain.

Différents critères ont permis de réaliser l'interprétation des images, notamment la radiométrie (teinte) et la texture des objets (la forme) ainsi que leur position géographique.

L'interprétation des images radar est réalisée dans un premier temps de manière strictement visuelle, en se basant sur une bonne connaissance du terrain. Nous utilisons les outils classiques de rehaussement du contraste, sur l'ensemble de l'image ou sur des régions d'intérêt.

Nous avons ainsi pu déterminer plusieurs classes d'objets identifiables sur l'imagerie radar : les lacs de vase, les barres vaseuses, les parties émergées et faiblement immergées des bancs de vase (vasières), et les micro-reliefs. Tous ces objets peuvent être observés sur la plupart des images radar disponibles. L'image RADARSAT du 14 novembre 2002 a été choisie pour sa qualité pour présenter notre interprétation visuelle des images radar (cf. Figure 2).

#### *L'eau du large et la houle*

Le signal radar rétrodiffusé par l'eau est le résultat de la diffusion de Bragg. Les conditions de vent et les courants modulent la diffusion. En certains endroits, des éléments océaniques sont visibles là où la diffusion de Bragg est très variable. On peut constater des variations du ton de l'eau comme c'est le cas dans le fleuve Approuague par exemple. La zone de faible radiométrie peut correspondre à une zone de faible vent. De même, on peut observer la houle au large (cf. Figure 2). Cette observation nette est rare sur les images radar. En effet, la houle en Guyane est en général de direction nord-est, alors que la visée de RADARSAT est orientée à 80° ou 280° (en orbite ascendante ou descendante). Dans les deux cas, la configuration n'est pas optimale pour observer la houle.

La houle orientée d'environ 120° est alors observée sous un angle faible, entre 20° et 40° respectivement en mode descendant et ascendant. On constate également que la houle n'est visible qu'au large, là où elle a une forte amplitude.

#### *Parties faiblement immergées des bancs*

Une partie des bancs a une radiométrie radar très faible, et apparaît en noir sur les images radar. Il s'agit de la partie faiblement immergée des bancs de vase (Figure 3). Cette faible radiométrie (de -21dB à -25dB) est due à la réflexion quasi spéculaire du signal radar sur la surface lisse de l'eau.

L'observation de terrain reportée sur la série de photos de la Figure 4a montre que lorsque la profondeur d'eau n'excède pas quelques dizaines de centimètres, l'interaction du banc avec les vagues tend à supprimer les ondes capillaires. Cette variation d'état de la surface de l'eau se traduit sur les images radar : l'eau calme se comporte comme un miroir et la rétrodiffusion est très faible (réflexion quasispéculaire).

#### *Parties émergées des bancs*

Sur les images radar, on observe également la partie émergée des bancs ayant en général une radiométrie forte. Les observations réalisées sur le terrain mettent en évidence l'influence de la forte rugosité de surface sur l'augmentation de la radiométrie. Les parties rugueuses sont donc imagées comme des zones claires (cf. Figure 5). Certaines zones émergées ont une rugosité moyenne et possèdent un coefficient de rétrodiffusion variant entre -13dB et -21dB pour RADARSAT à 28°. D'autres zones émergées sont très rugueuses et ont un coefficient de rétrodiffusion de -4dB à -9dB.

Comme on peut le constater sur l'image radar (Figure 5), il est difficile de faire la différence entre les bancs de vase émergés et la mangrove. La distinction peut se faire grâce à la différence de texture de ces deux entités. En effet, la mangrove est un peu plus homogène que les bancs émergés. Cependant, cette faible différence ne permet pas de dire si un banc est colonisé ou non par la mangrove, et rend la délimitation de la côte difficile.

#### *Lacs de vase*

Pendant la campagne de terrain de mars 2003, on a relevé la présence de plusieurs lacs de vase, constitués de vase fluide concentrée (de 350 à 450 g/l). La forte viscosité de la crème de vase qui les constituent dissipe les ondes capillaires ce qui rend la surface des lacs de vase très lisse et facilement détectable (cf. Figure 6). Le signal radar est réfléchi de façon spéculaire. Les limites du lac de vase sont nettes.

Cependant, il est parfois difficile de faire la différence par simple photo-interprétation entre les lacs de vase et certains bancs immergés. Le coefficient de rétrodiffusion de ces deux entités étant très souvent du même ordre de grandeur. La discrimination de ces deux entités s'appuie sur les connaissances de la structure des bancs : les lacs de vase sont facilement détectés sur l'image radar même s'ils ne sont pas protégés de la houle. La crème de

vase s'accumule en aval du banc (au nord-ouest) et sur sa partie extérieure, côté mer. Les lacs de vase donnent l'impression de se rajouter au banc existant. La partie faiblement immergée des bancs n'est quant à elle visible que si elle est protégée de la houle. Cette entité n'est observée qu'à l'intérieur du banc, ou derrière une barre vaseuse et fait partie intégrante des bancs.

### *Barres vaseuses et micro-reliefs*

Enfin, on observe la formation de barres vaseuses et de micro-reliefs. La barre vaseuse se présente comme une flèche d'accumulation de vase de faible altitude relative. Elle peut se développer sur plusieurs kilomètres. A basse mer, elle reste séparée de la côte par une zone faiblement immergée (cf. Figure 7). Les barres se forment sous l'action de la houle par liquéfaction, transport puis accumulation de la vase en zone proche subtidale. Elles constituent une barrière contre la houle. Constituant une partie émergée particulière, les barres vaseuses possèdent une rétrodiffusion très forte.

Sur la plage de Rémire-Montjoly (Cayenne), nous avons observé une micro-falaise immergée d'environ 30 cm de haut (mesurée sur le terrain). Sur l'image radar, elle est détectée par la présence d'un front brillant qui doit correspondre aux déferlements des vagues sur un faible fond. La rétrodiffusion radar au niveau des micro-reliefs est forte.

### **3.2 Influence de la hauteur d'eau sur le signal radar**

L'action des bancs sur l'état de la mer (vagues) est directement lié à la hauteur de l'eau. Les différences constatées entre deux images sont imputables aux nombreux facteurs variables entre elles : les paramètres d'acquisition des images, les conditions de mer, l'évolution naturelle des bancs avec le temps, et la hauteur de marée. Pour étudier l'influence propre de la hauteur d'eau, il faut utiliser des images acquises à différents niveaux de marée mais avec des paramètres d'acquisition (angle d'incidence et date d'acquisition) les plus proches possibles.

Les images du 17/07/2002, 03/09/2002 et 14/11/2002 ont été acquises avec des configurations identiques (même angle d'incidence) mais séparées de plusieurs mois (de 2 à 4 mois). La différence des hauteurs de marée est au minimum de 9 cm et au maximum de 24 cm (cf. Tableau 1).

On constate l'influence de la hauteur d'eau en 1A, 1B et 1C de la figure 8. Une partie du banc, immergé en 1A est détectée en 1B et 1C (zones sombres).

De même, on constate des tâches claires en 1B et 1C qui correspondent très probablement aux parties émergées du banc, c'est à dire à ses parties les plus hautes. En 1C, les zones claires qui émergent sont plus nombreuses car la hauteur d'eau est la plus faible. On observe la même progression en 2A, 2B et 2C. La surface 2C est en grande partie émergée alors qu'en 2A, seules les deux petites barres vaseuses restent émergées. Cependant, le banc émergé en 3A le 17/07/2002 (à l'extrémité de la flèche vaseuse) a disparu sur les images du 03/09/2002 et 14/11/2002. La hauteur d'eau étant la plus importante le 17/07/2002, on peut conclure que cette variation est due à l'évolution intrinsèque du banc.

### **3.3 Relation entre signal radar et angle d'incidence**

La détection des bancs de vase est fortement liée à l'angle d'incidence ( $\theta$ ). Baghdadi et al., [2004] ont constaté une meilleure discrimination des zones de faibles rétrodiffusion radar pour des faibles angles d'incidence. La Figure 9 confirme cette conclusion. Ainsi, les différentes structures de la frange intertidale sont mieux détectées pour les images acquises avec un angle d'incidence de 28°. Pour les images acquises avec des forts angles d'incidence, on n'observe au contraire que peu d'informations. Malgré la faible hauteur d'eau de l'image acquise le 20/06/2002 à fort angle d'incidence, le banc est moins visible que sur l'image du 17/07/2002 acquise à faible incidence et pour une hauteur d'eau supérieure d'une vingtaine de centimètres à celle du 20/06/2002. Les images qui ont été comparées sont acquises à quelques jours d'intervalle seulement. Il est clair que l'évolution journalière des conditions météorologiques peut apporter des différences significatives et limite les possibilités de comparaison stricte du niveau de signal RADAR rétrodiffusé. L'influence de l'angle d'incidence n'a donc pu être établie que d'une manière statistique par inter-comparaison de bon nombre d'images.

Le contraste entre les différents éléments du banc est également meilleur pour un petit angle d'incidence.

La Figure 9 montre une bonne détection des bancs faiblement immergés (zones à radiométrie faible) seulement pour l'image acquise à faible angle d'incidence.

### **3.4 Recommandations concernant l'utilisation des images radar**

L'imagerie radar permet de discriminer différentes entités constitutives des bancs, essentiellement dans

la zone intertidale et proche subtidale par faible profondeur d'eau. Les zones subtidales sous plusieurs mètres d'eau ne présentent pas de signature pouvant être discriminées par l'imagerie radar. Cette observation montre qu'il faut rester très vigilant lors de l'interprétation des images radar et qu'il est nécessaire d'utiliser les valeurs radiométriques pour limiter les ambiguïtés entre les différents états des bancs. Certaines zones émergées ont une rugosité moyenne et possèdent un coefficient de rétrodiffusion variant entre -13dB et -21dB pour RADARSAT à 28°. A titre d'exemple, les zones émergées très rugueuses ont un coefficient de rétrodiffusion entre -4dB et -9dB, et les zones immergées sous une faible couche d'eau et qui sont en général lisses entre -21dB et -25dB.

#### 4. Analyse des images optiques

##### 4.1 Interprétation

Pour le traitement des images optiques multibandes, la première étape consiste à déterminer les bandes spectrales les plus pertinentes pour l'étude des bancs de vases. Les multiples bandes disponibles garantissent une caractérisation précise des objets de l'image par leur seule signature spectrale.

De la même façon que pour les images radar, la photo-interprétation des images optiques est présentée pour une image particulière, l'image LANDSAT du 19/09/2002. Un segment de l'image est présenté sur la Figure 10. Les teintes vert-jaune correspondent à la végétation/mangrove, la teinte violet à l'eau turbide du large, les parties des bancs immergés ont une teinte bleu/vert et les parties émergées ont une teinte jaune/orange.

##### *L'eau du large et la houle*

Des études sont menées actuellement pour établir le lien entre la couleur de l'eau et sa concentration en matières solides dans le cas de forte turbidité [Froidefond et al., 2002 ; Doxaran et al., 2002]. Il en ressort une nette corrélation entre ces deux agents.

Les matières transportées par l'eau sont en général détectées dans les bandes du vert et du jaune. Ce sont les bandes spectrales utilisées pour la détection des MES de couleur jaune à brun [Froidefond et al., 2002]. On observera donc la couleur de l'eau principalement avec les bandes TM2 (vert) et TM3 (rouge).

Dans la bande du PIR, l'eau très turbide est bien détectée à proximité des bancs. Sur l'image du 19/09/2002, on peut observer différentes couleurs de l'eau avec la composition colorée (MIR, PIR, vert)

(cf. Figure 10). Loin au large, l'eau est très sombre car elle ne transporte quasiment pas de sédiments comparativement à l'eau de la côte. Plus près de la côte, l'eau chargée en MES se présente en composition MIR/PIR/vert sous une couleur violette. Cette couleur de l'eau est détectée près des côtes, à l'embouchure de certains fleuves, et à proximité des bancs.

La houle est beaucoup plus nette que sur les images radar, mais elle est rarement visible. Sur toute la base de données optiques, la houle n'est visible que sur une seule image : l'image SPOT 4 du 14/12/2001 (Figure 11). Les crêtes de houle sont très nettes dans toutes les bandes. On remarque aisément l'évolution de la forme de la houle avec celle de la géomorphologie de la côte. Sur cette image, le régime de houle varie avec la profondeur du fond. Derrière la barre vaseuse (vers la côte), l'eau est parfaitement calme. Seules les ondes générées localement par le vent peuvent se propager au-delà de la barre émergée.

##### *Parties immergées des bancs*

Les bandes du MIR (TM5 et TM7) permettent une bonne discrimination des surfaces situées au dessus des parties immergées du banc sous une faible tranche d'eau. Dans les bandes du PIR et du visible, cette détection est plutôt mauvaise car la radiométrie de ces surfaces est du même ordre de grandeur que celle des parties émergées du banc (cf. Figure 12). Dans les bandes du MIR, le banc de vase immergé apparaît en gris foncé alors que le banc émergé apparaît en blanc.

##### *Parties émergées des bancs*

Les bandes du moyen infrarouge (MIR) permettent dans la plupart des cas d'établir la limite eau libre / banc émergé. Cette limite est nette : la réflectance des terres nues émergées est forte (région 4, Figure 12), alors qu'elle est très faible pour l'eau. La végétation a aussi une radiométrie faible dans la bande du MIR. Le MIR peut servir à distinguer les bancs émergés de la végétation et de l'eau.

Dans la partie émergée (région 4), la réponse détectée dans la bande TM2 (vert-jaune) n'est pas homogène : deux barres vaseuses se découpent avec une réflectance très faible en région 5. Cette bande spectrale sert à caractériser les zones humides. Les deux flèches qui apparaissent en noir sur la bande TM2 sont des parties moins humides du banc. Elles appartiennent très probablement à une zone plus haute de la slikke qui est davantage drainée que le

reste du banc lors de la prise d'image. De plus, on remarque sur les autres images satellitaires proches dans le temps que ces zones moins humides sont toujours émergées, jusqu'à un niveau de marée de 2 mètres. Les observations réalisées lors de la campagne de terrain de mars-avril 2003 ont été confrontées à l'image SPOT du 16/03/2003 et permettent de confirmer que cette réflectance particulière n'est pas liée à la présence de végétation pionnière.

#### *Mangrove*

La mangrove a une très forte radiométrie dans la bande du PIR (cf. Figure 12). Cette bande suffit à elle seule à discriminer la végétation du reste. Le NDVI (indice de végétation) permet également une bonne cartographie de la mangrove.

#### *Lacs de vase*

Le lac de vase, observé près de Kaw lors de notre campagne terrain de mars 2003, n'est pas mis en évidence sur l'image SPOT acquise le 16/03/2003. L'image composite (MIR/PIR/Vert) de la Figure 13 pourrait traduire la présence du lac de vase par une zone en vert clair présentant un faible contraste avec les zones turbides extérieures ainsi qu'avec les parties immergées du banc. Le contraste provient de la bande PIR mais reste trop limité pour une discrimination aisée. Quant aux autres bandes spectrales, elles ne permettent pas de détecter les lacs de vase.

### 4.2 Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur l'image LANDSAT du 19/09/2002. Cette analyse a permis de connaître les canaux les plus pertinents pour la cartographie des bancs.

Les résultats obtenus ont révélé que les deux premières composantes principales contiennent respectivement 78.2% et 19.9% de l'information existante sur l'image. La matrice des vecteurs propres montre que toutes les bandes spectrales ont une large contribution dans la première composante des vecteurs propres. Le maximum de l'information est toutefois apporté par les bandes TM5 et TM3. Par ailleurs, la bande TM4 (PIR) est la composante la plus représentée dans le deuxième vecteur propre.

La Figure 14 illustre les différentes composantes principales issues de l'image du 19/09/2002. La première composante présente peu de contraste et ne permet pas une bonne distinction entre objets. Les CP2 et CP4 permettent la distinction non ambiguë de

la végétation avec le banc. La CP3 permet une bonne discrimination des parties émergées et faiblement immergées du banc. Cependant, il y a ambiguïté entre la mangrove et le banc immergé. La CP5 permet une bonne cartographie des parties émergées (teinte claire). La CP6 n'est pas très pertinente pour la cartographie des entités côtières.

### 4.3 Influence de la hauteur d'eau sur l'imagerie optique

Pour étudier le lien entre la hauteur d'eau et la capacité des capteurs optiques à détecter les bancs de vase, nous avons étudié les images de 05/08/2002 et 19/09/2002 (cf. Figure 15). Elles sont distantes de 45 jours et présentent une différence de hauteur de marée d'environ 0.86 m. C'est une différence importante, qui devrait avoir une influence visible sur la détection des bancs. Compte tenu de la pente moyenne des bancs, cette variation de la hauteur d'eau devrait entraîner une extension de la zone émergée de plusieurs centaines de mètres pour l'image du 19/09/2002. Sur l'image du 05/08/2002 (H=2.02 m à Cayenne), on peut constater l'avancée de l'eau (en bleu) sur les zones émergées (en orange) sur l'image du 19/09/2002 (H=1.16 m à Cayenne). La comparaison de ces deux images montre une relation directe entre la détection des parties émergées et faiblement immergées vis-à-vis de la hauteur de marée. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que certains des changements observés entre les deux dates sont dus à l'évolution intrinsèque du banc au cours des 45 jours. L'extension de la partie faiblement immergée (vert foncé) résulte très certainement de la modification de hauteur d'eau tandis que l'apparition de zones d'eau turbide (violet) est plus probablement liée à une modification du forçage océanique. Des mesures de MES réalisées le 05/08/2002 ont en effet mis en évidence, une très faible turbidité (5 mg/l) lié à un forçage océanique très faible.

## 5. Comparaison entre images radar et optiques

### 5.1 Relation entre hauteur d'eau et signal enregistré par les capteurs radar et optiques

Nous avons constaté au cours de la photo interprétation qu'il est préférable d'acquérir les images à de faibles hauteurs d'eau afin de garantir une extension maximale de la partie émergée du banc facilement détectable, ce qui n'est pas le cas des parties immergées. Ces dernières sont difficiles à détecter sur des images optiques dès lors qu'elles se trouvent

sous une certaine tranche d'eau, la reconnaissance du fond étant « masquée » par la forte turbidité de l'eau. Sur les images radar, c'est l'état de la surface de l'eau (forte rugosité) qui ne « trahit » plus la présence de fonds vaseux sous une certaine épaisseur d'eau. Il existe en effet une profondeur limite au-delà de laquelle le banc n'est plus détectable. Nous avons évalué cette limite à une dizaine de centimètres, pour une analyse comprenant l'ensemble des données optiques et radar. Pour certaines images optiques acquises avec des conditions de forçages océaniques faibles, des entités du banc en zone intertidale présentent des signatures pour de profondeur d'eau de plus d'un mètre [Gratiot et al., 2003].

Grâce aux campagnes des levés bathymétriques qui ont été réalisées dans les zones de bancs, nous avons pu déterminer la profondeur d'eau limite pour la détection des parties immergées des bancs.

Les images les plus proches des levés bathymétriques sont l'image RADARSAT du 25/03/2003 et l'image SPOT du 16/03/2003. Nous avons recherché sur ces deux images d'éventuelles correspondances entre la hauteur d'eau et le signal radar d'une part et la hauteur d'eau et la radiométrie optique d'autre part. La profondeur d'eau est obtenue par la différence entre la bathymétrie ramenée au zéro marin et la hauteur d'eau au moment de la prise de vue. Au voisinage de chaque point de mesure bathymétrique, nous avons défini une zone de quelques pixels représentative de ce point. La zone doit être assez petite pour qu'un pixel reste assimilable à la zone du levé bathymétrique, mais aussi contenir suffisamment de pixels pour réduire au mieux le bruit (speckle pour l'image radar). La radiométrie moyenne (digital number) et le coefficient de rétrodiffusion moyen ( $\sigma^{\circ}$ ) ont été obtenus pour chaque zone à partir des images SPOT et RADARSAT.

La Figure 16 montre que le signal radar augmente légèrement avec la profondeur de l'eau pour les zones ayant une profondeur d'eau entre 0 et 0.3 m. Cette relation correspond en partie à ce qui a été observé sur le terrain lors de la campagne de mesures : la surface de l'eau est plus agitée quand la profondeur de l'eau est importante (cf Figure 4). Cependant, la forte corrélation observée sur le terrain entre la rugosité de la surface de l'eau et la profondeur est mal retranscrite par le radar en bande C. La Figure 16 montre un comportement exponentiel entre le  $\sigma^{\circ}$  et la bathymétrie. Baghdadi et al., [2002] observaient sur des terres agricoles une augmentation du signal radar en fonction de la rugosité de surface. Cette augmentation est nette pour des rugosités inférieures ou égales à environ

1.5 cm (écart type des hauteurs). Au-delà de ce seuil de rugosité qui dépend des caractéristiques du capteur (longueur d'onde, polarisation et angle d'incidence), le signal radar devient insensible à la rugosité de surface.

Sur l'image optique, la relation entre la radiométrie et la profondeur des bancs est beaucoup plus claire (Figure 17). On observe une bonne corrélation entre la radiométrie et la profondeur des points de bathymétrie. Les graphiques de la Figure 17 montrent le comportement des quatre bandes XS1 à XS4 de l'image SPOT du 16/03/2003, en fonction de la profondeur du banc.

Dans les bandes XS3 (PIR) et XS4 (MIR), la relation entre la radiométrie et la profondeur de l'eau est très nette. La radiométrie décroît avec la profondeur de l'eau jusqu'à une profondeur d'environ 0.3 m et reste constante au delà de cette valeur. Dans la bande XS1 (vert), on peut voir une faible augmentation de la radiométrie avec la profondeur quand cette dernière est inférieure ou égale à environ 0.2 m. Quant à la bande XS2 (rouge), elle montre pour le site de Kourou une faible décroissance de la radiométrie quand la profondeur de l'eau augmente jusqu'à la valeur d'environ 0.3 m. La courbe obtenue sur Kaw est très bruitée dans la bande XS2.

En conclusion, seules les bandes XS3 (PIR) et XS4 (MIR) sont fortement corrélées à la profondeur des bancs immergés, entre 0 et 0.3 m de profondeur au maximum. Il semble toutefois que la profondeur critique de détection d'entités du bancs au moyen d'images optique et radar puisse être améliorée en prenant en considération la variation d'autres paramètres tels que le forçage océanique et les conditions de marées (vives eaux, mortes eaux).

## 5.2 Capacité de détection des différentes unités morphologiques des bancs de vase

Certaines parties des bancs de vase sont facilement détectables avec l'un ou l'autre des deux systèmes de télédétection (optique ou radar). En effet, des phénomènes affectant la surface de l'eau sont révélateurs de la présence de bancs de vase. Les phénomènes qui traduisent la présence des bancs sont différents. Par imagerie radar, on observe les bancs grâce à une éventuelle modification de la surface de l'eau (diminution/augmentation de la rugosité). Par imagerie optique, on observe la couleur des bancs et de l'eau. Les images optique et radar acquises aux dates les plus proches et avec des hauteurs de marée équivalentes (16/03/03 et 25/03/03) ont été comparées. Voici les conclusions obtenues unité par unité :



- Les lacs de vase sont détectés sur les images radar et ne sont pas faciles à distinguer sur les images optiques. La signature des lacs de vase sur les images optiques est très proche de celle des parties subtidales des bancs ou des bancs immergés.
- La partie subtidale du banc peut s'étendre loin vers le large. La partie proche subtidale (profondeur d'eau n'excédant guère un mètre) peut être partiellement discriminée à partir des images optiques acquises à marée montante avec un faible forçage océanique. Cette discrimination devra être précisée à partir d'études complémentaires. La concentration des MES n'est pas suffisante pour influencer la diffusion de Bragg sur l'image radar. On ne détecte aucune variation du coefficient de rétrodiffusion de l'eau dans les zones où devrait se trouver l'extension subtidale des bancs. Le sens de la marée – déterminant pour la détection des parties subtidales par imagerie optique – ne semble pas avoir d'influence sur l'image radar.
- Les parties faiblement immergées sont détectables par imagerie optique et radar. Sur les images optique, ces zones ont une forte radiométrie dans la bande du PIR et dans le visible. Elles ont une faible radiométrie dans la bande du MIR. Sur les images radar, elles ont un faible coefficient de rétrodiffusion, du même ordre de grandeur que celui des lacs de vase.
- La détection des zones supratidales et slikke par les systèmes optique et radar est aisée. Les zones supratidales sont caractérisées par des surfaces rugueuses, ayant un fort coefficient de rétrodiffusion radar. Des surfaces sèches (plus que toutes les autres parties du banc), ayant une réflectance forte dans la bande du MIR. Elles ont aussi une réflectance faible dans les bandes du vert et du rouge.
- La distinction entre la mangrove et les bancs émergés est très difficile avec les images RADARSAT. En revanche, elle est très facile avec l'imagerie optique.

## 6. Evolution du trait de côte

La cartographie du trait de côte (limite d'émersion) constitue une information importante pour les gestionnaires et les politiques d'aménagement du littoral. Elle est facilitée et accélérée par l'utilisation des données radar en raison des difficultés d'accès au terrain et par le fait qu'elles sont disponibles contrairement aux données optiques quelle que soit la couverture nuageuse. Ainsi, l'utilisation d'images

multidates ERS et RADARSAT permet de réaliser le suivi de l'évolution du trait de côte.

L'évolution du trait de côte est directement lié au cycle d'envasement et d'érosion. Le passage des bancs de vase sur une zone de la côte se traduit par des avancées ou des reculs des terres. La Figure 18 montre les différents sens de déplacements côtiers près du Mahury entre 1997 et 2003. Les images radar utilisées ont été choisies avec une faible hauteur d'eau et du même ordre de grandeur pour toutes les images (entre 1.46 m et 1.62 m). Certaines images utilisées sont issues des archives BRGM (ERS et RADARSAT). Entre 1997 et 2000, la région est en période d'envasement. L'avancée du trait de côte entre ces deux dates est assez importante, de l'ordre de 1 km au maximum. A partir de 2001, les variations du trait de côte sont mineures à cet endroit. En 1997, la côte est découpée en dents de scies caractéristiques des zones en érosion [Froidefond et al., 1988]. Dès 2002 en revanche, la côte est beaucoup moins découpée, car elle se trouve dans une période d'engraissement. Cette Figure montre que le radar est très adapté à la cartographie et à la mise à jour du trait de côte.

## 7. Conclusions et perspectives

L'impact économique négatif qu'induit le déplacement des bancs de vase sur le littoral guyanais justifie la recherche de moyens de détection qui permettraient d'en suivre le déplacement en temps quasi réel. La détection de variations de la rugosité de surface des zones proche subtidales et intertidales, au moyen d'images radar, est apparue intéressante dans la mesure où ces données sont indifférentes à la présence de nuages. Cette variation de rugosité est susceptible de correspondre à une augmentation de la rugosité liée au déferlement des vagues causée par la présence du banc, ou à une diminution liée à un amortissement des vagues. Dans un tel contexte, les images satellitaires peuvent constituer un outil privilégié d'acquisition d'information actualisée et répétitive. Grâce à une programmation pertinente, les images spatiales pourraient permettre de constituer des bases de données indispensables à la gestion des zones côtières.

L'objectif de cette étude était d'étudier le potentiel des images satellitaires pour la cartographie de l'évolution de l'environnement côtier en contexte climatique équatorial, en privilégiant l'établissement d'un diagnostic rapide, pour proposer un outil opérationnel de localisation des bancs de vase. Pour une meilleure détection des bancs de vase,

l'acquisition des images doit se faire à des dates où la hauteur d'eau est faible.

L'utilisation d'images radar à faibles angles d'incidence permet une meilleure cartographie des bancs de vase. De même, les résultats montrent un intérêt complémentaire quant à l'utilisation des images radar et optique pour la cartographie des bancs de vase. Certains objets sont mieux détectés avec l'imagerie radar et d'autres avec l'imagerie optique. A l'heure actuelle, les images optiques et radar s'avèrent inefficace pour la discrimination de la limite des bancs dans les zones subtidales (plusieurs mètres de profondeur). Les analyses réalisées sur les images radar et optique les plus proches de la période du relevé bathymétrique, a permis d'établir une relation entre l'imagerie radar et optique et la profondeur de l'eau si cette dernière est comprise entre 0 et 30 cm. La relation obtenue à partir de l'image optique (bandes MIR et PIR) est plus nette que celle obtenue avec l'image radar. Dans le futur, des mesures bathymétriques pour les faibles profondeurs seront nécessaires pour mieux analyser le comportement du signal radar ou optique en fonction de la bathymétrie. Ces mesures seront réalisées à marée haute avec un écho sondeur 200 kHz et un plomb de sonde.

Si l'utilisation de l'imagerie satellitaire s'avère rapide et relativement peu onéreuse au regard des méthodes de terrain conventionnelles, elle ne rencontre toutefois plus de limite comme celle des anciens capteurs dont la plus importante correspondait à la difficulté d'obtenir des images en temps réel (il était impossible de programmer des prises de vue sur ERS par exemple) Le nouveau capteur radar ASAR d'ENVISAT est multipolarisations et celui qui sera lancé prochainement est polarimétrique (RADAR-SAT-2), ce qui va sans doute permettre une meilleure caractérisation du milieu côtier.

## Références

- Allard J. F. (1997) Cartographie de l'évolution du trait de côte en Guyane de 1950 à 1994, *Rapport BRGM, R-39506*.
- Baghdadi N., King C., Bourguignon A., and Remond A. (2002) Potential of ERS and RADARSAT data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no 17, pp. 3427-3442.
- Baghdadi N., Gratiot N., Lefebvre J.P., Oliveros C., and Bourguignon A., (2004) Coastline and mudbank monitoring in French Guiana : Contributions of radar and optical satellite imagery.

- Doxaran D., Froidefond J.M., Lavender S., Castaing P., (2002) Spectral signature of highly turbid waters: application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations, *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, no. 1, pp.149-161.
- Eisma D., Augustinus P., and Alexander C. (1991) Recent and sub-recent changes in the dispersal of Amazon mud, *Netherlands Journal of Sea Research*, vol. 28, pp. 181-192.
- Froidefond J.M., Gardel L., Guiral D., Parra M., and Ternon J.F. (2002) Spectral remote sensing reflectances of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence, *Remote Sensing of Environment*, no. 80, pp. 225-232.
- Froidefond J.M., Pujos M. and André X. (1988) Migration of mud banks and changing coastline in French Guiana, *Marine Geology*, vol. 4, pp. 19-30.
- Gratiot N., Lefebvre J.P., Baghdadi N. and Oliveros C. (2003) Structuration des bancs de vase : rôle des barres vaseuses et hypothèses de fonctionnement, *9<sup>ème</sup> congrès de l'Association des Sédimentologues Français, 14-16 octobre 2003, Bordeaux*.
- Trebossen H., Rudant J.P., and Classeau N., (2001) Problèmes posés par la mise à jour de la cartographie marine en zone tropicale humide à partir de données radar à synthèse d'ouverture. Exemples en Guyane Française et au Cameroun, *Bulletin de la SFPT*, no 161, pp. 29-39.
- Rakotoarivony L., Taconet O., Vidal-Madjar D., Bellemain P., and Benallègue M. (1996) Radar backscattering over agricultural bare soils, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 10, no 2, pp. 187-209.
- Vogelzang J., Ruddick K.G., and Moens J.B. (1997) On the signatures of river outflow fronts in radar imagery, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no 16, pp. 3479-3505.
- Wells J.T., and Coleman J.M. (1981) Physical processes and fine-grained sediment dynamics, coast of Surinam, South America, *Journal Sediment. Petrol.*, vol. 51, pp. 1053-1068.

## Remerciements

Cet article a été réalisé dans le cadre d'une étude financée par la direction de la recherche du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et le PNEC (Programme National sur l'Environnement Côtier). Les données marégraphiques ont été fournies par le service hydrographique de la ODE-Guyane.

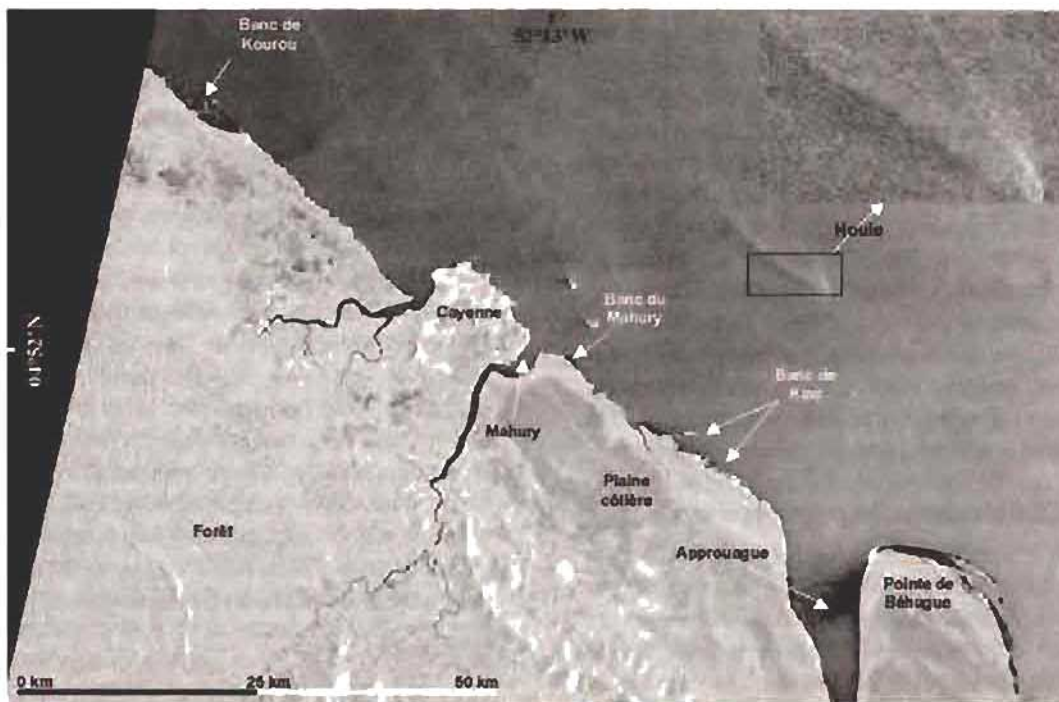


Fig. 2 Image RADARSAT du 14/11/2002 (mode descendant :  $\theta = 28^\circ$  ;  $H = 1.46$  m à Kourou et 1.57 m à Cayenne), échelle - 1:700 000.



Fig. 3 Exemple d'un banc immergé (banc de Kourou), échelle - 1:100 000

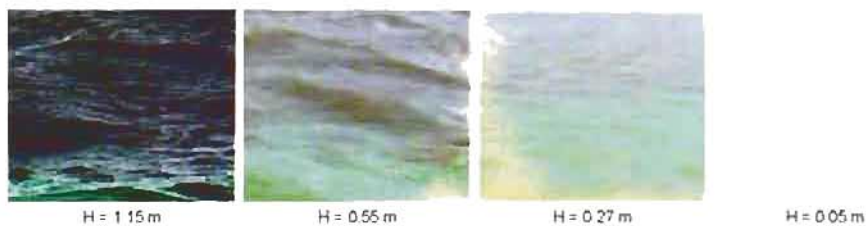


Fig. 4 Influence de la hauteur d'eau (H) sur l'amplitude des vagues capillaires. Les photos ont été prises le 1<sup>er</sup> avril 2003, à proximité du banc de Kourou.

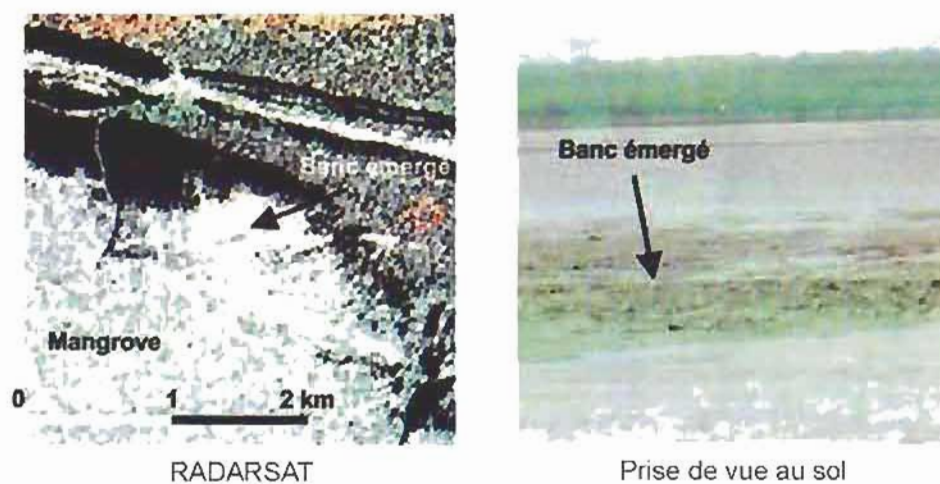


Fig. 5 Exemple d'un banc émergé sur l'image RADARSAT du 14/11/2002 (banc de Kaw).

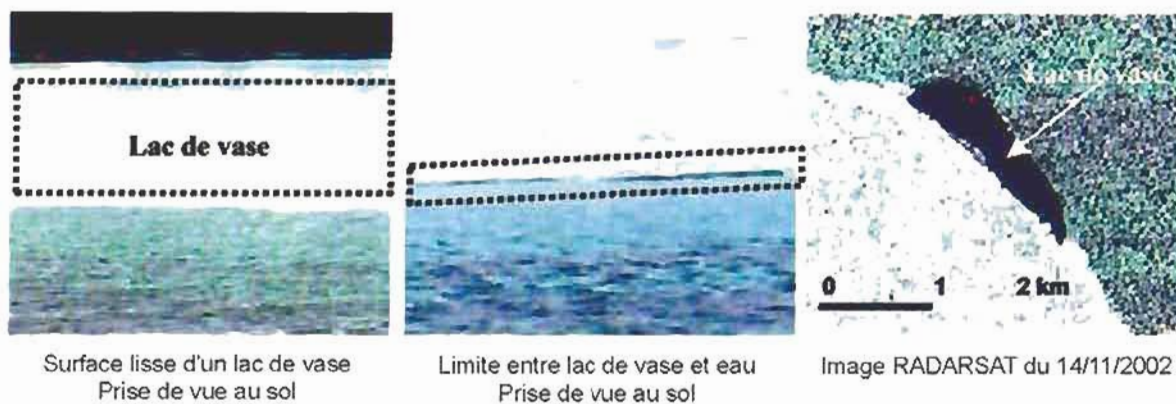


Fig. 6 Exemple de lac de vase près du Mahury.

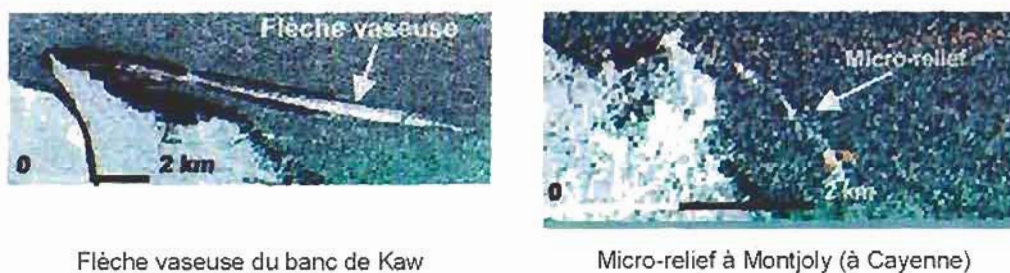


Fig. 7 Exemple d'une flèche vaseuse et d'un micro-relief.

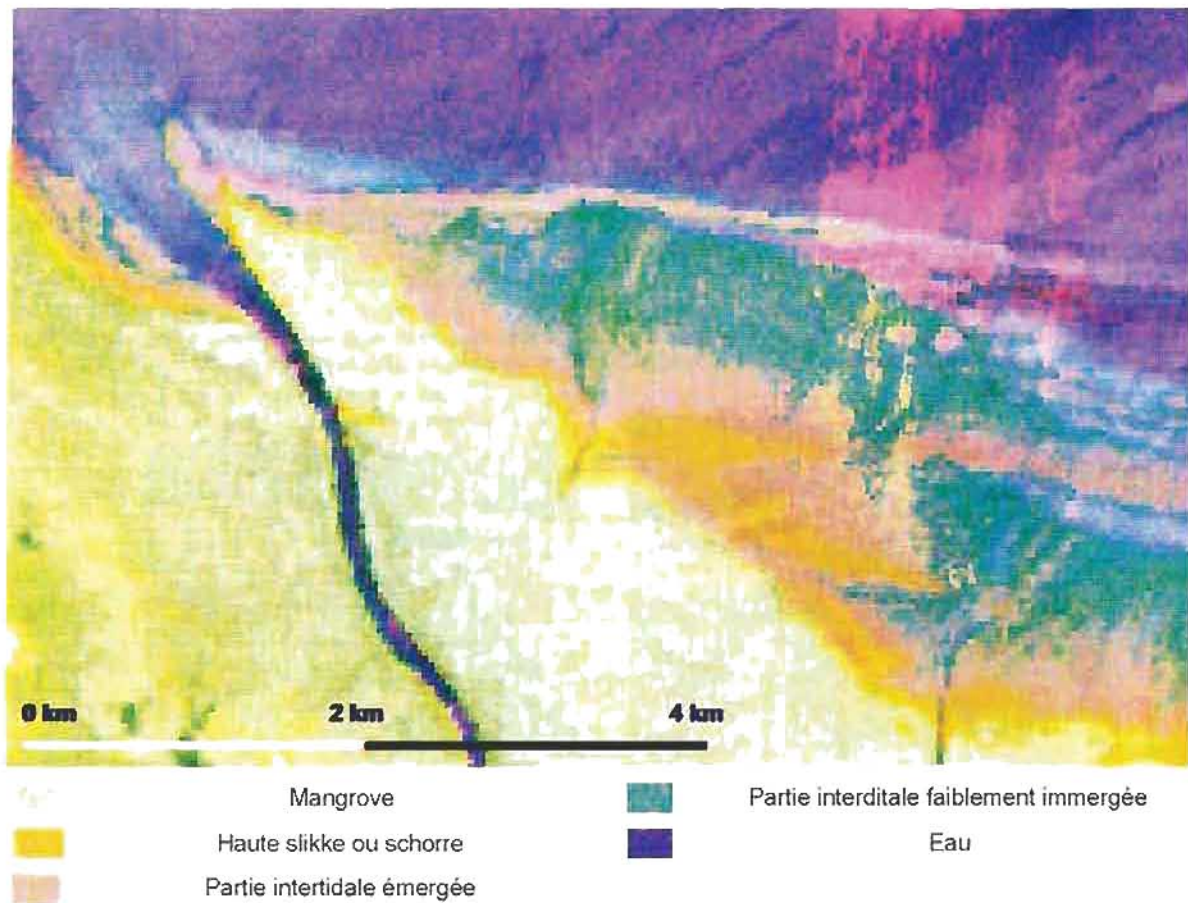


Fig. 10 Interprétation d'un segment de l'image LANDSAT du 19/09/2002 (MIR/PIR/Vert)  
Banc de Kaw, H=1.16 m, échelle ~ 1:45 000.



Fig. 11 Propagation de la houle dans la région de Kaw observée sur l'image SPOT du 14/12/2001  
(bande XS1), échelle ~ 1:100 000.

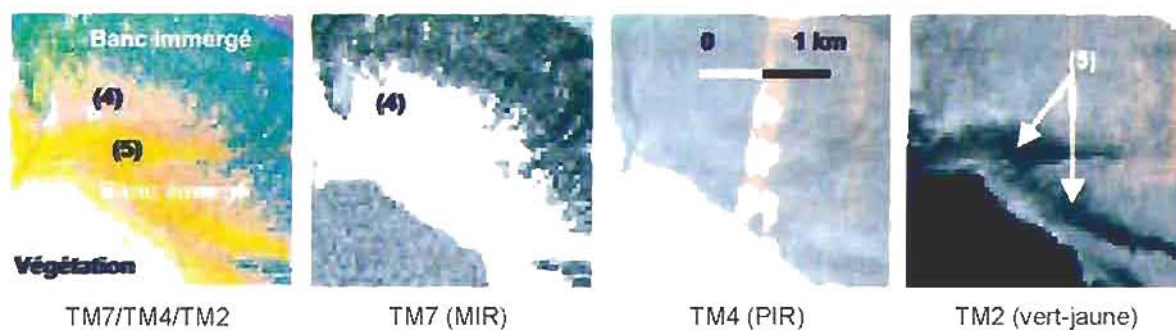


Fig. 12 Exemple de bancs émergés et immergés sur l'image LANDSAT du 19/09/2002  
(banc de Kaw, H=1.16 m), échelle ~ 1:50 000.

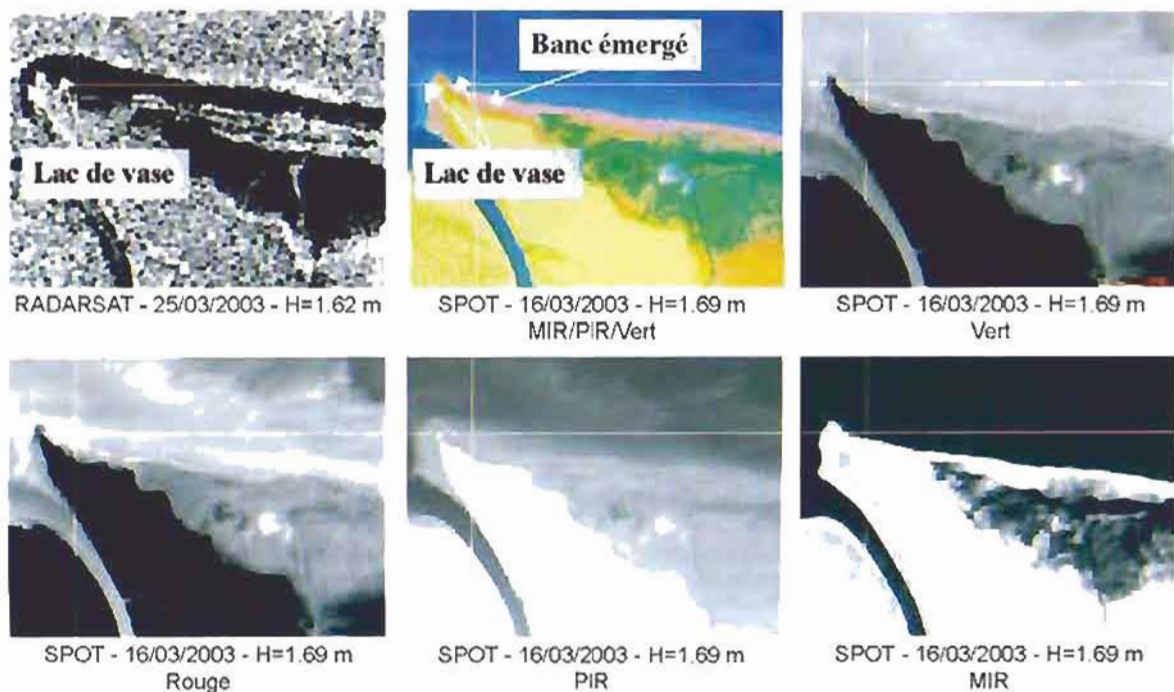


Fig. 13 Exemple d'un lac de vase sur l'image SPOT de 16/03/2003 (banc de Kaw), échelle ~ 1:65 000.

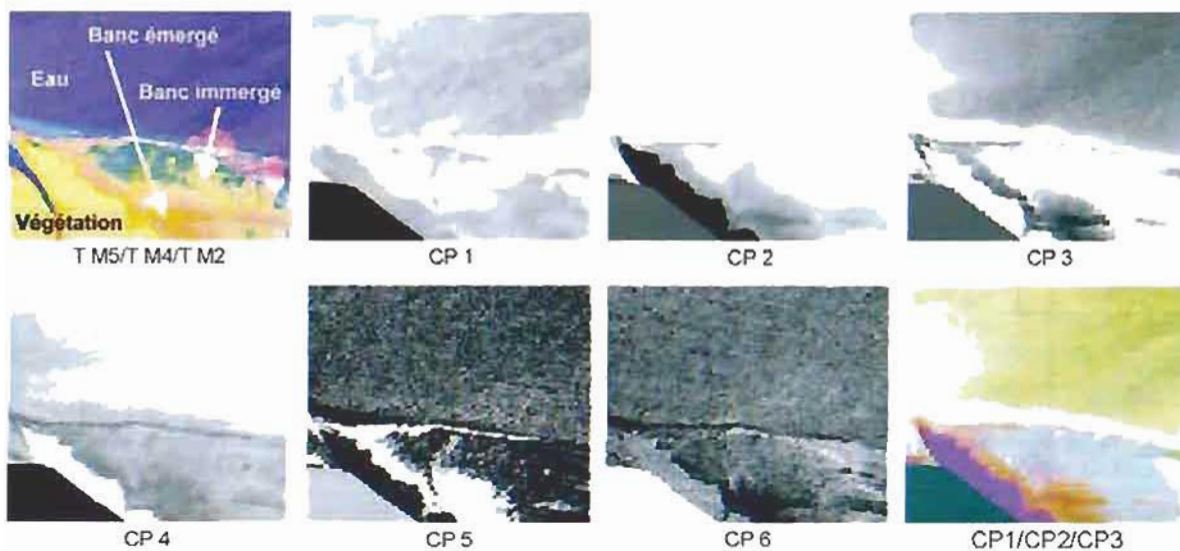


Fig. 14 Composantes principales calculées sur l'image du 19/09/2002 : Banc de Kaw, échelle ~ 1:150 000.

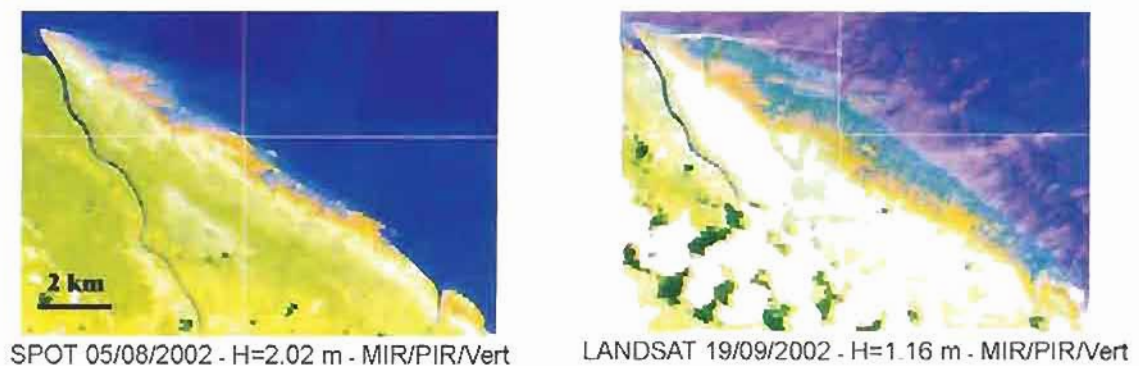


Fig. 15 Influence de la hauteur d'eau (Banc de Kaw), échelle ~ 1:200 000.

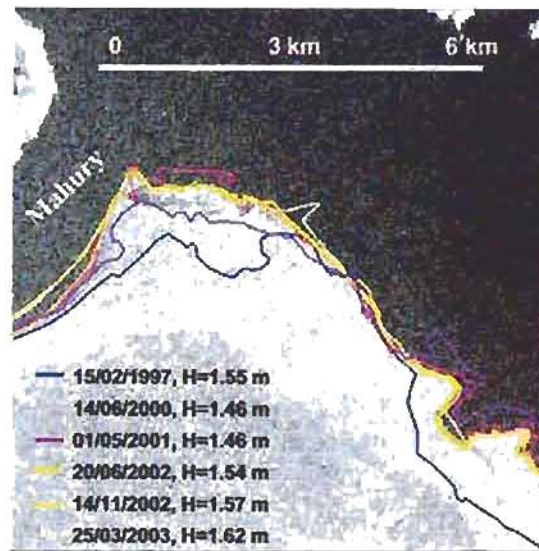


Fig. 18 Potentiel de l'imagerie radar pour le suivi de l'évolution du trait de côte (phénomènes d'érosion et de sédimentation). Différents sens de déplacements côtiers par superposition sur l'image du 20/06/2002 des traits de côtes extraits à partir d'images ERS et RADARSAT acquises entre 1997 et 2003 (échelle - 1:1 00 000).

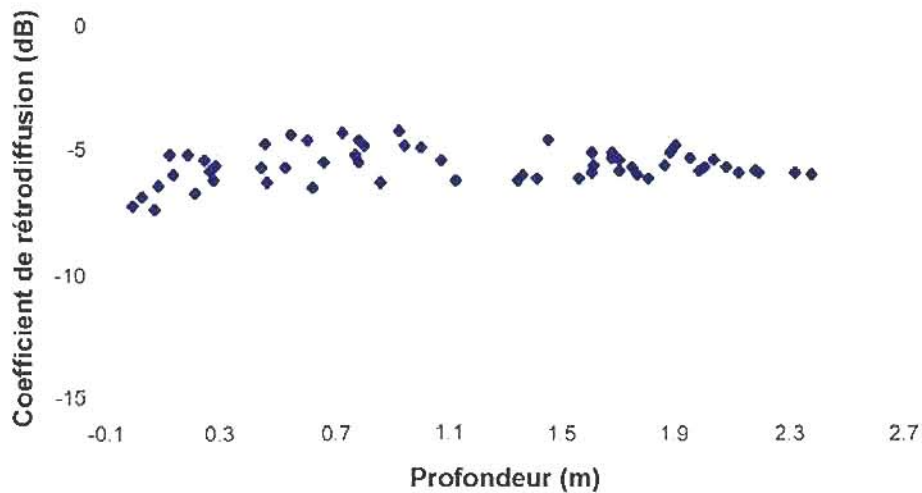


Fig. 16 Relation entre le coefficient de rétrodiffusion issu de l'image RADARSAT du 25/03/2003 (incidence de 28°) et la profondeur de l'eau à l'instant de la prise de vue. Une profondeur négative correspond à une zone émergée

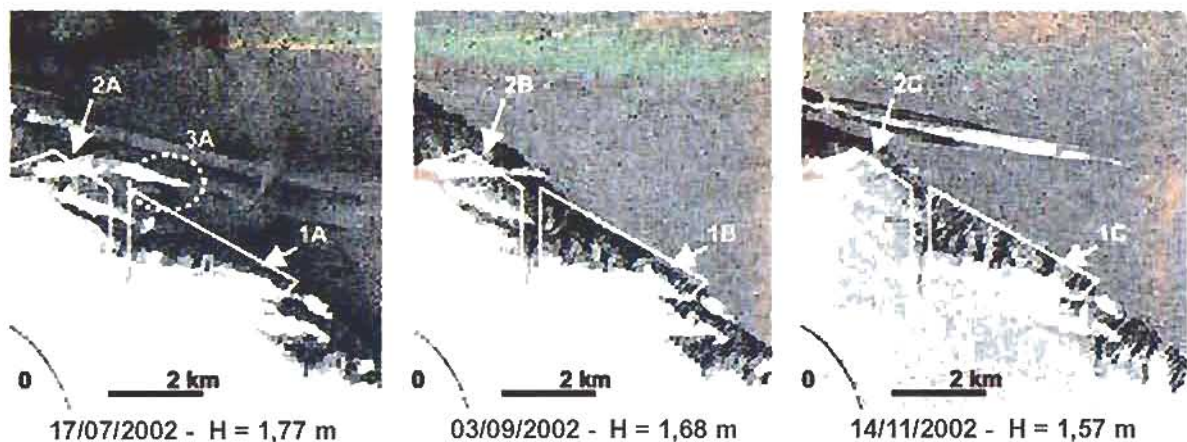


Fig. 8 Comparaison entre les trois images RADARSAT acquises avec les mêmes paramètres instrumentaux (angle d'incidence,  $\theta = 28^\circ$ ) et des hauteurs d'eau légèrement différentes. Cas du banc de Kaw

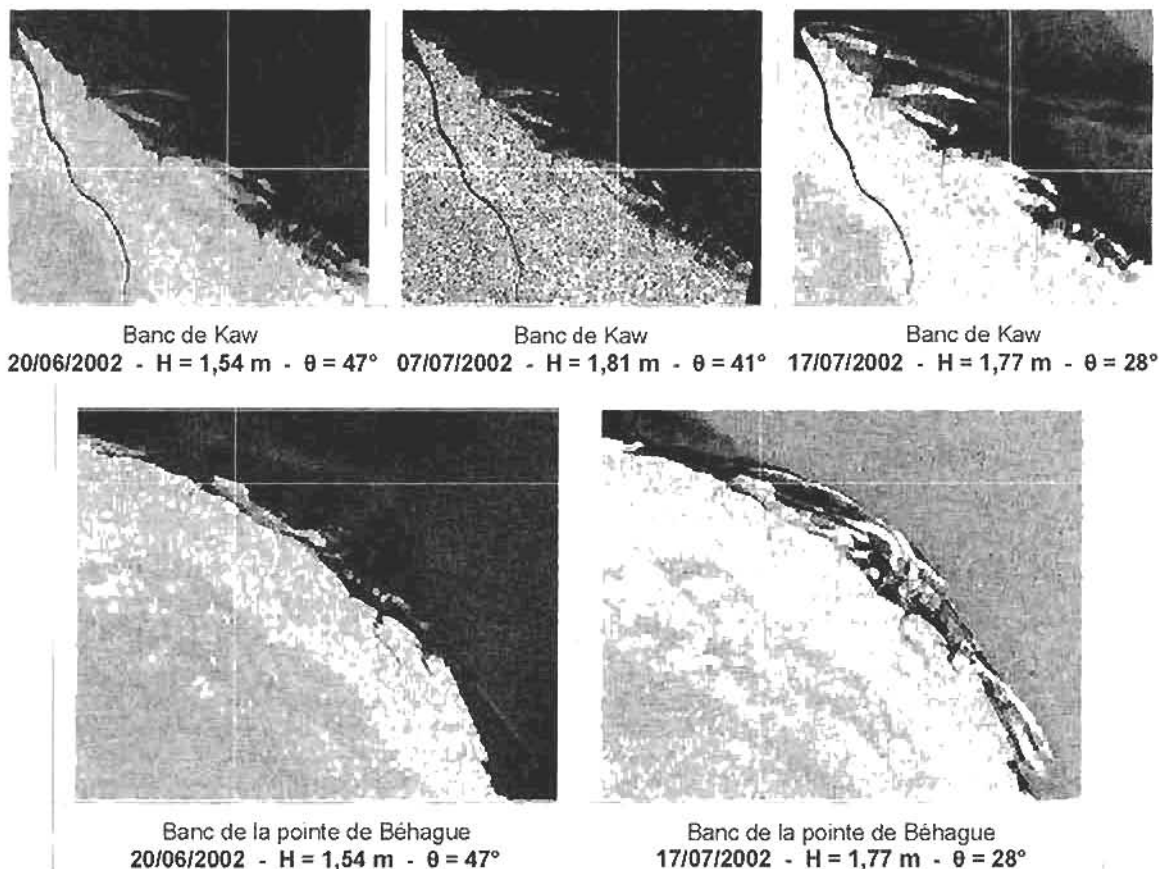


Fig. 9 Influence de l'angle d'incidence sur la détection des bancs de vase.

Tableau I. Principales caractéristiques des images radar et optique utilisées. Les valeurs soulignées en gras correspondent à des hauteurs d'eau obtenues par extrapolation à partir des marégrammes de Kourou.

Date jj/mm/aa	Heure locale d'acquisition	Capteur	Mode - Angle d'incidence	Résolution spatiale (m)	Hauteur de marée Kourou	Hauteur de marée Cayenne	Sens de la marée
14/12/01	11.16	SPOT 4	-	20	<u>1.07</u>	1.18	Montante
20/06/02	06.06	RADARSAT	S7 - 47°	25	1.37	1.54	Montante
07/07/02	06.10	RADARSAT	F2 - 41°	10	1.77	1.81	Descendante
17/07/02	06.18	RADARSAT	S2 - 28°	25	1.70	1.77	Montante
05/08/02	11.16	SPOT 4	-	20	1.89	2.02	Montante
03/09/02	06.18	RADARSAT	S2 - 28°	25	1.56	1.68	Descendante
19/09/02	10.34	LANDSAT 7	-	30/60	1.10	1.16	Montante
21/10/02	10.34	LANDSAT 7	-	30/60	1.20	1.24	Descendante
14/11/02	06.18	RADARSAT	S2 - 28°	25	1.46	<u>1.57</u>	Descendante
16/03/03	11.03	SPOT 5	-	10	1.58	<u>1.69</u>	Montante
25/03/03	18.35	RADARSAT	S1 - 24°	25	1.50	1.62	Montante



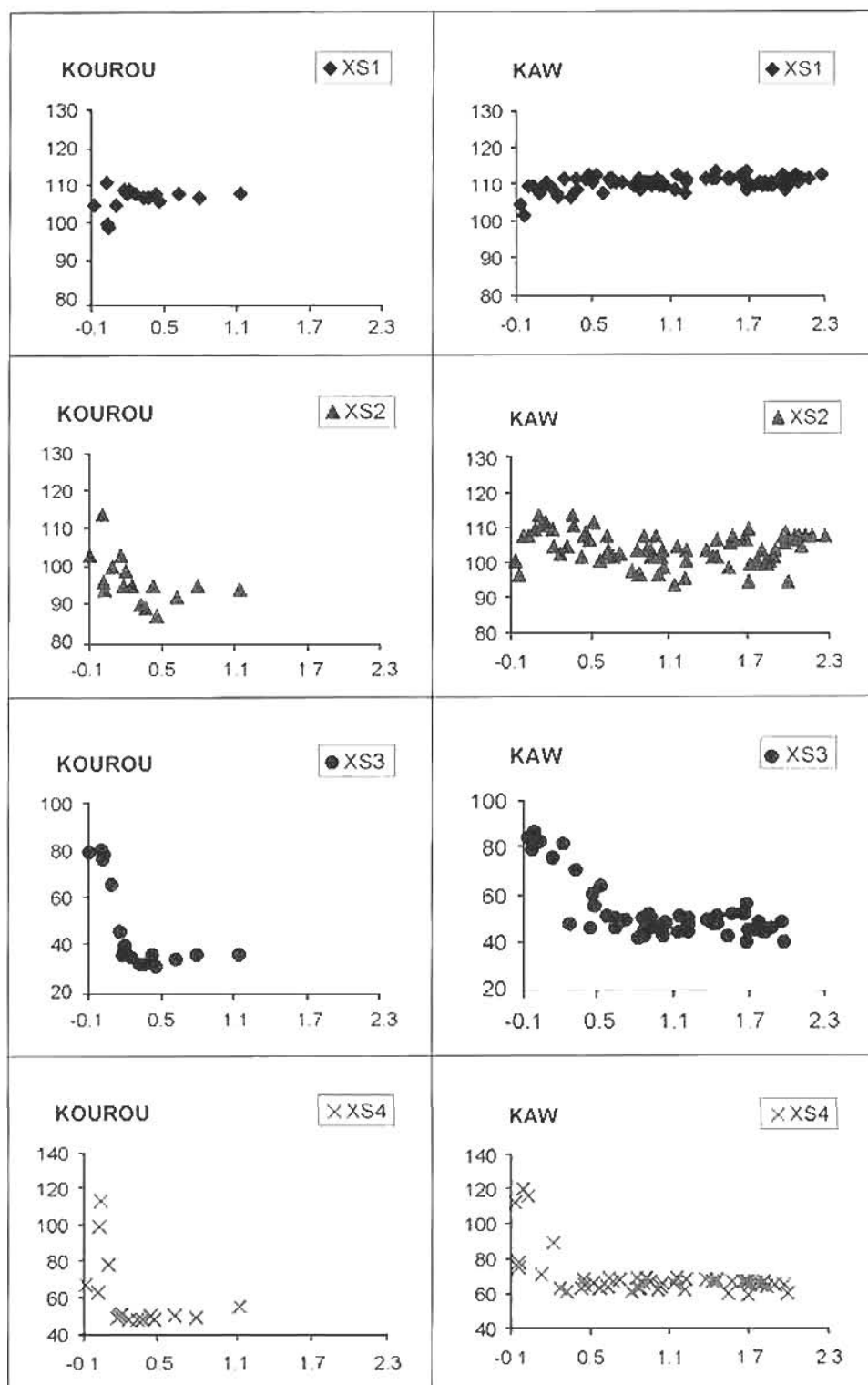


Fig. 17 Relation entre la radiométrie (Compte Numérique) issue de l'image SPOT 5 du 16/03/2003 et la profondeur de l'eau (en abscisse).

## Photogrammétrie Satellitale pour les Capteurs de Haute Résolution : État de l'Art \*

Th. Toutin

Centre Canadien de Télédétection  
588 rue Booth, Ottawa, Ontario, Canada K1A 0Y7  
Tél : +1 613 9471293 - Fax: +1 613 947 1385  
E-mail: thierry.toutin@cctmcan.gc.ca

**Résumé :** Depuis l'arrivée dans le domaine civil en 1999 des capteurs satellitaires de haute résolution (HR) dans les ondes visibles et infra-rouges (VIR), l'utilisation de ces données a posé de nombreux défis aux communautés scientifiques, et encore plus aux utilisateurs, dans les différentes applications de la géomatique, et principalement les traitements photogrammétriques 3D. Après un aperçu sur les nouveaux capteurs civils HR-VIR, les distorsions de prise de vue et les prétraitements des images disponibles aux utilisateurs, cet article présente différentes modélisations mathématiques et méthodes de photogrammétrie satellitale pour corriger ces distorsions géométriques dans le but de créer des produits cartographiques 3D de précision. L'application de ces modélisations aux différents prétraitements est aussi discutée.

**Mots clés :** Haute résolution, photogrammétrie satellitale 3D, modélisations physique et empirique.

**Abstract :** Satellite photogrammetry for high-resolution sensors: state of the art.

Since the launch of civilian high-resolution (HR) satellite sensors in the visible-and-infrared spectrum (VIR) in 1999, the use of HR data has challenged the scientific communities and the users for the different geomatic applications, mainly in 3D photogrammetric processing. After reviewing the new civilian HR-VIR sensors, the imaging distortions and the preprocessing of images available to users, this paper shows different mathematical modellings and methods of satellite photogrammetry to model geometric distortions in order to generate precise 3D cartographic products. The potential of these modellings is also addressed as a function of different pre-processing.

**Keywords:** high resolution, 3D satellite photogrammetry, physical and empirical modelling.

### 1. Introduction

L'intégration de données multisources (matricielles et vectorielles) dans les applications de la géomatique nécessite des traitements géométriques et radiométriques adaptés à la nature et aux caractéristiques de la donnée afin de conserver l'information de chaque image dans le produit final cartographique. Depuis l'apparition en 1999 des capteurs satellitaires de haute résolution (HR) (métrique et sub-métrique) dans les ondes visibles et infrarouges (VIR), de nouveaux défis se sont présentés dans ce domaine d'intégration de données, et principalement pour les applications cartographiques et topographiques de grande précision (Fritz, 1996; Kaufmann & Sulzer, 1997; Konecny, 2000; Dupéret *et al.*, 2004).

L'objectif de cet article est de faire le point sur les avancées et les limites de la photogrammétrie satellitale 3D (Light *et al.*, 1980) avec les nouveaux capteurs HRVIR. Nous aborderons en premier lieu les capteurs de SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, OrbView et QuickBird, puis les sources de distorsions géométriques de la prise de vue, et enfin les pré-traitements des images qui sont disponibles aux utilisateurs. Nous discuterons aussi des outils mathématiques et des méthodes de photogrammétrie satellitale pour la modélisation géométrique 3D de ces systèmes d'acquisition.

### 2. Capteurs de haute résolution

Il n'est pas question ici de rappeler le fonctionnement et les caractéristiques de tous les systèmes HR-VIR (Dupéret *et al.*, 2004), mais de regarder les spécificités des différents capteurs, qui conditionnent les possibilités et les limites de leurs applications cartographiques et topographiques. Comme les différents types d'images sont relativement similaires pour les différents capteurs, ces aspects de prétraitement et de calibration seront traités au § 2.7, après avoir décrit les sources de distorsions géométriques.

\* Article publié dans la Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, N° 175 (2004-3), Pages 57-68 et repris dans le Bulletin des Sciences Géographiques avec l'aimable autorisation de l'Auteur.

## 2.1 SPOT-5

SPOT-5 a été mis sur une orbite héliosynchrone quasi-polaire à 822 km dans la nuit du 3 au 4 mai 2002 par une fusée Ariane 4, avec à son bord, entre autres, des capteurs HR « en peigne », qui peuvent travailler de manière indépendante ou couplée (Baudoïn et Fratter, 1996, Bouillon *et al.*, 2002;

<http://spot5.cnes.fr/satellite/instruments.htm>) :

- le capteur HR géométrique (HRG) avec visée latérale ( $\pm 27^\circ$ ), un champ de vue de  $4^\circ$  pour une fauchée au sol de 60 km ; et
- le capteur HR stéréoscopique (HRS) avec visée avant-arrière ( $\pm 20^\circ$ ), un champ de vue de  $8^\circ$  pour une fauchée au sol de 120 km.

HRG fournit des images multibandes avec un échantillonnage au sol de 10x10 m, ou des images panchromatiques avec un échantillonnage au sol de 5x5 m ou de 2,5x2,5 m (super mode) réalisées à partir de deux images à 5 m décalées de 0,5 pixel (Latry & Rougé, 1998, <http://spot5.cnes.fr/satellite/instruments.htm>). Deux capteurs HRS fournissent, à 90 s d'intervalle, un couple panchromatique d'images stéréoscopiques avec un échantillonnage au sol de 10x5 m (<http://spot5.cnes.fr/satellite/instruments.htm>). Le but principal de ces capteurs est de créer, après traitement au sol, des modèles numériques de terrain (Bernard, 2001, Cantou, 2004).

Les scènes SPOT-HRG (60 x 60 km) sont des produits de base, qui font l'objet de prétraitement géométrique en fonction de la précision de localisation attendue: niveau 1A, 1B et 2A ([http://www.spotimage.fr/html/54\\_93\\_94.php](http://www.spotimage.fr/html/54_93_94.php)). Des couples stéréo peuvent être obtenus en produit 1A.

## 2.2 EROS-A1

EROS-A1 a été mis sur une orbite héliosynchrone à 480 km le 5 décembre 2000 par un lanceur russe Start-1, avec à son bord un capteur HR agile « en peigne » (<http://www.imagesatintl.com/aboutus/satellites/satellites.shtml#>). Ce capteur a un angle de visée tout azimut jusqu'à  $45^\circ$ , un champ de vue de  $1,6^\circ$  pour une fauchée au sol de 13,5 km et fournit des images panchromatiques, élargies dans l'infrarouge, avec un échantillonnage au sol de 1,8 m au nadir (Chen & Teo, 2002, Westin *et al.*, 2002). De plus, un mode d'acquisition avec un sur- ou un hyper-échantillonnage dans un axe permet d'obtenir une résolution métrique ou sous-métrique (0,50-0,85 m), respectivement (ImageSat Int., 2004) avec une fauchée de 9,5 km.

Par contre, comme le capteur est asynchrone avec une vitesse de déplacement au sol plus grande que la vitesse d'acquisition du capteur, le satellite doit continuellement compenser avec des variations d'attitude (principalement tangage vers l'arrière et un peu de lacet) (Figure 1). La variation de tangage pour l'acquisition d'une image de 13,5 km est de l'ordre de  $30^\circ$  ; ce qui crée des variations géométriques dans l'échantillonnage au sol en colonne et en ligne de l'ordre de 20% et 15%, respectivement mais aussi radiométriques (Figure 2) (Toutin *et al.*, 2002, [http://www.imagesatintl.com/customersupport/techarticles/TutorialSatelliteImaging\\_Non-synchronousMode.pdf](http://www.imagesatintl.com/customersupport/techarticles/TutorialSatelliteImaging_Non-synchronousMode.pdf)).

Les scènes EROS, Basic Scene (13,5 x 13,5 km), Vector Scene (13,5 x 40 km) ou Hypersampled Scene (9,5 x 9,5 km) sont des produits de base, qui font l'objet de prétraitements radiométrique et géométrique: *Raw Imagery, Radiometric System Correction, Geometric System Correction et Precision Correction (map projected)* (<http://www.imagesatintl.com/productservices/proddetail/products.shtml>). Des couples stéréo peuvent être obtenus dans le produit Radiometric System Correction.

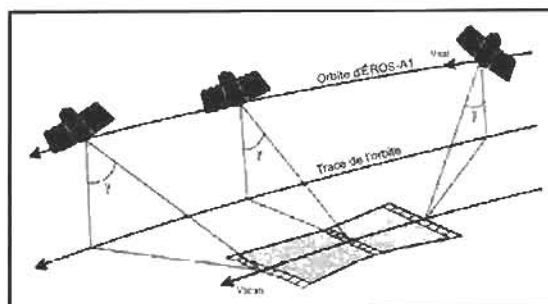


Fig. 1 Variation de l'attitude (tangage et lacet) pendant l'acquisition d'une image d'EROS-A1.

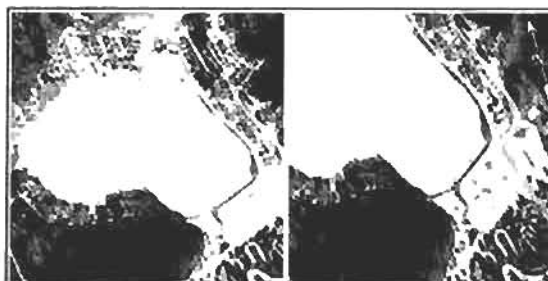


Fig. 2 Effet des variations de l'attitude (tangage et lacet) sur la géométrie et la radiométrie pendant l'acquisition d'un couple stéréo d'EROS-A1. EROS © ImageSat Int., 2002.

### 2.3 OrbView-3

OrbView-3 a été mis sur une orbite hélio-synchrone quasi-polaire à 470 km le 26 juin 2003 par une fusée Pegasus<sup>®</sup>, avec à son bord un capteur HR agile « en peigne ». Ce capteur a un angle de visée tout azimut jusqu'à 45°, un champ de vue de 1° pour une fauchée au sol de 8 km et fournit des images panchromatiques élargies dans l'infrarouge et multibandes avec un échantillonnage au sol de 1 m et 4 m au nadir, respectivement.

Les scènes OrbView (8 x 8 km) sont vendues comme produits *OrbViewBASIC™* et *OrbViewORTHO™* (avec PAs et MNT) (Hargreaves & Robertson, 2001, [http://www.orbimage.com/prods/orbview\\_3.html](http://www.orbimage.com/prods/orbview_3.html)). Des couples stéréo peuvent être obtenus en produit *OrbViewBASIC™*.

### 2.4 IKONOS-II

IKONOS-II a été mis sur une orbite hélio-synchrone quasi-polaire à 680 km le 24 septembre 1999 par une fusée Athena-6, avec à son bord un capteur HR agile « en peigne ». Ce capteur a un angle de visée tout azimut jusqu'à 60°, un champ de vue de 1,8° pour une fauchée au sol de 10 km et fournit des images panchromatiques et multibandes avec un échantillonnage au sol de 0,82 m et 3,26 m au nadir, respectivement. Quand l'angle de visée est de 45-60°, l'échantillonnage au sol est de 1-2 m.

Les scènes IKONOS (généralement 10 x 10 km) sont vendues comme différents produits avec des précisions variables de localisation. Elles font l'objet de prétraitements radiométrique mais surtout géométrique avec ou sans contrôle terrain (points d'appui (PA), MNT) : Geo ou Geo Ortho Kit, Reference, Pro, Precision, PrecisionPlus (<http://www.spaceimaging.com/products/ikonos/index.htm>). Le produit Geo Ortho Kit est comme le produit Geo mais avec les coefficients de fonctions rationnelles, qui ont été calculés à partir de la géométrie de prise de vue (Dial & Grodecki, 2002). Des couples stéréo peuvent être obtenus en produit équivalent à Geo, mais dans une géométrie quasi-épolaire.

### 2.5 QuickBird

QuickBird-3 a été mis sur une orbite héliosynchrone quasi-polaire à 450 km le 18 octobre 2001 par une fusée Delta II, avec à son bord un capteur HR agile « en peigne ». Ce capteur a un angle de visée tout azimut jusqu'à 30°, un champ de vue de 1,3° pour une fauchée au sol de 16,5 km et fournit des images

panchromatiques et multibandes avec un échantillonnage au sol de 0,61 m et 2,44 m au nadir, respectivement (<http://www.digitalglobe.com/about/quickbird.html>). Les scènes QuickBird, Single Area (16,5 x 16,5 km) et *Strip* (16,5 x 165 km) sont vendues comme produits avec des précisions de localisation en fonction des prétraitements géométriques avec ou sans contrôle terrain (PA, MNT) : *Basic Imagery*, *Standard Imagery*, *Ortho Imagery*, et *DG DOQQ* (<http://www.digitalglobe.com/product/index.shtml>). Des couples stéréo peuvent être obtenus en produit *Basic Imagery*. Comme chaque bande spectrale est en fait formée à partir de trois barrettes non-alignées dans le plan focal, des corrections pour la géométrie interne des barrettes (discontinuité et décalage), pour l'optique du capteur et pour le satellite (principalement les hautes fréquences de l'attitude) sont appliquées afin d'annuler ces discontinuités de chaque bande et ce décalage entre bandes. Cela permet de créer pour le produit *Basic Imagery* une sorte de « barrette unique » dans un « plan focal idéal » (Figure 3).

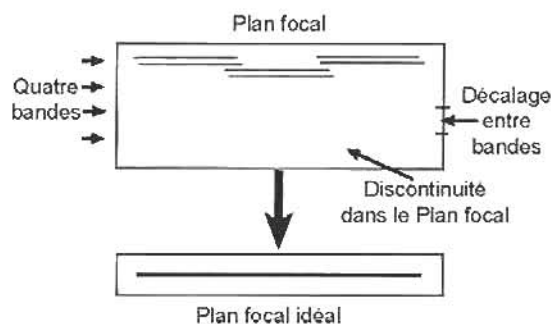


Fig. 3 Description du "plan focal idéal" pour le produit *Basic Imagery* de QuickBird.

### 2.6 Distorsions géométriques

Chaque système d'acquisition produit des distorsions géométriques particulières au(x) capteur(s) et à sa configuration dans le plan focal, ainsi qu'à la géométrie globale de prise de vue (capteur + plateforme + Terre). Il est quand même possible de généraliser les sources de ces distorsions, surtout quand les capteurs se ressemblent plus ou moins, comme les capteurs HR « en peigne ». Le Tableau 1 résume les deux grandes catégories (*l'Observateur* et *l'Observé*) et les sous-catégories avec les sources de distorsions (Toutin, 2004a). En plus des distorsions, on a ajouté les déformations reliées à la projection cartographique, incluses logiquement dans la catégorie *l'Observé* car, les applications sont

réalisées dans une référence cartographique plane et non pas dans le géoïde.

L'ensemble de ces distorsions sont prévisibles ou systématiques et généralement bien connues et documentées (Bonneval, 1972, Billingsley, 1983, Caloz & Collet, 2001). Les distorsions liées au satellite sont aussi bien documentées (Escobal, 1965, Centre National d'Etudes Spatiales, 1980, Light *et al.*, 1980). Les aspects d'étalonnage géométrique (orientation interne avec plan focal et externe avec précisions relative et absolue de localisation, etc.) sont généralement évalués par le propriétaire du système d'acquisition (Bonillon *et al.*, 2002, 2003, Mulava, 2004) ou par les vendeurs d'images (Hargreaves & Robertson, 2001). Cet étalonnage géométrique permet de vérifier la qualité des images pendant la durée de vie du satellite.

Tableau 1. Catégorisation des sources d'erreurs

Catégorie	Sous-Catégorie	Sources des distorsions
Observateur Ou Système D'acquisition	Satellite	Ellipse Osculatrice Attitude
	Capteur haute- résolution	Plan focal Angle de visée Effet panoramique
	Instruments de Mesure	Dérive du temps Synchronisme
Observé	Atmosphère	Réfraction Turbulence
	Terre	Courbure Rotation Topographie
	Carte	Géoïde Ellipsoïde

Certaines de ces distorsions géométriques sont corrigées aux stations de réception ou par les vendeurs d'images suivant le produit-image. D'autres, celles liées à l'atmosphère, ne sont généralement pas corrigées car, elles sont spécifiques à chaque image et aussi par manque de données sur l'atmosphère au moment de l'acquisition de l'image. En plus des ouvrages généraux précédents, la description de chaque distorsion, ainsi que leur caractérisation basse, moyenne et haute fréquences, peut être obtenue dans Bannari *et al.* (1988) et Toutin (2004a).

## 2.7 Prétraitements

Comme les scènes des capteurs HR sont vendues avec différents prétraitements radiométriques et géométriques avec des terminologies variables, il est utile, pour les utilisateurs, de comparer et normaliser ces différents produits en prenant comme base la terminologie adoptée pour les scènes SPOT (Tableau 2) :

- 0A: images directes du satellite sans aucune transformation radiométrique et géométrique. Toutes les méta-données (satellite, capteur et image) sont fournies. Ces données sont rarement disponibles ou que sur demande spéciale.
- 1A: images « brutes » avec normalisation et étalonnage radiométrique des détecteurs. Toutes les méta-données (satellite, capteur et image) sont fournies ;
- 1B: images « géoréférencées » suivant la trace de l'orbite et corrigées pour les distorsions systématiques de l'Observateur et de la rotation et courbure de la Terre. Quelques méta-données (satellite, capteur et image) sont fournies ainsi que sur les prétraitements ;
- 2A: images « géocodées » suivant un nord cartographique, avec les mêmes corrections que 1B plus celles liées à la projection cartographique mais sans contrôle-terrain. Très peu de méta-données (satellite, capteur et image) sont fournies mais des données sur les prétraitements ;
- 2B: images « géocodées » suivant un nord cartographique, avec les mêmes corrections que 2A mais avec des PA. Aucune méta-donnée (satellite, capteur et image) n'est fournie mais des données sur les prétraitements et les PA ;
- 3 : images « ortho-rectifiées » suivant un nord cartographique, avec les mêmes corrections que 2B mais avec un MNT). Aucune méta-donnée (satellite, capteur et image) n'est fournie, mais des données sur les prétraitements et le contrôle terrain.

Tableau 2. Normalisation des terminologie des images de haute résolution avec leurs prétraitement

SPOT	EROS	OrbView	IKONOS	QuickBird
0A	Raw			
1A	Radiometric System Correction	Basic		Basic
1B	Geometric System Correction			Standard
2A	Precision Correction		Geo Standard	
2B	Precision Correction (map)		Reference Pro	
3	Precision Correction (ortho)	Ortho	Precision PrecisionPlus	Ortho DG DOQQ

Les photogrammètres préfèrent et utilisent en général les images de niveau 1A pour des traitements 3D rigoureux avec des modèles physiques basés sur les équations de colinéarité bien connues. De plus, les lois de mécanique céleste, telles les équations de Lagrange (Escobal, 1965, Centre National d'Études Spatiales, 1980, Light *et al.*, 1980), qui régissent le mouvement du satellite peuvent être intégrées dans les équations des modèles physiques. Par contre, les méthodes et les logiciels doivent être un peu adaptés pour chaque satellite et capteur et pour la transformation des méta-données. Pour ces raisons, les télédéTECTEURS préfèrent souvent les niveaux 1B et 2A, alors que les utilisateurs finaux préfèrent le niveau 3. La qualité géométrique des images de niveau 3 dépend bien évidemment des données externes utilisées: les PAs et les MNTs. Ces MNTs externes (tels ceux utilisés pour les produits *PrecisionCorrection* d'EROS, *Ortho* d'OrbView, *PrecisionPlus* d'IKONOS ou les meilleurs produits *Ortho* de QuickBird) peuvent être générés à partir d'un couple stéréoscopique. Ces MNTs externes (tels ceux utilisés pour les produits *Precision* d'IKONOS ou pour les moins bons produits *Ortho* de QuickBird) peuvent aussi être des MNTs dits mondiaux, mais insuffisamment précis pour obtenir des précisions métriques.

### 3. Modèles mathématiques

Des modèles et des fonctions mathématiques doivent être développés pour corriger les distorsions géométriques, qui restent dans les images: soit avec des modèles empiriques 2D/3D (polynomiales ou rationnelles), soit avec des modèles physiques et déterministes 3D rigoureux.

#### 3.1 Modèles empiriques

Les modèles empiriques ne demandent aucune connaissance et information *a priori* de la géométrie de prise de vue : satellite, capteur, Terre et projection cartographique. Ils peuvent être donc utilisés quand aucun modèle physique n'est disponible, ou quand les paramètres du système d'acquisition ne sont pas connus ou donnés. La contre partie de ce manque de réalité physique est que ces modèles sont moins robustes et stables sur l'image entière car ils corrigent localement et ils sont sensibles aux erreurs des données. Comme les erreurs sont minimisées aux points d'appui (PA) dans le calcul des termes inconnus, ils requièrent plus de PAs que le minimum théorique et doivent être régulièrement distribués dans l'image.

Ces modèles sont basés sur différentes fonctions mathématiques, créées à partir de polynômes d'ordres variables :

- Des fonctions polynomiales 2D ( $P_{2D}$ ) ;

$$P_{2D}(XY) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} X^i Y^j \quad (1)$$

- Des fonctions polynomiales 3D ( $P_{3D}$ ) ;

$$P_{3D}(XYZ) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k \quad (2)$$

- Des fonctions rationnelles 2D ( $R_{2D}$ ) ;

$$R_{2D}(XY) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ijk} X^i Y^j}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ijk} X^i Y^j} \quad (3)$$

- Des fonctions rationnelles 3D ( $R_{3D}$ ) ;

$$R_{3D}(XYZ) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p b_{ijk} X^i Y^j Z^k} \quad (4)$$

Dans lesquelles  $X, Y, Z$  sont les coordonnées-terrain;  $i, j, k$  sont les indices incrémentaux ;  $m, n, p$  sont les ordres, avec  $m+n(+p)$  étant l'ordre du polynôme, généralement trois ;  $a_{ij}, a_{ijk}, b_{ij}, b_{ijk}$  sont les paramètres inconnus.

Comme le déplacement du satellite est une perspective cylindrique alors que l'acquisition d'une ligne « en peigne » est une perspective conique, l'ordre et les termes du polynôme pourraient être différents suivant chaque axe, et même au numérateur et dénominateur pour  $R_{3D}$ . Par exemple, des termes, tels que  $XZ, YZ$  pour  $P_{2D}$  ou  $R_{2D}$ ,  $XY^2, YZ^2, Z^3$ , etc. pour  $P_{3D}$  ou  $R_{3D}$  pourraient être annulés car, ces termes ne sont pas représentatifs d'un élément physique de la géométrie de prise de vue. Ces polynômes « intelligents » permettraient aux modèles empiriques de mieux refléter la géométrie de prise de vue dans les deux axes et d'éviter une sur-paramétrisation et des corrélations entre termes des polynômes. Okamoto (1981) avait déjà appliqué cette réduction de termes sur des  $R_{3D}$  pour des photographies à perspective centrale.

##### 3.1.1 Fonctions polynomiales 2D

Les fonctions polynomiales 2D,  $P_{2D}$  avec leur formulation, sont bien connues et documentées depuis 1970, ainsi que leurs applications aux images de télédétection (Wong, 1980, Billingsley, 1983,

Caloz & Collet, 2001). Les  $P_{2D}$  du 1<sup>er</sup> ordre (6 termes  $a_{ij}$ ) permettent de corriger pour une rotation, une translation et une mise à l'échelle dans les deux axes ainsi qu'une obliquité. Les  $P_{2D}$  du 2<sup>ième</sup> ordre (12 termes  $a_{ij}$ ) permettent de corriger, en plus des distorsions précédentes, une torsion et une convexité dans les deux axes. Les fonctions du 3<sup>ième</sup> ordre (20 termes  $a_{ij}$ ) permettent de corriger, en plus des précédentes, d'autres distorsions, qui ne correspondent pas toujours à la réalité physique. En fait, des études ont démontré que ces  $P_{2D}$  du 3<sup>ième</sup> ordre créent des erreurs dans le positionnement des ortho-images, tels SPOT-HRV (Caloz & Collet, 2001), et dans l'intégration d'images multisources HR, telles SPOT-HRV et radar aéroportés (Toutin, 1995). Ces  $P_{2D}$  sont théoriquement désuètes, même si elles sont de temps à autre utilisées.

Comme ce modèle empirique ne reflète pas la géométrie de prise de vue, et ne corrige pas les effets du relief, leur application est limitée aux images qui ont très peu, pas ou plus de distorsions, telles les images nadir et/ou des petites images acquises sur terrain plat et/ou dont les distorsions systématiques ont déjà été corrigées (1B, 2A et 2B). Telles ont été les premières applications pour les images nadir de basse-résolution d'ERTS-1 : des  $P_{2D}$  du 4<sup>ième</sup> ordre étaient alors suffisants pour approximer un modèle physique 2D (Kratky, 1971, Wong, 1975) car, les précisions recherchées n'étaient que de plusieurs pixels.

Par contre, des  $P_{2D}$  du 1<sup>er</sup> ordre appliquées à des images IKONOS Geo (2A) (Hanley & Fraser 2001) ont quand même donné de bons résultats parce que les images de niveau 2A avaient été acquises sur un terrain plat avec un faible angle de prise de vue. Par conséquent, toutes les distorsions géométriques étaient plus ou moins corrigées, justifiant ainsi l'utilisation et l'applicabilité des  $P_{2D}$  du 1<sup>er</sup> ordre. Dans une autre expérience, une image IKONOS Geo (2A) acquise avec un angle de 15° sur une dénivelé plus importante de 450 m, a été testé avec des  $P_{2D}$  du 1<sup>er</sup> au 4<sup>ième</sup> ordre et en faisant une correction d'altitude par rapport à un plan moyen (Shi & Shaker, 2003). La précision calculée seulement sur 20-30 points de vérification était de l'ordre d'un pixel ou mieux. Mais comme les 20-30 points étaient distribués dans les altitudes basses du terrain (0-150 m), les résultats sont alors biaisés et non représentatifs du terrain en entier et particulièrement en montagne.

L'extrapolation à d'autres images et type de terrain (grandes images, produit-image 1A avec beaucoup de distorsions géométriques, grande visée latérale,

terrain montagneux) n'est donc pas recommandé, surtout en mode opérationnel : aucun résultat n'a, en fait, été publié avec de telles images 1A d'EROS, de SPOT5 ou de QuickBird.

### 3.1.2 Fonctions polynomiales 3D

Les fonctions polynomiales 3D,  $P_{3D}$ , sont en fait une extension des  $P_{2D}$  en ajoutant les termes reliés à la troisième dimension, l'altitude Z. Les  $P_{3D}$ , du 1<sup>er</sup>, 2<sup>ième</sup> et 3<sup>ième</sup> ordre ont alors 8, 20 et 40 termes inconnus  $a_{ijk}$  respectivement. Par contre, les termes en Z des  $P_{3D}$  peuvent être réduits au seul terme  $a_z$  car, les autres (XZ, YZ, Z<sup>2</sup>) n'ont pas de réalité physique. Les  $P_{3D}$  sont aussi sujettes aux mêmes problèmes et difficultés d'applications que les  $P_{2D}$ , excepté pour le relief du terrain : taille limitée des images, prétraitement niveau 1B ou 2, beaucoup de PAs (au moins 20 pour le 3<sup>ième</sup> ordre), correction locale aux PAs, manque de cohérence et de robustesse en mode opérationnel.

Dans les années 1960, des  $P_{3D}$  conformes du 2<sup>ième</sup> ordre ont été utilisées avec des photos aériennes avec une réduction de termes (Baestlé, 1966, Schut, 1966). Vingt ans plus tard, Kratky (1989) a développé des  $P_{3D}$  avec une réduction de termes pour approximer son modèle physique 3D de SPOT. La raison principale était que, comme son modèle physique 3D n'était pas inversible, l'implémentation en temps réel sur ordinateur était impossible. Il n'aurait certainement pas eu besoin de cette approximation polynomiale de nos jours. Des  $P_{3D}$  du 2<sup>ième</sup> ordre ont aussi été testées sur des images SPOT-HRV 1B (Palà & Pons, 1995). L'évaluation de la méthode (de l'ordre du sous-pixel) est biaisée car, elle n'a été effectuée que sur les PAs. Plus récemment, les  $P_{3D}$  de Kratky ont été testés sur des images d'IKONOS Geo (2A) acquises avec des angles faibles de prises de vue sur des terrains montagneux (Kersten et al., 2000, Vassilopoulou et al., 2002). La deuxième étude a évalué les ortho-images par rapport aux PAs, suivant leur nombre, leur définition et leur précision de pointé sur l'image. Mais l'évaluation des erreurs (de l'ordre de 1-2 m) est biaisée car, les PAs ont servi à calculer les termes inconnus des  $P_{3D}$ . De plus, cette étude a montré qu'un  $P_{3D}$  affine du 1<sup>er</sup> ordre donnait les mêmes résultats que le  $P_{3D}$  de Kratky du 4<sup>ième</sup> ordre mais avec beaucoup moins de PAs, car en fait, les images IKONOS Geo n'ont plus que les distorsions d'altitude, en plus d'une rotation-translation.

Comme, mis à part une rotation-translation-mise à l'échelle, il ne reste que les distorsions d'altitude dans

les images de niveau 1B et 2, des  $P_{3D}$  du 1<sup>er</sup> ordre seraient théoriquement suffisants, en fonction des conditions d'expérience, de la précision et de la robustesse recherchées. Des  $P_{3D}$  du 2<sup>ième</sup> ordre pourraient être aussi utilisées pour corriger des erreurs résiduelles des prétraitements. Des tests ont alors confirmé que des précisions métriques et plus pouvaient être obtenues avec des images IKONOS *Geo* et des  $P_{3D}$  du 1<sup>er</sup> ordre (Ahn *et al.*, 2001, Fraser *et al.*, 2002, Jacobsen, 2002, Vassilopoulou *et al.*, 2002) ou du 4<sup>ième</sup> ordre (Kersten *et al.*, 2000, Vassilopoulou *et al.*, 2002). La plupart des tests, hormis les deux derniers, étaient sur des reliefs plats à modérés : aucune raison géométrique ne justifie alors l'utilisation du 4<sup>ième</sup> ordre avec des termes du style  $XYZ^2$ ,  $Z^4$ , etc. sur des terrains montagneux.

Par contre comme on pouvait théoriquement s'y attendre avec des images de niveau 1A sans prétraitement des distorsions systématiques, de mauvais résultats ont été obtenus avec des images de QuickBird *Basic Imagery* (Noguchi *et al.* 2004). Bien qu'aucun test avec des  $P_{3D}$  n'ait été effectué avec des images de SPOT5 1A (trop grande) ou d'EROS (trop de variations d'attitude), qui ont encore plus de distorsions géométriques, on peut s'attendre à des résultats semblables ou pires qu'avec Quick-Bird *Basic Imagery*.

### 3.1.3 Fonctions rationnelles 2D

Les fonctions rationnelles 2D sont en fait des extensions des fonctions projectives ( $R_{2D}$  du 1<sup>er</sup> ordre) bien connues en photogrammétrie. Ces fonctions ont à peu près les mêmes limites d'applicabilité et d'opération que les  $P_{2D}$ , et ne devraient donc être utilisées qu'avec des images de niveau 1B et 2 acquises sur des terrains plats. Ces limites font que ces  $R_{2D}$  sont théoriquement, mais aussi pratiquement, dépassées de nos jours, et principalement si on recherche une grande précision et en mode opérationnel. Mais, des fonctions projectives ont été quand même testées sur des images IKONOS *Geo* (Hanley & Fraser 2001, Fraser *et al.*, 2002, Shi & Shaker, 2003), ainsi que des fonctions projectives hybrides sur des images IKONOS *Geo* et IRS-1C (Valadan Zoj *et al.* 2002). Des résultats acceptables (de l'ordre du pixel) ont été obtenus, parce que les images prétraitées 2A avaient aussi été acquises avec un angle de prise de vue quasi-vertical et sur des terrains plats, limitant ainsi l'extrapolation de ces fonctions  $R_{2D}$  à d'autres données HR et d'autres types de terrain et de relief. Aucun test n'a été effectué sur d'autres images de HR de niveau 1A.

### 3.1.4 Fonctions rationnelles 3D

Les fonctions rationnelles 3D,  $R_{3D}$ , ont été utilisées sporadiquement dans les années 1980 pour les photographies à perspective centrale à une dimension (Okamoto, 1981), puis pour les capteurs « en peigne » (Okamoto, 1988). La réduction de termes avait été appliquée pour tenir compte des géométries. Vingt ans plus tard comme alternative au modèle physique, ces  $R_{3D}$  reviennent à la mode pour les images IKONOS car, ses paramètres de prise de vue ne sont pas inclus dans les méta-données. Comme il y a deux polynômes par équation, les  $R_{3D}$  ( $a_{ijk}$  et  $b_{ijk}$ ), du 1<sup>er</sup>, 2<sup>ième</sup> et 3<sup>ième</sup> ordre ont alors 16, 40 et 80 termes inconnus, respectivement; le double des  $P_{3D}$ . Il y a des désavantages à ces  $R_{3D}$  (Madani, 1999) :

- Les distorsions locales, comme par exemple les variations d'attitude de haute fréquence, ne sont pas modélisées ;
- Les paramètres n'ont pas de sens physique et sont durs à interpréter ;
- Une sur-paramétrisation et une corrélation entre termes ;
- Une instabilité ou une division par zéro quand le polynôme du dénominateur tend vers zéro ("zero crossing") ; et
- Des limites d'application aux grandes images.

Différentes stratégies permettent de réduire l'impact de ces désavantages. Les  $R_{3D}$  peuvent être appliquées aux images avec très peu de distorsions géométriques, telles les images de niveau 1B et 2, plutôt qu'aux images de niveau 1A avec toutes les distorsions. Les grandes images, comme celles de SPOT5, peuvent être découpées en sous-images avec des  $R_{3D}$  pour chaque sous-image (Yang, 2001). Ce qui crée un autre désavantage: plus de traitements géométriques et radiométriques et de contrôle-terrain si nécessaire. Pour éviter la sur-paramétrisation et l'instabilité du "zero-crossing", les termes corrélés et non significatifs peuvent être retirés des  $R_{3D}$  suivant la géométrie du capteur (Downman & Dolloff, 2000), une méthode identique à la réduction de termes en fonction de la géométrie du capteur, utilisée dans les années 1980. Pour résoudre une partie de ces problèmes, un modèle de géométrie d'images, dit « universel » en temps réel, basé sur des  $R_{3D}$  d'ordre variable, a été développé (OGC, 1999). Ce modèle dynamique, dont les termes peuvent être choisis en fonction du capteur, est ensuite calculé de façon itérative en retirant les termes non significatifs. De plus, comme le polynôme du dénominateur peut être, sur des bases statistiques, très simplifié et même



entièrement retiré - et en général il l'est - ces  $R_{3D}$  deviennent alors des simples  $P_{3D}$ , comme celles utilisées dans les années 1960.

Downman & Dolloff (2000) ont évalué les caractéristiques positives de ce modèle universel, telles l'universalité, la confidentialité et l'efficacité pour le transfert d'information, tout autant que les négatives, telles la perte de précision (toute approximation entraîne des erreurs), l'instabilité numérique de la solution, le manque d'adaptation aux images avec beaucoup de distorsions (mode asynchrone), l'incertitude (pas de relation physique des paramètres), la complexité (définition de la grille pour les PAs) en plus de celles mentionnées pour les  $P_{2D}$  et  $P_{3D}$ . Alors que ce modèle dit «universel» devient de plus en plus populaire dans une petite partie de la communauté de photogrammétrie et de télédétection (distributeurs d'images, vendeurs de systèmes et universités anglosaxonnes), il est intéressant de remarquer que les caractéristiques positives sont d'ordre politique et commerciale alors que les négatives sont d'ordre scientifique...

Les  $R_{3D}$  peuvent être alors utilisées et calculées selon deux approches (Madani, 1999) :

- Par approximation d'un modèle physique 3D déjà résolu ; ou
- Par calcul des termes inconnus avec des PAs.

La première approche, qui ne dépend théoriquement d'aucune donnée-terrain, est appelée «terrain-indépendante», à tort (voir plus bas), et se résout en deux étapes. En premier, une grille 3D régulière du terrain est définie et leurs coordonnées image 2D sont calculés avec le modèle physique déjà calculé. Tous les points de cette grille sont ensuite utilisés comme PAs pour calculer par moindres carrés les termes des  $R_{3D}$ .

Cette approche est utilisée par les agences gouvernementales et certains vendeurs d'images HR, qui ne veulent pas divulguer d'information sur le satellite et le capteur. A partir de 2001, le produit IKONOS *Geo Ortho Kit* avec des  $R_{3D}$  du 3<sup>ième</sup> ordre a été développé pour des raisons de commercialisation (Grodecki & Dial, 2003) et plus tard, deux des autres vendeurs d'images HR ont suivi avec les images *OrbViewBASIC™* et *QuickBird Basic Imagery* (Hargreaves & Robertson, 2001, Robertson, 2003). L'utilisateur peut alors traiter une image ou des blocs d'images pour créer des ortho-images avec MNT. Mais comme des biais et des erreurs, qui peuvent être corrélés avec l'altitude, existent encore après le traitement avec les  $R_{3D}$ , des post-traitements doivent être effectués pour retirer ces erreurs avec quelques PAs précis (au moins un) (Fraser *et al.*, 2002) ou les

termes des  $R_{3D}$  peuvent être améliorés avec des équations linéaires et quelques PAs précis (Lee *et al.*, 2002). Cette deuxième étape de traitement avec des PAs mais aussi l'utilisation d'un MNT ne justifient pas l'appellation de « terrain-indépendante » pour cette approche.

En plus des évaluations par les vendeurs d'IKONOS (Grodecki & Dial, 2003) et de QuickBird (Robertson, 2003), cette approche a été testée dans des conditions universitaires avec des images IKONOS *Geo Ortho Kit* (Fraser *et al.*, 2002, Tao & Hu, 2002) ou des images QuickBird *Basic* (Noguchi *et al.*, 2004) acquises sur terrain plat et en utilisant les  $R_{3D}$  fournies. Mais Tao & Hu (2002) n'ont obtenu que 2.2 m d'erreurs de positionnement horizontal avec un biais de 7 m en traitant des images stéréo IKONOS *Geo Ortho Kit*. Pareillement, Kim & Muller (2002) ont obtenu une erreur de 5 m calculées sur des PVs précis au mètre, même quand les termes des  $R_{3D}$  sont améliorés avec des PAs. Noguchi *et al.* (2004) n'ont obtenu des résultats encourageants sur terrain plat avec une dénivelé de 240 m qu'après avoir corrigés les  $R_{3D}$  avec six PAs mais, ils ont noté la présence d'erreurs systématiques non-expliquées. Ces résultats ne sont pas en accord et souvent moins bons que ceux (1m et moins) annoncés par Grodecki & Dial (2003) et Fraser *et al.* (2002) avec IKONOS ou Robertson (2003) avec QuickBird.

Finalement, Barbarella *et al.* (2003) ont constaté que le modèle physique 3D dans PCI Geomatica donnaient des ortho-images plus précises d'IKONOS (1.1 m  $\pm$  0.6 m d'erreurs moyennes) et de QuickBird (1.4 m  $\pm$  1.2 m d'erreurs moyennes) vérifiées sur 40-50 PAs, que celles créées avec les  $R_{3D}$  du 3<sup>ième</sup> ordre fournies avec les images (4.2 m  $\pm$  2.5 m d'erreurs moyennes).

Quand les  $R_{3D}$  ne sont pas fournies avec les images (photos, SPOT, EROS), l'utilisateur peut les calculer à partir de son modèle physique 3D déjà résolu avec des PAs. Même si c'est un cas peu utile en mode opérationnel car, l'utilisateur doit déjà avoir un modèle physique, cela a été testé dans un cadre universitaire avec des photographies aériennes et des images SPOT-HRV en calculant les termes inconnus des  $R_{3D}$  du 1er et 3<sup>ième</sup> ordre respectivement, à partir d'un modèle physique 3D déjà résolu (équations de colinéarité) pour ces images (Tao & Hu, 2001). Aucun autre test n'a été effectué sur d'autres images HR de niveau 1A (EROS, SPOT5) à cause de l'incapacité des  $R_{3D}$  à modéliser les distorsions de haute fréquence des images de niveau 1A (Madani, 1999, Downman & Dolloff, 2000).

La deuxième approche, appelée « terrain-dépendante », peut être réalisée par l'utilisateur de la même façon qu'on calcule des modèles physiques ou polynomiaux. Comme il y a 40 et 80 termes inconnus pour le 2<sup>ième</sup> et 3<sup>ième</sup> ordre, on doit utiliser un minimum théorique de 20 et 40 PAs, respectivement. Mais à cause des désavantages inhérents aux modèles empiriques (ne reflète pas la géométrie, sensible au nombre, distribution et précision des PAs, corrige localement mais pas entre les PAs, etc.) (Petrie, 2002), un plus grand nombre de PAs que le minimum théorique est donc requis pour réduire la propagation des erreurs. La méthode de découpage en sous-images (Yang, 2001) devrait aussi être utilisée pour SPOT-5 et EROS : ce qui multiplie le nombre de PAs proportionnellement au nombre de sous-images. Ces deux aspects rendent cette deuxième approche des  $R_{3D}$  inadéquate en mode opérationnel.

Pourtant, certaines études académiques ont démontré la faisabilité de cette deuxième approche avec des images IKONOS *Geo* (Fraser *et al.*, 2002, Tao & Hu, 2002). Ces résultats sont, toutefois, obtenus avec des images, quelquefois proches du nadir, acquises sur des terrains plats. De plus, la solution et les résultats sont fonctions du relief, du nombre et de la distribution des PAs (Tao & Hu, 2002), tant pour SPOT que pour IKONOS. Pour IKONOS, les résultats  $R_{3D}$  des 3<sup>ième</sup> ordre n'étaient pas meilleurs que ceux obtenus avec des fonctions affines  $P_{3D}$  du 1<sup>ière</sup> ordre, comme prévu théoriquement. Mais comme beaucoup d'information sur les conditions d'expérimentation ne sont pas toujours explicitement données dans les articles (tels que les caractéristiques géométriques des images et leurs prétraitements, la source, la distribution et le nombre de PAs, la source, la distribution et le nombre de points de vérification (PV), la dimension et le relief du terrain, et quelquefois même l'ordre du polynôme, etc.), ces études n'apparaissent pas indiscutables et rendent très difficiles l'extrapolation et l'adaptation de cette deuxième approche à d'autres expériences. D'un autre côté, beaucoup d'études réalisées par des utilisateurs montrent des résultats avec différentes images HR moins cohérents et de moins bonne qualité (Kristóf *et al.*, 2002, Petrie, 2002, Toutin *et al.*, 2002, Davis & Wang, 2003, Wolniewicz, 2004 et d'autres non publiés). Kristóf *et al.* (2002) ont obtenu une erreur de 5 m calculées sur des PVs précis au mètre. Petrie (2002) reporte avec les  $R_{3D}$  de grandes erreurs entre les PAs pour différentes images HR. Toutin *et al.* (2002) ont toujours obtenu de meilleurs résultats de modélisation et plus cohérents avec un

modèle physique 3D (Toutin, 2003a) qu'avec des  $R_{3D}$ , que ce soit avec EROS, IKONOS ou QuickBird; de même pour Wolniewicz (2004) avec des images IKONOS et QuickBird. Davis & Wang (2003) a remarqué des incohérences et des erreurs non-expliquées dans les ortho-images IKONOS traitées avec des  $R_{3D}$ , alors qu'elles n'existaient pas quand les images étaient traitées avec un modèle physique 3D.

Comme les résultats académiques et des vendeurs pour les deux approches des  $R_{3D}$  ne sont pas toujours confirmés par les résultats des utilisateurs, l'extrapolation à toute condition de prise de vue (principalement les angles supérieurs à 10), de prétraitements d'images (principalement le niveau 1A), de terrain (principalement les montagneux), et de données cartographiques est pour le moment hasardeux en milieu opérationnel sans vérifications ultérieures par d'autres utilisateurs.

### 3.2 Modèles physiques 3D

Les modèles physiques 3D, qui sont utilisés pour les corrections géométriques, peuvent varier suivant le système d'acquisition et le type d'images. Des modèles différents peuvent être développés en fonction des caractéristiques de chacun : agile (OrbView, IKONOS et Quickbird), latéral (SPOT5-HRG), avant-arrière (SPOT5-HRS) ou asynchrone (EROS). Mais comme ce sont tous des capteurs « en peigne », un modèle général peut être développé en tenant en compte toutes les caractéristiques. Ces modèles physiques sont en général développés pour les images de niveau 1A mais, des adaptations peuvent être effectuées pour tenir compte des prétraitements des niveaux 1 B et 2. La solution généralisée permettra une adaptation plus facile aux nouveaux capteurs, comme Pléiades-HR, CartoSat, etc. et aux prétraitements.

Le modèle physique doit prendre en considération toutes les distorsions géométriques de la plate-forme (position, vitesse, attitude), du capteur (champ de vue instantané ou focale, champ de vue total, angles de prise de vue et effet panoramique), de la terre (courbure, rotation, relief). Les déformations de la projection cartographique peuvent être aussi considérées car, les images sont généralement utilisées dans des références cartographiques planes. La modélisation peut s'effectuer distorsion par distorsion et étape par étape, par groupe de distorsions en quatre étapes (satellite, capteur, Terre, projection) ou toutes les distorsions ensemble en une seule étape. Les premières solutions sont généralement préférées aux stations de réception ou par les

vendeurs, alors que la dernière est préférée par les utilisateurs. En fait, il est préférable de considérer la géométrie totale de prise de vue car certaines distorsions sont corrélées entre elles et ont le même effet au sol. Il est théoriquement plus précis de calculer un terme « combiné » plutôt que chaque composante de ce terme « combiné » séparément, évitant ainsi la surparamétrisation et la corrélation entre termes. Des exemples non-exhaustifs de corrélation entre termes sont :

- L'orientation de l'image par rapport au nord cartographique est une combinaison de l'inclinaison osculatrice orbitale, du lacet, de l'angle de visée et de la convergence des méridiens;
- Le facteur échelle dans la direction du satellite est une combinaison de la vitesse, l'altitude et le tangage du satellite, du temps d'intégration des détecteurs, de la composante de la rotation de la Terre ;
- L'angle de nivellement dans la direction du capteur est une combinaison du roulis, de la composante latérale de l'angle de visée, de la courbure de la Terre et de l'ellipsoïde: etc.

Depuis 2000, un certain nombre de recherches a été effectué pour modéliser les nouveaux capteurs HRVIR: SPOT5 (Bouillon *et al.*, 2002, Cantou, 2004, Nonin & Picard, 2003, Toutin, 2004b); EROS (Chen & Teo 2002, Westin & Forsgren, 2002, Toutin, 2004b); OrbView (Haergreaves & Robestso 2001, Mulava, 2004); IKONOS (Toutin & Cheng, 2000, Toutin, 2003a, b); QuickBird (Toutin & Cheng, 2002, Jacobsen, 2003, Robertson, 2003, Toutin, 2005).

Les précisions obtenues, vérifiées avec des données de validation diverses, pour ces différentes modélisations sont en général de l'ordre de la fraction de pixel. Comme les modèles physiques 3D représentent la réalité de prise de vue, ils sont robustes sur l'ensemble de l'image et ne créent pas d'erreurs locales. En général, ils ne requièrent que peu de PAs, qui doivent être collectés sur toute l'image pour éviter les extrapolations, mais pas obligatoirement avec une distribution régulière. Ils filtrent aussi les erreurs d'entrée et donnent des résultats plus cohérents dans des conditions opérationnelles.

Le point de départ de la modélisation mathématique est généralement les équations de colinéarité bien connues pour les images VIR (Bonneval, 1972, Wong, 1980) :

$$x = (-f) \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (5)$$

$$y = (-f) \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (6)$$

dans lesquelles :  $(x, y)$  sont les coordonnées image ;  $(X, Y, Z)$  sont les coordonnées-terrain ;  $(X_0, Y_0, Z_0)$  sont les coordonnées du centre perspectif ;  $-f$  est la focale et  $[m_{ij}]$  sont les neuf éléments de la matrice orthogonale de rotation.

Les équations de colinéarité sont valides pour les perspectives coniques comme une ligne d'image d'un capteur « en peigne ». Mais comme les lignes successives de l'image sont fortement corrélées, il est possible de relier les centres perspectifs et les angles de rotation des différentes lignes de l'image en intégrant les éphémérides et les données d'attitude du satellite. Cette intégration permet alors de décorrélérer et de réduire le nombre de termes inconnus et de finaliser avec un couple d'équations par image. L'intégration des différentes distorsions et le développement mathématique des équations finales peuvent être trouvés pour chaque capteur et chaque modèle dans les références données précédemment.

De plus, à partir des lois de mécanique céleste et des équations de Lagrange (Escobal, 1965, Centre National d'Études Spatiales, 1980, Light *et al.*, 1980) les éphémérides (position et vitesse) peuvent être transformées en paramètres orbitaux osculateurs (Guichard, 1983, Toutin, 1985), qui déterminent une ellipse osculatrice à l'orbite réelle à chaque instant. Puisque les équations de Lagrange tiennent compte des variations gravitationnelles du potentiel terrestre pour lier les différentes positions du satellite sur son orbite pendant la formation de l'image, cette solution avec une ellipse osculatrice est meilleure et plus robuste que d'utiliser une ellipse constante avec des polynômes du 2<sup>ième</sup> ordre en fonction du temps. Ceci est encore plus vrai pour le traitement de longs segments d'images, comme ceux de QuickBird *Strip*, ou de bloc d'images (Toutin 2003b, Cheng *et al.*, 2003).

#### 4. Conclusions

Depuis le lancement en 1999 du premier satellite civil avec un capteur HR-VIR, il y a eu un certain nombre de changements dans le traitement géométrique 3D des images de télédétection pour arriver à des précisions métriques et sous-métriques. Depuis plus de trente ans, deux types de modèles très différents sont utilisés pour modéliser la géométrie de prise de vue des images de télédétection : les modèles physiques et déterministes et les modèles empiriques et statistiques. Les premiers ont fait l'objet de nombreuses recherches pour toute sorte de capteurs et sont fréquemment utilisés. Les seconds l'ont été au début avec les images de moyenne résolution quand la précision recherchée n'était pas trop grande. De plus les modèles empiriques basés sur des fonctions rationnelles ont aussi été sporadiquement utilisés avec des images HR-VIR, mais avec un cycle d'utilisation de 20 ans : dans les années 1960 pour les photographies aériennes, dans les années 1980 pour SPOT-HRV et maintenant dans les années 2000 pour les capteurs HR. Les avantages principaux des modèles physiques proviennent du fait que les fonctions mathématiques sont développées en fonction de la réalité physique de la prise de vue. Comme les termes des modèles sont des fonctions des différentes distorsions géométriques, ils ont un sens physique, et peuvent être facilement interprétés pour la détection des erreurs. Dans le sens inverse, les paramètres des modèles empiriques, en particulier les fonctions rationnelles, ne correspondent à aucune réalité physique (Madani, 1999, Dowman & Dolloff, 2000). De nombreuses recherches avec des images de basse et moyenne résolution et maintenant de haute résolution (Chen & Teo, 2002, Petrie, 2002, Toutin *et al.*, 2002, Barbarella *et al.*, 2003, Davis & Wang, 2003, Jacobsen, 2003, Wolniewicz, 2004), des articles de synthèse (Bannari *et al.*, 1995, Toutin, 2004a), ainsi que des ouvrages généraux (Billingsley, 1983, Caloz & Collet, 2001) et d'autres vont tous dans ce sens et/ou ont démontré la supériorité des modèles physiques.

De plus Dowman & Dolloff (2000) mentionnent qu'il n'y a pas unanimité sur le rôle et l'utilisation des fonctions rationnelles comme standard universel, alors que le consensus semble être en faveur des modèles physiques et déterministes, mais que les fonctions rationnelles peuvent être incontournables pour certains capteurs. En d'autres mots, les modèles physiques, si disponibles, devraient être le premier choix. En fait, la paramétrisation mathématique de modèles physiques a toujours été un aspect important dans la recherche scientifique et ses accomplissements!

#### Références

- Ahn C.-H., Cho S.-I., & Jeon J. C. (2001) Orthorectification Software Applicable for IKONOS High-Resolution Images : GeoPixel-Ortho. *Proceedings of IGARSS'01, Sydney, Australia, 9-13 July* (Piscataway, NJ, USA: IEEE), pp.555-557
- Baetslé PL (1966) Conformal Transformations in Three Dimensions. *Photogrammetric Engineering*, vol. 32, pp. 816-824.
- Bannari A, Morin O., Béné G.B. & Bonn F.J. 1995, A Theoretical Review of Different Mathematical Models of Geometric Corrections Applied to Remote Sensing Images, *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, pp. 27-47.
- Barbarella M., Mancini, F. & Zanni M. (2003) Processing of High Resolution Satellite Data for Map Updating, *Proc. of 30<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 10-14 November, Honolulu, Hawaii, CD-ROM, (Paper TS-4.3).
- Bernard M. (2001) Instruments HRS et MNT sur SPOT5. *Bull. SFPT*, N° 164-165, pp. 32-34.
- Billingsley F.C. (1983) Data Processing and Reprocessing, *Manual of Remote Sensing*, 2<sup>nd</sup> Edition, Vol. 1, Editor-in-chief RN. Colwell, (Falls Church, Virginia, USA : Sheridan Press), pp. 719-722.
- Bonneval H. (1972) Levés topographiques par photogrammétrie aérienne, *Photogrammétrie générale : Tome 3*, Collection scientifique de l'Institut Géographique National, (Paris, France: Eyrolles Editeur) 309 pages.
- Bouillon A, Breton E., Lussy F. de & Gachet R (2002) SPOT5 HRG and HRS first in-flight geometric quality results, *Proc. SPIE, Vol. 4881A Sensors, system, and Next Generation Satellites VII*, Agia Pelagia, Crete, Greece, September 22-27 (Bellingham, WA: SPIE), CD-ROM (Paper 4881A-31).
- Bouillon A, Breton E., Lussy F. de & Gachet R. (2003) SPOT5 geometric image quality, *Proc. of the IEEE-IGARSS 2003*, Toulouse, France, 3 pages, CD-ROM
- Caloz R. & Collet C. (2001) Transformations géométriques, *Précis de télédétection, Volume 3: Traitements numériques d'images de télédétection*, (Ste Foy, Québec, Canada: Presse de l'Université du Québec), pp. 77-105.
- Cantou J.P. (2004) Potentiel altimétrique des images Spot 5 et Pléiades-HR: Bilan des études techniques pilotées par le CNES. *Bull. SFPT*, N° 173-174, pp. 64-71.

- Centre National d'Études Spatiales (1980) Le mouvement du véhicule spatial en orbite. (Toulouse, France: CNES), 1031 pages.
- Chen L.-C. & Teo T.-A. (2002) Rigorous Generation of Orthophotos from EROS-A High Resolution Satellite Images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Ottawa, Canada, July 8-12 (Natural Resources Canada: Ottawa, Ontario) Vol. 34 ( B4), pp. 620-625.
- Cheng P., Toutin T., Zhang Y. & Wood M. (2003) QuickBird...Geometric Correction, Path and Block Processing and Data Fusion, *Earth Observation Magazine*, vol. 12, N° 3, pp. 24-30.
- Davis C. H. & Wang X. (2003) Planimetric Accuracy of IKONOS 1 m panchromatic ortho-image products and their utility for local government GIS basemap applications, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, W 22, pp. 4267-4278.
- Dial G. & Grodecki J. (2002) Block adjustment with rational polynomial camera models, *Proceedings of the ACSM-ASPRS Annual Conference/XXII FIG International Congress*, Washington D.C., USA, April 19-26 (Bethesda, MD: ASPRS), CD-ROM.
- Dowmann I. & Dolloff J. (2000) An evaluation of rational function for photogrammetric restitution, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, The Netherlands, July 16-23 (Amsterdam, The Netherlands: GITC) vol. 33 (B3), pp. 254- 266.
- Escobal P.R. (1965) Methods of orbit determination. vol. (Malabar, USA: Krieger Publishing Company), 478 pages.
- Fraser C. S., Hanley H. B. & Yamakawa T. (2002) Threedimensional ge positioning accuracy of IKONOS imagery, *Photogrammetric Record*, vol. 17, pp. 465-479.
- Fritz L. W. (1996) The era of commercial earth observation satellites, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 62, N°1, pp. 39-45.
- Guichard H. (1983) Etude théorique de la précision dans l'exploitation cartographique d'un satellite à défilement: application à SPOT, *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 90, pp. 15-26.
- Grodecki J. & Dial G. (2003) Block adjustment of highresolution satellite images described by rational functions, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, W1, pp.59-68.
- Hanley H.B. & Fraser C.S. (2001) Geopositioning accuracy of IKONOS imagery: Indications from two dimensional transformations, *Photogrammetric Record*, vol. 17, pp. 317329.
- Hargreaves D. & Robertson B. (2001) Review of Quickbird-112 and Orbview-314 Products from MacDonald Dettwiler Processing Systems, *Proc. of the ASPRS Annual Conference*, St Louis, Missouri, USA, April 23-27 (Bethesda, MD: ASPRS), CD-ROM (unpaginated).
- Jacobsen K. (2002) Generation of Orthophotos with Carterra Geo Images Without Orientation Information, *Proceedings of the ACSM-ASPRS Annual Conference/XXII FIG International Congress*, Washington D.C., USA, April 19-26 (Bethesda, MD: ASPRS), CD-ROM (unpaginated).
- Jacobsen K. (2003) Orthoimages and DEM by QuickBird and IKONOS, *Proc. of the 23<sup>th</sup> EARSeL Symposium: Remote sensing in transition*, Millpress Ed., Ghent, Belgique, 2-7 June, pp. 513-525
- Kaufmann V. & Sulzer W. (1997) Über die Nutzungsmöglichkeit hochauflösender amerikanischer Spionage-Satellitenbilder (1960-1972), *Vermessung und Geoinformation*, vol. 3, pp.166-173.
- Kersten T., Baltsavias E., Schwarz M. & Leiss I. (2000) Ikonos-2 Cartera Geo - Erste geometrische Genauigkeitsuntersuchungen in der Schweiz mit hochaufgelösten Satellitendaten, *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, vol.8, pp. 490-497.
- Konecny G. (2000) Mapping from space, *Remote Sensing for Environmental Data in Albania: A Strategy for Integrated Management*, 06-10 October, Tirana, Albania, (NATO Science Series, Vol. 72, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands), pp. 41-58.
- Kratky W. (1971) Precision Processing of ERTS Imagery, *Proceedings of ASP-ACSM Fall Convention*, San Francisco, Ca, September 7-11 (Falls Church, Va: ASP) pp. 481-514.
- Kratky W. (1989) On-line aspects of stereophotogrammetric processing of SPOT images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 311-316.
- Latry C. & Rougé B. (1998) SPOT5 THR mode, *Proc. Of SPIE* 1998, vol. 3439, pp. 480-492.
- Lee J.-B., Huh Y., Seo B. & Kim Y. (2002) Improvement the Positional Accuracy of the 3D Terrain Data Extracted From IKONOS-2 Satellite Imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Graz, Austria,

- Septembre 9-13 (Institute for Computer Graphics and Vision: Graz, Austria) vol. 34 (B3), pp. B142-B145.
- ImageSat International (2004) Hypersampled Imagery International Patent Application No. IL03/00354.
- Light D.L., Brown O., Colvocoresses A., Doyle F., Davies M., Ellasal A., Junkins J., Manent J., McKenney A., Undrejka R. & Wood G. (1980) Satellite Photogrammetry, in *Manual of Photogrammetry 4<sup>th</sup> Edition*, Chapitre XVII, Editor in chief: C.C. Slama, ASP Publishers, Falls Church, USA, pp. 883-977.
- Madani M. (1999) Real-Time Sensor-Independent Positioning by Rational Functions. *Proceedings of ISPRS Workshop on Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation*, Barcelona, Spain, November 25-26 (Barcelona, Spain: ISPRS) pp. 64-75.
- Mulava D. (2004) On-orbit geometric calibration of the OrbView-3 high-resolution imaging satellite. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35 (B1), CD-ROM, pp.1-6.
- Noguchi M., Fraser C.L., Nakamura T., Shimono T. & Oki S. (2004) Accuracy assessment of QuickBird stereo imagery. *Photogrammetric Record*, vol. 19, N° 106, pp. 128-138.
- Nonin Ph. & Piccard S. (2003) Performance analysis of DEM automatic extraction from SPOT5 sensors. *Proc. of the IEEEIGARSS 2003*, Toulouse, France, 3 pages, CD-ROM
- CGC (1999) The Open GISTM Abstract Specifications: The Earth Imagery Case, vol. 7, <http://www.openais.org/techno/specs/html/>
- Okamoto A. (1981) Orientation and Construction of Models. Part III: Mathematical Basis of the Orientation Problem of One Dimensional Central Perspective Photographs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 47, pp. 1739-1752.
- Okamoto A. (1988) Orientation Theory of CCD Line-Scanner Images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Kyoto, Japan, July 3-9 (Japan: ISPRS) vol. 27 (B3), pp. 609- 617.
- Palà V. & Pons X. (1995) Incorporation of Relief in PolynomialBased Geometric Corrections. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 61, pp. 935-944.
- Petrie G. (2002) The ACSM-ASPRS Conference: A Report on the Washington Meeting. *Geoinformatics*, vol. 5, N° 6, pp. 4243.
- Robertson B. (2003) Rigorous geometric modelling and correction of QuickBird imagery. *Proc. of the IEEE-IGARSS 2003*, Toulouse, France, 6 pages, CD-ROM.
- Shi W. & Shaker A. (2003) Analysis of terrain elevation effects on Ikonos imagery rectification accuracy by using non-rigorous models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, W 12, pp. 1359-1366.
- Schut G. H. (1966) Conformal Transformations and Polynomials. *Photogrammetric Engineering*, vol. 32, pp. 826829.
- Tao V. & Hu Y. (2001) A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 67, pp. 1347-1357.
- Tao V. & Hu Y. (2002) 3D Reconstruction Methods Based on the Rational Function Model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 68, pp. 705-714.
- Toutin Th. (1985) Analyse mathématique des possibilités cartographiques du système SPOT. *XYZ, Revue de l'Association Française de Topographie*, vol. 25, pp. 53-66.
- Toutin Th. (2003a) Error tracking in IKONOS geometric processing using a 3D parametric modelling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, W 1, pp. 43-51. <http://www.ccrs.nrcan.ac.ca/ccrs/rd/sci/pub/bibpdf/13102.pdf>
- Toutin Th. (2003b) Block bundle adjustment of Ikonos in-track images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, W 4, pp. 851-857. <http://www.ccrs.nrcan.ac.ca/ccrs/rd/sci/pub/bibpdf/13110.pdf>
- Toutin Th. (2004a) Review Article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, W 10, pp. 1893-1924, May. <http://www.ccrs.nrcan.ac.ca/ccrs/rd/sci/pub/bibpdf/13288.pdf>
- Toutin Th. (2004b) Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS, IKONOS and QuickBird. *IEEE-TGARS*, vol. 42, N° 10 (in press)
- Toutin Th. (2005) QuickBird stereo imagery for High resolution DSM. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26 (in press).
- Toutin Th. & Cheng P. (2000) Demystification of IKONOS. *Earth Observation Magazine*, July, vol. 9, W 7, pp. 17-21. <http://www.ccrs.nrcan.ac.ca/ccrs/rd/sci/pub/bibpdf/4807.pdf>

- Toutin Th., Chénier R. & Carbonneau Y. (2002) 3D Models for High Resolution Images: Examples with QuickBird, IKONOS and EROS, Proc. of Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications (ISPRS, IGU, C/G), Ottawa, Ontario, Canada, July 8-12, 2002, CD-ROM.
- Vassilopoulou S., Humi L., Dietrich V., Baltasvias E., Pateraki M., Lagios E. & Parcharidis I. (2002) Orthophoto generation using IKONOS imagery and high-resolution DEM: a case study on volcanic hazard monitoring of Nisyros Island (Greece), *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 24-38.
- Valadan Zoj M.J., Mansourian A., Mojaradi B. & Sadeghian S. (2002) 2D Geometric correction of IKONOS Imagery Using Genetic Algorithm, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34 (B4), CD-ROM (unpaginated).
- Westin T. & Forsgren J. (2002) Orthorectification of EROS-A1 Images, *ImageSat International Web site*, (at [http://www.imaesatintl.com/customer-support/technical/Orthorectification EROSA 1 Images.pdf](http://www.imaesatintl.com/customer-support/technical/Orthorectification%20EROSA%201%20Images.pdf)).
- Wong KW. (1975) Geometric and Cartographic Accuracy of ERTS-1 Imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 41, 621-635.
- Wong KW. (1980) Basic Mathematics of Photogrammetry, *Manual of Photogrammetry* 4<sup>th</sup> Edition, Chapter II, Editor in chief: C.C. Slama, ASP Publishers, Falls Church, USA, pp. 37-101.
- Yang X. (2001) Piece-wise Linear Rational Function Approximation in Digital Photogrammetry, *Proc. of the ASPRS Annual Conference*, St Louis, Missouri, USA, April 23-27 (ASPRS: Bethesda, USA), CD-ROM (unpaginated).
- Wolniewicz W. (2004) Assessment of geometric accuracy of VHR satellite images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35 (B1), CD-ROM, pp.19-23
-

## Comparison of Sediment Yield in Two Catchments, Northeast Algeria

K. Khanchoul, Y. Spiga  
Badji Mokhtar University, Annaba - Earth Science Faculty

M. B. JANSSON  
Uppsala University, Sweden - Department of Geography

**Résumé :** Le présent travail compare les débits solides dans les bassins versants de Saf Saf (322 km<sup>2</sup>) et de Kébir Ouest (1130 km<sup>2</sup>) en vue de cerner les différentes modalités de transport des sédiments et les paramètres qui les conditionnent. Le transport des sédiments en suspension a été calculé à partir des prélèvements effectués dans les crues d'une part, et estimés, pour combler les séries ayant un nombre faible de lacunes, à travers une régression des débits et des concentrations de la crue. Ces deux résultats précédents ont servi à confectionner une courbe d'étalonnage des sédiments suivant la méthode des classes de débits pour évaluer les concentrations des crues n'ayant pas de prélèvements.

Le débit solide moyen annuel pendant les périodes de crues sur une durée de 22 ans (1975/76-1996/97) était de 461 T km<sup>-2</sup> dans le bassin versant de Saf Saf et 247 T km<sup>-2</sup> dans le bassin de Kébir Ouest. Bien que le bassin versant de Saf Saf avait de faibles précipitations et écoulements de surface, l'érosion était plus élevée. Le débit solide élevé durant les saisons hivernales et printanières du bassin versant de Saf Saf pourrait être expliqué par un taux faible de recouvrement végétal des versants et des cultures sur des sols marno-limoneux - argileux en pentes dépassant 12%. Les impacts négatifs de cette forte mobilité des sédiments sont directement ressentis dans le barrage de Zardézas qui collecte les écoulements du bassin versant de Saf Saf et qui, par conséquent, a vu sa capacité se réduire.

Pour les crues à grandes amplitudes pendant l'hiver et le printemps, l'oued Saf Saf présente des graphes en pic très accentués des débits et des concentrations ce qui implique un fort approvisionnement en sédiments à cause de la végétation clairsemée. En revanche, l'oued Kébir Ouest présente des graphes plus larges et comparativement des concentrations faibles.

**Mots clés :** érosion – débit solide – bassin versants – nord-est algérien

**Abstract :** The present work compares the sediment yields in the Saf Saf (322 km<sup>2</sup>) and Western Kebir (1130 km<sup>2</sup>) catchments in order to get a better comprehension of the different sediment transport conditions and the parameters that govern them. The suspended sediment transport of sampled storms were calculated using measured concentration samples and additional estimated concentrations from a regression of the storm in question, to reconstruct the series having a low number of missing suspended sediment concentrations. These two previous results were used to develop a sediment rating curve with the discharge class method to calculate the concentrations from storms with no or few suspended sediment samples.

The mean annual sediment yield during flood events of the 22-year period (1975/76-1996/97) was 461 T km<sup>-2</sup> in the Saf Saf drainage basin and 247 T km<sup>-2</sup> in the Western Kebir basin. Although the Saf Saf drainage basin had lower rainfall and runoff, the erosion was higher. The high sediment yield in the Saf Saf basin could be explained by poorly vegetated hillslopes in the winter and spring seasons, and cultivation on steep slopes exceeding 12% on marly-silty-clayey soils. The negative impacts of this enhanced sediment mobility are directly felt in the Zardézas reservoir which collects the flows of the Saf Saf catchment and is consequently highly reduced in its capacity.

In storms of high magnitude during the winter and spring seasons, the Saf Saf wadi presents greatly peaked graphs of water discharge and sediment concentration which implies high sediment supply because of sparse vegetation, while the Western Kebir wadi presents broad graphs of discharge and comparatively low concentrations.

**Key words:** erosion – sediment yield – catchments – northeast Algeria



## 1. Introduction

Recent published studies of suspended sediment transport in northeastern Algeria are extremely limited and those that have been carried out have been based on determining some overall transport rate on an annual basis. The works by Demmak (1981) and Bourouba (2003) have treated the phenomenon of erosion in a number of catchments including the Western Kebir catchment, during the 7-year period 1972/73-1978/79. Their work was based on measured data of concentration and water discharge in order to evaluate sediment yields in these catchments. The importance of the sediment discharge in the Saf Saf catchment has been underlined in a study of erosion by Amirèche (1984). He introduced studies published by Heusch & Lacroix (1971) and Sogreah-Sogetha (1969) and used empirical formulas to quantify the gross erosion in the basins of the Maghreb and the irrigated areas in Algeria.

Facing this situation, it seemed tempting to introduce a new method developed by Jansson (1997), never used in Algeria, that permits the quantification of the fluxes of sediment in the wadis of Saf Saf and Western Kebir to get a better comprehension of the sediment transport phenomena. This method tries to reconstruct missing suspended sediment concentrations from measured concentrations of the period 1975/76 – 1996/97. High and medium high storms were mainly studied. The loads during low flow and small storms were estimated as a complement to get the total suspended load. The present study will focus on the analysis of erosion factors to understand the variations in suspended sediment transport and its relation to rainfall and runoff.

The Saf Saf and the Western Kebir catchments have been chosen because of their geographical proximity. Each one offers particular topographic, lithologic and vegetational conditions for sediment supply by runoff.

The collection of the hydro-climatic data and suspended sediment concentrations was possible with the collaboration of the different services of the National Agency of Hydraulic Resources (ANRH) of Annaba and Constantine. Daily and annual rainfall data come from five stations of a 22 year period (1975/76 - 1996/1997), viz. Azzaba (elevation of 96m), Ain Cherchar (34m), Bouati Mahmoud (156 m), Zardézas (189 m) and Ouled Habeba (980 m).

## 2. Characteristics of the study catchments

### 2.1 Morphometry

The Saf Saf catchment is located on the ridge of the Tell Mountains, 6 km upstream of the Zardézas dam. This catchment, which has an area of 322 km<sup>2</sup> at the gauging station Khemakhem, has an elongated shape oriented E-W (Fig. 1). The name of the Saf Saf wadi is applied from the junction of the Khemakhem wadi of SE-NW direction and Bou Adjeb of SW-NE direction (Fig. 2). The Saf Saf basin shows a greatly dissected landscape dominated by a high relief with steep slopes (Table 1). The steepness and the high drainage densities ( $Dd > 3.30 \text{ km}^{-1}$ ) of the Bou Adjeb, Khemakhem and Khorfan subcatchments affect the soil stability and contribute to gully erosion and mass wasting (bank erosion, mudflows and landslides).

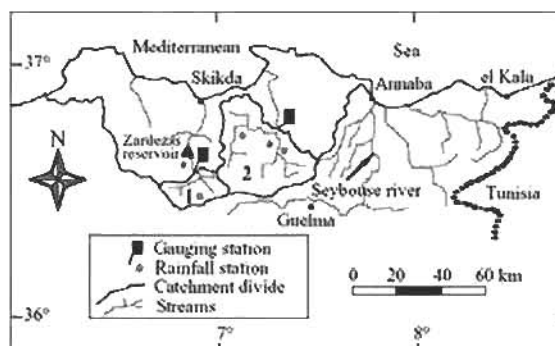


Fig. 1 Location of the study area. 1- Saf Saf catchment; 2- Western Kebir catchment.

The Western Kebir wadi at Ain Cherchar drains an area of 1130 km<sup>2</sup> and presents a very elongated and triangular shape with an orientation E-W parallel to the coastline (Fig.1), that gives the southern hillslopes an exposure to the north (Bourouba, 2003). The drainage system is formed by the union of the Hammam and Emchekel wadis (Fig. 2). The latter stream of E-W direction traverses a set of highly dissected mountains. The Hammam wadi of SW-NE direction, drains the southern part of the catchment with steeper slopes (71% of the area > 10%) and high drainage density ( $Dd = 3.28 \text{ km}^{-1}$ ).

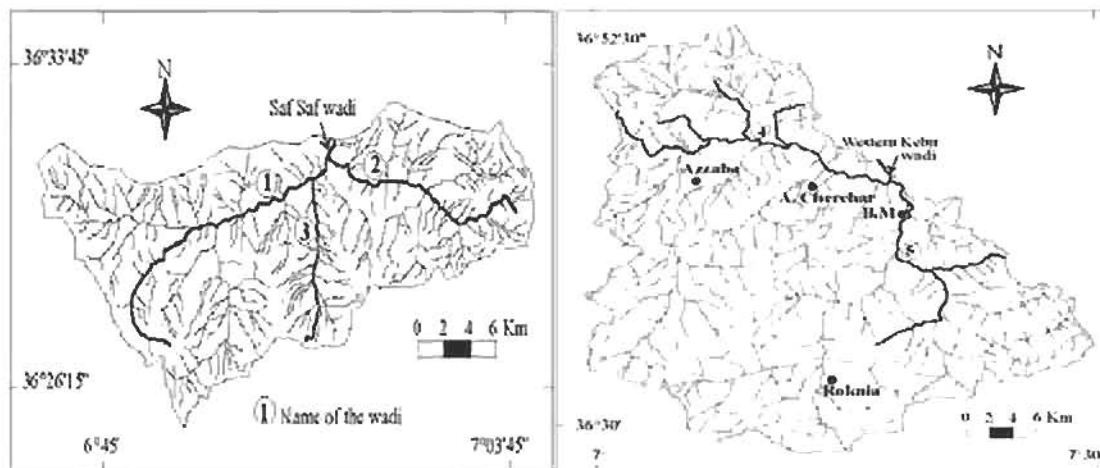


Fig. 2 Drainage networks of the Saf Saf and Western Kebir catchments. 1- Bou Adjeb wadi; 2-Khemakhem wadi; 3- Khorfan wadi; 4- Einchekel wadi; 5- Hammam wadi.

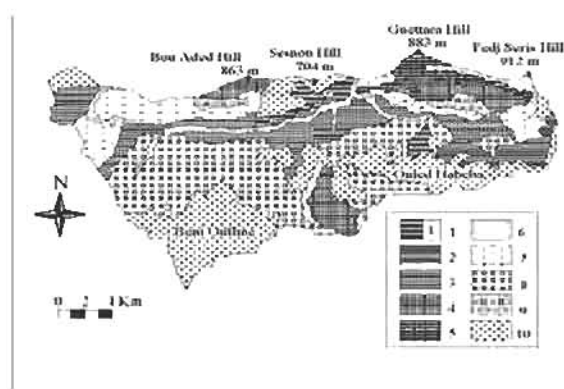
Table 1. Morphometric characteristics of the study catchments.

Morphometric parameters	Saf Saf wadi	Western Kebir wadi
Area (km <sup>2</sup> )	322.00	1130.00
Perimeter (km)	81.00	137.00
Minimum elevation (m)	206.00	25.00
Maximum elevation (m)	1220.00	1220.00
Mean elevation (m)	628.00	278.00
Drainage density (km <sup>-1</sup> )	3.60	2.51
Stream frequency (km <sup>-1</sup> )	7.61	6.49
Main stream length (km)	24.00	58.00
Compactness coefficient	1.27	1.15
Time of concentration (hours)	5.00	17.00
Orographic coefficient	823.00	62.00
Mean slope of the catchment (%)	23.79	15.00

## 2.2 Geology

The Saf Saf catchment has 22% of its area covered by erodible soils on geologic formations like marly limestone of Senonian, gypseous and sandy clay of continental high Miocene and the under-numidian clay of Oligocene (Fig. 3). Geologic formations with highly erodible soils have symbols with lines in Fig.3. Landslides appear largely in the gypseous clay provoked mainly by bank erosion at the stream base of the Bou Adjeb and Khemakhem rivers.

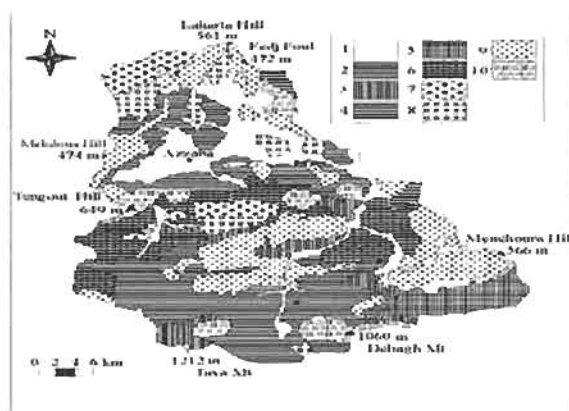
The mudflows, sometimes associated with sandstone boulders are especially visible at the sandstone outcrop foot of Ouled Habeba and at marly limestone foothills (Fig. 3). In the northeast, erodible soils are found on the facies belonging to the sandy-clayey flysch (lower Cretaceous) and to the micaceous sandstone (Eocene).



**Fig. 3** Lithology of the Saf Saf catchment. 1- quaternary formations (scree deposits and alluvium<sup>1</sup>); 2- under-numidian clay (Oligocene); 3- gypseous clay (high Miocene); 4- marly limestone (Senonian); 5- micaceous sandstone (Eocene); 6- micro-breccias flysch; 7- calcareous and clayey sandstone (Cretaceous); 8- conglomerate (Mio-Pliocene); 9- limestone (Miocene); 10- numidian sandstone (Oligocene).

The landscape of predominantly resistant rocks includes sandstone (Oligocene) and Neritic limestone (Fig. 3). The sandstone, which covers the most extended area of the basin (34% of the area), is subjected to tectonic accidents and highly dissected rocks are found on slopes steeper than 16%. The conglomerate formation of the continental Miocene is distributed on nearly 19% of the basin surface. This substratum, greatly affected by folds and faults show a dense drainage network often in conformity with the geologic structure.

The Western Kebir catchment is characterized by the presence of extended areas of rocks with highly erodible soils (clay, marl, marly limestone and micaceous sandstone) that are estimated to cover almost 50% of the basin (symbols with lines in Fig. 4). The clayey material of the alluvial plains of Azzaba, Roknia and Bouati Mahmoud (B.M) covers part of the Numidian sandstone and can give rise to bank erosion by the Emchekel wadi. In the southern part of the Western Kebir basin, marl and marly limestone of folded structure and clay cover a great part of the Hammam subcatchment. The fragile nature of these rocks allows them to be periodically dissected by gullies and moved away as landslides or mudflows. In limestone domes, the rock formation belongs to the neritic Aptian, and provides high summits with very steep hillslopes (Taya Mountain).



**Fig. 4** Lithology of the Western Kebir catchment. 1- quaternary formations; 2- under-numidian clay (Oligocene); 3- marl and shaly marl (high Cretaceous and Eocene); 4- clayey-shaly sandstone (low Cretaceous); 5- marly limestone (Senonian); 6- micaceous sandstone (Nummulitic); 7- metamorphic rocks (schist of Paleozoic); 8- conglomerate (Oligocene); 9- numidian sandstone (Oligocene); 10- limestone (Cretaceous and Senonian).

The north of the basin is composed exclusively of sandstone and under-numidian clay of the Oligocene, conglomerate (Oligocene), metamorphic rocks and limestone (Jurassic) which are usually broken up into small hills. The southern part shows a set of mounds with steep hillslopes (> 15%) in particular facing north. Sandstone and the metamorphic surfaces present aggressive stream downcuttings in conformity with the direction of fractures.

### 2.3 Vegetation

The forest and bushes of the Saf Saf catchment cover 30 % of the basin area. The forest that occupies 11% of that total surface, is found on hilly sandstone slopes of the numidian sandstone of Oligocene (Fig. 3). Dense bushes are observed on the numidian sandstone of Ouled Habeba and spreads to the north on clayey-gypseous rocks and to the southwest on marly limestone surfaces (Fig. 3). Damaged bushes occupy 4% of the basin. The rest of the land is used as grazing land and for cultivation, mainly of cereals and fruit trees.

The vegetation cover of the Western Kebir catchment is composed of permanent forest and bushes that occupy the majority of the northern Emchekel subcatchment. The forest of oak cork and oak zeen species, is distributed mainly in the north (Laharta Hill).

In the southeast part of the Emchekel basin on metamorphic and sandstone rock there is forest on 9% of the surface against bushes on 37% (Fig. 4) of which dense bushes are observed on numidian sandstone and micaceous sandstone. Grazing lands and cultivation substitute to a certain extent the forest and bushes and occupy the floodplain of Azzaba - Ain Cherchar and the clayey-micaceous sandstone and marly limestone terrains. Sparse bushes predominate in the southern Hammam subcatchment.

## 2.4 Rainfall

The two catchments belong to a temperate and humid climate of the Mediterranean type with a slightly fresh winter and a hot summer. Based on recorded daily rainfall of the 22-year period in the study catchments, the Saf Saf catchment is characterized by irregular annual precipitations with a mean annual rainfall of 617 mm and a mean annual temperature of 20°C (Fig. 5). The temperatures vary between 7°C in January and 29 °C in August.

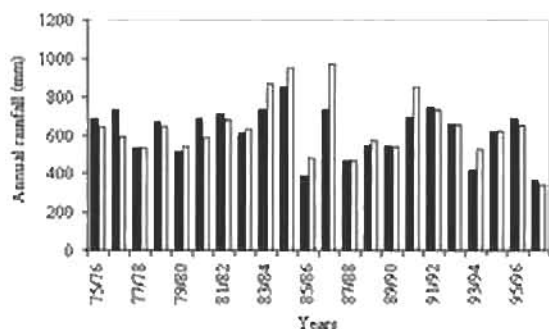


Fig. 5 Annual values of rainfall in the study catchments.

The precipitation data at the Zardézas station near the dam, show that there are rainfall events greater than 30 mm/day during 3 days/year on an average which occur from November to January. These torrential precipitations, are less frequent in the Saf Saf basin than in the Kebir catchment. This situation is probably due to the southern sandstone hillslopes that stand as an obstacle to the humid winds coming from NW to NE. Nevertheless, the violent character of the torrential rains of frequent intensities greater than 100 mm/day may generate high flood events capable of accelerating erosion processes. In both catchments, the number of days of medium high rains between 19 and 29 mm/day is relatively high, ranging from 5 to 6 days/year.

Low rainfall intensities always constitute a great part of the annual rainfall. The torrential and medium high rains are responsible for most of the flood events calculated in this study.

The Western Kebir catchment is characterized by a mean annual precipitation, recorded at the three rainfall stations of 640 mm (Fig. 5). The mean annual temperature is 17°C with a minimum of 8°C in January and a maximum of 28°C in August. The thunderstorms recorded at Azzaba and Ain Cherchar stations are most frequent from October to April and are present 4 days/year as a 22-year average, frequent in November, December and February. Within this basin, the torrential rains are frequent in the northern part of the catchment and are less abundant in the southern mountainous part (BNEDER, 1995).

## 3. Methods

### 3.1 Suspended sediment measurements and analysis

Surveys of suspended sediment concentration and water discharge are carried out in the two streams Saf Saf and Western Kebir. The gauging stations are controlled by ANRH which also performs the water sampling of surface water using one liter bottles, and the analysis of the samples. The water samples, which are taken in various conditions of stream flows, are filtered using a filter of Laurent type ( $\varnothing = 32$  cm). The filter and the mud contained in the bottle is weighed after drying in a special oven during 30 minutes to eliminate the organic matter at a temperature of 110 °C.

The instantaneous values of concentration of storm flows are sampled in variable time intervals. The samples are often more numerous in periods of flood peaks with short time intervals (from half an hour to two hours), whereas in low flow or when the water discharge is constant during the day, a minimum of sampling is done (1 to 2).

For storm events with few or no concentration samples, sediment concentrations were calculated with a sediment rating curve at water discharges with small time intervals e.g. one hour when the water discharge rises or falls quickly and two hours or more when the water discharge rises or falls slowly. It was considered important to calculate the sediment load of each small time increment and to sum up the loads of all the increments of the high-water event.

### 3.2 Sediment rating curves

Before developing sediment rating curves, it was necessary to reconstitute the missing concentration values of the measured storm events using relationships between concentration and instantaneous water discharge (Fiandino, 2003) for the best among the following solutions:

- linear formula :  $y = ax + b$ ;
- power formula :  $y = ax^b$  (by log-transformation)
- or exponential formula :  $y = a e^{bx}$

The purpose of using these relationships was to get smaller time increments for the load calculation of the measured storm events, and to increase the number of data on an equal time basis of the events to get relevant data for the individual discharge classes when sediment rating curves were constructed for the whole period. The developed regressions gave coefficients of correlation exceeding 0.82.

When too many suspended sediment concentration data were missing of a flood, sediment rating curves must be used describing relationships between concentration and water discharge such as  $C = f(Q)$ . As can be judged from Fig. 6, there is no single relationship between the two variables because of the differences in the level of concentration for different highwater events and of different hysteresis relationship for each event (Jansson, 1996). For this reason, it is essential to introduce a method that permits to establish valid sediment rating curves. The chosen method applied in this paper has been developed by Jansson (1985, 1997).

The data set used to develop the sediment rating curves of the Saf Saf stream consists of 1962 measurements of instantaneous suspended sediment concentration including the extra concentrations calculated for each measured flood event and the corresponding water discharge data, and 1805 water and sediment data of the Western Kebir wadi. The procedure started by sorting the data that include measured and the extra calculated values, and by regrouping them into distinct classes of water discharge. The definition of the width of each class interval depends on the data base in question. To the low discharge values, the class interval can be narrow and may contain 70 values in a discharge class. This class interval becomes progressively wider as the data base becomes small at high water discharges. The mean sediment concentration of the measurements in every class is computed and introduced in a plot to determine the change in

direction of the sediment rating curve and to check the goodness of fit of the developed regression (Fig. 6). On the basis of this analysis, it seems that the relationships between the two variables are not always simple. In the same set of high water discharge, we can have different magnitudes of concentration. These relationships are influenced mainly by rainfall associated with other factors such as nature of the soil, land use and topography of the area where the rain occurs.

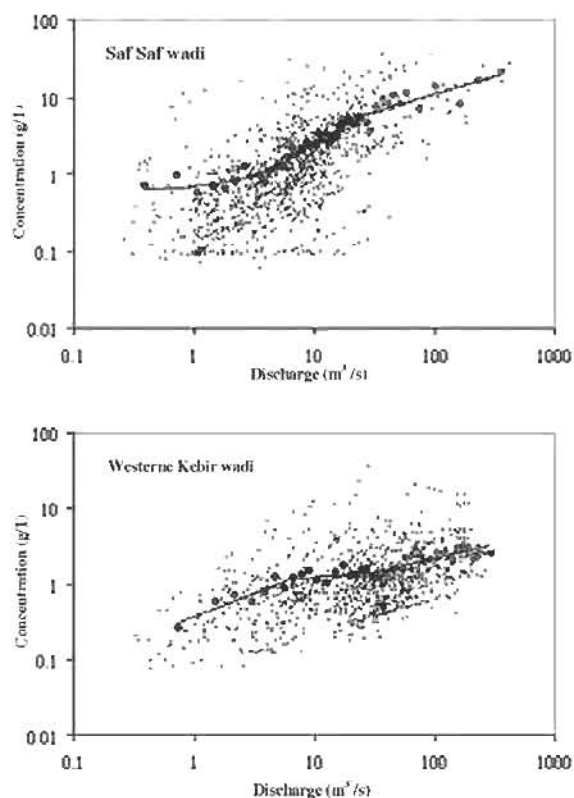


Fig. 6 Sediment rating curves developed on mean concentration of water discharge classes. The small dots represent all measured and additional concentration and water discharge values.

Based on changed direction of the means (Fig. 6), the database of the Saf Saf and Western Kebir catchments was divided into three groups of data with three different regression lines for each basin to establish the sediment rating curve. As log-transformation was used to develop the regression equations the re-transformed equations were corrected for bias. Miller (1984) proposed a correction factor (CF) of a regression of natural logarithms.

This factor is defined by the following formula:

$$CF = \exp(0.5\sigma^2), \sigma^2 = 1/(N-1) * \sum_{i=1}^n (\ln C_i - \ln C'_i)^2 \quad (1)$$

$\sigma^2$ ,  $C_i$  and  $C'_i$  are the variance, the measured and estimated concentration respectively.

For base-10 logarithms the correction factor according to Hald (1952), Jansson (1985) and Ferguson (1986) is:

$$CF = 10^{1.1513\sigma^2} \quad (2)$$

where  $\sigma^2$  is the variance in base-10 logarithms.

### 3.3 Suspended sediment discharge, load and yield

The sediment discharge ( $Q_s$ ) of the sampling occasion is:

$$Q_s \text{ (kg/s)} = Q \text{ (m}^3/\text{s)} \times C \text{ (g/l)} \quad (3)$$

Sediment load of flood events was calculated down to low flow conditions. The computation of the sediment load (SL) of each storm event is given by the general formula:

$$SL \text{ (tonnes)} = \frac{\sum Q \text{ (m}^3/\text{s)} \times C \text{ (g/l)} \times T \text{ (seconds)}}{1000} \quad (4)$$

where  $T$  is the duration of time between concentration values, measured or computed.

As two basins of different sizes were to be compared there was a need to calculate sediment yield. For each month of the year, the sediment loads of flood events were summed and divided by the basin area ( $A$ ). The sediment yield (SY) is:

$$SY \text{ (tonnes/km}^2) = \sum_{i=1}^n SL \text{ (tonnes)} / A \text{ (km}^2) \quad (5)$$

where  $i$  is flood event

The annual sediment yield becomes equal to the sum of the monthly yield values. The mean annual sediment yield corresponds to the sum of the annual sediment yield values divided by 22 years.

## 4. Results and discussion

The use of the discharge class method to develop sediment rating curves provided good results as the

sum of sediment discharges with measured concentration values were close to the sum of those calculated with concentrations predicted with sediment rating curve technique (Table 2).

The calculated loads comprise 202 high, medium high, and low floods but not very small floods in the Saf Saf wadi and 204 floods in the Western Kibir wadi. In the following discussion, attempts will be made to explain the variation in sediment yield between the two drainage basins by looking at sediment yield on an annual, a seasonal, and a storm basis.

### 4.1 The annual sediment yield

The mean annual sediment yield in the Saf Saf catchment was 461 T km<sup>-2</sup> compared with 247 T km<sup>-2</sup> in the Western Kibir drainage basin. That means that the sediment yield was almost two times greater in the Saf Saf basin than in the Western Kibir catchment (Table 3). The three years 1983/84, 1984/85 and 1992/93 with the highest annual loads in the Saf Saf wadi gave 63% of the total sediment load of the 22-year period (Fig. 7). The Western Kibir drainage basin did not have years with such extreme sediment yields as the Saf Saf wadi. In the Western Kibir catchment the sediment transport of the three years 1983/84, 1984/85 and 1990/91 represent 45% of the total 22-year sediment transport.

Considering the hydrologic conditions of the storm events, it appears that the Western Kibir catchment behaves as a highly efficient runoff generating unit (Fig. 7) with nineteen annual runoff coefficients of the storm events down to low flow ranging from 11% (1975/76) to 64% (1983/84). The stream flow response becomes less pronounced when the runoff efficiency of the Saf Saf wadi is examined, where annual runoff coefficients greater than 10% are obtained only for sixteen years, with a maximum of 37% (1984/85). The low runoff coefficients of storm events, observed mainly in the Saf Saf wadi, may be attributed to higher evapo-transpiration in grazing and cultivation areas, and more infiltration and transmission losses that reduce the total discharge, especially downstream, where losses increase in proportion to the increase in ephemeral channel width and the texture of the sediments (Jordan, 1977, Wallace & Lane, 1978, and Belmonte & Beltran, 2001).

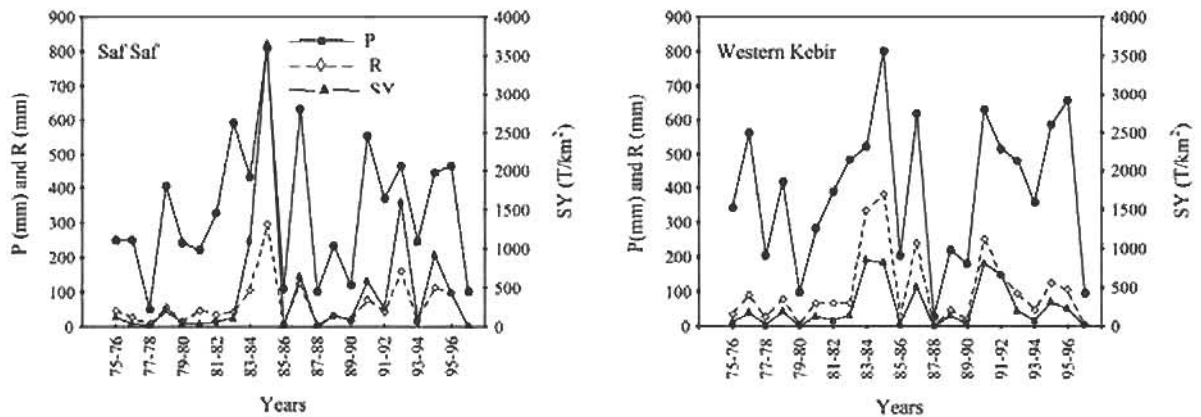
**Table 2.** Corrected equations and the sum of sediment loads calculated from measured concentrations <sup>(1)</sup> and from sediment rating curves <sup>(2)</sup>.

	Equations	R <sup>2</sup>	σ <sup>2</sup>	CF	Corrected equations	Sum of Qs (10 <sup>3</sup> tonnes)	
						Measured <sup>(1)</sup>	predicted <sup>(2)</sup>
Western Kebir catchment	$C = 0.3714 Q^{0.614}$ $C = 0.8927 Q^{0.1429}$ $C = 0.405 Q^{0.369}$	0.84 0.22 0.55	** 0.004398 0.008358	** 1.002202 1.004190	$C = 0.3714 Q^{0.614}$ $C = 1.002202 \times 0.8927 Q^{0.1429}$ $C = 1.004190 \times 0.405 Q^{0.369}$	869.15	844.57
Saf Saf catchment	$C = 0.5868 e^{0.1591Q}$ $C = 0.3925 Q^{0.8276}$ $C = 1.3186 Q^{0.461}$	0.80 0.85 0.64	0.006478 0.002666 0.014213	1.003244 1.001334 1.007132	$C = 1.003244 \times 0.5868 e^{0.1591Q}$ $C = 1.001334 \times 0.3925 Q^{0.8276}$ $C = 1.007132 \times 1.3186 Q^{0.461}$	590.02	546.85

\*\* : number of water discharge classes insufficient to establish a bias correction.

**Table 3.** Mean annual rainfall, runoff, water volume, sediment concentration and sediment yield during storm events in the two study catchments.

Variables	Saf Saf wadi	Western Kebir wadi
Number of storm events	202	204
Mean annual rainfall (mm)	337.52	394.12
Mean runoff (mm)	62.90	103.26
Mean volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	20.23	113.42
Mean concentration (g/l)	7.33	2.46
Mean sediment yield (t/km <sup>2</sup> /year)	461.00	247.00



**Fig.7** Annual rainfall (P), runoff (R) and sediment yield (SY) recorded during storm events in the Saf Saf and Western Kebir catchments.

Despite the fairly low amounts of water discharge during floods, the sediment transport of the 202 storm events in the Saf Saf catchment has revealed that it is subject to high erosion (Table 3). In fact, other physical conditions than runoff may play a major role in this high erosion in the Saf Saf basin such as:

- a higher orographic coefficient than that of the Western Kebir catchment. A general steepness of the topography and a higher drainage density excellent for the delivery of sediment (Table 1).
- a dominance of slopes greater than 10% that occupy 97% (310 km<sup>2</sup>) of the Saf Saf catchment area against only 68% (730 km<sup>2</sup>) of the Western Kebir catchment.
- a small percentage of forest and bushes in the Saf Saf basin.
- soils along the river banks along the reaches upstream of the gauging station are prone to landslides and slumps.

The annual average suspended sediment concentrations of flood events are consistently higher in the Saf Saf wadi than in the Western Kebir stream (Table 3).

#### 4.2 Relationships of annual sediment yield versus rainfall and runoff

After the presentation of the annual sediment yields, it would be interesting to understand the hydrologic work and search for a relationship between the net erosion, i.e. the sediment yield, and the main erosion factors: rainfall, and stream flow.

The obtained results are as follows:

- The correlation coefficient of the relationship between annual rainfall of storms and annual sediment yield during flood events is 0.86 in the Saf Saf catchment and 0.95 in the Western Kebir catchment at a significance level of 5% (test of Spearman) (Fig. 8).
- The two catchments present more complex relationships between annual mean concentrations and annual rainfall/annual runoff. An important part of the concentration values are dispersed widely around the regression line of which the coefficient of correlation doesn't exceed 0.58. This scatter in the rainfall plot probably reflects an oscillation in the conditions of the stream flow including the groundwater flow conditions, and in rainfall intensity leading to periods of high sediment transport alternating with periods of more clear runoff. Thereby, the factor of rainfall alone remains insufficient to explain the variations in sediment fluxes.
- The correlation coefficients of the relationships between annual flood runoff and sediment yield of the flood events in the two catchments are very high ( $r > 0.96$ ) and significant at 5% (Fig. 8). The flow régime is characterized by extremes with humid years associated with active erosion and by low flow years insufficient to conduct high erosion and produce great quantities of suspended sediment load.

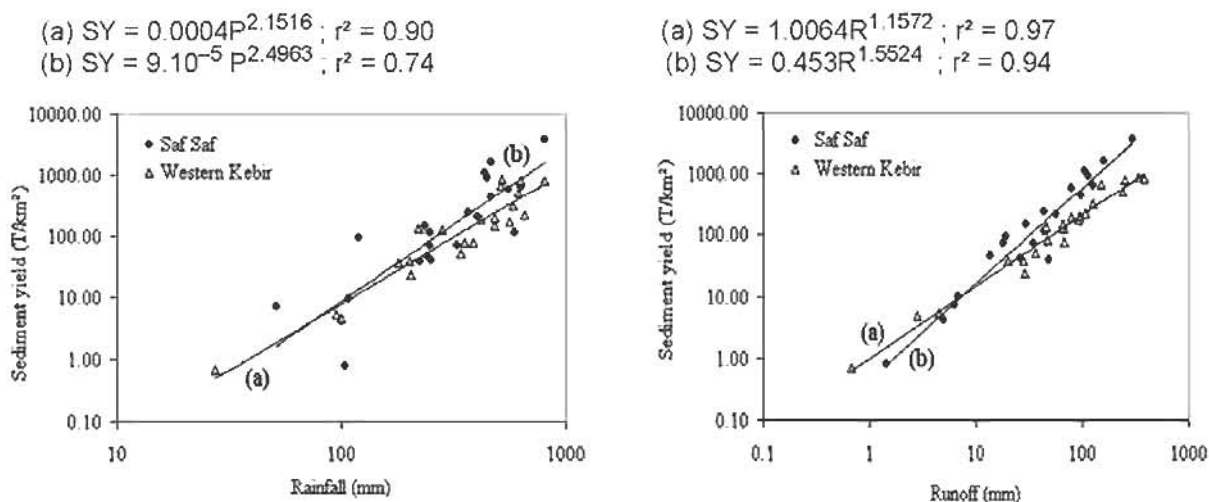


Fig. 8 Relationships of annual values: rainfall (P) versus sediment yield (SY) and runoff (R) versus sediment yield.



### 4.3 The seasonal sediment yield

The mean monthly sediment yield values of flood events during the study period are higher in the winter and spring seasons and the high monthly values are more abundant in the Saf Saf wadi. Indeed, the sum of the mean monthly sediment yields of January-March represent almost 85% of the mean annual sediment yield, whereas in the Western Kebir wadi only 67% are transported during these three months.

Monthly relationships between stream flow and sediment yield show a considerable rise of the coefficient of correlation of the rainy months related to the winter and spring seasons of the year. This coefficient is greater than 0.98 in both catchments. In addition, the relationships of monthly rainfall versus sediment yield also show an important rise of the coefficient of correlation which exceeds 0.91.

#### 4.3.1 Fall season

The rainfall and hydrometric characteristics of the two catchments in the autumn months September to November can be illustrated as follows :

- the mean monthly rainfall of the flood events is high in November with 39 mm in the Western Kebir catchment (Table 4). However, the two catchments show seasonal quantities of rain of 52 mm in the Saf Saf catchment and 69 mm in the Western Kebir catchment.
- the mean monthly runoff coefficients range between 2.3% and 7% in the Saf Saf catchment and between 6% and 18% in the Western Kebir catchment.
- a low seasonal flood runoff of about 3 mm in the Saf Saf wadi basin, and about 9 mm in the Western Kebir wadi basin.
- a seasonal mean concentration of 3.86 g/l in the Saf Saf wadi and 3.64 g/l in the Western Kebir wadi.
- the mean sediment yield of this season is three times higher in the Western Kebir catchment with 32 T km<sup>-2</sup> than in the Saf Saf catchment with 10 T km<sup>-2</sup>. The autumn sediment loads make up 13% of the mean annual loads of the study period in the Kebir stream and 2.2% of the loads in the Saf Saf stream.

**Table 4.** Mean monthly rainfall, runoff, runoff coefficient, concentration and sediment yield during storm events in the two catchments.

#### a- Saf Saf catchment

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug
P (mm)	-	17.95	33.52	47.08	86.98	55.09	55.09	33.02	9.57	-	-	0.63
R (mm)	-	0.41	2.22	4.94	23.81	11.81	11.70	6.51	1.02	-	-	0.48
RC (%)	-	2.28	6.62	10.49	27.37	21.44	21.79	19.71	10.66	-	-	76.19
C (g/l)	-	2.48	4.12	5.50	11.11	6.72	3.97	4.25	3.82	-	-	5.35
SY (T/km <sup>2</sup> )	-	1.02	9.14	27.18	263.49	79.33	46.45	27.65	3.91	-	-	2.55

#### b- Western Kebir catchment

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug
P (mm)	2.20	28.48	38.55	69.49	87.24	70.34	58.89	26.69	11.20	1.06	-	-
R (mm)	0.15	1.71	6.93	10.77	27.95	25.35	18.93	9.73	1.73	0.01	-	-
RC (%)	6.82	6.00	17.98	15.50	32.04	36.04	32.14	36.46	15.45	0.94	-	-
C (g/l)	1.37	2.20	4.04	2.18	2.34	2.49	2.42	2.11	2.58	0.51	-	-
SY (T/km <sup>2</sup> )	0.20	3.75	27.93	23.49	65.55	54.57	45.11	22.59	4.12	0.01	-	-

### 4.3.2 Winter season

The winter months December to February are essentially characterized by rains of polar and cold air masses. These rains often cover large areas and are continuous with moderate to high intensity (rains > 30 mm/24 hours). They produce more runoff than those of the autumn. Indeed, the winter period is characterized by mean monthly runoff coefficients that vary from 11% to 27% in the Saf Saf wadi and from 16% to 36% in the Western Kebir wadi. This coefficient can exceed 80% in particular at times of exceptional floods in the Saf Saf stream. This fact indicates a high percentage of surface runoff in certain cases. The mean seasonal hydrological and sedimentological characteristics of the two catchments are:

- the mean seasonal rains are higher in the Western Kebir catchment, but the winter rains of the two catchments make up about 60% of their mean annual rainfalls (Table 4).
- a winter runoff of flood events of 64 mm in the Western Kebir basin representing 61% of the mean annual flood runoff, and a flood runoff of only 41 mm in the Saf Saf basin which is 65% of the mean annual runoff.
- the mean concentration of flood events of the season is 9.14 g/l in the Saf Saf catchment against 2.37 g/l in the Western Kebir basin.
- a higher winter sediment yield of flood events in the Saf Saf catchment with a mean seasonal sediment yield of 370 T km<sup>-2</sup> that constitutes about 79% of the mean annual sediment yield. This is almost 2.6 times higher than the sediment yield in the Western Kebir catchment.

Although the rainfall and runoff is lower in the Saf Saf catchment the sediment yield is higher than in the Western Kebir basin. This can be explained by other factors such as higher steepness of the basin slopes, erodible soils close to the main river channel near the gauging station (Fig. 3), higher percentage of the area with poor vegetation and more human activity in the Saf Saf catchment which altogether can cause a high percentage of surface runoff out of the total runoff during winter floods.

### 4.3.3 Spring season

This season has a mean sediment yield of 78 T km<sup>-2</sup> in the Saf Saf catchment and 72 T km<sup>-2</sup> in the Western Kebir catchment, thus supplying less sediment than the winter season (Table 4).

The reasons of this decrease in sediment load compared with the winter season can be explained by:

- the existence of a seasonal plant cover capable to reduce the mobility of sediment materials from hillslopes.
- a reduction of flood events generated by high intensity rains compared with the winter season, especially the number of high torrential rains that lead to excessive surface erosion and rapid mass-movements.

As is shown in Table 4, the Western Kebir river shows higher runoff and runoff coefficient of the season, about 1.5 times higher than the Saf Saf wadi. The high runoff in the Kebir basin may be caused by higher groundwater flow at the end of the wet season.

The Saf Saf wadi has a mean seasonal concentration of the storm events of 4.1 g/l against only 2.3 in the Western Kebir wadi. A high relative relief within its basin and a sub-humid climate coupled with sparsely forested areas and cultivation on fairly steep hillslopes are major reasons for this intense erosional activity in the Saf Saf catchment. In addition, rocks with highly erodible bare soils are exposed more or less in large portions of the Saf Saf catchment.

### 4.3.4 Summer

The summer months from June to August are dry and the evaporation is high. The runoff coefficient is low in the Western Kebir wadi, with 1% in June (Table 4). On the other hand, the Saf Saf stream presents a high runoff coefficient, of 76%, mainly related to one torrential rainfall and an instantaneous runoff due to a rapid overland flow on dry soils. The low water volumes flowing in this season reflect the low sediment transport. Nevertheless, the Saf Saf catchment shows a mean monthly sediment yield in August of 2.55 T km<sup>-2</sup> (Table 4).

## 4.4 Selected storm events

### 4.4.1 Flood in November 1982

The sampled flood of 11-12 November in both catchments shows that in the Saf Saf wadi, Q and C had simultaneous peaks (Fig. 9) but the falling limb had an increase in sediment concentration, leading to a counterclockwise loop of the Q-C relationship (negative hysteresis).

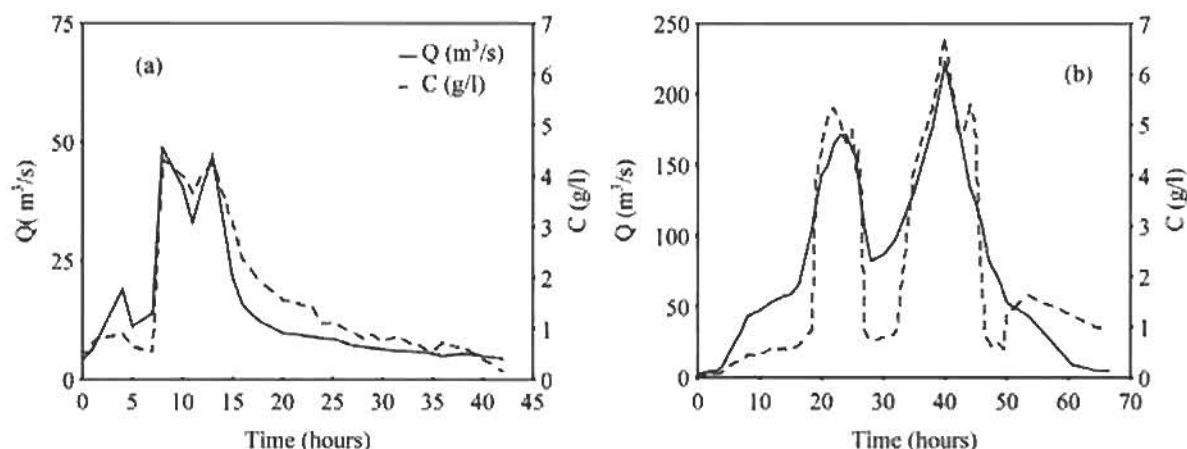


Fig. 9 Floods in the autumn. (a) 11-12/11/1982 in Saf Saf ; (b) 10-13/11/1982 in Western Kebir.

Although, the Saf Saf catchment received more rainfall (123 mm) during this flood than the Western Kebir catchment, it shows low runoff and low sediment concentration (Table 5). Consequently, despite more or less sparse and low permanent vegetation, the dry soils after a hot and dry summer

season prevented much sediment to be washed away, and the soils were not humid enough to provoke landslides. The total sediment load produced is then estimated at  $5.3 \times 10^3$  tonnes, which represents about 15% of the annual sediment yield of the flood events in 1982/83.

Table 5. Water discharge and sediment discharge variations during storm events in the study catchments. 1, Saf Saf wadi ; 2, Western Kebir wadi.

Storm events	November 1982		December 1990		March 1985	
	1	2	1	2	1	2
Rainfall (mm)	123.00	79.15	101.60	142.50	95.50	104.35
Runoff (mm)	6.70	17.28	17.67	45.20	76.30	57.99
Volume ( $10^6 m^3$ )	2.16	19.53	5.69	51.07	24.57	65.53
Mean discharge ( $m^3/s$ )	14.27	79.19	21.08	186.67	71.09	195.72
Mean concentration (g/l)	2.46	3.55	14.53	3.17	4.81	1.50
Peak discharge	48.70	222.07	94.11	321.45	345.33	316.81
Peak concentration	4.31	6.72	36.13	3.40	39.62	2.81
Sediment load ( $10^3$ tonnes)	5.30	69.39	82.69	162.10	118.17	98.08
Sediment yield (T/km <sup>2</sup> )	16.46	61.41	256.81	143.46	366.98	86.80

The sediment load of the same event in the Western Kebir catchment, was  $69.4 \times 10^3$  tonnes which represents 42% of the annual sediment yield in 1982/83. This event resulted from a total rainfall 79 mm and produced a peak discharge of  $222 m^3/s$  and a peak concentration of  $6.7 g/l$  (Fig. 9). The relationship between Q and C of the first hydrograph shows a marked positive hysteresis because of re-erosion of sediment in the channel before the water discharge had peaked.

The second hydrograph shows C-Q graphs with simultaneous peaks and somewhat higher concentrations than the Saf Saf wadi. As the Western Kebir basin area is about 3.5 times larger than the Saf Saf basin area, the scale of the Q axis is nearly 3.5 times greater.

#### 4.4.2 Flood in December 1990

This is the most important storm event of the hydrologic year 1990/91, measured from 23 to 26 December in the Saf Saf catchment. The most intense rain fell in December 24 and 25 with 32 mm and 52 mm. The Q and C curves show simultaneous peaks (Fig. 10) and the Q-C relationship presents a plot that corresponds to a linear relationship. The main C peak shows as high a concentration as 36 g/l reached in 29.5 hours (Fig 10, Table 5), provided by a quite high runoff which was capable of eroding and transporting great quantities of sediment toward the outlet. The sediment transport during this flood event was about  $83 \times 10^3$  tonnes, representing 44% of the sediment load of flood events in the hydrologic year 1990/91. The recorded flood at the Western Kebir

catchment shows a flattened summit of the hydrograph with a highest discharge of  $321 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fig. 10). The concentration is very low compared to that of the Saf Saf wadi with a peak of only 3.4 g/l (Table 5). In spite of its fairly high runoff coefficient of 32% and rainfall of 143 mm, this flood transported less sediment load per  $\text{km}^2$  compared to the Saf Saf catchment, and contributed with only 18 % of its annual sediment yield of floods in 1990/91 ( $803 \text{ T km}^{-2}$ ). The appearance of sediment is not solely dependent on water discharge but can rather be related to other geomorphic conditions. As concentrations are relatively low, there is a limiting factor that appears to be the availability of material because of the higher vegetation cover and litter than in the Saf Saf basin causing less sediment concentration in the surface runoff and less landslides.

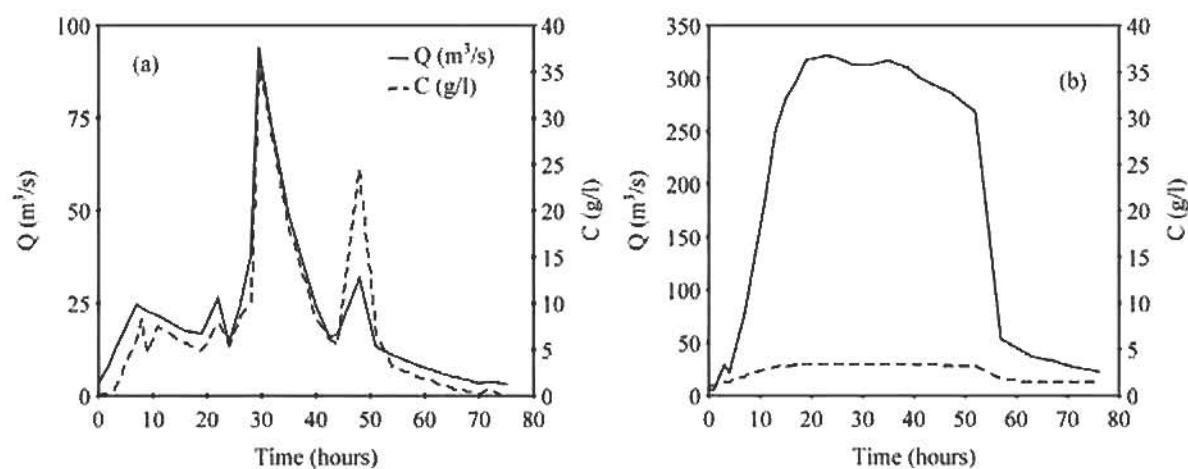


Fig. 10 Floods in the winter. (a) 23-26/12/1990 in Saf Saf; (b) 23-26/12/1990 in Western Kebir.

#### 4.4.3 Flood in March 1985

The floods of this season and in particular those of March can present high runoff and sediment discharge because of the humid period that may prevail, exceeding sometimes the winter moisture. For this reason, a storm event representing the most rainy month of the season has been chosen for discussion.

The flood of 7-10/03/85 is an important event in terms of sediment transport in the Saf Saf catchment that comes after the flood of 29/12/84 - 03/01/85 ( $3134 \text{ T km}^{-2}$ ). The total rainfall of this flood event, which represents 71% of the rain in March 1985, shows a rainfall of 96 mm and a runoff of 76 mm (Table 5).

The morphological impact of this flood event are certainly influenced by the saturation of the soils of the weak geologic formations poorly covered by vegetation. The high peaks of water discharge and sediment concentration obtained after 17 hours of the rising limb coincide with the time of concentration of the catchment and will be caused by overland flow (Fig. 11, Table 5).

This situation produced the huge quantity of  $367 \text{ T km}^{-2}$  of material removed by overland flow and mass wasting on clayey and marly hillslopes and river banks. This sediment load represents about 10% of the sediment transport in 1984/85 which was a sediment transport year of high magnitude.

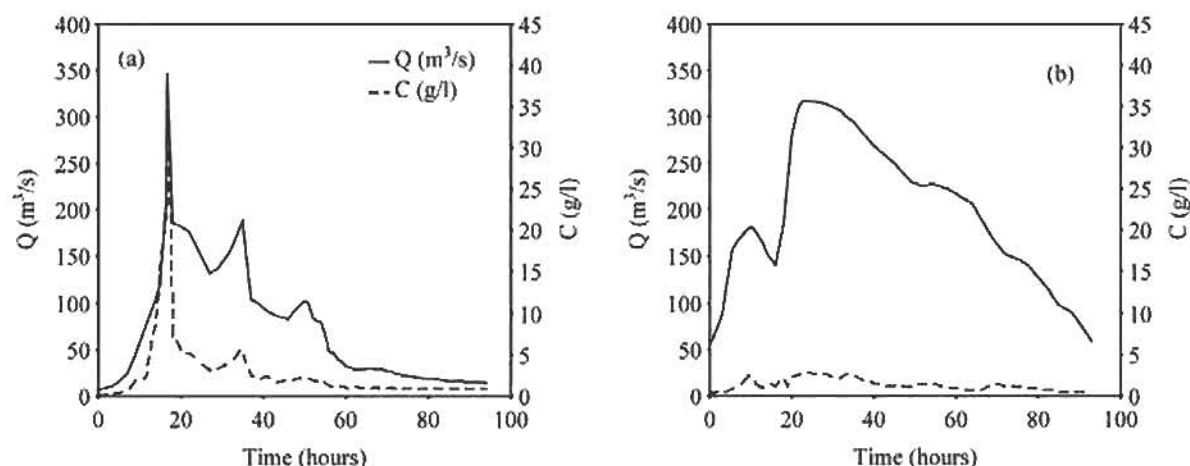


Fig. 11 Floods in the spring. (a) 7-10/03/1985 in Saf Saf ; (b) 7-10/03/1985 in Western Kibir.

The flood 7-10/03/1985 in the Western Kibir wadi shows a broader Q graph but lower runoff than the Saf Saf basin (Fig. 11, Table 5). This broader peak seems to be made up of both overland flow and throughflow. Although this flood event corresponds to somewhat higher rainfall in the Western Kibir basin compared to that of the Saf Saf basin (Table 5), it shows a lower sediment load of  $87 \text{ T km}^{-2}$  that represents only about 11% of the total sediment transport of flood events during the hydrologic year 1984/85. It is believed that the limited sediment load could be caused by less supply of sediments in the surface runoff water due to more vegetation cover, less steep slopes, and to less erodible soils along the river in the downstream parts of the basin with less slides and slumps near the gauging station, and may also be caused by some sediment accumulation on floodplains.

#### 4.5 Zardézas reservoir sedimentation

Sediment deposition in a reservoir provides an ideal opportunity to study the erosional history of a drainage basin. As previously mentioned, the Saf Saf wadi passes through the Zardézas reservoir. This reservoir constructed in 1945 has since then undergone substantial sediment accumulation. Because of the trap efficiency of the Zardézas dam by the Saf Saf inflow, the initial water capacity of  $15 \text{ Mm}^3$  is not as high any more.

The available reports taken from the Agency of Algerian dams show that during the first 13 years of existence (1945-1958), the sedimentation reached  $4.97 \text{ Mm}^3$ . The accumulated volume increased to  $10.36 \text{ Mm}^3$  in 1982 and  $13.30 \text{ Mm}^3$  in 1992.

From the period of 1982 to 1992, the Zardézas reservoir accumulated  $2.94 \text{ Mm}^3$  of sediment. The bulk density of the deposits is  $1.8 \text{ g/cm}^3$ . The bulk density is by implication always the wet bulk density. The dry bulk density of deposits must be known to be able to compare with the sediment calculations at gauging stations. Another reservoir, which is dry some period of time every year, had a measured wet bulk density of  $1.4 \text{ g/cm}^3$ , and a measured dry bulk density of  $0.6 \text{ g/cm}^3$  on the terraces with clayey silt and silty clay, and a wet bulk density of  $1.25$  and a dry bulk density of  $0.4 \text{ g/cm}^3$  in the upper parts of the channel deposits (Axelsson, 1992, p. 93). Therefore we estimated the dry bulk density of the Zardézas reservoir to be about  $0.9 \text{ g/cm}^3$ . With this dry bulk density the sediment deposited in the reservoir during the period 1982 to 1992 was calculated to be about  $2.65 \times 10^6$  tonnes. With a mean dry bulk density of  $0.8$  the sediment deposition would be  $2.35 \times 10^6$  tonnes. In fact, some wash load has passed the reservoir.

The suspended sediment load of storm events at the gauging station during this period was shown to be  $2.16 \times 10^6$  tonnes. Sediment load during small storms and during low water periods can be estimated to be about  $0.06 \times 10^6$  tonnes during this ten-year period. Some of the material in the reservoir is bed load material. A bed load of 10% of the suspended load would give  $0.22 \times 10^6$  tonnes of bed load (cf. Lane & Borland, 1951). Altogether the bed load and suspended load at the gauging station during the 10-yr period would be  $2.44 \times 10^6$  tonnes. As the sampling used surface water samples this load is too low an estimation of the total load.

In recent years, the Algerian government has given more interest to the problem of reservoir sedimentation and the impact of the development of agriculture on erosion, especially during the drought periods that have touched the country. Thus, decisions were taken to remove the accumulated sediments in the reservoir and to make managements in the drainage basin starting from 1993 by an Algerian society (SONATRAM).

## 5. Conclusion

The suspended sediment transport was calculated for the Saf Saf wadi with a drainage basin of 322 km<sup>2</sup>, and the Western Kebir wadi with a basin of 1130 km<sup>2</sup>. In water sampled storms a few additional concentrations were added by using one regression of each storm. For storms with no or few concentration samples, a sediment rating curve was used. The sediment rating curves of the two wadis were developed with the discharge class method. The measured and additionally calculated concentrations of all sampled storms were grouped into water discharge intervals and sediment rating curves were developed by using the mean concentrations and the mean discharges of the discharge classes.

The sediment load for a 10-year period at the gauging station in the Saf Saf wadi before the Zardézas reservoir was estimated to be  $2.44 \times 10^6$  tonnes, and the deposition in the reservoir including bed load was about  $2.35\text{-}2.65 \times 10^6$  tonnes which implies that the sediment load calculations were of the right order of magnitude.

The mean annual sediment yield during high, medium high, and low flood events of the 22 years of the study period was 461 T km<sup>-2</sup> in the Saf Saf drainage basin and 247 T km<sup>-2</sup> in the Western Kebir basin. Although the Saf Saf drainage basin had lower rainfall and runoff the erosion was higher. However, other factors seem to be more important in the erosion dynamics. These erosion factors can be summarized as:

- higher relief energy expressed by the orographic coefficient.
- higher drainage density.
- a greater part of the area having slopes exceeding 12% gradient in the Saf Saf catchment.
- extended cultivation on lands mostly associated with marly silty-clayey materials, often furrowed on slopes exceeding 12%.
- a more important supply of sediment coming from eroded and poorly vegetated hillslopes in the winter and spring seasons.

Especially during high rainfall years there is sediment transport of high magnitude in the Saf Saf wadi. During the 22-year study period three humid years contributed with 63% of the sediment transport in the Saf Saf wadi. The Western Kebir stream had a lower and more even sediment transport within the years and between the years. In this river, 45 % of the sediment load of the 22 years were transported in three years.

The sediment yields are highest in the winter and spring seasons. In storms of high magnitude during these seasons the Saf Saf wadi has highly peaked discharge and concentration graphs which implies high sediment supply with much erosion because of sparse vegetation, while the Western Kebir wadi has broad graphs of discharge and low concentrations implying high amounts of throughflow and upper groundwater flow and better filtering of the sediment of the overland flow by vegetation and litter.

As understood from reservoir sedimentation, it is essential to fight against the erosion and mass movement processes by using different procedures such as reforestation and other soil conservation practices.

## Reference

- Amirèche H. (1984). Etude de l'érosion dans le bassin versant de Zardézas ( Tell constantinois, Algérie) - milieux physiques et aménagement rural. Thèse doct. 3<sup>ème</sup> cycle, Université Aix-Marseille, 240 p.
- Asselman N. E. M. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. *J. Hydrol.*, 234: 228 – 248.
- Belmonte A. M. C., & Beltran F. S. (2001). Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region, Spain. *Catena*, 45: 229 – 249.
- Benkhaled A. & Remini B. (2003). Analyse de la relation de puissance : débit solide - débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Rev. Sci. Eau*, 16 (3): 333 – 356.
- Bourouba M. (2003). Etude de la teneur de sédiments en suspension de deux oueds méditerranéens intramontagneux du Tell oriental (Algérie). *Z. Geomorph.*, 47 : 51 – 81.
- Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (1995). Etude du Bassin Versant de l'Oued Kébir Ouest (Barrage de Zit Emba). Direction Générale des Forêts, Tipaza, Algérie. Phases 1 et 2.

- Demmak A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse doct. Ing., Paris, 323 p.
- Ferguson R.I. (1986). River loads underestimated by rating curves. *Water Resour. Res.*, 22 (1): 74 – 76.
- Fiandino M. (2004). Apports de matières en suspension par les fleuves côtiers à l'Etang de Berre (Bouches – du – Rhône, France). *Etudes de géographie physique*, suppl. n°XXXI. Travaux du BVRE, du Mont – Lazère. UMR6012 « Espace » - équipe G.V.E. Nice.
- Hald A. (1952). *Statistical theory with engineering applications*. – Wiley, New York.
- Heidel S. G. (1956). The progressive lag of sediment concentration with flood waves. *Trans. Am. Geophys. Union*, 37(1): 56 – 66.
- Heusch B. & Lacroix A. M. (1971). Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin – application au Maghreb. *Mines et géologie* n°33. Rabat.
- Jansson M. B. (1996). Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *J. Hydrol.*, 183: 227 – 241.
- (1997). Comparison of sediment rating curves developed on load and on Concentration. *J. Nordic Hydro.*, 28 (3): 189 – 200.
- Jordan P. R. (1977). Streamflow transmission losses in Western Kansas. *Journal of Hydraul. Div., Proc. ASCE* 103 (HY8): 905 – 919.
- Wallace D. E. & Lane L. J. (1978). Geomorphic features affecting transmission losses potential on semiarid watersheds. *Hydrol. Water Resour. Ariz. Southwest*, 8: 157– 164.
- Marre A. (1992). Le tell oriental algérien : de Collo à la frontière tunisienne. *Etude géomorphologique*. Office des Publications Universitaires, Alger. 624 p.
- Miller D.M. (1984). Reducing transformation bias in curve fitting. *Am. Stat.*, 38(2): 124 –126.
- Sogreah-Sogetha. (1969). *Etudes générales des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie*. Dossier Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire. Alger, 164 p.
- Zavoianu I. (1985). *Morphometry of drainage basins*. *Developments in Water Science*, 20. Elsevier, Amsterdam. 238 p.

#### Used formulas :

$$\text{Compactness coefficient} = 0,282P/\sqrt{A}$$

$$\text{Time of concentration (Giandotti)} = \frac{4\sqrt{A}+1,5L}{0,8\sqrt{Hm-h}}$$

Orographic Coefficient =  $Hm \times \tan \varphi$ , where  $\tan \varphi = Hm - h / A$ .  
 With P : catchment perimeter (km); A : catchment area (km<sup>2</sup>)  
 h : minimum elevation (m); Hm : mean elevation (m)  
 L : main stream length (m)

## Communication :

# Les Données INCT au Service de la Communauté de Gestion des Risques Majeurs \*

N. Omrane, N. Fergane, F. Degaichia, Dj. Bentata  
Centre de Télédétection / Institut National de Cartographie et de Télédétection  
E-mail : inct09@wissal.dz

**Résumé:** Depuis ces dernières années, le nombre de catastrophes naturelles connaît une évolution inquiétante chose qui a causé une hausse en pertes humaines et économiques énormes. Durant des situations pareilles, le premier souci des équipes de secours présentes sur le terrain ou celles voulant se déployer sur les lieux, est le besoin urgent de disposer des données de localisation précise afin de les mettre à la disposition des secteurs affectés et de mieux coordonner les actions de sauvetage et acheminement des secours. Dans ce contexte, l'utilisation de la donnée géographique au sens large du terme, est la solution requise dans cette situation à savoir: l'imagerie satellitaire, données SIG, spatiochartes, MNT, etc, offrant ainsi une vue globale du lieu de la crise, plus particulièrement dans les zones d'accessibilité réduite.

Le potentiel de la donnée géographique, produite par l'INCT ou autre organisme, n'est pas à démontrer dans cet article que se soit du point de vue détection et estimation des pertes liées à des catastrophes naturelles, de type inondation, glissement de terrain ou cyclone ou bien les besoins de localisation. Il se veut ici de montrer la nécessité de combiner toute cette donnée avec d'autres types de données pouvant aider à mener des études dans le contexte de prévention des risques majeurs. Nous présentons ici quelques exemples de produits pouvant être considérés dans ce contexte.

**Mots clés:** gestion risques majeurs, information géographique, spatiocharte, MNT.

**Abstract:** During the recent years, the world has seen a considerable evolution in terms of natural and non-natural disasters causing huge casualties and very complicated economic situations. In such situation, the main concern of rescue teams is a precision localisation data to enable them organizing help dispatching and rescue operations, such satellite data, GIS data, DEM and other type of information. We present in the paper some of the data produced at the National Institute of Cartography and Remote

Sensing (INCT) and which can be considered in these situations. Combining this data with other type of information can serve in many studies involved in disasters management and operations management.

**Keywords :** disaster management, geographical information, spatial maps, DEM.

## 1. Introduction

Les contraintes de temps, l'affolement et les limitations en terme d'équipements d'intervention, sont généralement les acteurs retardant les opérations de secours après une catastrophe naturelle. Une bonne coordination entre les services concernés est nécessaire. L'information géographique est d'une utilité vitale dans ces situations d'où la nécessité de la partager, de la mettre à la disposition des utilisateurs au temps requis. Ceci inclus les différentes échelles et tout type de produit: orthométriques, images satellitaires, MNT et autres produits thématiques. L'INCT considéré comme étant le plus gros producteur et gestionnaire de la donnée géographique en Algérie, s'inscrit dans une optique lui évitant de travailler indépendamment des autres acteurs, en assurant une interopérabilité de ses systèmes avec le monde extérieur. L'expérience a montré que le problème ne réside pas à ce point mais plutôt aux difficultés de mettre cette donnée disponible au niveau d'un système unifié. Les besoins nécessaires de tel système peuvent être résumés dans ce qui suit :

- Assembler l'information nécessaire
- Assurer la mise à jour de l'information (fraîcheur de la donnée)
- Traitement quasi-réel de l'information.

Un système intelligent prenant en considération tous ces points doit assister les différents intervenants, et doit être mis en place en impliquant tout le monde.

Nous détaillons ci-dessous quelques produits dérivés totalement ou partiellement de l'imagerie satellitaire et qui peuvent être intégrés dans de tel système.

\* Poster présenté lors du Séminaire International sur « l'utilisation des technologies spatiales pour la prévention et gestion des catastrophes naturelles », organisé par l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL) avec la collaboration du Bureau des Affaires Spatiales des Nations Unies (BAS-ONU) et l'Agence Spatiale Européenne (ESA), qui s'est déroulé du 22 au 26 mai 2005 à Alger.



## 2. La spatiocarte

La particularité de ce produit est qu'il résulte de la combinaison de l'imagerie satellitaire avec l'information issues de la cartographie existante, des bases de données ou tout simplement de l'interprétation des images satellitaires. Il est entendu que ce produit peut être renseigné avec tout type de thématiques suivant les besoins des clients. Occasionnée par la disponibilité de l'image satellitaire, la maîtrise de ce processus au niveau de l'INCT, permet l'obtention de tel produit dans une durée mesurée en terme d'heures répondant ainsi à des sollicitations urgentes et renseignée avec la thématique décrite par le demandeur.

Les images satellitaires utilisées dans ce contexte sont rectifiées radiométriquement et géométriquement afin de les approcher le plus de la réalité terrain. Le fond dérivé de cette imagerie constitue lui aussi un produit exploitable vue l'information contenue dans ce type d'image.

Nous schématisons ci-dessous le processus de production de spatiocarte au niveau de l'Institut :

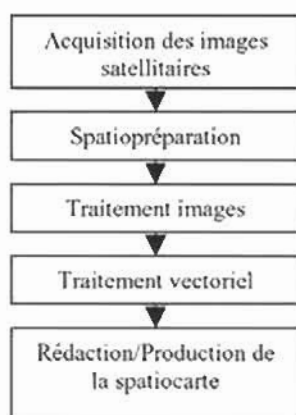


Fig. 1 Processus de production d'une spatiocarte

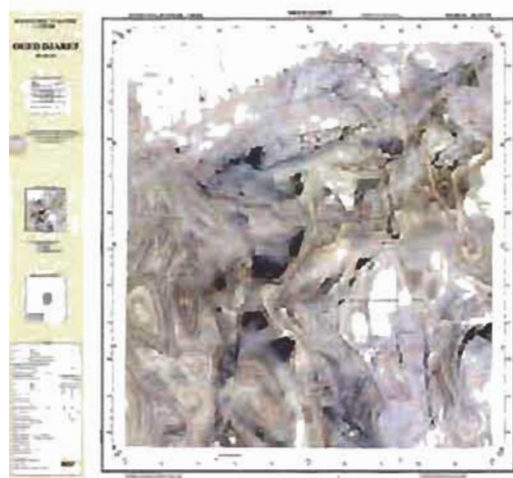


Fig. 2 La spatiocarte

## 3. Orthoimage

L'orthoimage numérique est le résultat d'un procédé dans lequel une photographie aérienne est rectifiée des déformations dues au relief et aux différentes distorsions. Elle peut être adaptée sur une projection cartographique donnée et pouvant être combinée avec une scène satellitaire pour bénéficier de la richesse de cette dernière. Durant le processus de production d'un orthonumérique, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) peut être généré soit par corrélation automatique à partir d'imagerie stéréoscopique soit par dérivation à partir de l'altimétrie existante. Ce type de produit peut être utilisé dans les études nécessitant la connaissance de la morphologie du terrain (inondations, glissements de terrain, etc.).



Fig. 3 Exemple de comparaison de donnée satellitaire (scène IKONOS sur la région de Zemouri juste après le séisme 2003) avec la cartographie correspondante existante au 1/25000 de la même région

La comparaison de l'information récente en provenance de l'imagerie satellitaire avec la donnée existante pourra être exploitée afin de détecter les changements que connaît une zone ou d'autres types d'applications.

En plus, le MNT constitue un autre produit pouvant être utilisé dans des études nécessitant la connaissance de l'information altimétrique.

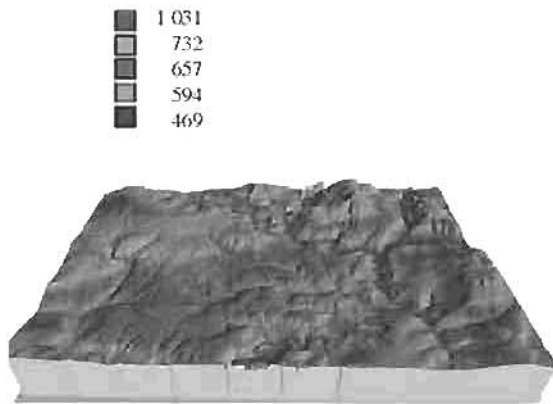


Fig. 4 Exemple d'un MNT issu d'une prise de vue 1/40 000, année 2000, région de Souk Ahras

#### 4. Conclusion

Dans cette communication, nous avons présenté une catégorie de produits dérivés de l'imagerie satellitaire et qui peuvent être considérés dans les études liées à la gestion des risques majeurs. La mise en place de systèmes d'information d'aide à la gestion de ces crises, cohérents et opérationnels,

reposera essentiellement sur la donnée qu'ils manipulent. La maîtrise des processus de production de cette donnée au niveau de l'INCT ne fait que rehausser de tels systèmes et assurera une interopérabilité entre les différents sous-systèmes qui gravitent autour (protection civile, hôpitaux, etc.).

Ces systèmes devant avoir une projection nationale, régionale et internationale participeront sans doute à minimiser les dégâts occasionnés par les catastrophes naturelles et garantiront une organisation complémentaire aidant à mieux organiser les opérations de sauvetage et organiser la phase après-événement.

#### 5. Références

- P.R.K Chetty. Satellite technology and its applications. TAB Books Inc. 1988.
- Claude Ecobichon. L'information géographique. Hermes, 1994.
- Paul Rouet. Les données dans les systèmes d'information géographique. Hermes, 1990.
- Procédure Technique de production de spatiocarte. INCT.

## Présentation du Bulletin des Sciences Géographiques



L'Institut National de Cartographie et de Télédétection édite et publie, depuis 1998, le Bulletin des Sciences Géographiques. Cette publication est une revue semestrielle scientifique consacrée aux sciences géographiques ; ce Bulletin unique en Algérie dans ce domaine, est un espace de réflexion, d'échange d'informations relatives aux sciences géographiques et de discussion dans lequel, la communauté géographique aussi bien nationale qu'internationale pourra non seulement valoriser les travaux de ses membres, mais également trouver dans celui-ci des informations sur les dernières nouveautés dans le domaine des sciences géographiques.

Ce Bulletin est animé par un Comité de Lecture et un Comité de Rédaction, composés essentiellement de personnalités scientifiques algériennes désignées par l'autorité de tutelle sur proposition du Directeur Général de l'INCT, conformément aux dispositions réglementaires en vigueur.

Le Bulletin des Sciences Géographiques est diffusé sur Internet, sur le site portail des revues scientifiques dénommé ( <http://www.webreview.dz> ), conçu et administré par le Centre de Recherche sur l'Information Scientifique et Technique (CERIST) ce qui a permis à la communauté scientifique nationale et internationale l'accès facile à l'intégralité des numéros déjà publiés.

Cette publication entamée depuis 1998, est actuellement à son seizième numéro. Voici le sommaire des numéros déjà publiés:

N° 0  
Juin 1997

SOMMAIRE :

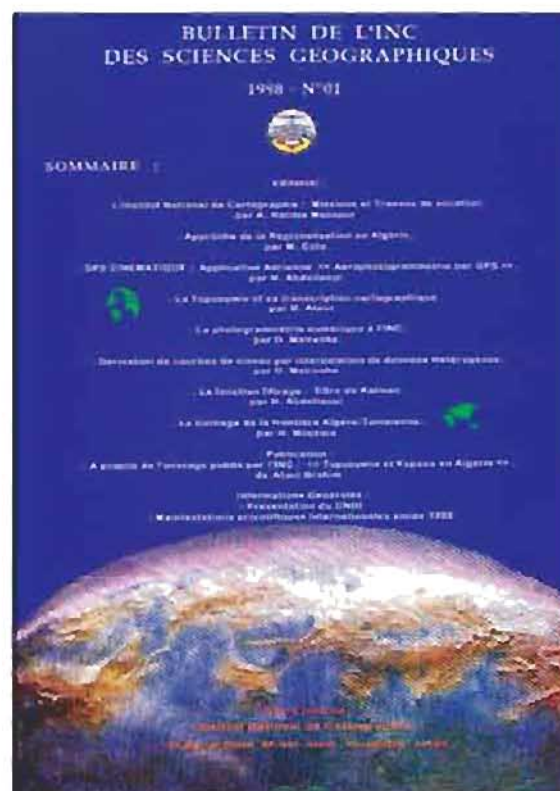
- Editorial
- Dérivation de courbes de niveau par interpolation de données hétérogènes  
*Par D. Maireche*
- La carte en relief  
*Par M. Boumaas*
- La toponymie et sa transcription cartographique  
*Par B. Atoui*
- La fonction filtrage, filtre de Kalman  
*Par H. Abdellaoui*
- La photogrammétrie à l'INC  
*Par D. Maireche*
- Informations générales:
  - Présentation du Conseil National de l'Information Géographique
  - Manifestations scientifiques internationales



N° 1  
Avril 1998

SOMMAIRE :

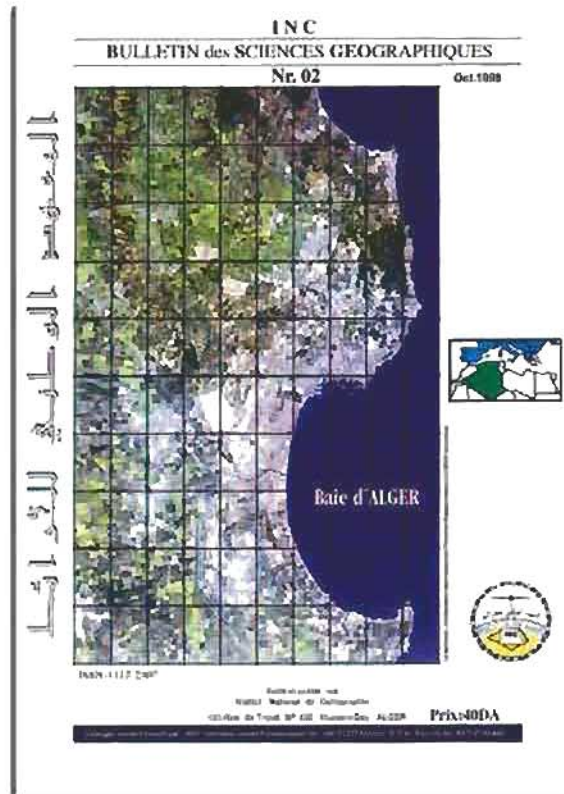
- Editorial
- Présentation de l'Institut National de cartographie.  
*Par A. Halima Mansour*
- Approche de la régionalisation en Algérie.  
*Par M. Cote*
- Aérophotogrammétrie par GPS.  
*Par H. Abdellaoui*
- La toponymie et sa transcription cartographique.  
*Par B. Atoui*
- La photogrammétrie numérique à l'INCT.  
*Par D. Maireche*
- Dérivation de courbes de niveau par interpolation de données hétérogènes.  
*Par D. Maireche*
- La fonction filtrage : filtre de Kalman ,  
*Par H. Abdellaoui*
- Le bornage de la frontière Algéro-Tunisienne.  
*Par H. Mouzaia*



N° 2  
 Octobre 1998

SOMMAIRE :

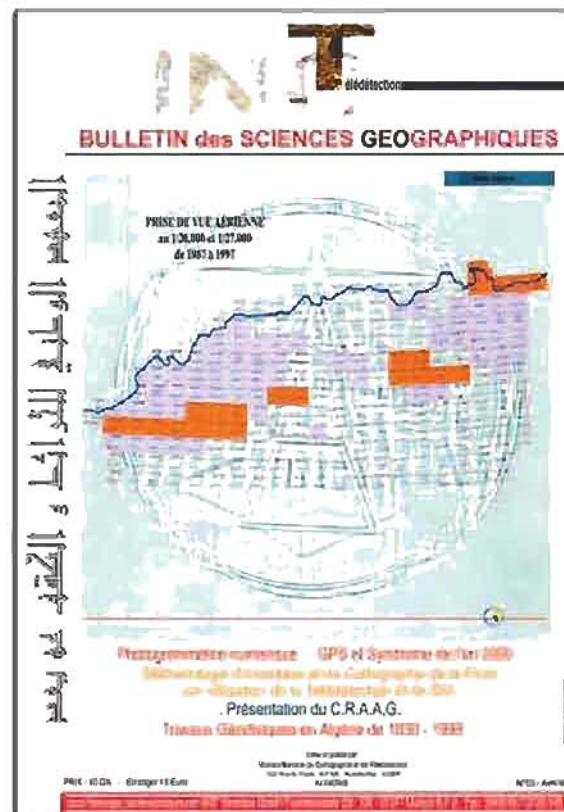
- L'I.N.C : Travaux spécifiques et missions.  
*Par A. Halima Mansour*
- SIG : Développement et perspective  
*Par Prof. Dr. A. Carosio*
- Les SIG: 1<sup>ère</sup> partie  
*Par A. Halima Mansour*
- Trajectographie par GPS  
*Par D. Maireche et Brahimi*
- La Base de Données Topographique.  
*Par C. Dekeyne.*
- Conception d'une base de données astro-géodésiques  
*Par B. Chemaa - S. Abrouche - B. Ghezali*
- Placement automatique des toponymes  
*Par F. Lecordix, C. Plazanet, F. Chirie, M. Barrault*
- La toponymie et ses dimensions  
*Par B. Atoui*
- La fonction Filtrage: Filtre de Kalman  
*Par H. Abdellaoui*
- Cartographie de la qualité  
*Par J.P Rives.*



N° 3  
 Avril 1999

SOMMAIRE :

- La photogrammétrie numérique: vers une banalisation du métier de photogrammetre.  
*Par Y. Egels.*
- Méthodologie d'inventaire et de cartographie de la flore par utilisation combinée de la télédétection et des systèmes d'information géographique.  
*Par F. Benhamouda, M. Chouieb, M Chikh.*
- Mise en œuvre de stations GPS différentiel pour la navigation et la signalisation maritimes.  
*Par S.Kahlouche, A. Zeggai, A. Ayouaz, S. Touam, H. Abdellaoui.*
- GPS et le syndrome de l'an 2000.  
*Par C. Million.*
- Les Travaux Géodésiques en Algérie de 1830 à 1998.  
*Par M. Khaldi.*
- Présentation du C.R.A.A.G et du C.R.T.E.A.N.
- Compte rendu sur les journées d'études sur les SIG



N° 4  
Octobre 1999

SOMMAIRE :

- S.I.G. informations géographiques et infrastructures nationales de données spatiales.  
*Par F. Salgé.*
- L'information dynamique spatialisée.  
*Par B. Naert.*
- L'appropriation sociale des technologies de l'information géographique.  
*Par S. Roche.*
- Conception d'une base de données géodésiques.  
*Par B. Chemaï, S. Benahmed Daho, H. Abdellaoui*
- Protection juridique des bases de données géographiques: le point de vue de l'I.G.N.  
*Par J.-P. Grélot.*
- Etude de la résolution dans une base de données géographiques.  
*Par N. Oumrane*
- La Topologie dans le monde SIG.  
*Par L. Coudercy.*
- Les données maillées ( ou "Raster" ).  
*Par B. Allouche.*
- Les référentiels de topographie et de géodésie.  
*Par C. Million.*



N° 5  
Avril 2000

SOMMAIRE :

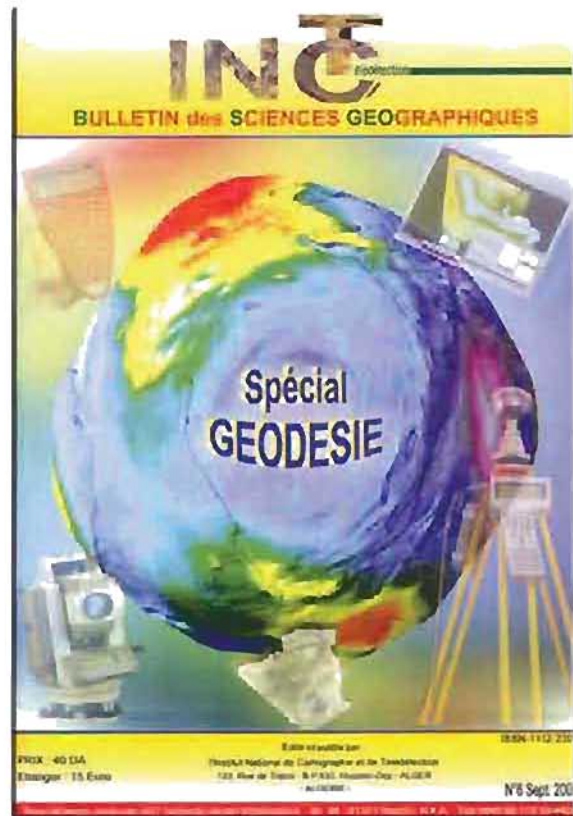
- La Toponymie. Normalisation et Culture.  
*Par H. Dorion*
- Les écritures sur une carte.  
*Par B. Atoui*
- A survey of nubian place-names.  
*Par H. bell*
- Réalisation d'une base de données toponymiques.  
*Par Mr B. Atoui , B. Chemaï , M. Brahimî.*
- L'apport de la recherche onomastique à la gestion des noms géographiques.  
*Par H. Dorion*
- La Toponymie algérienne : transcription latine, passif historique et question de normalisation.  
*Par F. Benramdane*
- La Toponymie et sa dimension historique en Algérie: Etude de cas.  
*Par S. Benkada*
- Toponymie et colonisation française en Algérie.  
*Par B. Atoui*
- Découpage administratif de l'Algérie.  
*Par A. Medjrab*



N° 6  
Septembre 2000

SOMMAIRE :

- Géodésie spatiale: avancées récentes.  
*Par P. Exertier, J. Nicolas et P. Bonnefond.*
- Nivellement et GPS : l'entretien de la référence nationale altimétrique.  
*Par M. Kasser*
- GPS : Nouveau système de référence géodésique français nouveaux processus de calculs.  
*Par F. Duquenne.*
- Méthodologie de détermination précise de géoïde en Algérie.  
*Par S. A. Benahmed Daho et S.Kahlouche.*
- Processus de conversions altimétriques applicables en France.  
*Par H. Duquenne*
- Unexpected geodynamical perspective of the Sinai area by GPS.  
*Par F. Riguzzi and S.M.Mahmoud*
- L'enseignement des méthodes de localisation sur satellites.  
*Par C. Million.*
- Développement d'une Chaîne d'Analyse Astro-Géodésique LOPAG.  
*Par B. Ghezali, C. Sahel, S. Abrouche.*



N° 7  
Avril 2001

SOMMAIRE :

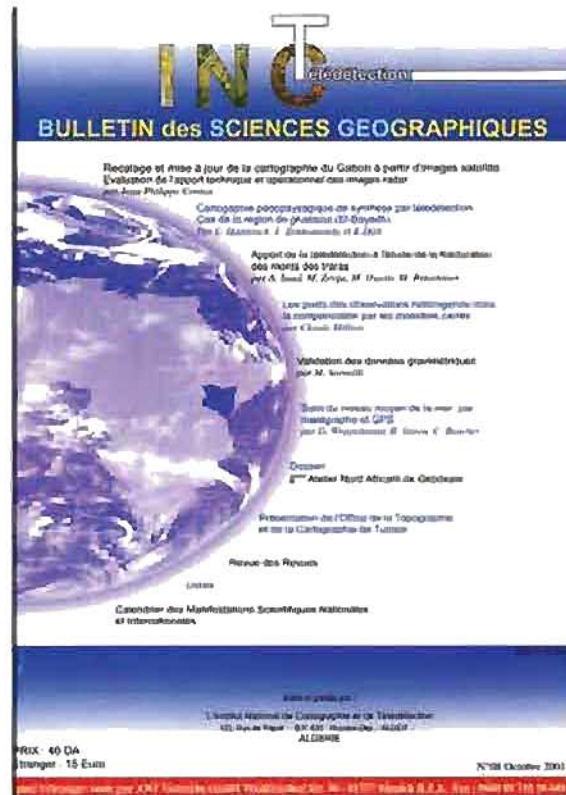
- Using GPS and gravity to infer ice mass changes in Greenland.  
*Par T.van Dam, K. Larson, J. Wahr, O.Francis*
- L'impact en géodésie des systèmes de radio-navigation par satellites GPS et GLONASS.  
*Par P. Willis*
- Etablissement de plans cadastraux en zone rurale par la technique GPS.  
*Par B.Ghazali, N. Nabed, H. Taïbi, B. Gourine, et C. Sahel*
- Les calculs de géodésie du topographe.  
*Par C. Million.*
- Observations magnétiques de la terre.  
*Par M. Mandeau*
- Développement, environnement, aménagement, en Algérie.  
*Par M. Cote*
- Les exonymes : des objectifs à préciser.  
*Par H. Dorion*
- Echelle et données numériques.  
*Par G. Troispoix et L. Couderey*



N° 8  
 Octobre 2001

SOMMAIRE :

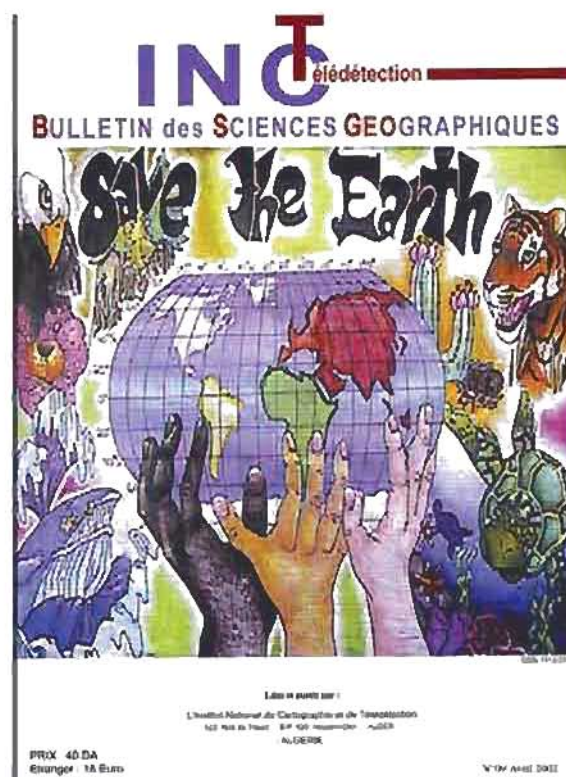
- Recalage et mise à jour de la cartographie du Gabon à partir d'images satellite: Évaluation de l'apport technique et opérationnel des images radar.  
*Par J.-P. Cantou*
- Cartographie pédopaysagique de synthèse par télédétection: Cas de la région de Ghassoul.  
*Par E. Haddouch, F. Benhamouda, & K. Djili*
- Apport de la télédétection à l'étude de la fracturation des monts des Traras.  
*Par A. Saad, M. Zerga, M. Ouasti, M. Bekaddour*
- Les poids des observations hétérogènes dans la compensation par les moindres carrés  
*Par C. Million.*
- Validation des données gravimétriques  
*Par M. Sarraïlh*
- Suivi du niveau moyen de la mer par marégraphe et GPS  
*Par G. Woppelmann, B. Simon, C. Boucher*
- Dossier: 2<sup>ème</sup> Atelier Nord Africain de Géodésie:
  - Report on the second workshop "unification of the geodetic reference system In north Africa"
  - Projet NAFREF (North African Reference Frame)



N° 9  
 Avril 2002

SOMMAIRE :

- Réseau de gravimétrie absolue algérien.  
*Par Dr. O. Francis*
- Le repère international de référence terrestre: ITRF 2000  
*Par Z. Altamimi*
- La réfraction atmosphérique au voisinage du sol  
*Par C. Million*
- Gestion de l'historique des données dans les bases de données localisées  
*Par M. Benmohamed*
- Méthodologie de collecte de statistiques agricoles par télédétection  
*Par D. Yousfi*
- Télédétection et géologie du hoggar : Apport des images Thematic Mapper de Landsat 5 à la cartographie géologique à 1/500000 d'In-Azaoua. (Hoggar Central Méridional)  
*Par A.Z-E. Saad*
- Les pratiques de nonnalisation toponymique. en Algérie  
*Par B. Atoui*

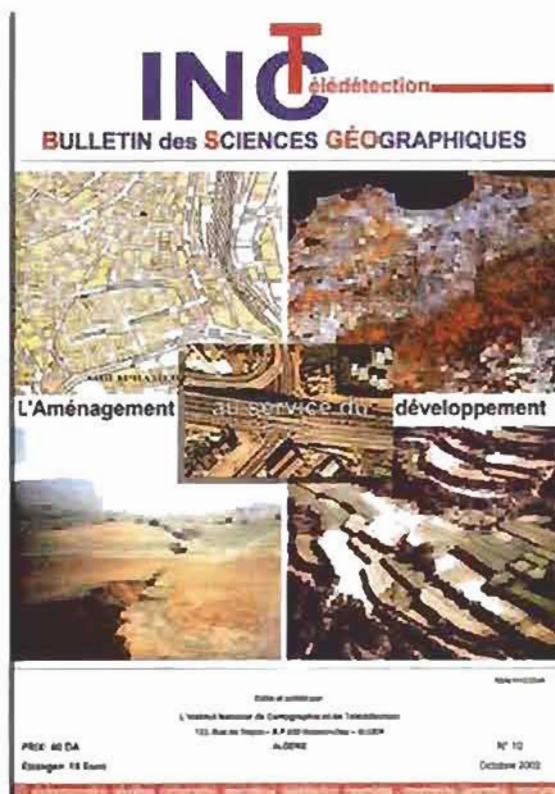




**SOMMAIRE :**

- Territoires, et Aménagement  
*Par M. Cote*
- Difficultés d'intégration d'une région à l'espace national : Cas des Hautes Plaines sud-oranaises  
*Par M. Hadeid*
- Quelques caractéristiques des exploitations agricoles des Hautes Plaines orientales.  
*Par S. Bouchemal*
- Seuils de charge et possibilités de développement des montagnes en Algérie.  
*Par Y. Spiga*
- La consommation de l'espace agricole dans l'agglomération Annabie.  
*Par N. Saïdi*
- Apports des cours d'eau et bilans hydrologiques des bassins de l'Est Algérien.  
*Par A. Mebarki*
- Villes moyennes, hypertrophie et équilibre micro régionale : Cas des wilayas de Batna et Biskra  
*Par A. Farhi*
- Visage et rôle des quartiers spontanés dans la centralité de la ville : Cas de Oued Skhoun à Guelma  
*Par N. Kerdoud*
- Analyse critique des stratégies de réhabilitation des médinas maghrébines  
*Par S. Benabbas*

N° 10  
Octobre 2002



N° 11  
Avril 2003

**SOMMAIRE :**

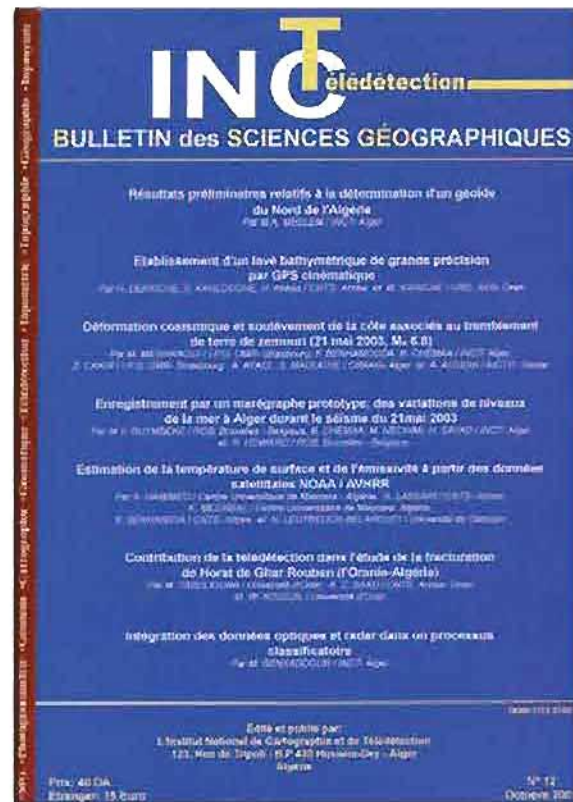
- First Order Gravity Network of Belgium  
*Par M. Everaerts, Ph. Lambot, T. Van Hoolst, M. van Rilymbeke, B. Ducarme*
- La Qualité dans une base de données géographiques  
*Par A. Eysidieux*
- Cartographie 3D par levé laser aéroporté.  
*Par Olivier de Joinville*
- Cartographie des ressources éoliennes de l'Algérie  
*Par L. Aiche-Hamane et A. Khellaf*
- Le rôle des stations mobiles de télémétrie Laser en géodésie spatiale.  
*Par L. Bounatiro*
- Structures de réactivation dans l'Atlas Saharien  
*Par O. Nouar*
- Hydrogéologie de la plaine de la Mitidja Orientale  
*Par M. Benzjada*
- L'érosion ravinante sur les terres agricoles  
*Par R. Kouidri*
- La Normalisation Toponymique et les Systèmes de Translittération  
*Par B. Atoui*



**SOMMAIRE :**

- Résultats préliminaires relatif à la détermination d'un géoïde du Nord de l'Algérie.  
*Par M. A. Meslem*
- Etablissement d'un levé bathymétrique de grande précision par GPS cinématique.  
*Par H. Dekkiche, S. Kahlouche et M. Kariche*
- Déformation cosismique et soulèvement de la côte associés au tremblement de terre de Zemmouri.  
*Par M. Meghraoui, F. Benhamouda, B. Chemaa, Z. Cakir, A. Ayadi, S. Malhouche et A. Aoudia*
- Enregistrement par un marégraphe prototype des variations de niveaux de la mer à Alger durant le séisme du 21 mai 2003.  
*Par M. Ruymbeke, B. Chemaa, M. Nechimi, H. Sayad, et R. Howard.*
- Estimation de la température de surface et d'émissivité à partir des données satellitales NOAA/AVHRR.  
*Par A. Hamimed, A. Lansari, K. Medrbal, K. Benhanifia et N. Belarouci.*
- Contribution de la télédétection dans l'étude de la fracturation de Horst de Ghar Rouban (Oranie).  
*Par M. Tabetiouna, A. Saad, et W. Koudjil.*
- Intégration des données optiques et radar dans un processus classificatoire.  
*Par M. Benkadour.*

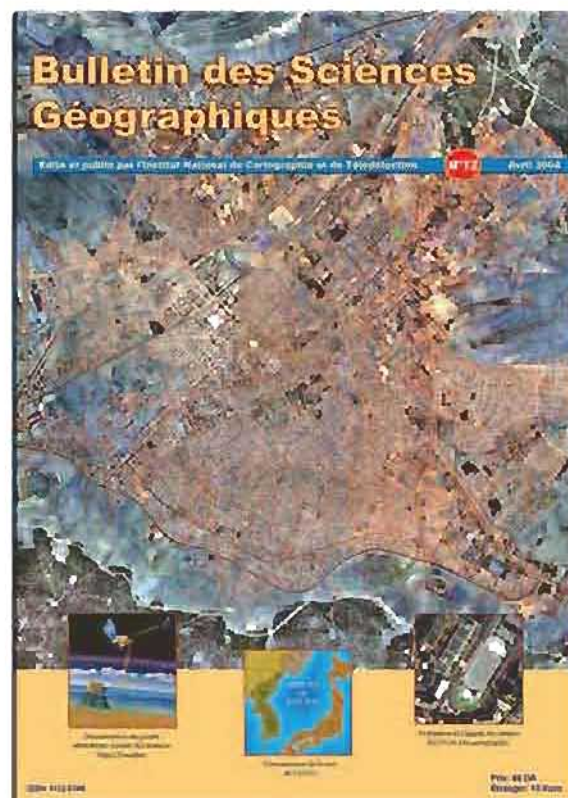
**N° 12  
Octobre 2003**



**N° 13  
Avril 2004**

**SOMMAIRE :**

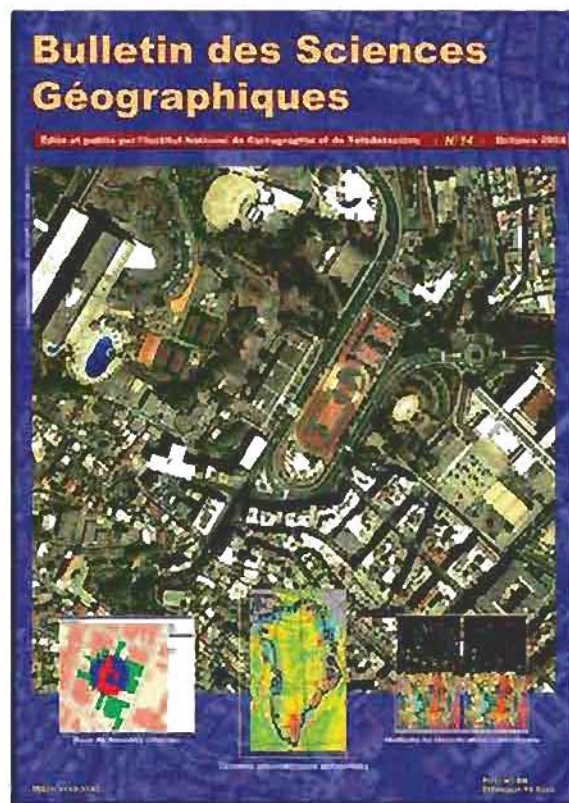
- Détermination du Géoïde Altimétrique à Partir des Données Topex/Poseidon (Cycles 365 et 366) sur le Bassin Méditerranéen  
*Par M. Haddad, S. Kahlouche, A. Rami*
- Simultaneous Georeferencing of Digitised Heterogeneous Map Sheets  
*Par B. Takarli, R. Mahmoudi, M. Benmohamed*
- Evaluation de l'Apport des Images IKONOS à la Cartographie Topographique-Application aux Grandes Echelles « Zone urbaine d'Alger ».  
*Par F. Degaichia*
- Dysfonctionnement Technique et Socio-économique d'un Périmètre Irrigué en Oranie.  
*Par F. Berrahi Midoun*
- Problématique des Appellations des Noms des Mers et des Océans et la Politique du Groupe des Experts des Nations Unies Chargé de la Normalisation des Noms Géographiques:  
Cas de la dénomination de la Mer du JAPON  
*Par B. Atoui*



## N° 14 Octobre 2004

### SOMMAIRE :

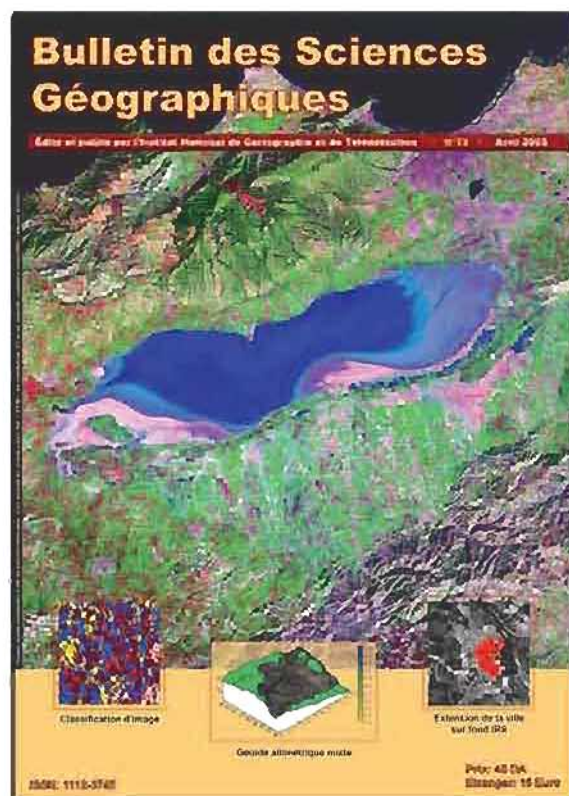
- Downward continuation of airborne gravity data  
*Par R. Forsberg*
- Calcul des hauteurs orthométriques à partir des observations GPS:  
Cas d'étude : Nord de l'Algérie.  
*Par S. Ben Ahmed Daho*
- Apport de la Morpho-géologie dans la connaissance de la néotectonique et du risque sismique dans la région de Constantine.  
*Par Ch. Benabbas*
- Conception et réalisation d'un système d'aide à la décision pour l'intervention opérationnelle en milieu urbain.  
*Par A. Kesraoui, T. Ould Ali, H. Takka*
- Super-resolution à partir d'une séquence d'images.  
*Par N. Omrane, Ph. Palmer*
- Contextual classification of remotely sensed data using MAP approach and MRF.  
*Par R. Khedam, A. Belhaqj-Aissa*
- Participation de l'INCT au XX<sup>ème</sup> Congrès de l'ISPRS 2004 (Turquie, du 12 au 23 juillet 2004)  
*Par F. Degaïchia*



## N° 15 Avril 2005

### SOMMAIRE :

- Détermination du niveau moyen de la méditerranée occidentale à partir des données Topex / Poseidon et Jason-1.  
*Par H. Bouhrat, M. Haddad*
- Ajustement avec contraintes internes des réseaux géodésiques.  
*Par B. Gourine, B. Ghezali, H. Taïbi*
- La distance horizontale entre deux points.  
*Par C. Million*
- Possibilités de révision cartographique au 1/50000 à partir de l'imagerie satellitaire:  
Cas de l'imagerie IRS/IC  
*Par N. Fergane*
- A gamma-convergence applied to multispectral image classification and restoration.  
*Par M. Iddir Zait, Y. Smara*
- Sensors and actuators of the ALSAT-1 First Algerian low earth orbit observation micro satellite in orbit  
*Par A.M.Si Mohammed, A. Boudjemai, Y. Hashida  
J. R. Cooksley, Sir Prof M.N. Sweeting*
- Rapport : Expectation to global mapping  
*Par H. Oukaci*



## CALENDRIER DES MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES INTERNATIONALES

2 0 0 5			
DATE	MANIFESTATION	SITE	CONTACT
1- 3 Nov 2005 "NEW"	The Association for Geographic Information's Annual Conference & Exhibition (AGI 2005) <a href="http://www.agi2005.org.uk">www.agi2005.org.uk</a>	London, UK	Angela McMahon P : +44-20-7017-8497 E : <a href="mailto:angela.mcmahon@agi.org.uk">angela.mcmahon@agi.org.uk</a>
3-4 Nov 2005 "NEW" Cosponsorship Confirmed by Council	International Symposium on Modern Technologies, Education & Professional Practice in Geodesy & related Fields (web site not ready)	Sofia, BULGARIA	Prof. Dr. Eng. G. Milev P : +359-870-0406 / F : -987-9360 E : <a href="mailto:milev@bas.bg">milev@bas.bg</a>
4-5 Nov 2005 "NEW"	13th International Symposium of ACM GIS <a href="http://infolab.usc.edu/acmgis05/index.html">http://infolab.usc.edu/acmgis05/index.html</a>	Bremen, GERMANY	Cyrus Shahabi E : <a href="mailto:shahabi@usc.edu">shahabi@usc.edu</a>
4-6 Nov 2005 "NEW" Confirmed by Council.	Joint Workshop on "Disaster Monitoring & Assessment through Images" <a href="http://www.star.ait.ac.th/dmai2005/">http://www.star.ait.ac.th/dmai2005/</a>	Bangkok, THAILAND	Dr. Xiaoyong Chen P : +66-2-524-6407 F : +66-2-524-5597 E : <a href="mailto:xychen@ait.ac.th">xychen@ait.ac.th</a>
5-6 Nov 2005 "NEW" Confirmed by Council	WG II /4 & ACRS Pre-conference Workshop on Spatial Planning & Decision Support Systems  <a href="http://www.acrs2005.ac.vn">http://www.acrs2005.ac.vn</a>	Hanoi, VIETNAM	Prof. Ali Sharifi (Chair WG II/4) P : +31-53-4874261/F: -4874575 E : <a href="mailto:alisharifi@itc.nl">alisharifi@itc.nl</a>
7-11 Nov 2005 "NEW" Confirmed by Council	WG II/4 & ACRS Joint Session on Spatial Planning & Decision Support Systems <a href="http://www.acrs2005.ac.vn">http://www.acrs2005.ac.vn</a>	Hanoi, VIETNAM	Prof. Ali Sharifi (Chair WG II/4) P : +31-53-4874261/F: -4874575 E : <a href="mailto:alisharifi@itc.nl">alisharifi@itc.nl</a>
7-11 Nov 2005 "NEW"	26th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2005) <a href="http://www.acrs2005.ac.vn">http://www.acrs2005.ac.vn</a>	Hanoi, VIETNAM	ACRS2005 Secretariat P : +84-4-7562417/F: -8361192 E : <a href="mailto:eisa.ig@fpt.vn">eisa.ig@fpt.vn</a>
21-25 Nov 2005 "UPDATED"	8th South East Asia Survey Congress <a href="http://www.seasc2005.org.bn">www.seasc2005.org.bn</a>	Bandar Seri Begawan, BRUNEI	Congress Secretariat P : +673-2-382005/F: -381185 E : <a href="mailto:secretariat@seasc2005.org.bn">secretariat@seasc2005.org.bn</a>
24-25 Nov 2005 "NEW" Confirmed by Council	WG II/2 Workshop on Spatial/Spatio-Temporal Data Mining (SDM) & Learning <a href="http://www.sdm2005.metu.edu.tr">http://www.sdm2005.metu.edu.tr</a>	Ankara, TURKEY	Zuhal Akyurek E : <a href="mailto:zakyurek@metu.edu.tr">zakyurek@metu.edu.tr</a> Workshop Secretariat E : <a href="mailto:wwwsdm05@metu.edu.tr">wwwsdm05@metu.edu.tr</a>
30 Nov-2 Dec 2005	2nd International Conference "Earth from Space -- the Most Effective Solutions" <a href="http://www.transparentworld.ru/conference/">http://www.transparentworld.ru/conference/</a>	Moscow, RUSSIA	Conference secretary P/F : +7-095-939-42-84 E : <a href="mailto:conference@scanex.ru">conference@scanex.ru</a>
8-10 Dec 2005 "NEW" Confirmed by Council	WG II/4 Workshop on Spatial Planning & Decision Support Systems <a href="http://www.itma.upm.edu.my/isprs">www.itma.upm.edu.my/isprs</a>	Macres, MALAYSIA	Prof. Ali Sharifi (Chair WG II/4) P : +31-53-4874261/F: -4874575 E : <a href="mailto:alisharifi@itc.nl">alisharifi@itc.nl</a>
15-16 Dec 2005 "NEW"	5th International Workshop on Web & Wireless Geographical Information Systems (W2GIS2005) <a href="http://lbd.epfl.ch/e/conferences/w2gis05/">http://lbd.epfl.ch/e/conferences/w2gis05/</a>	Lausanne, SWITZERLAND	Dr. Christelle Vangenot P : +41-21-6935255 F : -6935195 E : <a href="mailto:christelle.vangenot@epfl.ch">christelle.vangenot@epfl.ch</a>
2 0 0 6			
DATE	MANIFESTATION	SITE	CONTACT
23-25 Jan 2006 "NEW"	International Symposium Ostrava 2006 " Informatics for Geoinformatics" <a href="http://gis.vsb.cz/GISEngl/Conferences/GIS Ova/GIS Ova 2006/gis ostrava 2006.htm">http://gis.vsb.cz/GISEngl/Conferences/GIS Ova/GIS Ova 2006/gis ostrava 2006.htm</a>	Ostrava, CZECH Republic	Jan Ruzicka P : +420-597-325472 F : +420-596-918589 E : <a href="mailto:jan.ruzicka@vsb.cz">jan.ruzicka@vsb.cz</a>
13-15 Feb 2006 "UPDATED" Confirmed by Council	WG VIII/11 & EARSeL joint Conference "3D Remote Sensing in Forestry" <a href="http://ivfl.boku.ac.at/3DRSForestry/">http://ivfl.boku.ac.at/3DRSForestry/</a>	Vienna, AUSTRIA	Prof. Werner Schneider P : +43-1-47654-5100 E : <a href="mailto:werner.schneider@boku.ac.at">werner.schneider@boku.ac.at</a>

14-16 Feb 2006 "NEW" Confirmed by Council	WG I/5 & I/6 Workshop on Topographic Mapping from Space <a href="http://www.commission1.isprs.org/wq5">http://www.commission1.isprs.org/wq5</a>	Ankara, TURKEY	Ugur Murat Leloglu (Chair WG I/6) P: + 90-312-210-1310 F: -210-1315 E: leloglu@bilten.metu.edu.tr
22-24 Feb 2006 "NEW" Confirmed by Council	WG II/3 & II/6 Workshop on Multiple Representation & Interoperability (web site not ready)	Hannover, GERMANY	Monika Sester(Chair WG II/3) P: + 49-511-7623588 F: -7622780 E: Monika.Sester@ikg.uni- hannover.de
29-31 Feb 2006 "UPDATED" Cosponsorship Confirmed by Council	5th International Symposium "Turkish-German Joint Geodetic Days" (web site not ready)	Berlin, GERMANY	Prof. Dr.-Ing. Lothar Gründig P: +49-30-31422375 E: gruendig@inge3.bv.TU- Berlin.DE
30 Apr- 4 May 2006	ASPRS Annual Conference  <a href="http://www.asprs.org/asprs/meetings/calendar.html">http://www.asprs.org/asprs/meetings/calendar.html</a>	Reno,Nevada, USA	ASPRS P: + 1-301-493-0290 F: -493-0208 E: asprs@asprs.org
8-12 May 2006 "NEW" Confirmed by Council	Commission VII Symposium  <a href="http://www.commission7.isprs.org">www.commission7.isprs.org</a>	Enschede, the NETHERLANDS	John L. van Genderen (President Comm VII) P: +31-53-4874254/F: -4874466 E: genderen@itc.nl
15-17 May 2006 "NEW"	25th Urban Data Management Symposium (UDMS2006)  <a href="http://www.udms.net">http://www.udms.net</a>	Aalborg, DENMARK	UDMS Executive Secretary Mrs. Elfriede M. Fendel E: e.fendel@otb.tudelft.nl
27-30 June 2006 "NEW" Confirmed by Council	Commission VI Symposium  <a href="http://www.commission6.isprs.org">www.commission6.isprs.org</a>	Tokyo, JAPAN	Kohei Cho (President Comm VI) P: +813-34672211#361 F: +813-34854976 E: kcho@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp
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: alain.baudoin@cnes.fr
4-5 July 2006 "NEW"	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: franck.barbier@univ- valenciennes.fr
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: wolfgang.kainz@univie.ac.at
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: ieeeigrss@adeiphia.net
1- 3 Sep 2006 "NEW" Confirmed by Council	7th Joint ICA/EuroGeographic international Workshop on Incremental Updating & Versioning  <a href="http://geo.haifa.ac.il/~caupdt/">http://geo.haifa.ac.il/~caupdt/</a>	Haifa, ISRAEL	Ammatzia Peled (President Comm VIII) P: +972-48-343591 F: +972-48-343763 E: peled@geo.haifa.ac.il

4- 7 Sep 2006 "NEW" Confirmed by Council	Commission VIII Symposium <a href="http://www.commission8.isprs.org">www.commission8.isprs.org</a>	Haifa, ISRAEL	Ammatzia Peled (President Comm VIII) P: +972-48-343591 F: +972-48-343763 E: peled@geo.haifa.ac.il
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	Wolfgang Förstner (President Comm III) P: +49-228- 7322713 F: +49-228- 7322712 E: wf@ipb.uni-bonn.de
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: hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de
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: shailesh@sac.isro.org
1- 4 Oct 2006 "NEW" Confirmed by Council	Joint Meeting with Commission Presidents & Council Meeting	Goa, INDIA	Secretary General Dr. Orhan Altan E: oaltan@itu.edu.tr
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: congress.director@fig2006.de
<b>2 0 0 7</b>			
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 IV) 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/garss.html">http://ewh.ieee.org/soc/grss/garss.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>	Hong Kong, CHINA	FIG Office E: <a href="mailto:fig@fig.net">fig@fig.net</a>
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: <a href="mailto:f.ormeling@geog.uu.nl">f.ormeling@geog.uu.nl</a>
<b>2 0 0 8</b>			
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: <a href="mailto:fig@fig.net">fig@fig.net</a>
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

# Pour soumettre un article...

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

**Pour faciliter votre démarche, nous vous adressons quelques recommandations :**

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

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

**LES ARTICLES DE SYNTHÈSES :** ont pour but de faire ressortir, les théories, les méthodes, les techniques ou les procédés liés aux sciences géographiques, avec notamment des cas précis d'application.
- **LANGUES :** Les articles paraissent principalement, en Arabe, Français et Anglais.
- **CRITÈRES DE PUBLICATION :** Toute communication présentant de l'intérêt sera diffusée, quelle que soit son origine; l'appartenance de son auteur à l'INCT n'est pas exigée.  
Les articles doivent être fournis 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, Agérie.**



**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 21 23 43 75 - **Fax:** 213 21 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 Normal: 40 DA
- Envoi Recommandé: 70 DA
- Envoi Express: 75 DA
- Pour l'étranger: 3 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 23 43 75

Fax: 213 021 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 23 43 75 - Fax: (213) 021 23 43 81  
E-mail: [inct99@wissal.dz](mailto:inct99@wissal.dz)