



**Spécial
GEODESIE**

ISSN-1112-230

Edité et publié par :

l'Institut National de Cartographie et de Télédétection
123, Rue de Tripoli B.P.430 Hussein-Dey - ALGER
- ALGERIE -

PRIX : 40 DA.
Etranger : 15 Euro

N°6 Sept. 2000

Comité de lecture :

- Prof, Larouk Med El Hadi :
Université de Constantine.
- Prof, Bendjelid Abed :
Université d'Oran.
- Mr, Kahlouche Salem :
Maître de recherche, CNTS/ Arzew.
- Mr, Atoui Brahim, Docteur, INCT.
- Mr, Kedjar Abou Bakr, Docteur, INCT.
- Mr, Iftene Tahar :
chargé de recherche, CNTS/ Arzew.
- Mr, Trache Abdelhak :
chargé de recherche, CNTS/ Arzew.
- Mr Benmohamed Mohamed :
chargé de recherche, CNTS/ Arzew.
- Mr, Benhamouda Fethi, Magister, INCT.
- Mr, Ayadi Abdelkrim :
chargé de recherche, CRAAG.

INCT
BULLETIN DES SCIENCES
GÉOGRAPHIQUES

2000 - N° 6

	pages
• Géodésie spatiale : avancées récentes. <i>Par P. Exertier, J. Nicolas et P. Bonnefond.</i>	03
• Nivellement et GPS : l'entretien de la référence nationale altimétrique. <i>Par Michel kasser, professeur des universités, ingénieur en chef géographe.</i>	16
• GPS : Nouveau système de référence géodésique français nouveaux processus de calculs. <i>Par Françoise. Duquenne.</i>	22
• Méthodologie de détermination précise de géoïde en Algérie. <i>Par S. A. Benahmed Daho, S.Kahlouche.</i>	33
• Processus de conversions altimétriques applicables en France. <i>Par H. Duquenne</i>	43
• Unexpected geodynamical perspective of the Sinai area by GPS. <i>Par Federica Riguzzi and Salah Mohamed Mahmoud.</i>	52
• L'enseignement des méthodes de localisation sur satellites. <i>Par Claude Mil'ion.</i>	62
• Développement d'une Chaîne d'Analyse Astro-Géodésique LOPAG. <i>Par B. Ghezali, C. Sahel, S. Abrouche.</i>	66
• Soutenance de thèse.	73
• Activités :	
1/ Association internationale de Géodésie (AIG) Pasadena / USA. du 12 au 18 février 2000. <i>Par S.Kahlouche.</i>	75
2/ Atelier maghrébin de géodésie. (Tunis du 18 au 20 mai 2000). <i>Par B.Chemaa, S. Maarouf, A. Sellal.</i>	77
• Ecole d'été sur l'Astronomie de position et les Techniques Spatiales (Les Pins d'Or, Ain Turck du 24 au 28 juin 2000).	80
• Calendrier des Manifestations Scientifiques Internationales.	81

COMMENT ACQUERIR LES PRODUITS DE L'I.N.C.T ?

Animé par le souci de répondre rapidement à tous les besoins du grand public et des utilisateurs des données géographiques, l'Institut National de Cartographie et de Télédétection, a installé la Sous Direction Commerciale, 20, rue Abane Ramdane, dans l'une des grandes artères d'Alger centre.

L'une des missions dévolues à cette structure, est de renseigner et d'orienter les clients. Un magasin de vente, et un service de consultation y sont ouverts au public; des moyens de consultation y sont déposés, entre autres :

- tableaux d'assemblage des différentes campagnes de prises de vues aériennes existantes;
- des catalogues de tous les produits réalisés par l'I.N.C.T, cartes topographiques à différentes échelles, levés photogrammétriques, et géodésiques;
- un terminal d'interrogation à distance du catalogue de l'imagerie Spot est en voie d'y être installé.

Les commandes peuvent être exprimées directement au niveau de la sous-direction, ou par courrier (Fax, Téléx,...).

L'acquisition de documents (cartes ou autres) se fait selon la procédure commerciale classique: bon de commande avec devis préalable éventuellement.

La vente par correspondance est possible notamment pour les cartes. l'expédition de documents se fait, au choix du client soit par colis postal recommandé ou par courrier ordinaire.

Les prix de vente appliqués sont ceux homologués par arrêtés ministériels:

Pour les cartes, arrêté du 29 janvier 1994 - J.O. n°18 du 06 avril 1994.

Pour les autres travaux, arrêté du 26 octobre 1996 - J.O. n°6 du 22 janvier 1997.

INSTITUT NATIONAL DE CARTOGRAPHIE ET TELEDETECTION

Siège: 123, rue de Tripoli Hussein Dey BP 430 - Alger 16040
Tel: (02) 23:43:76 à 80 et 82 - Fax (02) 23:43:81 - Téléx: 65.441 DZ
E-mail: inct99@wissal.dz

CCP n°1552.04 - CPA n°101 401 78505 1 - BEA n° 22 61 570 Q

Sous Direction Commerciale

20, rue Abane Ramdane - 16000
Tel: (02) 73:92:60 - Fax: (02) 73:73:05

Coordonnées des Etablissements régionaux

De Cartographie et de Télédétection

ERCT/ Oran: Tel: (06) 46-62-62 Tel Fax 06-46-58-58

Rue Bouamama Ali Hai El Makari Oran.

ERCT/ Constantine: Tel: (04) 66-48-39. Fax: 04-66-48-40

Zone Industrielle "Le Palma" Constantine

ERCT/ Ouargla : Tel: (09) 76-44-81/82 Fax: 09-76-44-80

Place de l'ANP Ouargla

GEODESIE SPATIALE : AVANCEES RECENTES

P. Exertier, J. Nicolas et P. Bonnefond

Observatoire de la Côte d'Azur, départ. CERGA, av. Copernic, F-06130 Grasse

ملخص

إن هذا المقال يعرض بصفة شاملة التطورات الحديثة المحققة في قطاع الجيوديزيا الفضائية وهذا بفضل التقنيات الفضائية كتقنية DORIS (تحديد المدارات وتحديد المواقع اللاسلكي المدمج بالأقمار الصناعية)، قياس المسافات الليزري، قياس الارتفاعات بالأقمار الصناعية. إن وصف الأعمال المحققة في الأعوام الأخيرة يوضح جلياً مساهمة كوكبة الأقمار الصناعية DORIS والأقمار الصناعية الليزرية (أقمار صناعية مجهزة بعكاس رجعي ليزري) في إعطاء شكل للمدارات (وصف القوات) وتحديد جقل الجاذبية للأرض وتغيراته الزمنية، وكذا إنجاز معلم المرجع الأرضي الأساسي. بعد عرض سريع لأسس أنظمة الجيوديزيا الفضائية وميزاتها الأساسية، سوف نعرض النتائج المحصل عليها من طرف فرق مختلفة خلال السنوات الماضية.

إن النظام الفضائي الفرنسي (DORIS) و الذي تم إطلاقه أول مرة على القمر الصناعي (spot 2) سنة 1990، قد أثبت منذ ذلك الوقت تطبيقات علمية عديدة لتحديد مدارات الأقمار الصناعية السفلي، الجيوديزيا والجيوفيزياء. ومن جهته، تطور قياس المسافات الليزري خلال السنوات الأخيرة سواء في دوره أو في إنجازاته. وبفضل التحسين في دقتها ووضعها لتنسيق أفضل للشبكة العالمية لمحطات رصد الأقمار الصناعية، قد شغلت هذه التقنية مكانة فريدة في تحديد الموجات الطويلة المدى لحقل الجاذبية، مشاهدة الظواهر البطيئة التغيير ومعايرة التقنيات اللاسلكية-الكهربائية (PARARE - DORIS-GPS) ذات الطابع التفاضلي وذات التطور الناجح. وفي الأخير فإن تقنية قياس المسافات بالأقمار الصناعية التي تم ضبطها في السبعينات والمحدودة أساساً بخطأ المدار النصف قطري للأقمار الصناعية الأوقيانوغرافية، شهدت تحسن إنجازاتها بصفة واسعة في التسعينات لا سيما بفضل التحديد المداري العالي الدقة المحقق من طرف DORIS وقياس المسافات الليزري. إن خطأ المدار المحصل عليه بالقمر الصناعي TOPEX/Poseidon الذي تم إطلاقه سنة 1992 هو من درجة 25 مم حالياً.

RESUME

Ce papier synthétise les progrès récents réalisés dans le secteur de la géodésie spatiale grâce aux techniques spatiales comme DORIS (Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégrés par Satellite), la télémétrie laser et l'altimétrie satellitaire. La description des travaux réalisés ces dernières années met en évidence de l'apport des constellations des satellites DORIS et des satellites laser (satellites équipés de rétro-réflecteurs laser) à la modélisation d'orbite (description des forces), à la détermination du champ de gravité de la Terre et de ses variations temporelles, et à la réalisation du repère de référence terrestre fondamental.

Après une présentation rapide des principes des systèmes de géodésie spatiale et de leurs principales caractéristiques, on présentera les résultats obtenus par différents groupes au cours de ces dernières années.

Le système spatial français DORIS, lancé pour la première fois sur le satellite SPOT-2 en 1990 a depuis cette date démontré de nombreuses applications scientifiques pour la détermination d'orbite de satellites bas, la géodésie et la géophysique. De son côté, la télémétrie laser a sensiblement évolué au cours de ces dernières années, tant dans son rôle que dans ses performances. Par une amélioration de sa précision et la mise en place d'une meilleure coordination du réseau mondial des stations de poursuite de satellites, cette technique spatiale occupe une place unique dans la détermination des grandes longueurs d'onde du champ de gravité, l'observation de phénomènes lentement variables et l'étalonnage de techniques radio-électriques (GPS, DORIS, PRARE) à caractère différentiel dont le développement est un succès. Enfin, l'altimétrie satellitaire, technique mise au point dans les années 70 et limitée essentiellement par l'erreur d'orbite radiale des satellites océanographiques, a vu ses performances largement améliorées dans les années 90 grâce notamment à une orbitographie de très haute précision réalisée par DORIS et la télémétrie laser; l'erreur d'orbite obtenue avec le satellite TOPEX/Poseidon (lancé en 1992) est de l'ordre de 25 mm actuellement.

ABSTRACT

This paper synthesizes the recent progress in spatial geodetic sector thanks to the spatial techniques as DORIS (Orbit Determination and Radio-positioning integrated by Satellite), laser telemetry and satellite altimetry. The description of works realized in the last years, underlines the contribution of DORIS satellites and laser satellites (satellite equipped with retro-reflectors) constellations, to the orbit modeling (forces description), to the determination of gravity field of the earth and its temporal variations, and to the fundamental reference system of the earth.

After a quick representation of the principles of spatial geodesy systems and their main characteristics, we will present the results obtained by different groups during the last years.

The French spatial system DORIS, launched for the first time on Spot-2 satellite in 1990 has since that time shown several scientific applications for low satellites orbit determination, geodesy and geophysics. From its side, the laser telemetry has markedly evolved during the last years, in its role as well as in its achievements. By an improvement of its accuracy and a set up of a best coordination of the world network tracking satellites stations, this technique holds a unique place in field gravity long wavelength determination, the slowly variable phenomena observation and the standardization of radio-electric techniques (GPS, DORIS, PRARE) of a differential nature and of a successful development. Finally, the satellite altimetry, a technique perfected in the 70th, essentially limited by radial satellite error of oceanographic satellites, has notably improved in the 90th thanks to an orbitography of a high accuracy realized by DORIS and laser telemetry, the orbit error obtained with Topex/Poseidon (launched in 1992) is of 25mm actually.

1. INTRODUCTION

La qualité des recherches menées en Géodésie Spatiale, et par conséquent aussi en Sciences de la Terre, est pour beaucoup fondée sur celles des mesures qui doivent être nombreuses, précises, établies sur de larges spectres spatio-temporels. Les techniques de mesures précises de position, de vitesse et d'accélération sur des objets extérieurs à la Terre ont été développées depuis une trentaine d'années et ont acquis progressivement une très grande capacité de précision et de répétitivité spatio-temporelle. L'expérience aidant, la géodésie spatiale a défini des techniques de mesures originales (télémétrie laser, Doppler, altimétrie radar, etc) qui ont été mises en œuvre dans de grands projets spatiaux tels que l'altimétrie des océans (Table 1).

Ceci implique l'existence d'une politique fondée sur la durée. En l'espace de vingt ans - entre les années 1970 et 1990 - toutes les techniques de poursuite de satellites ont gagné plusieurs ordres de grandeur tant

sous l'aspect qualitatif (précision et exactitude des mesures) que sous l'aspect quantitatif (nombre global de données, rapidité de leur disponibilité et échantillonnage spatio-temporel). Au cours des années 90, les applications des systèmes radioélectriques comme DORIS (Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégrés par Satellite), GPS (Global Positioning System) et GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) ont eu une progression telle qu'à la fin de cette décennie ces techniques fonctionnent en réseau mondial et ont rejoint en précision l'autre technique déjà établie : la télémétrie laser. Dans le même temps, la télémétrie laser a vu l'avènement de nouveaux détecteurs, très schématiquement les photodiodes à avalanche en Europe ou les photo-multiplificateurs à micro-canaux (MCP) aux Etats-Unis, portant la précision de mesure de distance à un niveau sub-centimétrique pour environ 30% des instruments laser dans le monde (ILRS, 1999).

Table 1. 25 ans de missions altimétriques. En cm : erreur d'orbite prévue, précision de l'altimètre embarqué, erreur d'orbite obtenue (avec, entre parenthèses, les meilleurs résultats obtenus), et technique laser comme technique de poursuite unique (***) ou non (*); d'après (Cheney, 1995; Lefévre, private communication, 1999).

Missions	Laser	Dates	Err. rad. d'orb. prévue	Précis. altim.	Err. radial d'orb.
GEOS-3	*	1975-78	200	15	100
Seasat	*	1978	200	9	75 (20)
Geosat	*	1985-89	100	7	40 (15)
ERS-1	**	1991-00	20	4	20 (3-4)
T/P	*	1992-	12	3-4	4 (2-3)
GFO	**	1998-	5	4	10-15
ERS-2	*	1995-	15	4	6
Jason-1	*	2001-	<4	2.5	objectif : 1
EnviSat	*	2001-	10	3-4	objectif : 3

Le système DORIS est un système français, développé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) en collaboration avec l'IGN (Institut Géographique National) et le GRGS (Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale) pour la détermination précise d'orbite de satellites bas, et en vue de nombreuses applications en géodésie et en géophysique. Le premier satellite comportant un récepteur DORIS a été le satellite SPOT-2 lancé en 1990, qui est toujours opérationnel (bien après sa durée de vie nominale). Depuis cette date, d'autres satellites ont embarqué des récepteurs DORIS : TOPEX/Poseidon (T/P) en août 1992, SPOT-3 en octobre 1993 (jusqu'en novembre 1996), et SPOT-4 en mars 1998. Plusieurs autres satellites sont prévus dans un avenir proche, ENVISAT fin 2001, Jason-1 au printemps 2001, SPOT-5,... Le système DORIS est un système ascendant : un réseau de balises permanentes (une soixantaine de stations uniformément réparties dans plus de 30 pays) émettent depuis le sol des signaux

omnidirectionnels qui sont captés par des satellites (à bord desquels on peut faire des mesures de l'effet Doppler). Afin d'estimer au mieux le retard ionosphérique, le système DORIS utilise deux fréquences : 2036.25 Mhz et 401.25 Mhz (Willis, 1998a). Les mesures mémorisées à bord sont transmises périodiquement au Centre de Contrôle mis en œuvre par la société CLS (Collecte Localisation Satellites) à Toulouse. Le traitement fin des mesures permet d'obtenir une connaissance de l'orbite des satellites avec une précision de quelques centimètres. Le succès de T/P est ainsi lié à la réussite de DORIS, lui-même lié à la réussite des oscillateurs ultra stables (OUS, à quartz) embarqués. Pour la première fois dans une mission d'observation des océans, la précision du calcul d'orbite est comparable à celle de la mesure du radar altimètre (cf. Table 1), ce qui permet d'accéder à la connaissance de la topographie des océans (Barlier et al., 1996). La seconde mission de DORIS, la localisation, a de nombreuses

applications dans les domaines de la géodésie et de la géophysique (Crétaux et al., 1998). On peut rappeler: le mouvement régulier des plaques tectoniques, les mouvements verticaux de la croûte terrestre, le mouvement du centre de la Terre, ou encore celui de son axe de rotation.

L'avantage de la télémétrie laser se situe dans la simplicité du concept de la mesure (temps de trajet d'une impulsion lumineuse) et dans son exactitude. Elle utilise des rétro-rélecteurs, d'un coût modeste, qui sont placés à bord des satellites ou encore, dans le cas de la Lune, qui ont été déposés par les missions américaines et soviétiques entre 1969 et 1973. En revanche, la technique est tributaire de la météorologie et de la nécessité d'un personnel spécialisé pour la mettre en œuvre au sol. La situation est un peu opposée à celle des techniques radio-électriques (DORIS, GPS ou GLONASS), qui sont de type tous temps, très faciles d'utilisation sur le terrain et dont le coût très important est essentiellement dans la technologie embarquée à bord du ou des satellites. L'apport des données de télémétrie laser acquises ces dernières années sur les satellites géodésiques Starlette, Stella, Ajisai, LAGEOS et LAGEOS-2, notamment, a été essentiel dans l'amélioration du modèle de champ de gravité de la Terre à grandes longueurs d'onde (Schwintzer et al., 1997). Or, la connaissance du champ et de ses variations temporelles est fondamentale pour l'orbitographie et, par conséquent, pour le positionnement et l'océanographie spatiale. En comparaison à DORIS, le réseau des stations laser est moins bien distribué géographiquement. De plus, il n'est pas exactement reproductible dans le temps compte tenu des conditions météorologiques changeantes. De ces

limitations de la couverture spatio-temporelle laser découlent les difficultés rencontrées dans le calcul d'orbite au démarrage de missions comme ERS-1 ou GFO (Table 1), à 800 km d'altitude, pour lesquelles l'erreur d'orbite atteignait environ 20 cm (Scharroo et al., 1992). Mais ce qu'il faut avant tout retenir de la contribution de la télémétrie laser à la dynamique orbitale, au cours des années 90, est l'apport de mesures de distance de plus en plus exactes, notamment à faible distance zénithale où l'incertitude liée aux corrections de propagation atmosphérique est la moins importante. Ces données (à caractère absolu) ont ainsi permis d'obtenir une validation et une grande maîtrise du bilan de l'erreur radiale des orbites des satellites altimétriques (Tapley et al., 1994; Scharroo and Visser, 1998). Nous pourrions appeler cela le *facteur d'échelle* des orbites, en référence aux faits que, (i) les systèmes radio-électriques ne donnent accès qu'à des mesures de poursuite à caractère différentiel (Doppler et GPS), et que (ii) ces dernières mesures sont beaucoup plus sensibles, par rapport au laser, au contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, paramètre qui est encore mal maîtrisé actuellement.

Au cours du temps, si toutes les techniques spatiales ont progressé dans leur précision, elles se sont aussi spécialisées dans leur rôle et leur utilisation pour la géodésie, la géophysique et l'océanographie. La télémétrie laser n'apparaît pas comme étant la technique la plus précise avec la meilleure résolution temporelle. Elle apparaît en revanche comme la plus exacte sur le long terme, ce qui lui confère une place unique pour l'observation des phénomènes lentement variables (par ex. le rebond post-glaciaire, ...) et la réalisation d'un système de référence terrestre géocentrique très stable dans le temps et à très grandes mailles (plusieurs milliers de km) (Tapley et

al., 1993). La durée de vie des cibles spatiales (LAGEOS, Starlette, Stella) est quasi infinie à l'échelle humaine, et la qualité de la métrologie faite au niveau du sol peut être non seulement contrôlée en permanence avec exactitude mais aussi améliorée. Les erreurs introduites par la propagation de la lumière dans l'atmosphère sont aussi minimales pour la technique laser, ce qui n'est pas le cas pour les techniques radio-électriques. En fournissant un facteur d'échelle absolu - via la détermination de la constante gravitationnelle (GM) par les données acquises sur LAGEOS (Dunn et al., 1999) -, d'une part à l'orbitographie et d'autre part à l'étalonnage des altimètres radar T/P (1992), ERS (1991 et 1995) et enfin GFO (1998), la télémétrie laser a occupé une place tout à fait indispensable et complémentaire des autres techniques au cours des années 1990 (Francis, 1992; Ménard et al., 1994; Marshall et al., 1995; Scharroo and Visser, 1998; Bonnefond et al., 1995; 1999).

2. DYNAMIQUE ORBITALE

Les progrès réalisés dans la précision et l'exactitude des techniques spatiales ont encouragé le développement de nouvelles solutions du champ de gravité de la Terre. Les modèles GRIM, qui sont issus d'une longue coopération entre le Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS, Grasse, Paris, Toulouse) et le GeoForschungZentrum (GFZ, Berlin), sont fondés sur l'analyse d'une constellation de 36 satellites, dont les satellites équipés du système DORIS ainsi qu'environ 20 cibles laser. Ces dernières ont une unique et large répartition en inclinaison et altitude, avec des durées de vie très importantes. Ceci, allié à de longues séries temporelles d'observations

centimétriques laser disponibles depuis 10-15 ans, a permis une amélioration sensible des grandes longueurs d'onde du géoïde ainsi que des termes de marées océaniques (Schwintzer et al., 1997; Biancale et al., 2000). En particulier, l'étude du mouvement de LAGEOS observé depuis plus de 20 ans en continu par la télémétrie laser a pris une place considérable en géodynamique globale. Par exemple, l'analyse d'orbite à long terme a permis de séparer correctement aujourd'hui l'amplitude de la marée océanique à 18.6 ans, qui est estimée à 1.65 ± 0.15 cm, du rebond post-glaciaire estimé à $-2.71 \pm 0.2 \times 10^{-11}$ par an (Exertier et al., 1999; Cazenave et al., 1996; Cheng et al., 1997).

La qualité croissante de l'orbite du satellite T/P entre 1992 et 1996 (Table 2), jusqu'à 2-3 cm aujourd'hui (Lemoine et al., 1998), et l'amélioration induite de l'orbite des satellites ERS (Le Traon and Ogor, 1998), constituent une véritable avancée. Il est vrai que ces résultats sont surtout le reflet de la très bonne couverture de l'orbite des satellites altimétriques par le système DORIS sur T/P (Nouël et al., 1994), sans oublier PRARE sur ERS-2 (Andersen et al., 1998). Outre l'amélioration d'orbite obtenue par l'amélioration de la connaissance du champ de gravité, une nette diminution des erreurs d'orbite a été obtenue aussi grâce à l'introduction, plus ou moins systématique dans les modèles non gravitationnels, de coefficients d'accélération empirique et/ou stochastique à caractère "pseudo-modélisateur" (Créaux et al., 1994). Ces coefficients sont en effet estimés avec une erreur d'autant moins grande que les données sont plus nombreuses et bien réparties le long de la trajectoire (Barrotto and Berthias, 1996).

Table 2. Estimations, bilans d'erreur et résidus laser (unités en mm) estimés et/ou prévus pour les orbites de TOPEX/Poseidon de la classe JGM-2, puis JGM-3, de Jason-1 (prévu et futur), et de Starlette (niveau EGM96. ou GRIM5); d'après les réf. indiquées et (Lemoine et al., 1998; Biancale et al., 2000), and J.P. Berthias (CNES, private communication 1999).

Bilan	T/P < 95	T/P > 95	References	Jason-1	Jason (futur)	Starlette
Err. d'orbite	30-40	28		15		
Rés. laser (rms)	40-50	35-40	<i>Tapley et al., 96</i>			35-45
Champ de gravité	22	9	<i>Marshall et al., 95</i>	5	4	25-30
Marées	12-15	7	<i>id.</i>	5	4	10
Var. Tempor.	10	10		5	4	10
Press rad.	15-20	15-20	<i>Tapley et al., 94</i>	10	5	5-10
Freinage	10-15	10	<i>Barrotto, 96</i>	5	4	15
Coord. stat.	10	10	<i>Tapley et al., 94</i>	10	5	10
Mesures :			<i>id.</i>			
Attitude	2-3	2-3			1-2	
Réfecteurs	3-4	3-4	<i>Schwartz, 90</i>		1-2	1
Atmosphère	3-4	3-4	<i>id.</i>	3-4	2-3	3-4
err./system. Laser	5	5		5	5	5
Total (rss)	33-40	25-30		15-18	10-12	35-40
References				<i>Vincent, AVISO, 98</i>		<i>Biancale, 00</i>

En parallèle de la détermination d'orbite, des activités d'évaluation et d'analyse d'erreurs ont pris un nouvel essor dans la communauté de géodésie spatiale, avec la nécessité d'évaluer les produits de base de l'océanographie spatiale - l'orbite et le repère de référence terrestre - à un niveau de précision de l'ordre de 1 à 2 centimètres au maximum. Dans le domaine de la validation d'orbite, les données laser ont permis d'établir des points de contrôles locaux, voire régionaux, de l'erreur d'orbite à ce niveau de précision. Mais il faut toutefois ajouter que GPS peut être une solution alternative pour le futur, comme cela a été montré sur la mission T/P à titre de démonstration (Bertiger et al., 1994). Toutefois, des progrès sont encore à faire pour que le système GPS démontre qu'il est vraiment facile d'emploi vis-à-vis du calcul d'orbite: rappelons que le système n'a pas fonctionné sur la récente mission d'océanographie Geosat-Follow-On (GFO) lancée en 1998.

Dans le cas de T/P, selon le principe de comparaison de solutions (orbites) indépendantes, les solutions dynamiques (POEs) obtenues au CNES et à la NASA ont été comparées, d'une part à la solution de type "reduced-dynamic" obtenue à partir des seules données GPS (Yunck et al., 1994), et d'autre part à la solution purement laser, entièrement géométrique, obtenue en utilisant une méthode de détermination par arcs courts (Bonnefond et al., 1995). Compte tenu du caractère très différent des erreurs rencontrées dans les deux types d'approche - géométrique ou dynamique -, la comparaison de ces différentes solutions a permis de fournir une mesure spatio-temporelle fiable de l'erreur radiale des orbites dynamiques de T/P (Marshall et al., 1995; Bonnefond et al., 1999). Dans le cas des missions ERS, la télémétrie laser a également joué un rôle important (Scharroo, 1992; Scharroo and Visser, 1998), mais dû à la plus basse altitude d'ERS la couverture mondiale de la trajectoire a plutôt été apportée par les données

altimétriques aux points de croisements des arcs (Le Traon and Ogor, 1998). Au niveau global, il faut noter que toutes les stations du réseau laser international ont respecté le jeu des priorités de tir définies par le nouveau service international laser (ILRS, International Laser Ranging Service) sur ERS, T/P, puis GFO, et ceci pendant plusieurs années. Cela a ainsi permis de mettre en évidence la notion d'erreur géographiquement corrélée sur au moins deux grandes zones du globe couvertes par la télémétrie laser, l'Europe et les US (Bonnefond et al., 1999).

Dans l'objectif de la mission Jason-1, avec une prévision de l'erreur radiale au niveau de 15 mm, les méthodes d'évaluation de la qualité d'orbite et de sa stabilité au cours du temps, basées sur la télémétrie laser, DORIS et GPS, conserveront donc une importance majeure pour l'océanographie. Plus localement, pour les expériences d'étalonnage en absolu des altimètres radar, comme celle réalisée en Corse dans le cadre de la mission T/P et pour la préparation de Jason-1 (Bonnefond et al., 1997), la télémétrie laser est encore la seule technique de mesure de distance capable d'atteindre, en absolu et donc en exactitude, le niveau centimétrique.

3. POSITIONNEMENT

Plusieurs groupes, notamment au CNES et à l'IGN, se sont intéressés aux performances du système DORIS pour la localisation précise des stations du réseau permanent d'orbitographie. Grâce aux mesures DORIS effectuées sur plusieurs satellites (jusqu'à 3 à l'heure actuelle), il est possible d'obtenir des exactitudes de positionnement de l'ordre de 26-28 mm à partir de plusieurs jours d'observations. Une des limitations actuelles est le faible nombre de

satellites équipés de récepteurs DORIS à bord. En observant sur plusieurs années, il est aussi possible de déterminer les vitesses de déplacement de ces stations, dues au phénomène de tectonique des plaques. Plusieurs contributions majeures ont été publiées sur ce sujet par le CNES (Soudarin et al., 1999; Crétaux et al., 1998). Il semble en particulier que DORIS soit un système apte à détecter des vitesses verticales de stations; ceci a des implications importantes dans de nombreuses études scientifiques liées à la quantification de l'élévation du niveau moyen des mers (Chambers et al., 1998; Cazenave et al., 1999). Actuellement les résultats obtenus dépendent bien évidemment de la durée totale des observations prises en compte pour estimer ces vitesses. Pour les stations les mieux observées, il est actuellement possible d'obtenir des vitesses de déplacement issues de DORIS à une exactitude de l'ordre de 5 mm/an (vérifiée par d'autres techniques de mesures indépendantes comme le VLBI, la télémétrie laser sur satellites ou le GPS). De plus, ces calculs de position de stations du réseau peuvent être obtenus de manière continue, sous forme de séries temporelles mensuelles voire hebdomadaires (Willis, 1998b). En prenant en compte les signaux globaux, qui affectent l'ensemble du réseau des balises, des variations millimétriques du géocentre ont pu être mises en évidence (e.g., Sillard, 1998); elles sont dus aux variations de masses de l'ensemble Terre-Océan-Atmosphère. Des nouveaux progrès significatifs sont attendus avec le lancement du satellite Jason-1 en 2001.

Le système DORIS présente un intérêt important pour le Service International de la Rotation Terrestre (IERS). Ses performances en terme de localisation

géodésique des stations ainsi que pour la détermination précise de la rotation terrestre sont pratiquement comparables avec celles des autres systèmes actuels déjà cités. Ses coûts d'installation et de maintenance le rendent très compétitif même par rapport au GPS. Enfin, l'IGN, en charge de l'installation et de la maintenance des balises du réseau a pris soin de répartir les stations de manière relativement homogène sur le globe tout en essayant de favoriser les co-localisations avec d'autres systèmes existants de géodésie spatiale (téléométrie laser, GPS, Very Long Baseline Interferometry, VLBI, par exemples).

Enfin, DORIS a aussi des applications pour la détermination de certains paramètres de l'atmosphère terrestre : le retard ionosphérique peut être parfaitement déterminé grâce aux deux fréquences très différentes émises par les balises et reçues à bord des satellites. De plus, des études récentes ont montré que le système DORIS, tout comme le système GPS, est capable d'estimer le retard troposphérique lié au pourcentage d'humidité au-dessus de la station, permettant ainsi de nouvelles applications en météorologie ou en climatologie.

De son côté, la téléométrie laser a beaucoup progressé ces dernières années en France et dans le réseau mondial (e.g. Nicolas et al., xxxx). Il est apparu en effet que dans un passé encore récent (1997) des mesures faites par les stations présentaient souvent des biais pouvant atteindre quelques centimètres, avec une variabilité temporelle du même niveau et d'un spectre complexe. Un point gênant venait de ce que ces biais pouvaient être détectés trop longtemps (jusqu'à un an) après les observations, rendant

l'analyse de leur origine presque impossible à réaliser correctement. Cette réalité a amené les centres d'analyse à effectuer un contrôle de qualité des mesures dans des délais beaucoup plus courts qu'auparavant. Le progrès réalisé est très sensible.

Dans ce contexte, la communauté a souhaité un renforcement de la coopération européenne pour intercomparer les erreurs d'éphémérides, telles qu'elles peuvent apparaître aux observateurs, en utilisant principalement les satellites d'altitude élevée comme LAGEOS, GPS-35 et -36 qui sont équipés de réflecteurs laser (Table 3). Le service international ILRS, qui vient d'être mis sur pied, s'inspire de ce qui a fait le succès de GPS. Ce service rénové de la coopération internationale en matière de téléométrie laser, s'est fixé comme objectif de définir un certain nombre de programmes prioritaires, d'organiser des campagnes, et d'évaluer presque au jour le jour la qualité des résultats de mesures, voire des produits qui en découlent. En particulier, la publication régulière et comparative des biais instrumentaux à différentes échelles de temps, ou celle de la précision des points normaux, crée une compétition permanente invitant les stations à satisfaire de mieux en mieux des critères de qualité et de performance. Il en ressort que la détection des biais peut se faire sans retard au niveau des stations, ce qui contribue plus efficacement à l'amélioration de l'exactitude de la mesure de distance, et surtout à une meilleure stabilité à l'échelle de quelques mois et plus encore à l'échelle de l'année ou au-delà. La tenue régulière de réunions techniques et la publication de leur compte-rendu, comme en 1996 à Shanghai et en 1998 à Deggendorf (Allemagne), ont contribué à cet effort commun international.

Table 3. Bilan d'erreurs (unités en mm) pour l'orbite de LAGEOS, pour des arcs de 10 jours. $\sigma(1998)$ est obtenu à partir des champs JGM-3 ou GRIM4, et $\sigma(2000)$ à partir de la solution plus récente GRIM5.

Source d'err.	$\sigma(1998)$	$\sigma(2000)$	Réf.
Champ de G.	4-6	2-3	<i>Tapley, 1996</i>
Non-gravit.	8-12	5-8	
Autres	2-3	1-2	
Position Stat.	3-5	2-3	
Vitesses	1-3	1-2	
Mvt global rés.	2-4	1-2	
Mesures las.	8-22	8-12	
Total	15-25	10-15	

Il résulte de cette nouvelle maîtrise de la technique laser au niveau mondial, une amélioration de la qualité des éphémérides et, peu à peu également, une amélioration de la solution laser du repère de référence terrestre ITRF publié par l'IERS (Boucher et al. 1999). Mais toutes les stations du réseau (environ 40 plus ou moins permanentes) n'ont pas suivi le même rythme dans l'amélioration de leur technologie ; la dispersion des biais laser peut encore atteindre 20-30 mm et plus pour de nombreux instruments en dehors des 12 à 15 meilleurs sites actuels, qui ont une exactitude de l'ordre de 10 à 15 mm. Ceci a entraîné une petite hétérogénéité des champs de vitesse des coordonnées des stations laser, en particulier dans la direction verticale, problème qui devient prépondérant dans le transfert d'erreur sur l'orbite des satellites océanographiques, dans la détermination du mouvement du géocentre, et plus généralement dans la contribution du laser à réalisation d'un repère de référence vertical le plus stable possible (Boucher and Carter 1997; Bonnefond et al., 1999).

Les réseaux sur lesquels s'appuient les différentes techniques spatiales ont un caractère global et mondial; ils sont gérés par des services internationaux. Les techniques se développant de manière indépendante, une coordination est nécessaire; sur le plan géodésique, il faut pouvoir intercomparer et, finalement, relier entre eux les repères propres à chacune des techniques. C'est le rôle de l'International Earth Rotation Service (IERS), en tant que coordinateur, de fournir un système de référence unique. Les co-localisations d'instruments spatiaux, pas toujours aisées à réaliser sur le terrain, doivent être aussi nombreuses que possible. A Grasse, par exemple, le site de l'observatoire réunit à la fois la télémétrie laser (deux stations fixes, pour les satellites et la Lune), le GPS (une antenne permanente), GLONASS (idem) ainsi qu'un site d'accueil pour d'autres instruments à caractère géodynamique (Nicolas et al., 1999).

4. REFERENCES VERTICALES

Un point de plus en plus important en géodésie est celui de la réalisation d'une référence verticale mondiale absolue et suffisamment stable. Tous les projets spatiaux des années à venir, qu'ils soient d'océanographie (niveau moyen des mers) ou de géophysique (champ de gravité et ses variations temporelles), requiert en effet la réalisation d'un repère de référence terrestre dont l'évolution dans le temps soit maîtrisée au niveau de quelques millimètres voire mieux.

Dans ce contexte et compte tenu des améliorations citées plus haut, qui portent à la fois sur les techniques et sur les modèles, les géodésiens ont développé des

applications visant à mesurer les déformations verticales de la croûte terrestre. Ceci à déboucher sur la mesure des déplacements séculaires dus au rebond post-glaciaire dans les zones de haute latitude (Pan and Sjöberg, 1999; Soudarin et al., 1999), ainsi que sur la mesure des déplacements dus aux effets de charges (océans et atmosphère), qui sont plutôt à caractère saisonniers (e.g., VanDam et al., 1994). A Grasse par exemple, une campagne spécifique d'observation des satellites LAGEOS et LAGEOS-2 par télémétrie laser a été réalisée entre fin 1997 et 2000, soit trois ans environ. Des solutions de coordonnées du site ont été calculées régulièrement à partir du calcul de l'orbite des deux satellites (voir performances Table 3) qui a été réalisé sur des arcs de 10 jours. Les coordonnées de deux autres stations laser du réseau européen (Graz en Autriche et Hertsmonceux au Royaume-Uni) ont également été calculées à titre de comparaison. La Figure 1 montre les variations du positionnement laser selon la coordonnée d'altitude pour les trois stations mentionnées (étoiles). Les effets sont nettement à caractère saisonnier d'une amplitude de plus d'un centimètre pic à pic. D'autre part, les effets de charge dus à l'atmosphère (champs de pression atmosphérique calculés toutes les six heures par l'European Centre for Medium Wavelength Forecast, ECMWF) ainsi que les effets de marée polaire (modifications dues au mouvement du pôle et aux variations de la rotation de la Terre) ont été modélisés suivant les recommandations de l'IERS (IERS Conventions, 1996); les variations du positionnement vertical sur les trois sites choisis sont indiquées (traits) Figure 1 également, sachant que les principaux effets de charges dus à l'océan sont supposés être de moyenne nulle sur les périodes de calcul des orbites et

des coordonnées des stations. La corrélation entre observations et effets géophysiques est très importante, ce qui montre bien la capacité actuelle des techniques spatiales de positionnement.

REFERENCES

- Andersen, P.H., K. Aksnes, H. Skonnord: 1998, Precise ERS-2 orbit determination using SLR, PRARE, and RA observations, *J. of Geodesy*, 72, 421-429
- Barlier, F., P.Y. Le Traon, A. Cazenave: 1996, Point sur les Missions d'Altimétrie Spatiale TOPEX/Poseidon et ERS-1, *Compte Rendu Acad. Sci. Paris*, 323 (IIa), 737-753
- Barotto, B. and J.P. Berthias: 1996, First results of reduced dynamics with DORIS on TOPEX/Poseidon and SPOT, *J. of Guidance and Dynamics*, 19-6, 1296-1302
- Bertiger, W.I. et al.: 1994, GPS precise tracking of TOPEX/Poseidon: results and implications, *J. of Geophys. Res.*, 99(C12), 24449-24464
- Biancale, R., et al.: 2000, A new global Earth's gravity field model from satellite orbit perturbations: GRIM5-S1, *Geophys. Res. Lett.*, in press
- Bonnefond, P., P. Exertier, P. Schaeffer, S. Bruinsma, and F. Barlier: 1995, Satellite altimetry from a short-arc orbit technique : Application to the Mediterranean, *J. of Geophys. Res.*, 100(C12), 25365-25382
- Bonnefond, P., P. Exertier, Y. Ménard, E. Jeansou, G. Manzella, S. Sparnocchia, F. Barlier: 1997, Calibration of Radar Altimeters and Validation of Orbit Determination in the Corsica-Capraia Area, in *Proceedings of the 3rd ERS Symposium*, Florence, Italy; Vol. 3, pp. 1525-1528
- Bonnefond, P., P. Exertier, F. Barlier: 1999, Geographically Correlated Errors Observed from a Laser-based Short-Arc Technique, *J. Geophys. Res.*, 104(C7), 15885-15893
- Boucher, C., Z. Altamimi, P. Sillard: 1999, The ITRF97, in *IERS Technical Note*, 27, Central Bureau of IERS, Observatoire de Paris, France, May 1999
- Boucher, C. and W.E. Carter: 1997, Vertical references, *IERS missions, present and future -*

Report on the 1996 IERS Workshop, IERS Techn. Note 22, Obs. de Paris

Cazenave, A., P. Gegout, G. Ferhat and R. Biancale: 1996, Temporal variations of the gravity field from LAGEOS 1 and LAGEOS 2 observations, in "Global Gravity Field and its Temporal Variations", *Proceed. of IAG Symp. G3*, Springer-Verlag, New York, Vol. 116, pp. 141-151

Cazenave, A., K. Dominh, L. Soudarin, F. Ponchaud, Ch. Le Provost: 1999, Sea level changes from TOPEX/Poseidon altimetry and tide gauges, and vertical crustal motions from DORIS, *Geophys. Res. Lett.*, 26(14), 2077-2080

Chambers, D.P., J.C. Ries, C.K. Shum, and B.D. Tapley: 1998, On the use of tide gauges to determine altimeter drift, *J. of Geophys. Res.*, 103(C6), 12885-12890

Cheney, R.E.: 1995, TOPEX/Poseidon scientific results - Preface, *J. of Geophys. Res.*, 100(C12), 24893

Cheng, M.K., Shum C.K., and B.D. Tapley: 1997, Determination of long-term changes in the Earth's gravity field from satellite laser ranging observations, *J. of Geophys. Res.*, 102(B10), 22377-22390

Crétau, J.F., F. Nouel, C. Valorge, P. Janière: 1994, Introduction of empirical parameters deduced from Hill's equations for satellite orbit determination, *Manus. Geodaetica*, 19, 135-156

Crétau, J.F., L. Soudarin, A. Cazenave and F. Bouillé: 1998, Present-day tectonic plate motions and crustal deformations from the DORIS space system, *J. of Geophys. Res.*, 103, 30167-30181

Dunn, P., M. Torrence, R. Kolenkiewicz, and D. Smith: 1999, Earth Scale defined by Modern Satellite Ranging Observations, *Geophys. Res. Lett.*, 26(10), 1489-1492

Exertier, P., S. Bruinsma, G. Métris, Y. Boudon and F. Barlier: 1999, Geodynamics from the analysis of the mean orbital motion of geodetic satellites, in *IAG Symposia - Geodesy beyond 2000 - The challenges of the first decade*, Schwartz Ed., Springer, Vol. 121, pp. 262-270

Francis, C.R.: 1992, The height calibration of the ERS-1 radar altimeter, in *Proceed. of the first ERS-1 Symp. - Space at the Service of our Environment*, ESA Spec. Pub., ESA SP-359(1), pp. 381-393

ILRS: 1999, Report of the Third General Assembly of the International Laser Ranging Service (ILRS), Florence, Italy, Sept. 20, 1999

Lemoine, F.G., S.C. Kenyon, J.K. Factor, R.G. Trimmer, N.K. Pavlis, D.S. Chinn, C.M. Cox, S.M. Klosko, S.B. Luthcke, M.H. Torrence, Y.M. Wang, R.G. Williamson, E.C. Pavlis, R.H. Rapp, T.R. Olson: 1998, The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96, *NASA/TP--1998-206861, GSFC*, Greenbelt, Maryland, July 1998

Le Traon, P.Y. and F. Ogor: 1998, ERS-1/2 orbit improvement using TOPEX/Poseidon: the 2 cm challenge, *J. of Geophys. Res.*, 103(C4), 8045-8057

Marshall, J.A., N.P. Zelensky, S.M. Klosko, D.S. Chinn, S.B. Luthcke, K.E. Rachlin, R.G. Williamson: 1995, The temporal characteristics of TOPEX/Poseidon radial orbit error, *J. of Geophys. Res.*, 100(C12), 253331-25352

Ménard, Y., et al.: 1994, Calibration of the TOPEX/POSEIDON altimeters at Lampedusa : Additional results at Harvest, *J. Geophys. Res.*, 99(C12), 24487--24504

Nicolas, J., P. Exertier, P. Bonnefond, F. Pierron, Y. Boudon, J.F. Mangin, F. Barlier, M. Kasser and J. Haase: 1999, Stability control of range biases on the French laser ranging stations, in *Proceed. of the EOS/SPIE Symp. on Remote Sensing*, Florence, Italy, Europto Ser., Vol. 3865, pp. 27-32

Nouël, F., J.P. Berthias, M. Delouze, A. Guitart, P. Laudet, A. Piuze, D. Pralines, C. Valorge, C. Dejoie, M.F. Susini, and D. Taburiau: 1994, Precise Centre National d'Etudes Spatiales orbits for TOPEX/Poseidon : Is reaching 2 cm still a Challenge ?, *J. Geophys. Res.*, 99(C12), 24405--24419

Pan, M. and L. Sjöberg: 1999, Estimating present-day postglacial rebound and horizontal movements in Fennoscandia by repeated GPS campaigns in 1993 and 1997, field, *Geophys. Res. Lett.*, 26(6), 771-774

Scharroo, R. and P. Visser: 1998, Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites, *J. of Geophys. Res.*, 103(C4), 8113-8127

Scharroo, R. et al.: 1992, ERS-1 Precise Orbit Determination, in *Proceed. of the first ERS-1 Symp. - Space at the Service of our Environment*, ESA Spec. Pub., ESA SP-359(1), pp. 477-482

Schwintzer, P., et al.: 1997, Long-wavelength global gravity field models : GRIM4-S4, GRIM4-C4, *J. of Geodesy*, 71, 189-208

Sillard, P., Z. Altamimi, C. Boucher: 1998, The ITRF96 realization and its associated Velocity field, *Geophys. Res. Lett.*, 25(17), 3223-3226

Soudarin, L., J.F. Crétaux and A. Cazenave: 1999, Vertical crustal motions from the DORIS space-geodesy system, *Geophys. Res. Lett.*, 26(9), 1207-1210

Tapley, B.D., M.M. Watkins, J.C. Ries, G.W. Davis, R.J. Eanes, S.R. Poole, H.J. Rim, B.E. Schutz and C.K. Shum: 1996, The joint Gravity Model 3, *J. Geophys. Res.*, 101(B12), 28029-28049

Tapley, B.D. et al.: 1994, Precise orbit determination for TOPEX/Poseidon, *J. of Geophys. Res.*, 99(C12), 24383-24404

Tapley, B.D., B.E. Schutz, R.J. Eanes, J.C. Ries, M.M. Watkins: 1993, Lageos laser ranging

contributions to geodynamics, geodesy, and orbital dynamics, in *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics, Geodyn. Ser.*, 24, pp. 147-174

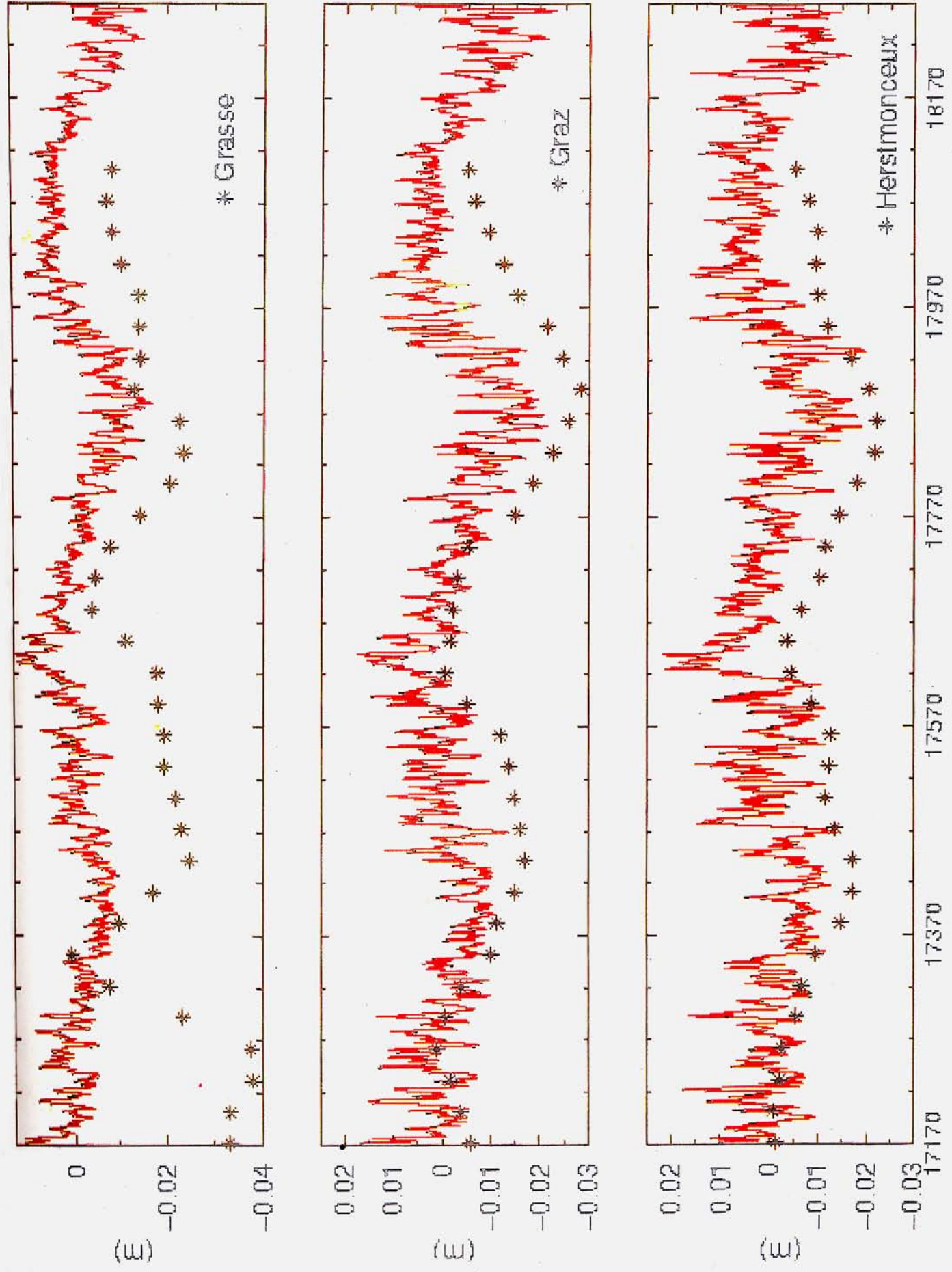
VanDam, T.M., et al.: 1994, Atmospheric pressure loading effects en Global Positioning System coordinate determinations, *J. of Geophys. Res.*, 99(B12), 23939-23950

Willis, P.: 1998a, Le système DORIS: présentation, rôle et recherches à l'IGN, *Revue Internationale de Géomatique*, 6, 2, 3, pp. 289-304

Willis, P.: 1998b, Monitoring geocenter and scale variations using DORIS data: monthly and weekly comparisons toward ITRF references, *IERS Workshop*, Potsdam, Allemagne, October 1998

Yunck, T.P. et al.: 1994, First assessment of GPS-based reduced dynamic orbit determination on TOPEX/Poseidon, *Geophys. Res. Lett.*, 21(7), 541-54

Figure 1. Variations du positionnement vertical sur trois sites géodynamiques européens : Grasse (France), Graz (Autriche) et Herstmonceux (Royaume-Uni). Etoiles : solutions obtenues par télémétrie laser et calculs d'orbites précises avec les satellites LAGEOS et LAGEOS-2 (altitudes d'environ 6000 km); le système de référence est l'ITRF-97. Trait : modélisation (de moyenne nulle) des effets de charges sur la croûte terrestre dus à l'atmosphère (données toutes les 6 heures de l'ECMWF), et des effets du mouvement du pôle (marée polaire).



NIVELLEMENT ET GPS : L'ENTRETIEN DE LA REFERENCE NATIONALE ALTIMETRIQUE

*Michel Kasser, Professeur des Universités, Ingénieur en Chef Géographe
Chef du Service de Géodésie Nivellement,
Directeur du Laboratoire de Recherches en Géodésie*

Institut Géographique National, 2 Av. Pasteur, 94 165 Saint-Mandé Cedex, France

<michel.kasser@ign.fr>

ملخص

إن هذا المقال، الذي يسترجع، وهذا لتسهيل الفهم، اعتبارات منشورة على نطاق واسع في مجلة "جيومتر" سنة 1998، يرمي إلى إبراز الكيفية التي تظهر بها إشكالية قياس الارتفاع بأجهزة تحديد المواقع عندما نطرح مسألة صيانة شبكة وطنية. إن الإجراء المتبع حديثاً في فرنسا، والمطروح هنا، إضافة إلى الخلاصات التي أدى إليها، يستعمل قياسات أجهزة تحديد المواقع على عدد صغير من النقاط، مع تكثيف محلي للمعالم التي قيست بالتسوية المباشرة التقليدية.

RESUME

Cet article qui reprend pour faciliter la compréhension, des considérations largement publiées en 1998 dans la revue "Géomètre", vise à exposer comment se présente le problème de la mesure altimétrique par GPS lorsqu'on se pose la question de l'entretien d'un réseau national. La démarche suivie récemment en France est ici exposée, ainsi que les conclusions auxquelles elle a conduit : emploi de mesures GPS sur un petit nombre de points, avec une densification locale de repères mesurés par nivellement direct traditionnel.

ABSTRACT

This article, taking back some considerations widely published in "Géomètre" journal, to facilitate the understanding, aims at exposing how the problem of altimetric measurements by GPS presents itself, when we ask ourselves the question concerning a national network maintenance. the procedure followed recently in France and exposed here, as well as the conclusions to which it led : uses GPS measurements on a small number of points, with a local condensing of markers measured by direct traditional levelling.

Introduction.

L'emploi du GPS en altimétrie, motivé par des considérations économiques et par l'intuition que l'opération est probablement jouable, pose de très nombreux problèmes techniques et théoriques. Nous rappellerons ici tout d'abord le contexte théorique de la mesure des altitudes, puis nous résumerons l'apport possible du GPS dans un tel processus.

longtemps été obligé de s'intéresser au champ de pesanteur terrestre : en effet, la seule orientation accessible absolument partout est la direction de la verticale, qui est donc une référence obligée pour le topographe, d'autant qu'elle est repérable partout et à peu de frais (une simple nivellement) avec une précision tout à fait extraordinaire (aucune autre référence d'orientation n'offre de telles facilités).

I/ Les surfaces de référence et l'altimétrie.

La surface que tout le monde connaît, c'est bien entendu la **topographie**, c'est-à-dire la surface limite entre la Terre solide et l'atmosphère ou les océans. Cette surface peut être décrite très grossièrement comme une sphère de l'ordre de 6400 km de rayon, avec des écarts autour de cette sphère susceptibles d'atteindre plusieurs dizaines de kilomètres. Mais si l'on cherche à la décrire plus finement, on a

Si l'on étudie le champ de pesanteur, champ en $1/r^2$ (comme le champ électrique par exemple), on pourra définir des surfaces équipotentielles dont l'espacement varie d'un endroit à l'autre en fonction des variations de l'intensité du champ. Lorsque ces surfaces se rapprochent, et comme on s'en souvient pour le champ électrique, le champ de pesanteur augmente, ce qui se traduit par des valeurs de g plus importantes que lorsque ces surfaces s'éloignent (Une

surface équipotentielle du champ de pesanteur n'a donc rien à voir avec une surface où g serait une constante). Une telle surface équipotentielle est partout perpendiculaire à la pesanteur, donc à la verticale locale (toute direction horizontale y est donc tangente), mais g n'y est pas uniforme. Si les océans n'étaient traversés d'aucun courant, s'ils étaient de densité constante, et s'ils étaient au repos, leurs surfaces décriraient des équipotentielles du champ de pesanteur. L'une de ces surfaces, proche en général du niveau moyen de la mer, a été prise pour origine des altitudes (tout au moins des altitudes orthométriques) : on l'appelle **géoïde**. Le géoïde est assez voisin d'un ellipsoïde de révolution, par rapport auquel il présente des irrégularités plus ou moins corrélées avec la topographie, n'excédant pas la centaine de mètres. On recherche donc l'ellipsoïde qui est le plus proche du géoïde, et on privilégie cette nouvelle surface parce qu'elle se décrit mathématiquement par deux nombres seulement : le demi-grand axe a et le demi-petit axe b . On va donc repérer de manière fiable tout point par rapport à sa position sur l'ellipsoïde par trois nombres (par exemple une longitude, une latitude et une hauteur).

On retient donc ici quelques points importants :

- Le géoïde est par obligation la surface de référence des altitudes (le nivellement sert d'abord à faire couler l'eau par gravité avec le moins de pente possible, sa référence au champ de pesanteur et à ses anomalies est donc inévitable).

- Quoique choisi proche du niveau de la mer, il en est toujours distinct puisque le niveau moyen des mers ne cesse de changer au cours du temps (fonte des glaces polaires, effets météorologiques divers, mouvements verticaux de l'écorce terrestre, etc...)

- C'est une surface entièrement fictive, et généralement inaccessible à l'observation directe.

- Elle ne représente pas une surface à g constant (et c'est dommage, car g se mesure très bien aujourd'hui...)

II/ Définition d'un type d'altitudes

Une fois rappelée la notion de géoïde, tous les problèmes ne sont pas réglés, et de loin. Prenons un repère de référence, doté d'une altitude conventionnelle (cette origine en France est à Marseille, son altitude a été fixée après une campagne marégraphique de 1885 à 1897 : depuis

lors le niveau de la Méditerranée a changé de plus de 10 cm). Si nous additionnons les dénivelées successives pour passer de ce point à un autre, nous trouvons un résultat qui dépend significativement de l'itinéraire suivi. A quoi ceci est-il dû ? Essentiellement au fait que les équipotentielles successives du champ de pesanteur (le géoïde en est une parmi d'autres) ne conservent pas en tout point du globe une distance constante, ces distances dépendent en effet des variations de l'intensité de la pesanteur g . On est ainsi obligé d'appuyer la notion d'altitude sur une grandeur indépendante du chemin suivi, et on choisit à cet effet le travail effectué contre la pesanteur par l'unité de masse :

$$W_{OA} = \int_0^A g \, dh$$

Et l'on peut ainsi sans difficulté bâtir un type cohérent d'altitudes, en additionnant depuis le point origine les produits élémentaires "dénivelée \times valeur de g locale". L'inconvénient majeur de ce système dit **géopotential**, est que la différence entre deux altitudes ne ressemble en rien à la dénivelée mesurée (qui est une longueur), puisque toutes les mesures ont été multipliées par des valeurs de g , toujours assez proches de $9,8 \text{ m.s}^{-2}$. Pour corriger cette petite difficulté pratique, les divers systèmes d'altitudes courants consistent tous à diviser W_{OA} par une valeur conventionnelle g_c , par exemple :

- g_c étant pris égal à la valeur moyenne de g entre le géoïde et le point A , on obtient un système dit **orthométrique** (mais cette valeur de g est impossible à mesurer directement et fait intervenir des modèles pas forcément fidèles à la réalité). Ou alors,

- g_c étant pris égal à la valeur du champ de pesanteur dit "normal" (calculé pour une Terre "théorique" ellipsoïdique), on obtient une altitude **normale**. Mais dans ce cas on montre que la surface de référence n'est plus strictement le géoïde, mais une surface théorique qui en est proche, que l'on appelle communément le *quasi-géoïde* : ce point passablement complexe ne sera pas davantage évoqué.

La dernière source de complications est maintenant la suivante : un ensemble d'observations de nivellement direct sur un grand réseau reste toujours entaché de nombreux systématismes, *qui font intégralement partie de la réalisation du système d'altitude*. Ainsi pour la France, les nivellements NGF de premier ordre effectués par C. Lallemand (1890-1920) et par

L'IGN (terminé en 1969) s'écartaient ils de 60 cm à Dunkerque par rapport à une référence commune à Marseille, uniquement à cause des systématismes résiduels des observations.

Nous définissons alors la dernière surface de référence, mais à vrai dire la seule qui serve vraiment pour l'utilisateur, la **surface d'altitude zéro** : il s'agit de la surface ayant, vis à vis d'un système d'altitude donné, une altitude constamment nulle. Habituellement, cette surface ressemble beaucoup au géoïde, mais elle subit des déformations à plus ou moins grande longueur d'onde matérialisant les défauts des observations élémentaires (systématismes, mouvements des repères par instabilité du sol, etc...). Ainsi il semble aujourd'hui, sur la base de nombreux indices, que les surfaces d'altitude zéro des nivellements Lallemand et IGN-69 aient par rapport au géoïde des pentes sensiblement Nord-Sud, de part et d'autre de celui-ci, sans que l'on ait vraiment compris pourquoi. D'où les discordances entre altitudes anciennes et nouvelles d'un même repère NGF, de l'ordre de 30 cm à Paris, à l'origine de nombreux tracés chez les techniciens (de nombreux plans de villes à grande échelle ont gardé les altitudes anciennes, l'IGN-F de son côté ne publiant plus le NGF que sous forme d'altitudes IGN-69).

Cette longue présentation de concepts de base nous permet de comprendre qu'avec des observations purement géométriques (GPS par exemple), et même en les supposant infiniment précises (ce qui est loin d'être le cas en général), il est impossible d'accéder à des altitudes calculées dans le nécessaire référentiel du NGF sans un modèle précis de surface d'altitude zéro, ce qui exige des calculs très importants.

III/ La mesure d'altitudes par méthodologie GPS

Les géomètres sont désormais familiers avec le GPS. Les matériels employés couramment pour nos applications de haute précision n'ont, malheureusement pour nos finances, rien à voir avec les récepteurs désormais très largement diffusés, pour quelques centaines de francs, pour la randonnée ou la navigation de plaisance ou automobile, qui donnent une position absolue à 100 m près au mieux. Nos récepteurs travaillent en effet toujours en mode différentiel, et mesurent la phase du signal reçu souvent sur deux fréquences. Les principales sources d'erreurs résiduelles du GPS sont :

- Connaissance de la position des satellites. Cette position est nécessairement imprécise au niveau de quelques mètres, mais l'observation différentielle

élimine la plus grosse partie de cette erreur. Lorsqu'on recherche la précision maximale, on est amené à stationner avec des récepteurs un jeu de points connus avec une bonne précision dans un référentiel mondial (eux-mêmes obtenus d'autres méthodes spatiales - radioastronomiques (VLBI) ou mesures de distances Terre/satellites avec un télémètre laser très puissant, ou encore comme sous-produit du système DORIS d'orbitographie ultra-précis du CNES -). On recalcule alors a posteriori la position exacte des satellites. Depuis 1992, un service international (IGS, pour International GPS Service) fournit de telles orbites à des fins scientifiques à quelques centimètres près.

- Connaissance du contenu électronique de l'ionosphère. Pour les ondes radio, l'ionosphère est une couche très perturbatrice, le signal qui se propage y est ralenti en fonction de la teneur locale en charges libres (qui varie parfois très rapidement avec le flux de particules venant du Soleil et de l'espace) et de la fréquence du signal. Lorsqu'on recherche la précision maximale, en recevant les deux fréquences émises et en comparant les temps de propagation sur ces deux canaux, on sait éliminer l'essentiel de cet effet qui n'est gênant que sur des bases assez longues (> 10 km). Mais ceci exige des récepteurs dits "bifréquence", que l'on emploie désormais volontiers malgré leur coût aussi parce qu'ils reçoivent deux fois plus de données et donc accélèrent notablement les opérations de terrain.

- Connaissance de l'indice de réfraction des derniers kilomètres de l'atmosphère : cette erreur que nous savons analyser (la vapeur d'eau, dont la présence dans l'atmosphère est quasiment aléatoire, en est un facteur d'erreur prépondérant) s'élimine en partie lorsque les deux récepteurs sont à la même altitude et dans des conditions climatiques proches, car l'observation différentielle soustrait l'un de l'autre deux facteurs mal connus mais presque égaux, ce qui n'est plus le cas si les altitudes des antennes sont très différentes (montagne). Dans tous les cas on note que la détermination de la coordonnée verticale (altitude ellipsoïdique) est toujours moins bonne que les coordonnées horizontales : son exactitude est rarement meilleure que 3 à 5 cm, même si les résultats des logiciels de calculs mettent en évidence une précision apparente souvent bien plus flatteuse que le centimètre.

IV/ Analyse de l'erreur du GPS employé en altimétrie de précision.

A/ Effets atmosphériques et instrumentaux

La symétrie de la figure formée par les satellites vus depuis le récepteur GPS est, en termes statistiques, une symétrie cylindrique autour de la verticale. Cela signifie que toute erreur sur l'indice de l'air, modifiant globalement les distances apparentes entre l'antenne et les satellites, fera peu bouger le point calculé en planimétrie, mais toujours beaucoup plus en altimétrie. Ceci, joint à notre précédente remarque sur l'effet de l'humidité aléatoire de l'air, explique pourquoi le GPS donne en détermination altimétrique un modèle d'erreur comme suit :

- Pour des points à une altitude voisine, une erreur qui augmente avec la distance (à cause de la variabilité de l'humidité de l'air)

- Pour des points à des altitudes différentes, une erreur d'autant plus forte que cette dénivelée est grande (le mode différentiel n'élimine en effet pas ce qui se passe dans la tranche horizontale d'atmosphère comprise entre ces deux altitudes, et les modèles utilisés sont nécessairement assez différents d'une réalité qui change tout le temps).

En plus, parmi les différents problèmes instrumentaux qui sont plus ou moins heureusement résolus par les fournisseurs de matériels GPS du marché, il faut en noter un qui est directement lié à la physique de la propagation des ondes radio (phénomène de diffraction). Il s'agit de l'impossibilité d'empêcher l'antenne de recevoir un signal réfléchi par le sol, et qui n'a donc pas effectué un trajet direct "réglementaire" vers l'antenne et se superpose au signal désiré. Si le sol est assez conducteur et d'une rugosité inférieure à la longueur d'onde (qui est de l'ordre de 20 cm), l'onde réfléchie est très intense mais sa polarisation est inversée par la réflexion, de sorte que l'antenne (sensible à une seule polarisation) reçoit assez peu de signal parasite, mais en reçoit tout de même. Toute la partie du signal diffusée par les aspérités du sol a acquis une polarisation aléatoire, et donc ne peut être discriminée par l'antenne. Et si le sol (avec les objets qui sont dessus) est rugueux autour de l'antenne (cas général), même s'il est peu conducteur, un signal diffusé important pourra être reçu.

Cette superposition entre le signal normal et ce signal parasite, appelé "multitrajet", engendre une série d'erreurs dont la moyenne est statistiquement nulle en planimétrie mais pas en altimétrie, sauf pour de très longues durées d'observation (une demi-journée par exemple), qui ne sont pas pensables dans un contexte de production courant.

Tous ces éléments concourent à donner souvent une exactitude assez modeste pour la composante verticale de la mesure GPS. Néanmoins le géomètre travaille souvent sur de courtes distances (de l'ordre du kilomètre) et avec de faibles dénivelées, et dans ces conditions l'exactitude sur cette dénivelée ne peut descendre en dessous de 2 cm. Mais bien souvent les erreurs moyennes quadratiques fournies par le calcul GPS seront considérablement plus optimistes : le géomètre ne doit pas se laisser abuser par des valeurs de l'ordre de quelques millimètres, qui ne reflètent que la dispersion des résultats, mais pas leur exactitude.

B/ Erreurs liées à la connaissance de la surface d'altitude nulle

Bien évidemment, pour exploiter des résultats GPS (donc purement géométriques) afin d'en tirer une information altimétrique, il est indispensable de disposer d'une cartographie aussi précise que possible de la surface d'altitude nulle dans le même référentiel. Cette surface est aujourd'hui disponible sur toute la France métropolitaine et la Corse, mais sa précision n'est guère meilleure que 2 cm, et dans les zones montagneuses elle est sans doute moins bonne. Ceci permet tout de même d'envisager la possibilité de fournir des altitudes à 2 ou 3 centimètres près sur des chantiers courants, avec un prix de revient nettement inférieur à celui d'un nivellement traditionnel.

Le processus de détermination est le suivant : tout d'abord le géoïde à proprement parler est calculé, en utilisant un modèle numérique de terrain (au pas de 130 m environ) sur toute la France ainsi qu'une bonne partie du reste de l'Europe autour de la France, un modèle de densité des couches supérieures de la lithosphère, une grande quantité de mesures de l'accélération de la pesanteur (près d'un million) ainsi qu'un modèle global de champ de pesanteur déduit des mesures de géodésie spatiale (l'orbite d'un satellite trahit en effet les moindres variations de la pesanteur) des dernières décennies. Une fois ce géoïde calculé et validé, on le bascule pour l'adapter aux erreurs du réseau NGF, au moyen des points géodésiques GPS du réseau français RGF qui ont reçu une mesure de nivellement et sont donc aussi rattachés au NGF. En chacun de ces points on connaît ainsi l'écart entre la composante verticale du GPS (mesure purement géométrique) et l'altitude NGF.

Si le NGF, le géoïde, ainsi que la détermination du RGF étaient parfaits, ces écarts seraient constants. En fait l'écart varie suivant de très grandes longueurs d'ondes, et l'adaptation du géoïde à ces écarts NGF-RGF est l'information qui permettra à l'utilisateur de GPS de calculer ses altitudes NGF.

Les erreurs que l'on trouve dans cette grille ont finalement pour origine :

- les valeurs de g mesurées parmi lesquelles il y a encore un nombre appréciable de fautes de mesure ou de réduction, et une grande irrégularité spatiale dans les mesures, avec une densité particulièrement faible en montagne,

- les incertitudes sur le RGF, dont la composante altimétrique est forcément assez peu précise comme on a pu le voir auparavant.

La précision du résultat est en général meilleure que 2 cm en plaine, et pourra dépasser 10 cm en montagne. Mais dans beaucoup de chantiers, la précision requise sera moindre dans une zone de fortes pentes...

Il est clair que, pour que les résultats soient homogènes avec les levés habituels, calés ou non sur le NGF, il est indispensable de prendre conscience de l'importance de l'emploi de la correction de géoïde, qui se chiffre souvent à plusieurs centimètres par kilomètre de distance entre les repères. Avec la grille de correction désormais disponible en France, diffusée par l'ESGT et librement accessible à tous (site <http://www.esgt.cnam.fr>), première en son genre dans ce pays mais qui sera certainement améliorée par les uns et les autres dans les prochaines années, le géomètre dispose d'un nouveau moyen d'améliorer sa productivité sur certains chantiers.

L'entretien du réseau national d'altitudes, le NGF

Le schéma Directeur de Géodésie et Nivellement adopté en Janvier 2000 par l'IGN-F prévoit les grandes priorités des prochaines années. Parmi les attendus, notons les remarques suivantes :

- *Malgré leur équipement encore réduit, de plus en plus de géomètres effectuent (ou font effectuer) des travaux altimétriques par GPS. La diffusion d'informations sur les corrections de géoïde à apporter devient impérative. Par ailleurs la grille de corrections RAF 98 calculée par H. Duquenne (ESGT) doit autant que possible être encore améliorée et étendue (Corse, DOM). Ceci implique des démarches dans plusieurs directions :*

étendre le nivellement scientifique (traverse Est Ouest en complément de la traverse Nord-Sud mesurée en 1983), améliorer la couverture gravimétrique sur les points RBF (réseau géodésique de base très précis et couvrant la France) et nœuds de nivellement, reprendre les rattachements altimétriques douteux sur les points RBF.

- *Il manque actuellement des études permettant de conclure en matière d'emploi du GPS pour l'entretien du NGF, même si cette méthodologie est déjà entrée dans les habitudes de certains géomètres. Ces études, ainsi que l'amélioration de la grille altimétrique, sont essentielles pour définir les travaux des prochaines années. Par ailleurs, la visite systématique va en effet montrer l'état réel du NGF, et donnera donc une base objective à des travaux de réfection, pour lesquels les techniques de remesure doivent être optimisées à partir des moyens d'aujourd'hui.*

Et parmi les orientations retenues, nous noterons :

- ** Mettre au point des spécifications pour l'emploi de GPS pour l'entretien du NGF.** Ceci nécessitera de poursuivre des expériences en grandeur réelle afin d'évaluer les cas d'emploi du GPS, ainsi que les modalités de contrôle qualité.

Ainsi que, pour mémoire :

- ** Améliorer la grille de correction altimétrique.** Ceci implique, en poursuivant les collaborations externes déjà actives) :

- une extension à la Corse et aux DOM,
- une amélioration de la composante verticale du RBF,
- des mesures gravimétriques nombreuses et de grande exactitude, sur des programmes à préciser avec les autres acteurs nationaux concernés.
- un renforcement considérable du réseau de nivellement de référence de très haute précision.
- la reprise de toutes les opérations de rattachement NGF - RBF apparaissant comme douteuses lors des calculs.
- une poursuite des calculs menés à l'IGN puis à l'ESGT, et une diffusion aussi large que possible de cette grille de correction.
- une normalisation du format de cette grille de référence.

Les travaux entrepris depuis l'adoption de ce Schéma Directeur se sont basés sur de nombreuses

expérimentations menées au SGN, en particulier par A. Coulomb, avec des mesures GPS et du nivellement direct mené en parallèle de façon presque synchrone. Il en ressort qu'il n'est pas possible avec les matériels et logiciels actuels de déterminer une altitude par GPS à beaucoup mieux que 2 cm d'écart-type, même sur des bases courtes, aussi longtemps que l'on ne stationne pas chaque point sur des durées de plus de 30 mn. Encore faut-il alors être très attentif à la détection des multi-trajets, dont l'apparition n'est pas toujours facile à anticiper. Dans ces conditions, les mesures altimétriques par GPS n'ont d'intérêt que si les conditions suivantes sont remplies :

- La durée d'observation de 30 mn crée des conditions d'usage économiquement rentables compte tenu de l'effectif de techniciens à employer sur le terrain,

- La sécurité sur le terrain est améliorée pour les techniciens (elle devient de plus en plus problématique le long des routes actuelles),

- Le modèle d'erreur est compatible avec les attentes des usagers.

Après l'étude de ces différents aspects du problème posé, il semble possible dès aujourd'hui de mettre en place un processus acceptable. Il est certain que dans quelques années il y aura encore des changements appréciables en matière de GPS, tant sur des aspects matériels (plus de satellites par rajout des constellations Glonass puis Galileo) que sur les traitements des mesures. Pour le moment nous proposons quand même de passer à l'action et de faire évoluer les méthodes dans le sens suivant :

- Mise à disposition de repères et entretien de ceux-ci avec une densité directement liée à la densité d'habitations. En France, ceci se traduira par l'entretien des repères dans les villages et autres agglomérations, et l'abandon progressif de l'entretien des repères placés en pleine campagne (ces repères étant presque toujours sur des ouvrages de faible stabilité, ponceaux, petits aqueducs, etc...où des tassements centimétriques sont très fréquents, et où les besoins de précision sont moindres).

- Les repères seront alors observés à partir des points du RBF (1000 repères sur toute la France), au fur et à mesure de l'amélioration de leur altimétrie (il reste encore quelques cas où des reprises en nivellement sont requises, cas qui seront rapidement traités), en observant sur une durée longue (typiquement 1 heure) une base entre le RBF et un point dans le village considéré. L'objectif est que la dénivelée sur cette base soit connue à mieux que 2 cm d'écart-type.

- Les autres repères à déterminer dans le village seront alors mesurés depuis ce repère, dans un rayon de quelques centaines de mètres, par nivellement direct. La règle actuelle consiste à implanter les repères par groupes de 3, ce qui permet aux géomètres d'en tester la stabilité aisément et réduit les risques de destruction complète du site.

Cette méthodologie va faire l'objet de campagnes d'essais au cours des prochains mois, qui devront permettre de valider ce concept tant en termes de précision que de gains économiques et de sécurité pour les opérateurs. Mais tout laisse à penser, en l'état de la situation qui prévaut en France, que cette solution pourra être adoptée. En effet le géomètre utilisateur ne rencontrera probablement pas de situation où les discordances du GPS seraient visibles dans ses propres mesures et donc gênantes. Et la précision locale est d'autant meilleure que la zone est plus habitée, ce qui semble cohérent avec les demandes actuelles.

Conclusion

Les mesures altimétriques par GPS posent des problèmes nombreux. Néanmoins il semble qu'il soit actuellement possible de s'en servir moyennant un grand nombre de précautions, avec un bénéfice économique significatif. Néanmoins il ne sera possible de conclure qu'avec les résultats des premières campagnes qui seront effectuées en France sous peu.

GPS: NOUVEAU SYSTEME DE REFERENCE GEODESIQUE FRANCAIS NOUVEAUX PROCESSUS DE CALCULS

Françoise. DUQUENNE

Ingénieur Géographe IGN¹, Maître de conférences à l'ESGT²

Ecole Supérieure des Géomètres Topographes 1 boulevard Pythagore 72000 Le Mans
francoise.duquenne@esgt.cnam.fr

ملخص

في فرنسا، يطالب قرار، وشيك الصدور، باستعمال نظام مرجعي جيوديزي جديد RFG93، مقترن بإهليج نظام سطح المقارنة الجيوديزي 80 (GRS 80)، وبالتمثيل المستوي لامبرت 93. في بادئ الأمر، يقترح المقال استنكار مفهوم هذا النظام الجديد وكيفية الارتباط به.

لقد تم التطرق أيضا إلى مشكلة اختلاط التقنيات التقليدية للتموقع وأجهزة تحديد المواقع (GPS). لقد تم غالبا اعتماد حل يتمثل في الرجوع إلى التمثيل المستوي لإجراء الحسابات التقليدية (منجم معادن، مسافة). إلا أن بعض الحسابات يمكن إجراءها بثلاثة أبعاد بسهولة أكثر أو بدقة أكثر. سيتم معالجة عدة أمثلة في هذا المقال، كحساب إحداثية أفقية منحنية الخطوط، توجيه التسديد، حساب الارتباط، مع مقارنة الطرق.

RESUME

En France, un arrêté dont la publication est imminente préconise l'utilisation du nouveau système de référence géodésique RGF93 associé à l'ellipsoïde GRS80 et à la représentation plane LAMBERT 93. Dans un premier temps l'article propose de rappeler la signification de ce nouveau système et comment on peut s'y rattacher.

Le problème du mélange des techniques traditionnelles de positionnement et du GPS est également abordé. Une solution fréquemment adoptée consiste à revenir en représentation plane pour faire des calculs classiques (gisement, distance). Pourtant certains calculs peuvent se faire en tridimensionnel plus facilement ou plus exactement. Dans cet article on traitera plusieurs exemples comme le calcul d'une abscisse curviligne, l'orientation d'une visée, le calcul de rattachement, en comparant les méthodes. Les précautions d'utilisation du Lambert 93 sont à l'occasion évoquées.

ABSTRACT

In France, there is a decision, in the way to be published, which recommends the use of RGF93, a new geodetic reference system, associated to GRS80 ellipsoid and to the plane representation Lambert93. In the first time, the article suggests to remind the significance of this new system and how we can join it.

The problem of traditional techniques mixture of positioning and GPS is also tackled. A solution frequently adopted consists of returning to the plane representation in order to make classical calculations (deposit, distance). Nevertheless, some calculations can be done with three dimensions, more easily or more exactly. In this article we will treat several examples such as the curvilinear abscissa calculation, the sight orientation and the joining calculation, with methods comparison. On the occasion, usage precautions of Lambert93 are evoked.

1. Pourquoi L'IGN a-t-il, sur la recommandation du CNIG³, mis en place le réseau géodésique RGF ?

Le système géodésique « ancien » nommé NTF (Nouvelle Triangulation française) qui est encore utilisé lorsque l'on fait des calculs en coordonnées Lambert zone a été réalisé entre 1889 et 1992. Les techniques d'observations utilisées sont principalement des mesures d'angles avec environ tous les 300 km des mesures astronomiques et des mesures de distance au fil invar qui ont permis une réorientation et une mise à l'échelle du réseau.

Les moyens de calculs étaient à ce moment là assez rudimentaires même si dans les années cinquante est apparu le premier ordinateur. Les calculs d'ajustement ont été exécutés par petits blocs de quelques points s'appuyant les uns sur les autres.

¹ IGN: Institut Géographique National

² ESGT: Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes

³ CNIG: Conseil National de l'Information Géographique

Vers les années 1980 ont été introduites de manière plus systématique des mesures de distances obtenues avec des distancemètres électroniques. Dans le même temps l'évolution de l'informatique a permis de traiter des blocs de plus en plus grand, jusqu'à plusieurs milliers de points dans les dernières années.

Dès les années 70 apparaissent les premières mesures de géodésie spatiale avec le système Transit qui permettait des positionnements relatifs à 0,5 mètres près. Ces mesures, tout autant que les mesures de distances ont montré que le système NTF n'était pas si homogène qu'on le prétendait et qu'il y avait dans certaines régions des problèmes d'échelle.

La géodésie spatiale faisant des progrès rapides il est apparu dans le milieu des années 80, grâce au GPS (Global Positioning System) que l'on pouvait mettre en évidence de manière assez précise les déformations de la NTF que l'on ne percevait pas en faisant des mesures d'angles même à des distances de 30 kilomètres, d'autant plus que le GPS permettait de faire des mesures de plusieurs centaines de kilomètres. Très vite il est apparu qu'il fallait mettre à dispositions des utilisateurs GPS un système géodésique compatible avec les nouvelles techniques de mesures c'est à dire de précision centimétrique. A l'heure actuelle le GPS est devenu l'outil quotidien pour l'arpentage et c'est pour cela qu'il devient important que l'utilisation du système géodésique national associé au GPS soit appuyé au niveau national par un arrêté.

Ce nouveau système est le RGF93. Il a été développé conjointement au système géodésique mondial (ITRF) et au système géodésique Européen (ETRS). Le système mondial est réalisé par des points répartis à la surface de la Terre dont les coordonnées ont été déterminés par plusieurs techniques de géodésie spatiale (Very Long Base Interferometry, Laser vers la Lune ou vers satellite, GPS ultra précis, DORIS). Actuellement le réseau contient environ 200 points. Tout les ans l'IGN recalcule les coordonnées des points du réseau mondial en intégrant les nouvelles stations et les nouvelles observations : on dit alors que l'on crée une réalisation annuelle du système mondial, celui qui est utilisé maintenant est l'ITRF97.

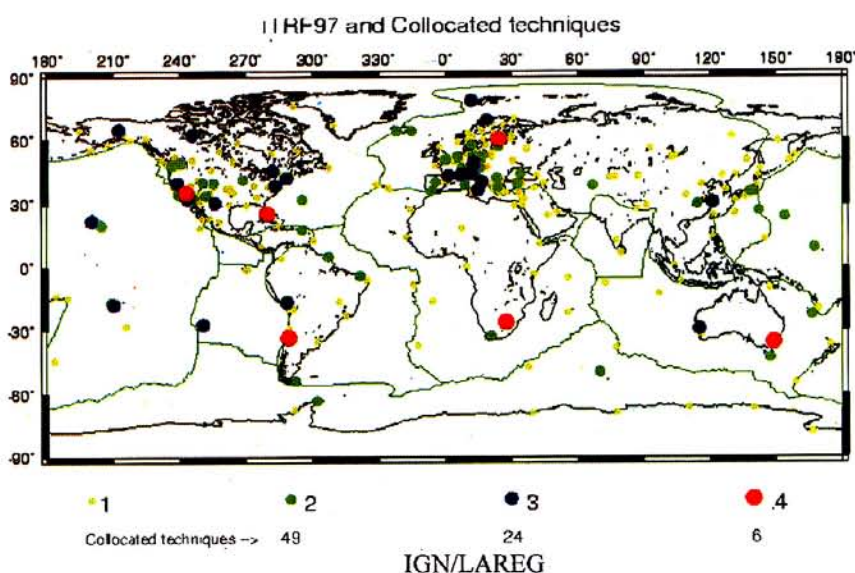


Figure 1: système de référence mondial ITRF97.

Dans ce repère toutes les plaques tectoniques ont un mouvement. Il se pose donc des problèmes de variations de coordonnées pour tout point sur ces plaques. Par exemple en France nous sommes sur la plaque Eurasie dont le déplacement annuel est entre 2 et 3 cm. Pour avoir un système géodésique facilement utilisable en Europe on a décidé de créer un système qui suivrait le mouvement de la plaque Eurasie et qui serait confondu au système ITRF à l'époque 1989,0. Le réseau qui matérialise le système ETRS comporte des points européens du réseau mondial densifiés par GPS.

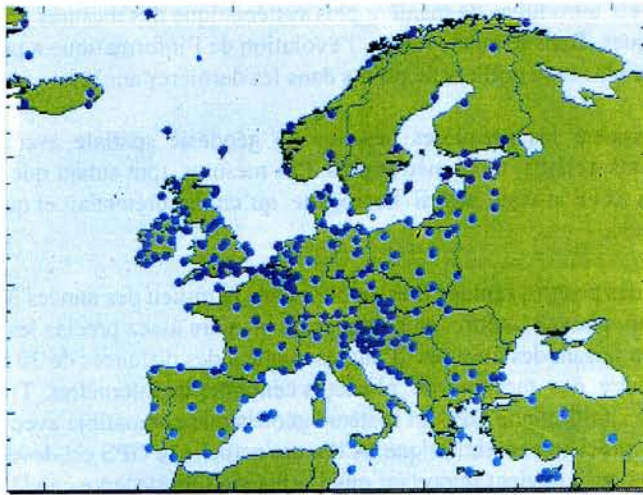


Figure 2: réseau géodésique Européen: ETRS

En France il y a 23 points du réseau européen dont 3 points du réseau mondial. On appelle RRF (Réseau de Référence Français) cette partie du RGF qui est la réalisation du RGF93.

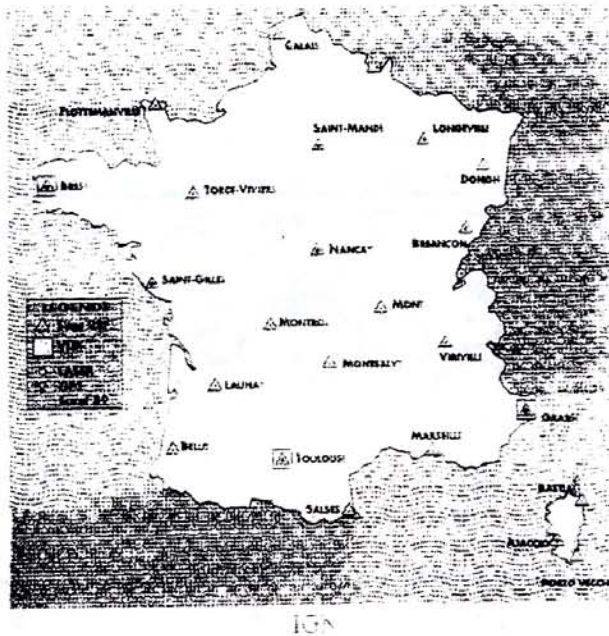
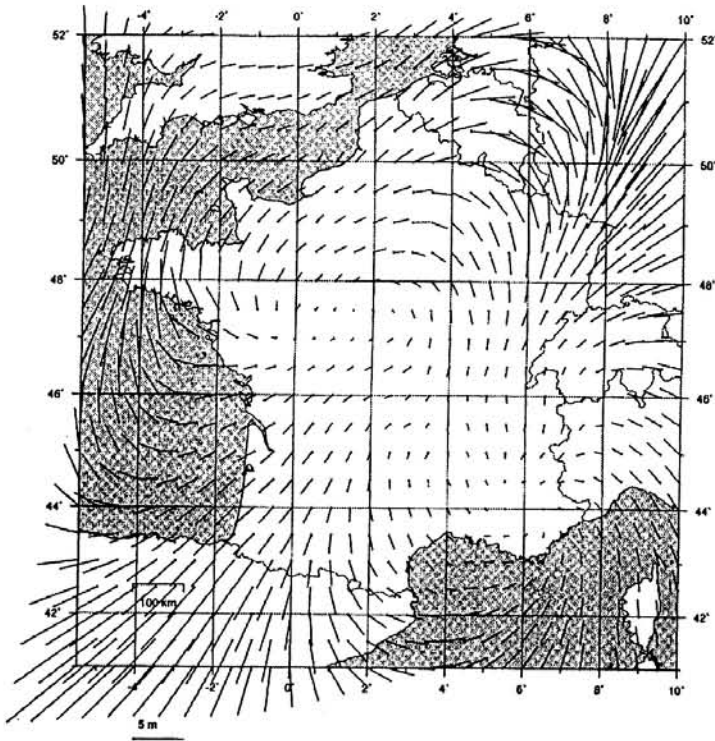


Figure 3: Le Réseau de Référence Français

Une densification du réseau de plus de 1000 points observés en GPS entre 1993 et 1996 constitue le RBF (Réseau de Base Français).

Certains de ces points ont été rattachés au système NTF, ce qui a permis de calculer une transformation générale sur la France entre les deux systèmes géodésiques. La carte ci-dessous montre les résidus de cette transformation et nous permet de visualiser les déformations du système NTF.



IGN

Figure 4: Déformations du système géodésique NTF

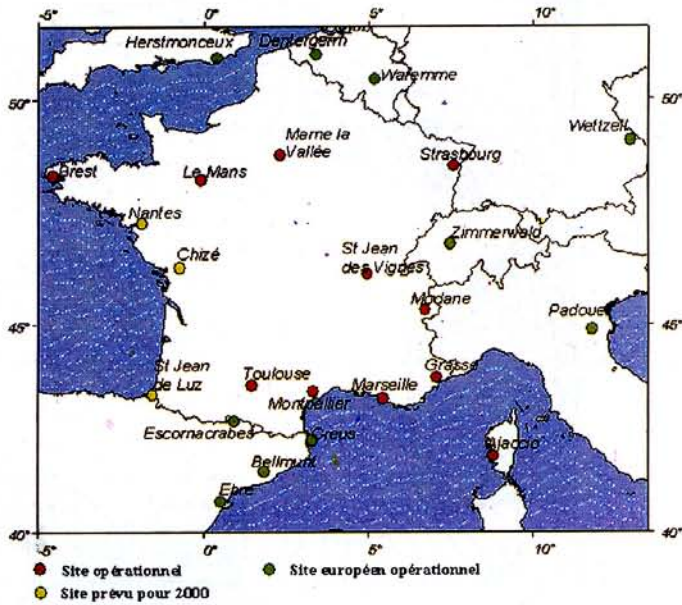
Supposons que l'on observe une base GPS précise entre Marseille et Brest, la distance entre Marseille et Brest présente plusieurs mètres de différence de celle déduite des coordonnées NTF. Par ailleurs, si on rattache précisément le point de Brest à un point RBF proche, que l'on applique la transformation générale sur la France pour calculer des coordonnées NTF et que l'on compare au coordonnées NTF issues de la géodésie classique on trouve un écart de 1,7 mètres en longitude et 3,7 mètres en latitude.

Pour faire des transformations de coordonnées plus précises (quelques centimètres) entre les deux systèmes l'IGN a élaboré une grille de conversion. Avec cette grille toutes les coordonnées des points du réseau NTF ont été transformées en coordonnées RGF93 ce qui définit le Réseau de Détail Français (RDF)

2. Comment rattacher un chantier GPS au réseau RGF et obtenir ainsi des coordonnées RGF93 ?

Le RBF est constitué de plus de 1000 points, et donc quelque soit l'endroit où se trouve un chantier il y a toujours 3 ou 4 points du RBF distants de 10 à 25 km. On peut alors rattacher un point du chantier, en général le pivot, en observant en statique sur chacun des points RBF pendant une à deux heures. Il est souhaitable que ces observations soient faites avec des récepteurs bifréquences, mais cela peut aussi se faire avec des récepteurs monofréquences en augmentant le temps d'observation et en ne dépassant pas 20km. Le calcul se fait avec les logiciels standards vendus avec le matériel et il n'est pas nécessaire d'utiliser des éphémérides précises.

Une autre solution consiste à utiliser les stations GPS permanentes du Réseau Géodésique Permanent (RGP). Actuellement 11 stations observent en permanence et mettent leur observations à disposition sur Internet.



IGN/LAREG
Fig 5: le réseau géodésique permanent

Ces données sont mises à disposition sur le serveur www.lareg.ensg.ign.fr sous la forme d'un fichier pour 24 heures avec une cadence d'observation de 30 secondes. Certaines stations mettent aussi les données à disposition avec un délai plus court, et une cadence plus élevée, comme la station du Mans, serveur : www.esgt.cnam.fr, qui fournit sur Internet un fichier toutes les heures avec une cadence de 1 seconde. Les fichiers d'observations sont formatés en format RINEX qui est un format standard en GPS, et qui peut être lu par n'importe quel logiciel. En considérant la densité actuelle on voit que les bases de rattachements sont en général de l'ordre de 100 km, et le calcul doit être fait prudemment avec les éphémérides précises de l'IGS⁴ qui peuvent être utilisées avec la plupart des logiciels standards. Le problème est qu'il faut attendre au moins trois jours pour obtenir sur INTERNET les orbites rapides. Des tests récents ont montré que, depuis la fin de la SA⁵, même à des distances de plus de deux cents kilomètres on pouvait obtenir avec des orbites radiodiffusées des positions à 2 ou 3 cm dans le RGF93.

3. La représentation plane LAMBERT 93:

L'ellipsoïde GRS80 a été associé au système géodésique RGF93. La représentation plane choisie de cet ellipsoïde est le Lambert 93 défini de la façon suivante:

C'est une représentation conique conforme sécante. Les parallèles standards (d'altération linéaire nulle) sont les parallèles 44° et 49°. Le point origine est donné en coordonnées géographiques par sa latitude égale à 46°30' et

sa longitude égale à 3° est de Greenwich. Les coordonnées planes de cette origine sont
$$\begin{cases} X_o = 700000 \text{ m} \\ Y_o = 6600000 \text{ m} \end{cases}$$

La France et la Corse sont représentées en une seule zone, ce qui provoque de fortes altérations linéaires au nord de la France et en Corse (environ 3 m/km au sud de la Corse).

4. La grille de conversion de hauteur au dessus de GRS80, dans le RGF93 en altitude IGN69:

Le positionnement GPS détermine la hauteur du point au dessus de l'ellipsoïde. Pour calculer l'altitude (hauteur au dessus du géoïde) il faut connaître la hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde. La grille RAF98 (H.DUQUENNE, ESGT), qui a été validée par le groupe de travail permanent "Positionnement Statique et Dynamique" du CNIG permet de convertir des hauteurs au dessus de GRS80 dans le système RGF93 en altitudes dans le système altimétrique IGN69. Cette grille a été fabriquée par adaptation du géoïde gravimétrique QGF98

⁴ IGS: International GPS Service

⁵ SA: Selective Availability n'est plus active depuis le 1/05/2000

(H.DUQUENNE) sur environ 1000 points GPS nivelés. La précision globale sur la France entière est de 2,5 cm, la précision étant meilleure en plaine qu'en montagne. Des tests récents montrent que sur des points proches la précision relative serait de l'ordre de quelques millimètres. L'interpolation dans la grille se fait obligatoirement à partir des coordonnées longitude, latitude et hauteur RGF93/GRS80. Elle permet d'avoir une altitude absolue dans le système altimétrique IGN69 à quelques centimètres sans stationner de repères de nivellement.

5. Calculs des coordonnées planes Lambert I (II,III,IV) dans le système NTF

Contrairement à la transformation en coordonnées Lambert 93 le calcul en Lambert zone ne peut se faire directement, il faut faire un changement de système géodésique entre RGF93 et NTF.

$$(X, Y, Z)_{RGF93} \xrightarrow{T_x, T_y, T_z} (X, Y, Z)_{NTF} \longrightarrow (\lambda, \varphi)_{NTF, \text{Clarke80/IGN}} \xrightarrow{n^\circ \text{ zone}} (E, N)_{\text{lambert}}$$

La grille IGN/ GR3DF97A de conversion RGF93 à NTF permet de calculer les paramètres T_x, T_y, T_z en chaque point avec une précision globale sur la France d'environ 5 cm. On peut remarquer ici que si cette transformation est utile pour assurer une cohérence avec les travaux anciens, elle ne peut être conseillé pour des calculs nouveaux puisqu'elle déforme les coordonnées issues du GPS.

6. Utilisation des coordonnées RGF93 pour des calculs standards:

6.1. Calculs de distance et d'abscisse curviligne:

En utilisant les coordonnées cartésiennes tridimensionnelles $(X, Y, Z)_{RGF93}$ on obtient directement des distances dans l'espace (distance oblique):

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

On peut aussi calculer l'abscisse curviligne tridimensionnelle par :

$$s = \sqrt{\sum_1^n ((X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2)}$$

On rappelle qu'en méthodes traditionnelles (c.a.d. non GPS) D et s sont mesurées directement.

Souvent on a besoin de passer à la distance en représentation plane. Avec les coordonnées RGF93, ceci est très facile il suffit de transformer les coordonnées $(X, Y, Z)_{RGF93}$ en coordonnées géographiques puis planes E(easting), N(northing) et par calcul on obtient la distance ou l'abscisse curviligne sur la représentation plane par:

$$D_p = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2}$$

$$s_p = \sqrt{\sum_1^n (E_{i+1} - E_i)^2 + (N_{i+1} - N_i)^2}$$

On remarque que par cette méthode on a directement le tracé de la trajectoire sur la carte.

Par méthode traditionnelle la réduction d'une distance à la représentation plane se fait par géométrie:

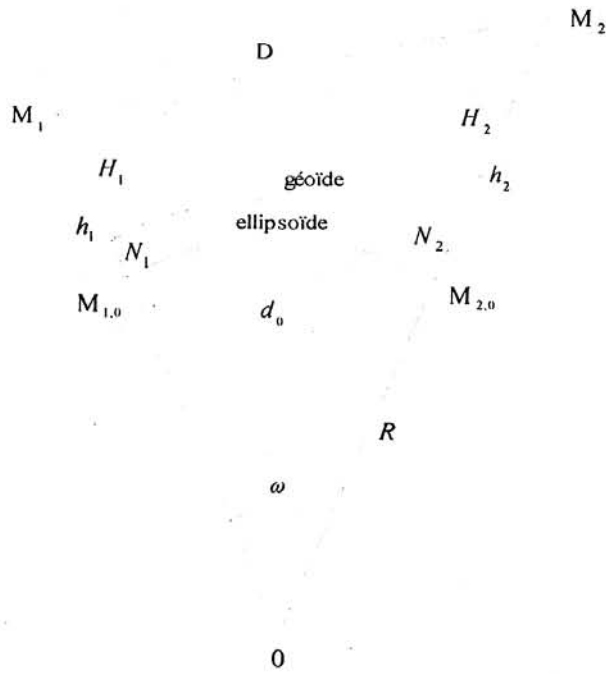


Figure 6: réduction d'une distance à l'ellipsoïde

On passe de la distance oblique D à la distance d_0 selon la corde par:

$$d_0 = D \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{h_2 - h_1}{D}\right)^2}{\left(1 + \frac{h_1}{R}\right)\left(1 + \frac{h_2}{R}\right)}}$$

puis, pour des distances supérieures à 20 km, on passe de la corde à l'arc $\widehat{M_{1,0}M_{2,0}}$ par:

$$d = d_0 \left(1 + \frac{d_0^2}{24R^2}\right)$$

On assimile l'ellipsoïde à une sphère de rayon R . h_1, h_2 sont les hauteurs au dessus de l'ellipsoïde. En méthode classique cette donnée est inconnue et donc on assimile à l'altitude. En système NTF, la hauteur du géoïde étant au plus 20 mètres cela peut donner une erreur de $3 \cdot 10^{-6} D$. Si on faisait la même approximation en RGF93, la hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde étant aux alentours de 50 mètres on aurait une erreur de l'ordre de $8.5 \cdot 10^{-6} D$. En fait le problème ne se pose pas puisqu'avec GPS on dispose de la hauteur des points au dessus de l'ellipsoïde.

Réduction de la distance sur l'ellipsoïde à la représentation plane:

Pour faire cette réduction on utilise le module linéaire de la représentation plane: c'est le rapport entre un élément différentiel de distance sur le plan, et l'élément correspondant sur l'ellipsoïde:

$$\mu = \frac{dS}{ds}$$

Pour réduire la distance d , on doit calculer l'intégrale:

$$Dp = \int_{M_1}^{M_2} dS = \int_{m_1}^{m_2} \mu ds$$

Pour une représentation Lambert conforme le module linéaire est une fonction de la latitude dont l'intégration est impossible. Donc on fait des approximations de l'intégrale en fonction de la distance en posant μ constant et égal à:

$$\mu = \mu_1$$

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2 + 4\mu_{1/2}}{6}$$

En Lambert93, on est amené à utiliser la troisième formule plus souvent qu'en Lambert zone puisque les déformations linéaires au nord et au sud sont plus grandes:

Prenons un exemple dans le sud de la Corse:

En une station de coordonnées géographiques RGF93/GRS80 : $\left[\begin{array}{l} \lambda_1 = 9^\circ \\ \varphi_1 = 41^\circ 30' \end{array} \right]$ on a mesuré une distance réduite à l'ellipsoïde de 10 000.00 m dans le direction plein nord. On peut calculer sur cette visée une valeur approximative de la latitude du point final, et du point milieu de la visée, soit: $\varphi_2 = 41^\circ 35' 22''$ et $\varphi_{1/2} = 41^\circ 32' 41''$.

Les altérations linéaires correspondantes sont:

$$\varepsilon = \mu - 1$$

$$\varepsilon_1 = 2.772 \text{ m / km}$$

$$\varepsilon_2 = 2,642 \text{ m / km}$$

$$\varepsilon_{1/2} = 2,707 \text{ m / km}$$

Comparaison des distances réduites à la projection:

$$D_p = d + \varepsilon_1 d = 10027,72m$$

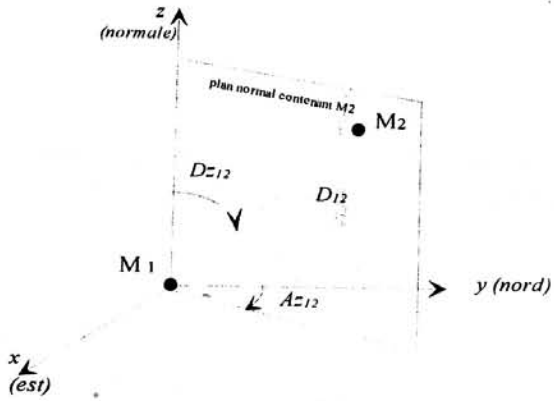
$$D_p = d + \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} d = 10027,07m$$

$$D_p = d + \frac{\varepsilon_1 + 4\varepsilon_{1/2} + \varepsilon_2}{6} d = 10027,07m$$

En conclusion on voit qu'il est plus facile et moins risqué pour transformer une distance spatiale en distance en représentation plane de transformer des coordonnées tridimensionnelles en coordonnées planes.

6.2. Orientation d'une direction:

De nombreuses applications requièrent le calcul d'une orientation par rapport au nord, comme par exemple matérialiser la direction du Nord ou une autre direction par l'implantation d'un repère. Quand on parle d'orientation par rapport au nord, on se place dans le repère local défini comme suit :



M1 est l'origine du repère
 M1z est la normale à l'ellipsoïde
 M1xy : plan parallèle au plan tangent à l'ellipsoïde
 M1y : direction du nord
 Dz : distance zénithale angle vertical entre la normale et la direction M1M2
 Az : azimut : angle horizontal entre la direction du nord et la direction M1M2
 D : distance dans l'espace

Figure 7: repère local géodésique : RLGM1

L'orientation d'une direction est donnée par l'azimut de cette direction.

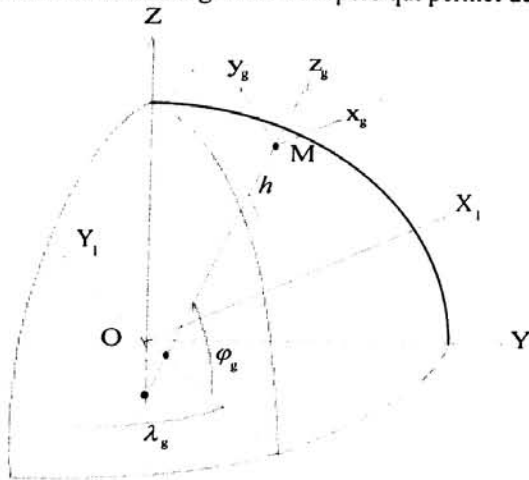
On peut écrire les coordonnées tridimensionnelles de M2 dans ce repère de la manière suivante :

$$x_2 = D_{12} \sin Dz_{12} \sin Az_{12}$$

$$y_2 = D_{12} \sin Dz_{12} \cos Az_{12}$$

$$z_2 = D_{12} \cos Dz_{12}$$

Voyons maintenant comment passer des coordonnées (X,Y,Z) RGF93 aux coordonnées locales (x,y,z). Pour cela nous effectuons le changement de repère qui permet de passer du repère RGF93 au repère local de M1.



Le résultat GPS est la ligne de base :

$$\overline{M_1 M_2} = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix}_{RGF93}$$

Pour écrire ce vecteur dans le repère local on doit faire une rotation autour de OZ de $\lambda_1 + \frac{\pi}{2}$, puis de

$\frac{\pi}{2} - \varphi$ autour de OX1.

λ_1, φ_1 sont respectivement les longitude et latitude RGF93/GRS80

X

Figure 8: repère géocentrique et repère local

On a donc :

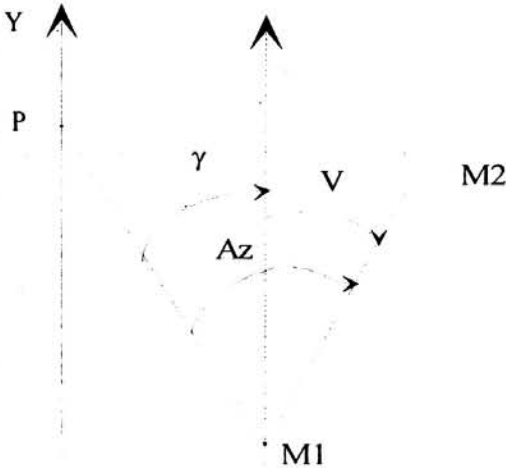
$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_{RLGM1} = R_g \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix}_{RGF93}$$

$$\text{avec } \mathbf{R}_g = \mathbf{R}\left(OX_2 \frac{\pi}{2} - \varphi_1\right) \times \mathbf{R}\left(OZ_2 \lambda_1 + \frac{\pi}{2}\right) = \begin{pmatrix} -\sin \lambda_1 & \cos \lambda_1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 \cos \lambda_1 & -\sin \varphi_1 \sin \lambda_1 & \cos \varphi_1 \\ \cos \varphi_1 \cos \lambda_1 & \cos \varphi_1 \sin \lambda_1 & \sin \varphi_1 \end{pmatrix}$$

On calcule alors l'azimut par :

$$\tan Az_{12} = \frac{x_2}{y_2}$$

Par méthode traditionnelle on passe par l'intermédiaire du gisement en Lambert. Comme précédemment à partir des coordonnées RGF93 on calcule les coordonnées Lambert, puis le gisement comme suit:



Comme la représentation plane est conforme l'angle Az (azimut) est conservé et en projection c'est l'angle entre l'image du méridien de M1 et la direction M1 et M2. Approximation la courbe M1M2 est assimilée à une droite (on néglige la correction de courbure de l'image de la géodésique)

$$Az = V + \gamma$$

V est le gisement

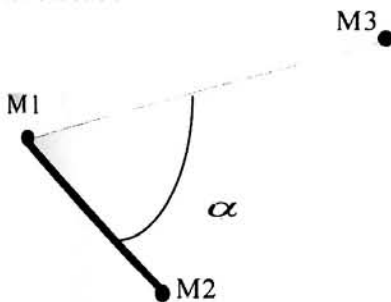
γ est la convergence du méridien, elle dépend des paramètres de la Lambert et de la longitude

figure 9: les angles d'orientation

Ces deux méthodes sont expliquées dans le cadre d'orientation proche (quelques kilomètres), pour des distances plus longues les calculs deviennent plus compliqués et font en particulier intervenir des calculs de géodésiques sur l'ellipsoïde.

6.4. Calcul d'un rattachement:

Il s'agit ici de mélanger des observations GPS et des observations traditionnelles afin d'attribuer des coordonnées RGF93 à un point non observable en GPS situé à quelques centaines de mètres. Ainsi les observations minimales pourront être :



Les coordonnées RGF93 des points M1 et M3, déterminées par GPS.

Avec un théodolite on mesure l'angle α , la distance oblique D12 et la distance zénithale Dz12.

Figure 10: rattachement

L'azimut Az_{13} est déterminé par la méthode vue ci-dessus et on en déduit l' Az_{12} en ajoutant l'angle α .

On calcule les coordonnées (x_2, y_2, z_2) dans le repère local de M1.

Puis on calcule le vecteur $\overrightarrow{M_1 M_2}$ par :

$$\begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix}_{RGF93} = R_g^{-1} \begin{bmatrix} X_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_{RLG_{M1}}$$

Il s'agit ici d'un exemple simple de rayonnement, qui se généralise pour faire des calculs de compensations de schéma d'observations plus compliqués. Des logiciels comme GEOLAB permettent de faire ce genre de compensation en tridimensionnel.

Pour calculer en méthode traditionnelle :

On transforme les coordonnées de M1 et M3 en Lambert.

On calcule le gisement M1M3 puis M1M2.

On réduit la distance à la représentation (comme ci-dessus)

Puis on calcule les coordonnées Lambert de M2.

On transforme en coordonnées géographiques, longitude, latitude

On calcule h avec la distance zénithale, la distance et éventuellement la grille de géoïde selon la distance.

7. CONCLUSION :

La sortie imminente de l'arrêté préconisant l'utilisation du nouveau système géodésique RGF93 inquiète certains utilisateurs parce que les habitudes vont changer. Pourtant ce nouveau système va permettre de simplifier certains problèmes et de faciliter l'utilisation du GPS.

METHODOLOGIE DE DETERMINATION PRECISE DE GEOIDE EN ALGERIE

S. A. Benahmed Daho, S. Kahlouche
Centre National des Techniques Spatiales
Laboratoire de Géodésie - BP 13 Arzew- 31200 – Algérie

ملخص

لقد تم عرض طريقة للتصديق على قياسات الجاذبية ولتحديد الجيود في الجزائر : هذا باستعمال الترتيب السريع واستعمال البرنامج الحاسوبي قراف سوفت التابع لجامعة كورنيليا .
إن التقنية المستعملة لتقدير ارتفاعات الجيود بطريقة الترتيب السريع هي طريقة السحب/الإرجاع ، ولقد تم حساب تأثيرات الأرضية بالنماذج الرقمية لسطح الأرض المتوفرة تبعا لتصغير أرتي أم . لقد تم استعمال نموذج OSU91A كنموذج مرجعي لسحب وإرجاع ، و هذا على التوالي ، مساهمات إمتدادات الموجة الطويلة على نقائص الجاذبية وكذا موجات الجيود .
ولأجل اختبار نوعية ودقة النتائج المحصل عليها، فإن هذا الجيود ذو القدرة التمييزية $5' \times 5'$ المحسوبة في نظام سطح المقارنة الجيوديزي 80 ، بين الحدين [20 - 37] بدرجة العرض و [-7, 10] بدرجة الطول، قد تم تكيفه على 20 ارتفاعا جيوديا مستنتجة من أرصاد أجهزة تحديد المواقع (GPS) و من التسوية .
لقد تم جمع هذه القياسات انطلاقا من مشروع الجيوسيت ومن شبكات محلية لأجهزة تحديد المواقع و التسوية . إن معادلة النتائج تقع على مستوى ± 4 سم على المتوسط خاصة في المنطقة الشمالية من البلاد ، بفوارق تصل إلى ± 11 على الأكثر في المناطق التي تتعدم فيها كثافة القياسات الجاذبية.

RESUME

Une méthode de validation des mesures gravimétriques et de détermination du géoïde en Algérie, utilisant la Collocation rapide et le logiciel GRAVSOFTE de l'université de Copenhague est présentée.

La technique utilisée pour l'estimation des hauteurs du géoïde par la méthode de Collocation rapide est celle de retrait-restauration. Les effets de terrain ont été calculés avec les MNT disponibles suivant la réduction RTM. Le modèle géopotential OSU91A a été utilisé comme modèle de référence pour retirer et restaurer respectivement les contributions de grandes longueurs d'onde sur les anomalies de gravité et les ondulations du géoïde.

Afin de tester la qualité et la précision des résultats obtenus, ce géoïde de résolution $5' \times 5'$ calculé dans le système GRS80 entre les limites [20°, 37°] en Latitude et [-7°, 10°] en Longitude, a été adapté à 20 hauteurs géoïdales déduites d'observations GPS et de nivellement. Ces mesures ont été collectées à partir du projet ALGEONET et des réseaux locaux de GPS/Nivellement. L'adéquation des résultats se situe au niveau de ± 4 cm en moyenne spécialement pour la partie nord du pays avec des écarts atteignant au maximum ± 11 cm dans les régions où la densité de mesures gravimétriques fait manifestement défaut.

Mots clés : Géoïde, modèle géopotential, Collocation rapide, RTM, retrait-restauration.

ABSTRACT

A method for the validation of gravity measurements and the determination of gravimetric geoid over Algeria, using the Fast Collocation and GRAVSOFT software of Copenhagen University is presented.

The method used to estimate the geoidal heights by Fast Collocation method is the remove-restore. The terrain effect has been computed with the available DTM according the RTM reduction. The OSU91A model has been used as a reference field in order to remove and restore the long wavelength components of gravity and geoid respectively.

In order to test the accuracy and the quality of the obtained results, this geoid of the 5' x 5' the resolution computed in the GRS80 system between the limits [20°, 37°] for latitudes and [-7°, 10°] for longitudes, was adapted to 20 geoidal heights provided from GPS and levelling observations. These measurements have been collected from the ALGEONET project and the local GPS/Levelling survey. The adequacy of the results is ± 4 cm in the mean especially for the north part of the country with variations reaching ± 11 cm maximum in areas where gravity data are clearly missing.

Key words : Geoid, Geopotential model, Fast Collocation, RTM, remove-restore.

1. Introduction

L'Algérie a récemment orienté une partie de ses programmes de recherche vers les déterminations précises du géoïde en utilisant différentes méthodes. Cette surface de niveau connaît un regain d'intérêt depuis l'avènement du positionnement précis par satellite, en particulier pour réaliser du nivellement par GPS.

L'objet de cet article est de réhabiliter ce concept qui faillit disparaître ou au moins d'être délaissé par beaucoup avec l'apparition de la géodésie tridimensionnelle.

Une première détermination d'un géoïde préliminaire dans des petites zones situées au nord de l'Algérie, a été effectuée en 1997. Les résultats obtenus ont été présentés lors de l'Assemblée Scientifiques de l'AIG à Rio de Janeiro – Brazil en 1997 (S.A.Benahmed Daho, et S. Kahlouche 1998).

A présent, un nouveau géoïde de résolution 5'x5', a été calculé par la méthode de collocation rapide sur le territoire national entre les limites $20^\circ \leq \varphi \leq 37^\circ$ et $-7^\circ \leq \lambda \leq 10^\circ$ en utilisant les données suivantes : le modèle géopotential OSU91A développé jusqu'au degré et ordre 360, un ensemble de 12472 données gravimétriques terrestres couvrant l'ensemble du territoire national, et des informations topographiques. Le calcul des effets de la topographie selon la réduction RTM est basé sur deux grilles d'élévations; un MNT de résolution 1km x 1km pour la partie Nord du pays, et le modèle topographique global ETOPO5 de résolution 10km x 10km pour la partie restante du territoire, lequel est utilisé jusqu'à une distance de 200 km.

Afin de procéder à une vérification externe de la qualité et de la précision des résultats obtenus, ce géoïde a été comparé aux 20 hauteurs géoïdales déduites d'observations GPS et de nivellement. Ces

mesures ont été collectées à partir du projet ALGEONET et des réseaux locaux de GPS/Nivellement.

2. Fonction de Covariance

Le premier pas dans l'application de la Collocation pour l'estimation des hauteurs du géoïde réside dans la détermination de la fonction covariance empirique et par conséquent la sélection de sa représentation analytique correspondante. Cette fonction devrait être utilisée pour exprimer la dépendance statistique des quantités liées au potentiel perturbateur. On suppose que la différence entre le modèle terre (ellipsoïde) et la réalité (géoïde) obéit à des lois statistiques.

2.1. Covariance empirique

La fonction de covariance empirique de l'anomalie de gravité est calculée par la formule suivante :

$$C_{ss}(\psi) = \frac{1}{N} \sum \Delta g_i \cdot \Delta g_j \quad (1)$$

La somme est effectuée pour toutes les combinaisons des points Q_i et Q_j dont la distance sphérique ψ_{ij} est comprise entre $(\psi - \Delta\psi / 2)$ et $(\psi + \Delta\psi / 2)$. N est le nombre de combinaisons, et $\Delta\psi$ représente la dimension de l'intervalle d'échantillonnage. Le choix de cette valeur dépend du pas de la grille utilisée.

2.2. Ajustement de la fonction de covariance locale

L'application de la méthode de collocation nécessite la connaissance d'un modèle analytique de covariance. La fonction de covariance locale $K(\psi)$ du potentiel perturbateur utilisée dans le cadre de ce travail, est donnée par (Tscherning, 74):

$$K(\psi) = K_G(\psi) + K_L(\psi) \quad (2)$$

avec :

$$K_G(\psi) = \alpha \left[\frac{GM}{R_E} \right]^2 \cdot \sum_{l=2}^N \varepsilon_l \left[\frac{R_E^2}{rr'} \right]^{l+1} P_l(\cos\psi)$$

$$\text{et } K_L(\psi) = \sum_{i=N+1}^{+\infty} \frac{A}{(i-1)(i-2)(i+B)} \left[\frac{R_B^2}{rr'} \right]^{i+1} P_i(\cos\psi)$$

où ε_l : représente la variance des erreurs des coefficients harmoniques du modèle géopotential,
 N : degré maximum du modèle de référence,
 α : coefficient multiplicatif empirique que l'on estimera,
 A : facteur d'échelle de prédiction,
 R_B : rayon de convergence [c'est le rayon de la sphère de Bjerhammar],
 r et r' : rayons vecteurs des points P et Q.
 R_E : rayon moyen de la terre.
 B : entier positif

Cependant, l'utilisation du modèle précédent comme modèle de fonction de covariance locale exige l'estimation de trois paramètres : le rayon de la sphère de Bjerhammar (R_B) et deux facteurs d'échelle (α , A). Le problème consiste donc à ajuster les valeurs de ces paramètres afin de se rapprocher le plus possible des valeurs empiriques. Une procédure itérative par moindres carrés est utilisée pour l'estimation de ces derniers, en imposant à B d'être un entier, ce qui conduit dans ce cas à des expressions finies pour la somme des séries en question.

3. Description des données

3.1. Anomalies de gravité

Les anomalies de gravité utilisées dans le cadre de ce travail ont été fournies par le Bureau Gravimétrique International (B.G.I.). Ces mesures dont la précision a priori est de 5 mGals ont été rattachées au système de Référence Géodésique GRS67 par le B.G.I.. Toutes ces mesures ont été transformées du système GRS67 vers le système GRS80.

Enfin, on a appliqué une correction atmosphérique recommandée par l'Association Internationale de Géodésie (IAG, 1971) pour éliminer l'influence des masses atmosphériques. La répartition géographique des mesures fournies par le B.G.I. est représentée sur la figure 1.

3.2. Modèle Géopotential

L'étude des perturbations orbitales des satellites artificiels, sous l'influence de l'attraction gravitationnelle terrestre, a permis d'établir des modèles représentatifs du potentiel gravitationnel de la Terre. Ces modèles se présentent sous la forme de développements en harmoniques sphériques; une classe particulière de polynômes et fonctions qui permettent une modélisation appropriée de la forme de notre planète.

L'expression du développement en harmoniques sphériques du potentiel Terrestre W (somme du potentiel gravitationnel V et du potentiel centrifuge Φ) est donnée par (Moritz, 80) :

$$W = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r} \right)^n \left[\bar{C}_{nm} \cdot F_{nm} + \bar{S}_{nm} \cdot G_{nm} \right] + \Phi \quad (3)$$

où : $F_{nm} = \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \cos m\lambda$

$G_{nm} = \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \sin m\lambda$

(r, θ , λ) sont les coordonnées sphériques (rayon vecteur, colatitude et longitude) du point de calcul, GM est la constante gravitationnelle, a est le demi-grand axe de l'ellipsoïde de référence; \bar{P}_{nm} sont les fonctions associées de Legendre normalisées, \bar{C}_{nm} et \bar{S}_{nm} sont les coefficients normalisés du potentiel gravitationnel et Φ représente le potentiel centrifuge, $\Phi = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2(\theta)$, ω étant la vitesse angulaire de rotation de la Terre.

Le potentiel normal généré par l'ellipsoïde de référence est représenté par l'expression (Moritz, 80) :

$$U = \frac{GM}{r} \left[1 - \sum_{n=1}^{+\infty} \bar{J}_{2n} \left[\frac{a}{r} \right]^{2n} P_{2n}(\sin\beta) \right] + \Phi \quad (4)$$

où M' est la masse de l'ellipsoïde de référence.

De même, l'expression du potentiel perturbateur; différence entre le potentiel terrestre et le potentiel normal, est donnée par la formule suivante (Moritz, 80) :

$$T = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{+\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \left[\Delta \bar{C}_{nm} \cdot F_{nm} + \Delta \bar{S}_{nm} \cdot G_{nm} \right] + \frac{GM}{r} \quad (5)$$

où $\Delta \bar{C}_{nm}$ et $\Delta \bar{S}_{nm}$ représentent les différences entre les coefficients normalisés du potentiel terrestre et les coefficients normalisés du potentiel normal, et où n'ont été considérés que les termes de degré $n \geq 2$; du fait qu'on suppose généralement que la masse de l'ellipsoïde de référence est égale à la masse de la Terre, et que l'origine du repère du développement est confondue avec le centre de gravité de la Terre.

Par ailleurs, si l'on considère un développement en harmoniques sphériques du potentiel perturbateur jusqu'au degré $n = N_{\max}$ et en posant $\delta M = 0$, on aura :

$$T = W - U = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{N_{\max}} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \left[\Delta \bar{C}_{nm} \cdot F_{nm} + \Delta \bar{S}_{nm} \cdot G_{nm} \right] \quad (6)$$

Cette expression permet de dériver les formules de toutes les quantités gravimétriques qui sont en relation avec le potentiel perturbateur T.

Hauteur du géoïde (Formule de Bruns)

$$N = \frac{T}{\gamma} = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^{N_{\max}} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \left[\Delta \bar{C}_{nm} \cdot F_{nm} + \Delta \bar{S}_{nm} \cdot G_{nm} \right] \quad (7)$$

où γ est la pesanteur normale donnée par la formule de Somigliana.

Anomalie de gravité à l'air libre

$$\Delta g_m = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^{N_{\max}} (n-1) \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n [\Delta \bar{C}_{nm} \cdot F_{nm} + \Delta \bar{S}_{nm} \cdot G_{nm}] \quad (8)$$

Le problème de choix d'un modèle géopotential optimal en Algérie pour la réduction des données gravimétriques et par conséquent l'application de la technique de retrait-restauration; une étape importante dans le calcul précis d'un géoïde, a été abordé.

Les résultats obtenus restent tributaires de la qualité et la densité des données utilisées.

Les différents tests effectués pour la définition du modèle géopotential le plus approprié en Algérie parmi les quatre modèles globaux **GPM2**, **OSU81**, **OSU91A** et **EGM96**; utilisés dans le cadre de cette comparaison, sont basés sur les données gravimétriques du **B.G.I.**.

La comparaison est faite sur l'ensemble des données en calculant leurs anomalies de gravité réduites (données observées moins la contribution de chaque modèle), et en déterminant leurs paramètres statistiques correspondants.

Les paramètres statistiques considérés dans cette comparaison sont la moyenne, l'écart type et la fonction de covariance lissée; nécessaire pour toute estimation par la méthode de Collocation.

Les statistiques des données réduites ($\Delta g_{\text{Réd}} = \Delta g_{\text{OBS}} - \Delta g_{\text{M}}$) sont résumées dans la table 1.

La figure 2 illustre les fonctions de covariance empirique et analytique (modèle de Tscherning, 1974) des données réduites de chaque modèle; obtenues avec les programmes EMPCOV (Tscherning, 1994) et COVFIT (Knudsen, 1987) du logiciel GRAVSOFT

En comparant les résultats de la table 1. et en tenant compte de l'accord parfait entre les fonctions de covariance analytique et empirique, il ressort que le modèle OSU91A ajuste d'une façon optimale les données collectées en Algérie.

3.3. Données topographiques

Le calcul des effets topographiques sur le géoïde nécessite un Modèle Numérique de Terrain de haute résolution.

En effet, deux MNT de différentes résolutions ont été utilisés :

Un MNT de 10km x 10km issu de ETOPO5, couvant le région $15^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ$ et $-10^\circ \leq \lambda \leq 15^\circ$.

Un MNT de 1km x 1km issu de GLOBE, couvant le région $33^\circ \leq \varphi \leq 38^\circ$ et $-3^\circ \leq \lambda \leq 9^\circ$.

4. Validation des mesures gravimétriques

La validation des données est une procédure extrêmement stricte qui garantit la qualité et l'intégrité de la banque de données gravimétriques. Elle est appliquée systématiquement, avant intégration dans la banque, à tout ensemble de données. Son principe consiste à faire une comparaison entre les valeurs observées et prédites, estimées par une technique puissante.

La procédure de validation a été appliquée en utilisant la Collocation par moindres carrés. Pour des contraintes purement numériques, la surface totale a été divisée en 42 zones rectangulaires disjointes. Le numéro et le nombre de mesures de gravité de chaque zone sont représentés sur la figure3.

Les données réduites ($\Delta g_{\text{Réd}} = \Delta g_{\text{OBS}} - \Delta g_{\text{M}}$) de chacune des 42 zones ont été divisées en deux ensembles disjointes A et B, à condition qu'ils aient la même distribution. En outre, un échantillonnage avec un pas de 5' sur les données contenues dans cette zone a été effectué (il ne s'agit pas de valeurs moyennes). A partir de ces anomalies réduites, deux fonctions de covariance empiriques ont été calculées séparément. Ces valeurs empiriques ont été utilisées pour estimer les valeurs des paramètres du modèle de la fonction de covariance locale (modèle de Tscherning).

Les valeurs prédites des anomalies de gravité de l'ensemble B ont été estimées à partir des données de l'ensemble A, puis comparées aux observations de l'ensemble B. Cependant, si la différence entre Δg_{red} et Δg_{pred} est supérieure à 20 mGals (seuil fixé au préalable en fonction de la précision et de la densité des données utilisées), alors, cette observation est rejetée. De même pour les données de l'ensemble A à partir de l'ensemble B.

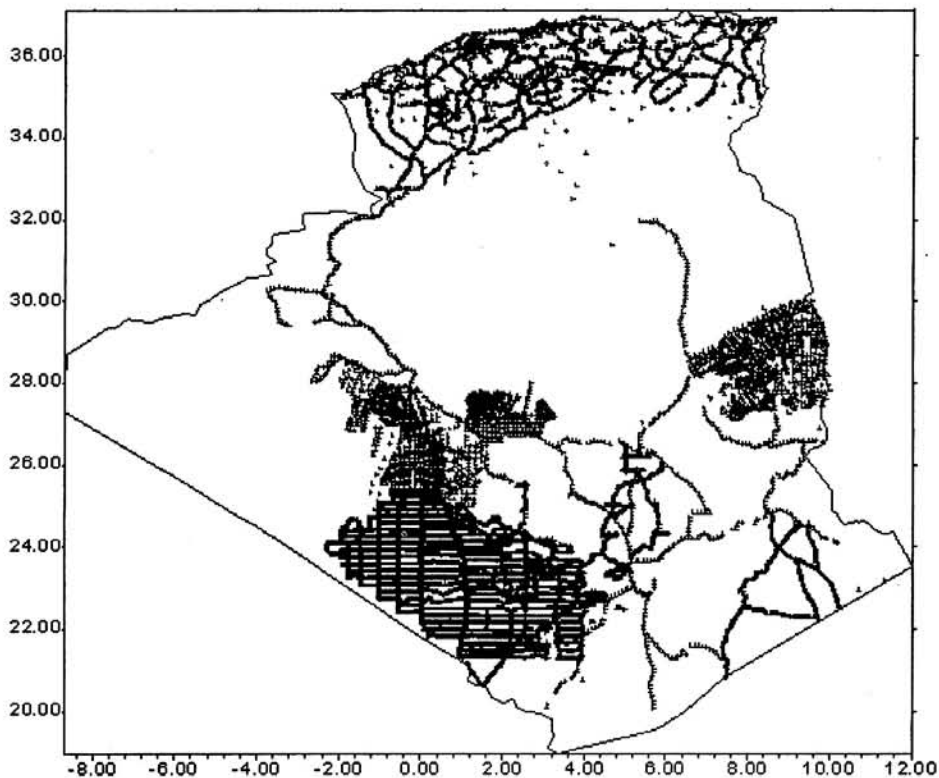


Figure 1 : Répartition géographique des 12472 mesures de gravité fournies par le B.G.I.

Modèles Géopotentiels	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
GPM2	-82.05	138.37	2.79	24.81
OSU81	-72.26	115.19	1.55	18.17
OSU91A	-97.04	125.56	0.30	13.16
EGM96	-100.96	112.03	-2.17	13.54

Table 1. Statistiques, en mGals, des différences entre l'anomalie observée et celle calculée par chaque modèle géopotentiel.

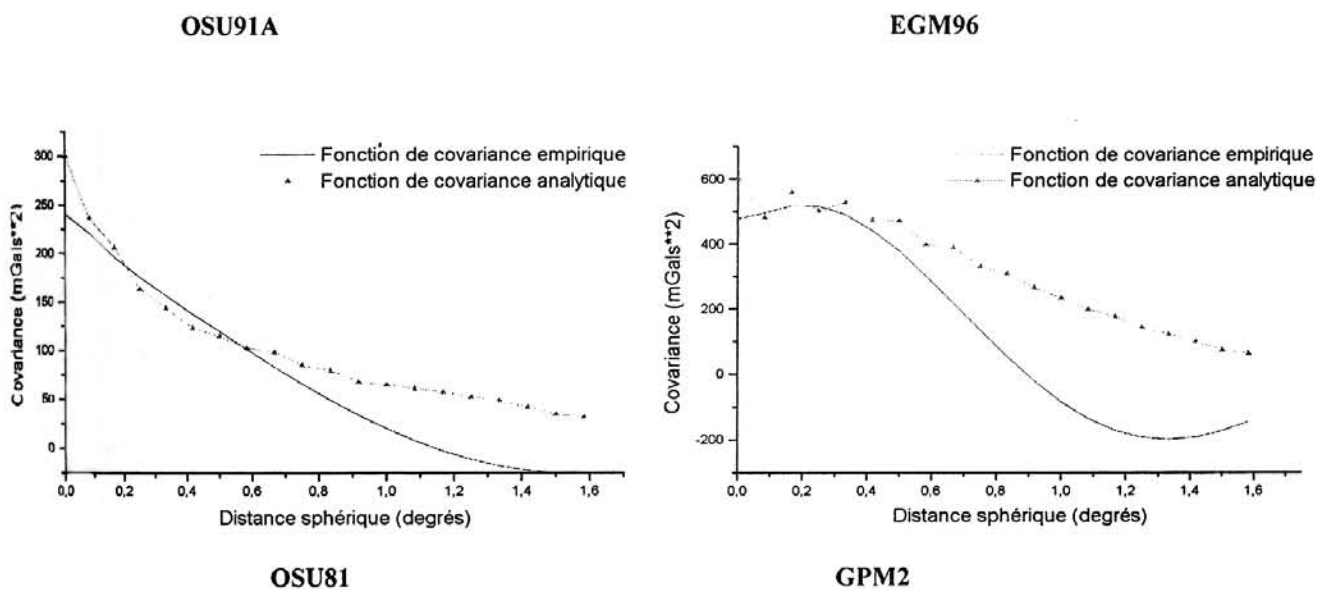


Figure 2. Fonctions de covariances des anomalies de gravité réduites pour chaque modèle.

La procédure est répétée sans les observations erronées et sur tous les points des ensembles A et B. Alors, si la même observation est rejetée, on peut affirmer qu'elle est entachée d'erreur et par conséquent, elle sera éliminée automatiquement.

Le taux d'erreur détecté en utilisant cette méthode est de l'ordre de 1.21%. Les statistiques des 12183 mesures validées sur 12472 mesures brutes, sont regroupées dans la table 2. Les écarts entre les observations et les prédictions sont maximums, jusqu'au 20 mGals, dans les régions dépourvues de données, et d'environ 1 mGals le long des levés gravimétriques.

5. Calcul du géoïde gravimétrique

Les calculs ont été effectués avec le logiciel GRAVSOFT (Tscherning, 1994) largement éprouvé et validé par l'IGeS (International Geoid Service, D.I.I.A.R. - Politecnico di milano).

La technique utilisée pour le calcul des hauteurs du géoïde par la méthode de Collocation rapide est celle de retrait-restauration. La procédure de retrait consiste à retrancher des anomalies à l'air libre observées Δg_{OBS} son contenu basse Δg_M et haute Δg_{TOPO} fréquences pour obtenir des anomalies résiduelles $\Delta g_{R\acute{e}s}$.

$$\Delta g_{R\acute{e}s} = \Delta g_{OBS} - \Delta g_M - \Delta g_{TOPO} \quad (9)$$

Les anomalies résiduelles ainsi obtenues ont une variabilité (déviations standard) fortement atténuée qui permet d'appliquer la méthode de Collocation rapide.

On restaure ensuite l'information géoidale, après calcul ($\Delta g \rightarrow N$) en sommant les différentes composantes fréquentielles :

$$N_{R\acute{e}s} = N_{OBS} - N_M - N_{TOPO} \quad (10)$$

Le modèle géopotential OSU91A développé jusqu'au degré et ordre 360 a été utilisé comme modèle de référence pour retirer et restaurer respectivement les contributions de grandes longueurs d'onde sur les anomalies de gravité et les ondulations du géoïde.

Cependant, le calcul des effets de la topographie en accordant la réduction RTM est basé sur deux grilles d'élévations; un MNT de résolution 1km x 1km pour la partie Nord du pays, et le modèle topographique global ETOPO5 de résolution 10km x 10km pour la partie restante du territoire, lequel est utilisé jusqu'à une distance de 200 km. La surface de référence de résolution 15' x 15'; nécessaire pour la réduction RTM, a été formée à partir de ETOPO5. Les statistiques, en mGals, des données résiduelles sont résumées dans la table 3.

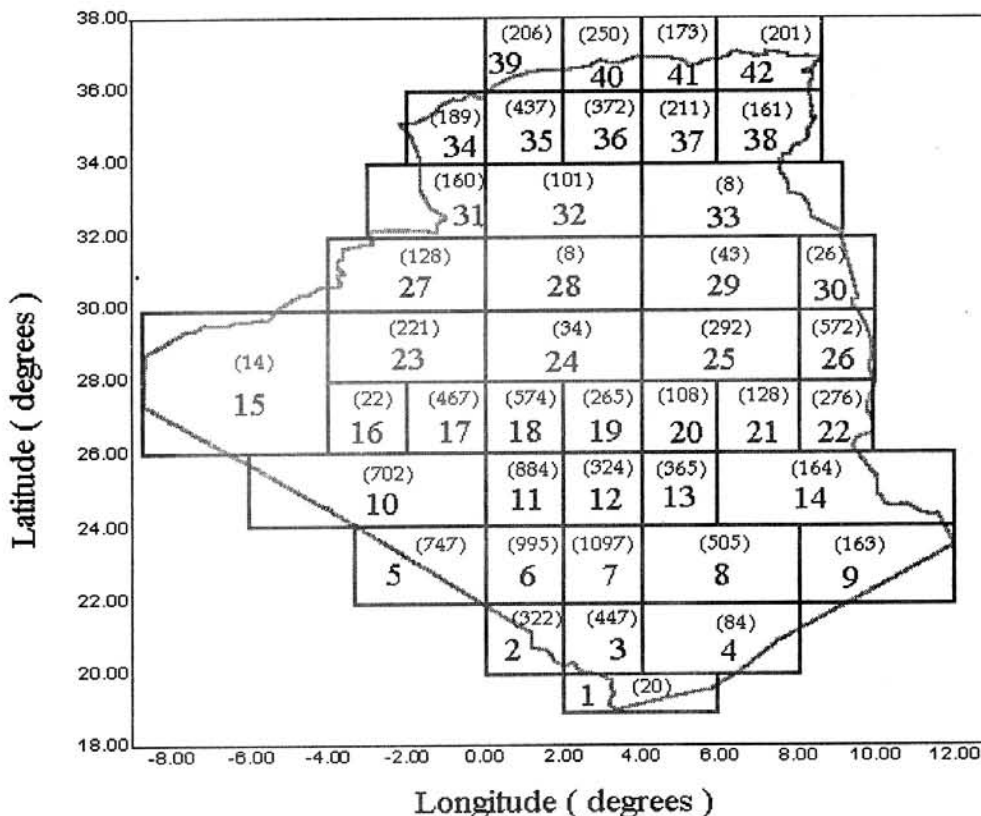


Figure 3. Numéro de chaque zone et le nombre de mesures correspondant (entre parenthèses).

	Nombre de points	Moyenne (mGals)	Ecart type (mGals)	Minimum (mGals)	Maximum (mGals)
Free Air – OSU91A	12183	0.12	12.31	-67.75	123.46
Prediction	12183	0.18	10.68	-57.34	123.20
Différence	12183	-0.06	4.92	-19.94	19.96

Table 2. Statistiques des données validées

Anomalies	Moyenne	Dev. Std.	Minimum	Maximum
Δg_{obs}	4.89	26.84	- 82.59	136.20
$\Delta g_{obs} - \Delta g_{OSU91A}$	0.12	12.31	-67.75	123.46
$\Delta g_r = \Delta g_{obs} - \Delta g_{OSU91A} - \Delta g_{RTM}$	3.09	13.00	-34.17	110.38

Table 3. Statistiques des anomalies résiduelles.

Après l'opération de retrait, on obtient des anomalies résiduelles beaucoup plus lisses que les anomalies gravimétriques observées. La déviation standard des données se réduit de 26.84 mGals à 13.00 mGals. On construit ensuite la grille des anomalies résiduelles de résolution 5' x 5' en utilisant la technique de prédiction par collocation. La valeur de chaque nœud de la grille est calculée à partir des 5 points les plus proches du point de prédiction, en utilisant le modèle de covariance de Markov avec une distance de corrélation = 25km.

Cependant, l'estimation des hauteurs résiduelles du géoïde par Collocation rapide à partir de la grille des anomalies gravimétriques résiduelles, nécessite la connaissance d'un modèle analytique de covariance. Dans ce contexte, le modèle de Tscherning et Rapp

du potentiel perturbateur; donné par l'équation [2], est adopté comme modèle de covariance analytique.

Les résultats de l'ajustement de la fonction de covariance empirique sur le modèle de Tscherning et Rapp sont calculés avec le programme COVFIT8 (Knudsen, 1987).

La figure 5 présente les deux courbes de la fonction de covariance analytique et empirique des anomalies résiduelles

La grille 5' x 5' de la hauteur du géoïde sur le territoire national (après évidemment rajout de la hauteur du géoïde du modèle global de référence OSU91A et la restauration de l'effet du RTM) est représentée sur la figure 6 avec des contours tous les 1m.

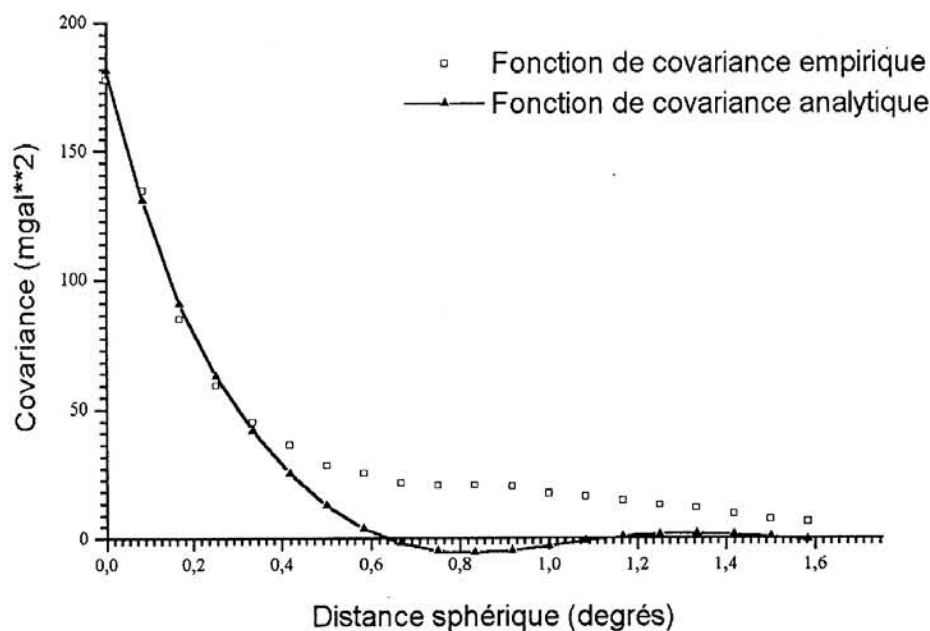


Figure 5. Fonctions de covariance des anomalies de gravité résiduelles.

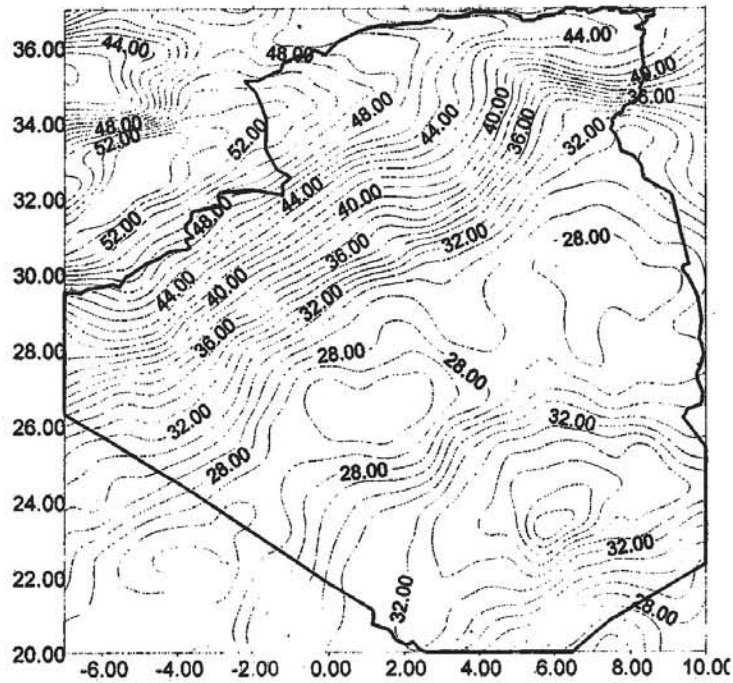


Figure 6. Géolde gravimétrique en Algérie.

7. Adaptation du géolde aux points GPS-nivelés

Malgré tout, il est possible que le modèle géopotential utilisé ne soit pas les plus performants dans la région étudiée et introduise des perturbations à longue période, un décalage éventuellement assortie d'une inclinaison, dans le géolde calculé. C'est pourquoi il est préférable, si l'on dispose des points GPS-nivelés, d'adapter le géolde à ces hauteurs géoidales géométriques. Pour ce faire, on utilise une transformation de similitude à quatre paramètres (ΔX , ΔY , ΔZ et un facteur d'échelle) ou autre technique adéquate.

Dans ce contexte, plusieurs compagnes GPS ont été exécutées ces dernières années en Algérie. Dans le cadre du projet TYRGEONET, deux sites situés au nord d'Algérie ont été déterminés dans le système WGS84. Ces points ont été utilisés par la suite dans la densification et l'amélioration de la précision des réseaux locaux.

L'adaptation a été réalisée par moindres carrés sur 20 points GPS-nivelés; tous situés au nord d'Algérie dont 15 points sont proches de la station d'Arzew (voir figure 7). Les statistiques des différences avant et après adaptation sont résumées dans la table 4.

	Moyenne	Min.	Max.	Dev. Stand.
Avant adaptation	-1.740	-2.290	0.730	0.730
Après adaptation	0.000	-0.067	0.095	0.045

Table 4. Résultats de comparaison entre les hauteurs du géolde gravimétrique et les hauteurs déterminées par GPS/nivellement (en mètres).

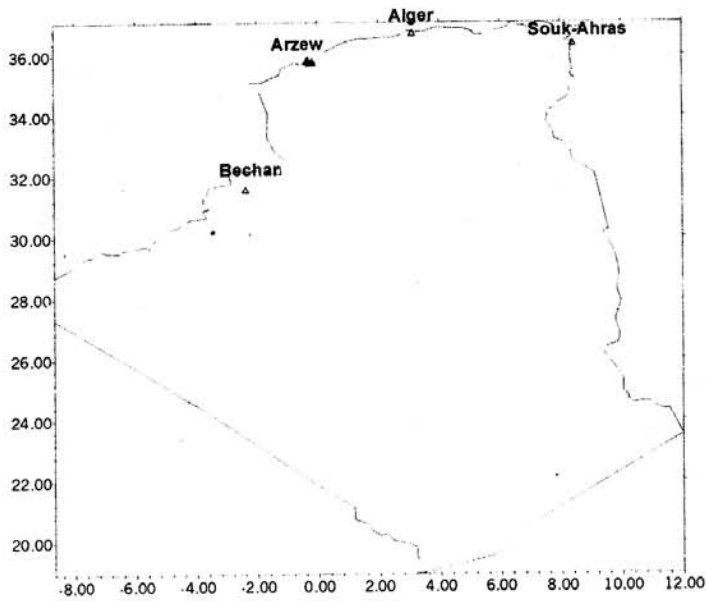


Figure 7. Distribution des points GPS-nivelés

Conclusion

Le nouveau géoïde gravimétrique en Algérie a été calculé par la Collocation rapide en utilisant la technique de retrait-restauration. Ce géoïde a été adapté à 20 hauteurs géoïdales déduites d'observations GPS et de

nivellement. L'adéquation des résultats se situe au niveau de ± 4 cm en moyenne sur des distances variant de 3 à 1000km.

Malgré l'imperfection des données qui ont servi à ce premier calcul du géoïde gravimétrique sur l'Algérie, les résultats sont concluants et on peut considérer que la précision centimétrique est atteinte dans la partie nord du pays, à l'exception des régions où il existe un manque manifeste de données. Un de nos objectifs est de combler ces lacunes.

Dans une version ultérieure du géoïde gravimétrique, on utilisera un MNT plus fin et on tiendra compte, dans la mesure du possible, des données gravimétriques des pays limitrophes. En densifiant la couverture gravimétrique et celle du réseau GPS de premier ordre afin de procéder à une vérification externe de la précision du géoïde calculé, il ne semble pas impossible d'atteindre une précision centimétrique dans la détermination du géoïde gravimétrique sur le territoire national.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Prof. C. C. Tscherning (secrétaire général de l'A.I.G.) et le Prof. R. Forsberg de l'université de Copenhague pour leur avoir fourni le logiciel GRAVSOF, et le Prof G. Balmino, ancien directeur du B.G.I. et Secrétaire Général de l'U.G.G.I., pour avoir mis à leur disposition les données gravimétriques sur l'Algérie.

Références bibliographiques

- Benahmed Daho S., 1996. *Détermination du géoïde gravimétrique en Algérie par la méthode de collocation*. Thèse de magister en techniques spatiales - CNTS 1996.
- Benahmed Daho S., Kahlouche S., 1998. *The gravimetric geoid in Algeria: first results*. Geodesy in the MoVe. Scientific Assembly of the International Association of Geodesy, Rio de Janeiro -Brazil - 3- 9 September 1997.
- Benahmed Daho S., Kahlouche S., 2000. *The New Gravimetric Geoid in Algeria*. IGeS Bulletin N. 10
- Benahmed Daho S., Kahlouche S., 2000. *Geopotential Models Comparison in Algeria*. IGeS Bulletin N. 10

- IAG, 1971. Geodetic Reference System 1967. Publ. Spéc. N° 3 Bull. Geod., Paris.
- Knudsen P., 1987. *Estimation and Modelling of the Local Empirical Covariance Function using gravity and satellite altimeter data*. Bulletin Géodésique, vol. 61.
- Moritz H., 1980. *Advanced Physical Geodesy*, H. Wichmann-Abazcus Press, Karlsruhe-Tundridge Wells.
- Rapp R. H., Sanso F., 1995. *Determination of the geoid present and future*. International Association of Geodesy symposia, N° 106.
- Tscherning C.C. , Rapp R.H. , Goad C., 1983. *A comparison of methods for computing gravimetric quantities from High Degree Spherical Harmonic Expansions*, Manuscripta geodaetica, Vol. 8, pp. 249-272.
- Tscherning C.C., 1974. *A FORTRAN IV program for the determination of the anomalous potential using stepwise least squares collocation*. Reports of the Department of Geodetic Science, N° 212, Ohio State University.
- Tscherning C.C., 1994. *Geoid determination by Least Squares Collocation using GRAVSOF*. Lecture notes for the international school for the determination and use of the geoid, Milano, October.
- Wenzel G., 1999. *Global models of the gravity field of high and ultra-high resolution*. Lecture notes for the international school for the determination and use of the geoid, Milan, February 15-19, 1999.

PROCESSUS DE CONVERSIONS ALTIMETRIQUES APPLICABLES EN FRANCE

H. Duquenne (1)

(1) École Supérieure des Géomètres et Topographes, 1, boulevard Pythagore, 72000 Le Mans
henri.duquenne@esgt.cnam.fr

ملخص

بعد مقدمة تذكر بمختلف طرق التسوية بأجهزة تحديد المواقع، يظهر هذا المقال شبه الجيود كا.جي.أف. 98 و شبكة التحويل لقياس الارتفاع أر.أ.أف.98. لقد تم أساسا حساب شبه الجيود انطلاقا من معطيات قياس الجاذبية بطريقة مستمدة من طريقة ستوكس. لقد سمحت مقارنة قرابة 1000 نقطة للأجهزة تحديد المواقع التي تمت تسويتها بتقدير دقة شبه الجيود ب 10 سم. إن شبكة التحويل لقياس الارتفاع هي مستمدة من كا.جي.أف.98 بتكليف نقاط أر.جي.أف. إن استعمال هذه الشبكة، هو الآن موصى به من طرف فريق العمل التابع للمجلس الوطني للمعلومة الجغرافية، التي قدرت دقته ب 2 أو 3 سم في السهل، و 4 سم في الجبل.

RESUME

Après une introduction rappelant les différentes méthodes de nivellement par GPS, l'article présente le quasi-géoïde QGF98 et la grille de conversion altimétrique RAF98. Le quasi-géoïde a été calculé à partir, essentiellement, de données gravimétriques par une méthode dérivée de celle de Stokes. Une comparaison avec près de 1000 points GPS nivelés du réseau géodésique français (RGF) permet d'estimer la précision du quasi-géoïde à 10 cm. La grille de conversion altimétrique est dérivée de QGF98 par une adaptation aux points du RGF. L'usage de cette grille est maintenant recommandé par un groupe de travail du Conseil National de l'Information Géographique, qui a estimé sa précision à 2 ou 3 cm en plaine, 4 cm en montagne.

ABSTRACT

After an introduction reminding the different methods of levelling by GPS, this article presents the QGF98 quasi-geoid and the altimetric conversion grid RAF98. The quasi-geoid was calculated, essentially from gravimetric data by a method derived from the Stokes one. A comparison with, approximately, 1000 levelled GPS points of the French geodetic network (RGF), allows to evaluate the accuracy of the quasi-geoid at 10cm. The altimetric conversion grid derived from QGF, by an adaptation to RGF points. The use of this grid is now recommended by a working group of the national council of geographic information, which has evaluated its accuracy at 2 or 3cm in plain, 4cm in mountain.

1. Introduction

Inventé par les mathématiciens et géodésiens allemands C.F. Gauss et J.B. Listing, le géoïde est longtemps resté un objet d'études scientifiques. Il était principalement utilisé pour des recherches sur les références verticales et le niveau moyen de la mer. Depuis l'apparition des techniques spatiales de positionnement, et plus particulièrement avec le développement rapide du système GPS, la situation a radicalement changé: le géoïde est devenu un outil indispensable pour convertir les hauteurs ou les différences de hauteurs issues du GPS en

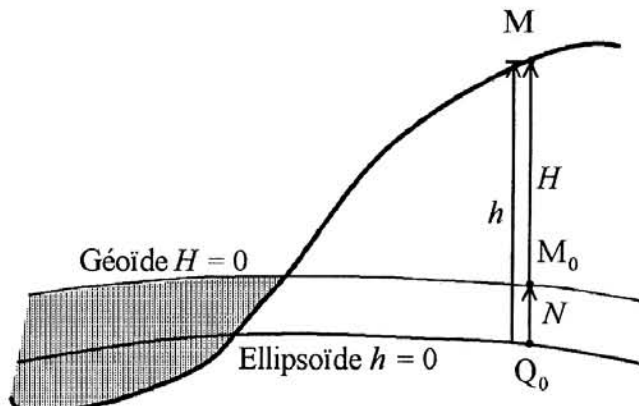


Figure 1 : Altitude, hauteur ellipsoïdale et géoïde.

altitudes ou en différences d'altitudes. Ce problème de conversion altimétrique, dans sa forme générique, est illustré par la figure 1: M est un point de la surface topographique, M_0 est le point du géoïde à la verticale de M , Q_0 est le point d'un ellipsoïde sur la normale à ce dernier passant par M . H est l'altitude orthométrique de M , h est sa hauteur ellipsoïdale. N est la hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde de référence. Avec une très bonne approximation, ces grandeurs sont liées par l'équation :

$$H = h - N \quad (1)$$

Il existe plusieurs méthodes pour obtenir la hauteur du géoïde :

On peut utiliser un modèle global de champ, qui donne N sous la forme d'un développement en harmoniques sphériques en fonction des coordonnées géographiques, ou en grille dans laquelle il faut interpoler. Le dernier modèle à haute résolution publié est EGM96 [1]. Sa précision en France est de 0,50 m en plaine, et 2 à 3 m en montagne [2]. Ces mauvaises performances sont dues à des problèmes de références géodésiques (celle de EGM96 diffère légèrement de celle du réseau géodésique français), aux erreurs du modèle de champ et à sa résolution insuffisante : il ne peut pas restituer des détails du géoïde dont l'extension est plus petite que 55 km.

Il est possible (et c'est une méthode très utilisée) de réaliser des modèles locaux du géoïde en déterminant par GPS la hauteur ellipsoïdale de quelques repères de nivellement, ou, par nivellement, l'altitude de quelques points GPS. Pour les autres points, qui sont connus uniquement par GPS, on interpole la hauteur du géoïde en s'appuyant sur les points GPS nivelés environnants et on en déduit l'altitude. On peut prétendre à une précision d'un petit nombre de centimètres pour peu que :

- les points GPS nivelés soient suffisamment nombreux et bien répartis dans et autour de la zone de travail,
- les observations et traitements GPS soient de bonne qualité,
- les dénivelées ne soient pas trop fortes pour éviter des erreurs de troposphère sur les hauteurs ellipsoïdales,
- le géoïde présente peu de courbure.

Avec cette technique, on maîtrise parfaitement et automatiquement les problèmes de systèmes de références géodésique et altimétrique. Par contre, le rattachement au réseau de nivellement est souvent peu pratique, car les repères de nivellement ne sont pas stationnables et sont implantés sur des bâtiments qui constituent des masques. De toutes façons, ces rattachements prennent du temps. La méthode est d'un emploi délicat en montagne.

Une troisième solution consiste à réaliser, par les techniques de la géodésie physique, un géoïde précis et de l'adapter aux références nationales de géodésie et nivellement. Si les données utilisées sont denses et de bonne qualité, la précision du modèle de géoïde est du même ordre de grandeur que celle que permet le GPS en altimétrie. Pour l'utilisateur, le rattachement au réseau de nivellement devient en principe inutile. En contrepartie, il faut utiliser la référence géodésique dans laquelle le géoïde est exprimé. Le géoïde constitue une solution globale (en tout cas nationale) au problème, évitant ainsi la prolifération des modèles locaux dont l'homogénéité est difficilement maîtrisable. Les premiers modèles de géoïdes français sont dus à J.J. Levallôis [3], [4], à une époque où il n'était nullement question de nivellement par technique spatiale. Après une tentative [5] en 1987, les recherches ont repris en 1992, au Bureau Gravimétrique International, à l'IGN et à l'ESGT [6], [7], [8]. Les résultats les plus précis sont actuellement le modèle de géoïde QGF98 et la grille de conversion altimétrique RAF98, qui sont présentés dans cet article.

2. Le modèle de géoïde QGF98

Sans trop entrer dans les détails, il est nécessaire de rappeler quelques définitions et d'apporter quelques précisions. Le géoïde est la surface équipotentielle du champ de pesanteur qui coïncide au mieux avec la surface moyenne des océans. Il existe plusieurs méthodes de calcul du géoïde, dont celle de Stokes. Elle utilise des anomalies de pesanteur, définie de la manière suivante :

- g est l'intensité de la pesanteur réelle au niveau du géoïde
- γ est l'intensité qu'aurait la pesanteur si la Terre était un ellipsoïde
- $\Delta g = g - \gamma$ est l'anomalie de la pesanteur

La hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde est alors :

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma \quad (2)$$

R est le rayon de la Terre, ψ est l'angle sous lequel on voit, depuis le centre de la Terre, le point de calcul et le point courant d'intégration, S est la fonction de Stokes [9] qui ne dépend que de ψ , le domaine d'intégration σ est une sphère unité. Malheureusement, la formule de Stokes n'est valable que dans des conditions assez éloignées de la réalité : il faudrait, en particulier, qu'il n'y ait pas de masse au dessus du géoïde, donc pas de

topographie. En fait, il n'est pas possible de calculer N rigoureusement par la méthode de Stokes sans connaître la masse volumique de la croûte terrestre au dessus du géoïde. C'est la raison qui a conduit de nombreux pays, dont la France sous l'impulsion de J.J. Levallois (dès 1969 ! voir [10]), à adopter un système d'altitudes normales au lieu des altitudes orthométriques. La surface de référence des altitudes normales est le quasi-géoïde, qui est calculable exactement sans qu'il soit nécessaire de connaître la masse volumique du terrain, par une extension de la théorie de Stokes due à Molodenski.

QGF98 est un quasi-géoïde. Trois types de données ont été utilisées pour sa réalisation :

- le modèle global de champ OSU91A [11], qui joue le rôle d'une solution approchée et dont l'emploi permet de se contenter d'une intégration des anomalies de pesanteur dans un domaine restreint (220 km autour de chaque point calculé dans le cas de QGF98),
- des valeurs d'anomalies de pesanteur au nombre de 550000 environ, la plupart provenant du Bureau de Recherche Géologiques et Minières et du Bureau Gravimétrique International (voir figure 2), un modèle numérique de terrain d'un pas de 140 m, couvrant l'Europe de l'ouest, assemblé à partir de données provenant de l'IGN, du Ministère de la Défense et d'organismes étrangers.

Le potentiel de pesanteur, ainsi que toutes les quantités qui lui sont liées : anomalies de pesanteur, hauteur du quasi-géoïde, sont considérés comme la somme de trois termes : la partie représentée par le modèle de champ, la partie due au terrain supposé homogène et non déjà restituée par le modèle de champ (anomalie dite du terrain résiduel), et la partie, dite résiduelle, due à la géologie ou à des causes plus profondes. Le processus de calcul, baptisé "méthode du terrain résiduel" est dû à R. Forsberg [12] et peut être résumé ainsi :

Des anomalies gravimétriques mesurées Δg , on retire l'anomalie telle qu'elle résulte du modèle de champ Δg_{GM} ainsi que la composante due au terrain résiduel Δg_{RT} , pour obtenir l'anomalie gravimétrique résiduelle :

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{GM} - \Delta g_{RT} \quad (3)$$

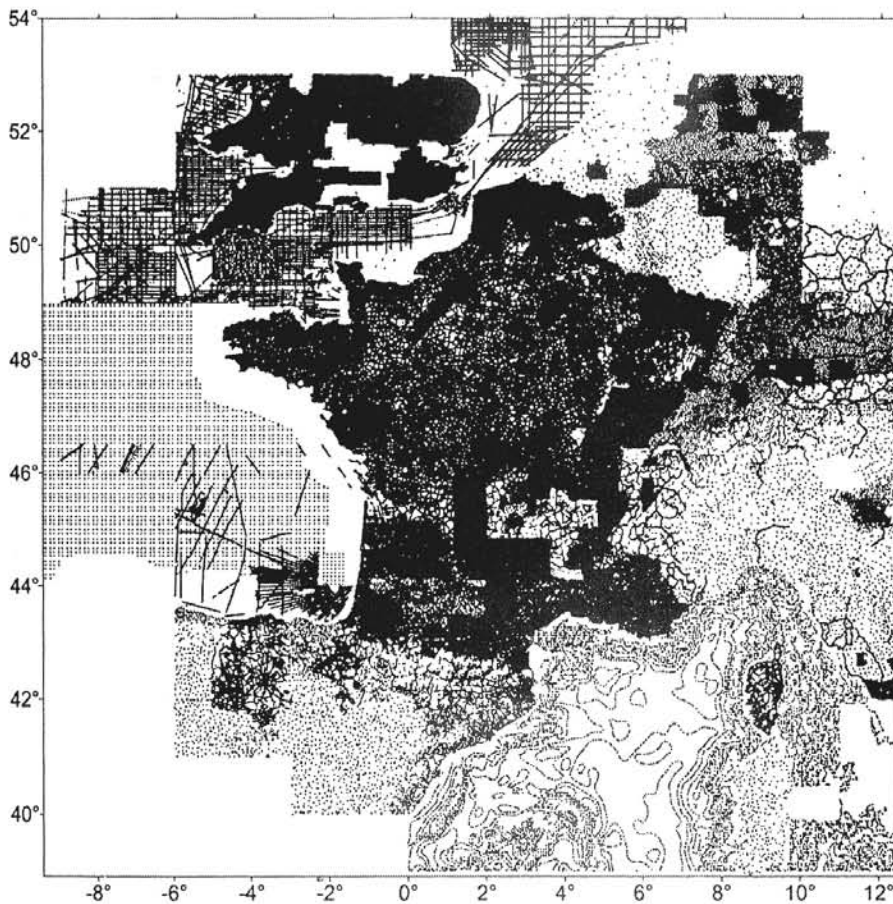


Figure 2 : Données gravimétriques incorporées dans le calcul de QGF98

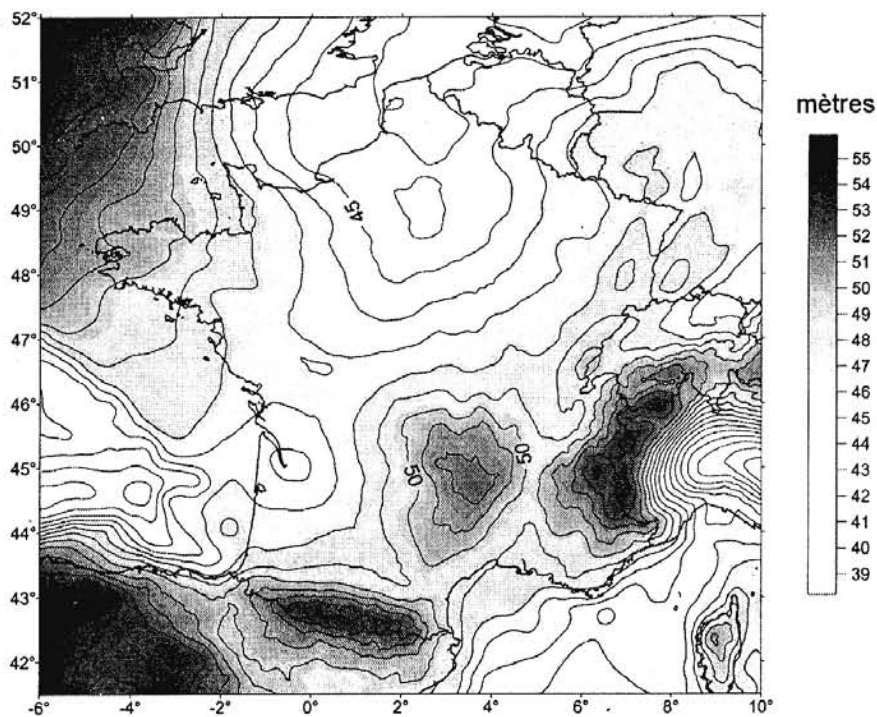


Figure 3 : Le quasi-géoïde QGF98

A partir des anomalies résiduelles ponctuelles on calcule, par interpolation, une grille d'anomalies résiduelles.

On intègre par la formule de Stokes, obtenant des hauteurs du quasi-géoïde résiduel ζ_{res} .

On restaure enfin le quasi-géoïde du modèle de champ ζ_{GM} et l'influence du terrain résiduel ζ_{RT} :

$$\zeta = \zeta_{res} + \zeta_{GM} + \zeta_{RT} \quad (4)$$

Un formulaire complet se trouve dans [12] ou [8]. L'ensemble de logiciels Gravsoft [13] ainsi que des programmes développés à l'ESGT ont été utilisés. La figure 3 montre le quasi-géoïde.

3. L'évaluation de QGF98 et la grille de conversion altimétrique RAF98

En France continentale, la référence altimétrique (surface d'altitude nulle) dont l'utilisateur a besoin pour des opérations de nivellement par GPS est celle qui est réalisée par le réseau de nivellement IGN69. Il serait donc commode d'exprimer cette référence d'altitude dans le référentiel géodésique utilisé pour les calculs GPS, en l'occurrence le Réseau Géodésique Français (RGF). Le quasi-géoïde gravimétrique QGF98 ne réalise pas cette condition pour plusieurs raisons :

- du fait du mode de calcul de QGF98, sa référence géodésique est celle du modèle de champ OSU91A;
- ce modèle de champ présente des erreurs régionales que le processus de calcul ci-dessus n'a pas entièrement supprimées, et qui sont dues en grande partie à la présence des Alpes et des Pyrénées;
- comme toute mesure, la gravimétrie utilisée pour élaborer QGF98 est affectée d'erreurs à caractère systématique (mauvais étalonnage de gravimètres) ou accidentel;
- le réseau de nivellement français est entaché d'erreurs systématiques dont la principale est une pente dans la direction nord-sud de 0,30 m pour 1000 km, [10], [14]. La surface d'altitude nulle réalisée par le réseau n'est donc pas un quasi-géoïde parfait;
- l'altimétrie du réseau géodésique RGF présente elle-même des erreurs accidentelles de quelques centimètres.

Pour conserver la référence d'altitude IGN69 dans les opérations de nivellement par GPS, il a donc été nécessaire d'adapter QGF98, ce qui a été réalisé en le comparant aux points nivelés du RGF selon la figure 4 (voir aussi [15]). ζ_{QGF98} désigne la hauteur du quasi-géoïde gravimétrique au dessus de son ellipsoïde de

référence. $\zeta_{GPS-Niv}$ est la hauteur de la surface d'altitude nulle au dessus de l'ellipsoïde de référence du réseau RGF, on l'obtient par le GPS et le nivellement :

$$\zeta_{GPS-Niv} = h - H \tag{5}$$

En chacun des 987 points nivelés du RGF, l'écart peut être modélisé en distinguant une tendance générale exprimée par une fonction linéaire des coordonnées géographiques, et un résidu qui représente les erreurs locales, corrélées ou non :

$$\zeta_{GPS-Niv,i} - \zeta_{QGF98,i} = a + b(\varphi_i - \varphi_0) + c(\lambda_i - \lambda_0)\cos\varphi_i + v_i \tag{6}$$

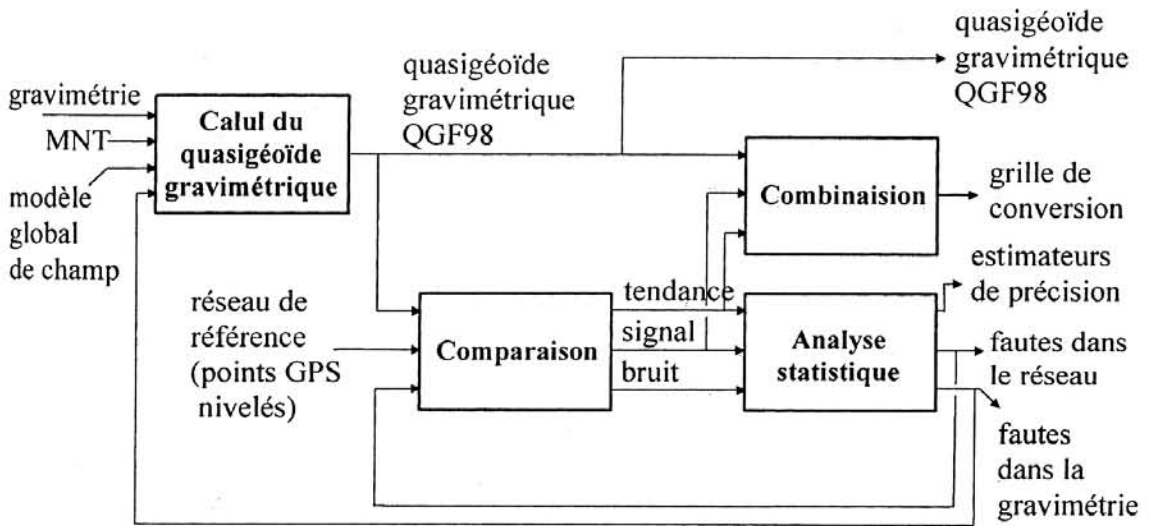


Figure 4 : Validation et adaptation du quasi-géοide QGF98.

i est l'indice du point, λ_i et φ_i sont sa longitude et sa latitude, λ_0 et φ_0 sont les coordonnées d'un point de référence arbitraire, a est la partie constante de la tendance, b et c sont les pentes vers le nord et l'est de la surface de référence d'altitude par rapport au quasi-géοide gravimétrique, v_i est le résidu. Celui-ci, ainsi que a , b , c sont calculés par la méthode des moindres-carrés. La tendance linéaire représente les erreurs à grande longueur d'onde ou grande distance de corrélation (problèmes de références géodésiques, erreurs du modèle de champ, erreur systématique principale du nivellement). L'écart-type des résidus est un indicateur global des autres erreurs. Les résultats de la comparaison du quasi-géοide gravimétrique aux points GPS nivelés du RGF sont donnés dans le tableau I. La figure 5 montre, par des courbes de niveau, les résidus. Les corrélations locales apparaissent clairement, et on constate l'existence de deux zones à forts résidus dans les Landes et en Provence. Des tests et analyses ont montré que ces erreurs proviennent de mesures gravimétriques de mauvaise qualité en mer, autour de la Corse, qui se répercutent sur le géοide. Il est possible de réduire les erreurs dans les Landes en portant le rayon d'intégration de Stokes de 220 à 330 km au moins, mais les erreurs en Provence deviennent alors insupportables. Une tentative de calcul de géοide pour la Corse a d'ailleurs échoué pour les mêmes raisons. Il est bien évident qu'une précision de 10 cm en nivellement, se dégradant à 60 cm dans certaines régions, n'est pas satisfaisante pour la majorité des utilisateurs.

Tableau I : Comparaison de QGF98 des points GPS nivelés du RGF.

	Paramètre	Unité	Valeur
a	Biais constant	m	0,060
b	Pente vers le nord	m/1000 km	-0,5258
c	Pente vers l'est	m/1000 km	0,7852
v min	Résidu minimal	m	-0,379
v max	Résidu maximal	m	0,676
σ_v	Ecart-type des résidus	m	0,109
σ_s	Ecart-type du signal	m	0,104
σ_n	Ecart-type du bruit	m	0,034

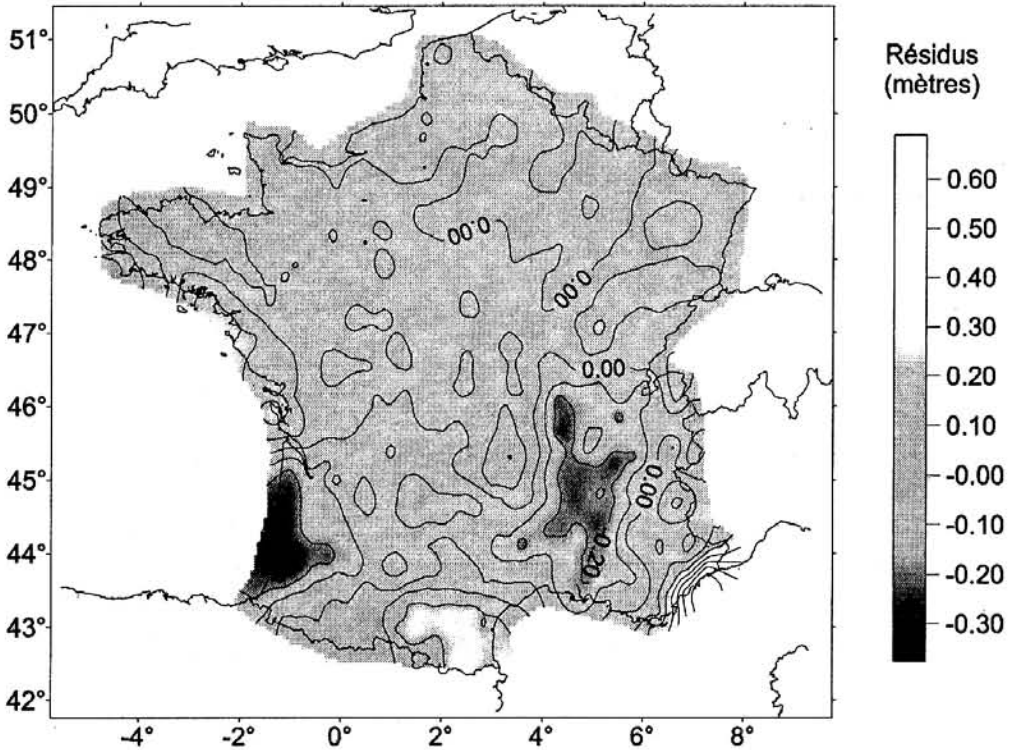


Figure 5 : Résidus de la régression linéaire du quasi-géoïde aux points nivelés du RGF.

Aussi a-t-on imaginé d'adapter le quasi-géoïde en profitant à la fois des corrélations locales des erreurs (ce qui les rend prévisibles en partie) et de la bonne exactitude générale des points nivelés du RGF. On partage chaque résidu v_i en signal s_i (partie corrélée) et bruit n_i (partie non corrélée). On démontre qu'une bonne estimation du signal en un point est obtenue en interpolant les résidus des points voisins par une méthode particulière, le krigeage. Le bruit est obtenu en retranchant le signal estimé du résidu effectif. Ces quantités peuvent dans un premier temps être utilisées pour détecter des fautes dans les données. En effet, un signal important est l'indice d'erreurs corrélées, généralement imputables à un défaut de la gravimétrie que l'intégrale de Stokes "étale". Au contraire, un bruit de grand module ne peut être dû qu'à une faute non corrélée sur un point GPS nivelé, causée par exemple par une hauteur d'antenne GPS inexacte ou par l'utilisation d'un repère de nivellement fortuitement déplacé. L'écart-type des résidus, donné dans le tableau I, caractérise l'écart du quasi-géoïde et de la référence IGN69 après régression linéaire, l'écart-type du signal est dominé par les erreurs du quasi-géoïde dues à la mauvaise gravimétrie, l'écart-type du bruit rend plutôt compte des erreurs locales du RGF et du nivellement, dont on peut prendre la mesure de la qualité.

On peut ensuite se servir de la tendance et du signal pour corriger le quasi-géoïde et le contraindre à mieux épouser la forme de la surface d'altitude nulle : il suffit, en chaque nœud de la grille du quasi-géoïde, d'appliquer la tendance et une valeur interpolée du signal. Interpoler le bruit n'aurait évidemment pas de sens. Cette méthode a été appliquée pour générer la grille de conversion RAF98 à partir du quasi-géoïde QGF98 et de 987 points du RGF.

RAF98 se présente sous la forme d'une grille en coordonnées géographiques RGF93, en degrés décimaux. Le pas de la grille est 0,025° en latitude, 0,0333° en longitude, soit un point tous les 2,7 km environ, ce qui permet une interpolation bilinéaire si on ne recherche pas une précision d'interpolation meilleure que le centimètre. La grille est disponible gratuitement sur le serveur de l'ESGT (www.esgt.cnam.fr), et accompagne plusieurs logiciels GPS du commerce.

4. Les tests de RAF98

En même temps que d'autres grilles de conversions altimétriques, RAF98 a été évaluée par le groupe de travail "Positionnement statique et dynamique" du Conseil National de l'Information Géographique, sous la présidence de P. Willis [16]. Les traitements ont été réalisés par J.M. Nocquet. Les tests sont basés sur des ensembles de points GPS nivelés, rattachés aux références RGF et IGN69, fournis par différents organismes (IGN et ENSG, SNCF, EDF, CNRS, IPGP). Pour chaque point, on a comparé l'altitude issue du nivellement traditionnel à celle déduite du GPS et des grilles de conversion. Après rejet éventuel de données fausses, l'erreur moyenne quadratique et un biais local moyen ont été calculés pour chaque ensemble de points, donnant des estimateurs de précision de l'ensemble du processus. Il n'est en effet pas possible de séparer les erreurs de RAF98 de celles des mesures de GPS et nivellement de contrôle. En marge des travaux du CNIG ou après ceux-ci, l'auteur de RAF98 a reçu de l'ENSG, de l'ESGT et du Service du Cadastre des données intéressantes car concernant des régions non couvertes par les tests du CNIG. Les résultats de tous les tests disponibles sont présentés dans le tableau II et la figure 6. Les écarts donnés ici peuvent être légèrement différents de ceux publiés par le CNIG, les processus de calcul et de rejet de points faux n'étant pas tout à fait identiques.

Tableau II : Validation de la grille de conversion RAF98

Zone		Nombre de points		Ecart (cm)			
Nom	Altitude moyenne (m)	Total	Rejetés	Moyen	Min.	Max.	EMQ
Bordeaux	53	41	2	-2,1	-6,6	+0,1	2,7
Briançon	1141	18	0	+0,2	-3,7	+7,1	3,9
Carmaux	283	8	8	-2,8	-3,8	-1,4	2,9
Cévennes	906	3	1	+0,2	-1,5	+1,8	1,7
Dijon	257	95	2	-0,1	-2,6	+2,5	1,2
Fréjus	165	6	0	+1,2	-1,5	+4,1	2,1
Le Mans (1)	86	7	0	-0,1	-1,0	+0,9	0,6
Le Mans (2)	82	6	0	+0,1	-0,5	+0,9	0,5
Manosque	587	76	2	+0,4	-3,9	+5,4	1,9
Nice	184	12	0	+1,4	-1,4	+5,0	2,2
Paris	74	3	0	-4,3	-9,4	-1,5	5,6
Pau	361	3	0	+0,1	-1,2	+2,2	1,5
Pays Basque	91	26	2	0,0	-5,3	+4,7	2,1
Rennes	48	15	0	+0,3	-3,6	+2,1	1,8
Toulon	148	8	2	+2,0	0,0	+3,9	2,6
Var	163	5	1	+0,7	-3,0	+3,8	3,0

Globalement, il apparaît que le nivellement par GPS, s'appuyant sur le Réseau Géodésique Français et RAF98, soit réalisable et qu'une précision de 2 à 3 centimètres puisse être atteinte. Le seul test réalisé en région très accidentée dans les Alpes, où la variabilité du géoïde est très importante, laisse penser que la précision pourrait se détériorer à 4 cm en montagne. Il serait intéressant de poursuivre les investigations dans ce sens.

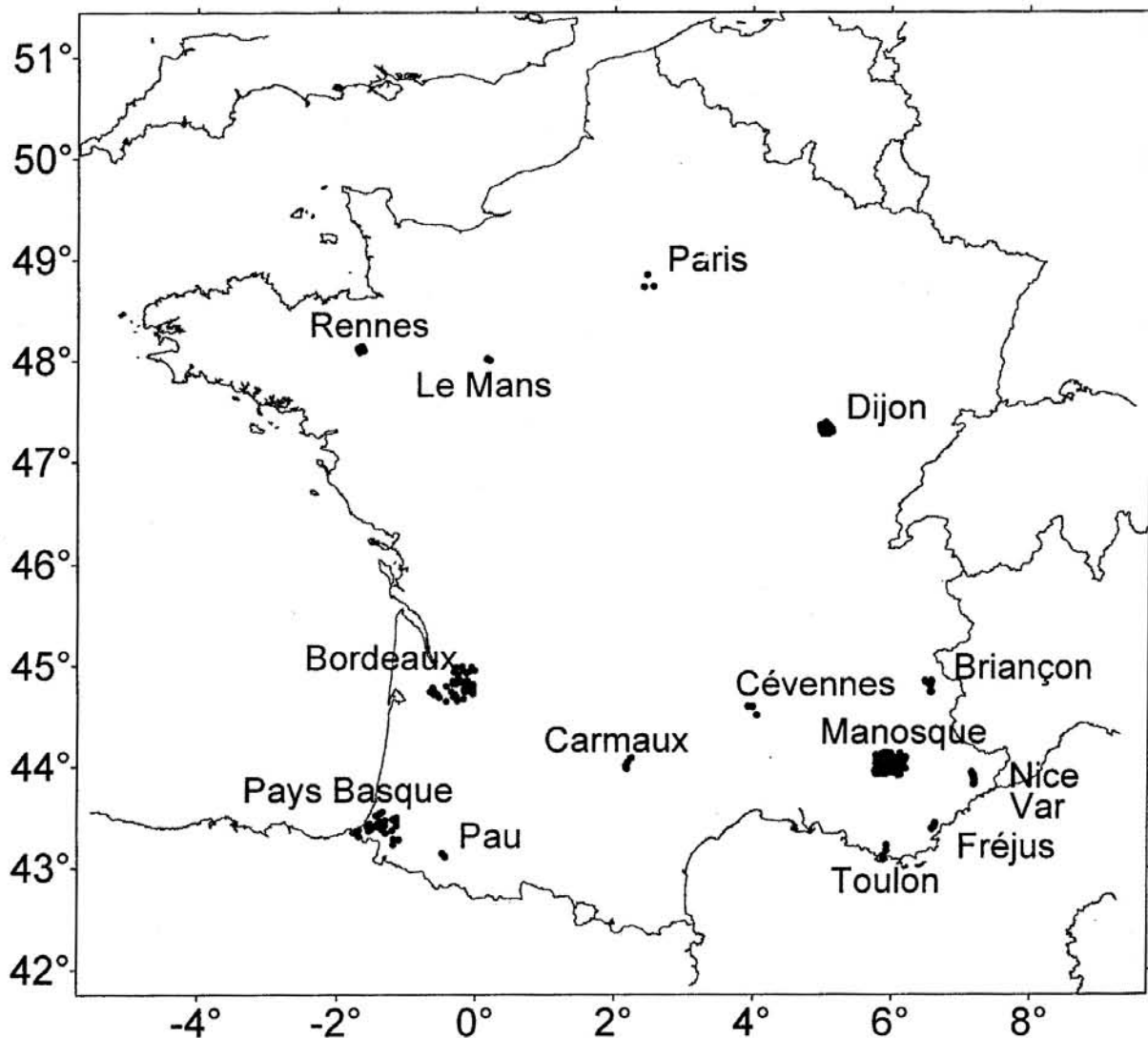


Figure 6 : localisation des tests de RAF98.

5. Conclusions et perspectives

Cette étude montre comment un réseau géodésique tridimensionnel moderne, le RGF, et un quasi-géoïde gravimétrique, QGF98, rendent possibles le nivellement par GPS d'une manière efficace et suffisamment précise pour couvrir la majorité des besoins. Le réseau géodésique, dont la plupart des points sont nivelés, met à disposition de l'utilisateur à la fois la référence géodésique et celle du nivellement. Mais le réseau n'est pas assez dense pour rendre compte de la variabilité du géoïde. Le quasi-géoïde, malgré ses défauts, agit comme un interpolateur entre les points nivelés du RBF pour densifier la référence d'altitude. Au niveau du centimètre, la référence IGN69 n'est pas modifiée par le processus nouveau.

Comme on l'a vu, QGF98 manque d'exactitude dans certaines régions et particulièrement en Provence. Pour certains besoins scientifiques, il mériterait d'être amélioré. Cela ne devrait pas conduire à modifier profondément RAF98, car le processus de correction et d'adaptation du quasi-géoïde s'est montré très efficace.

6. Références

- [1] F.G. Lemoine et al., *The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96*, NASA Center for Aerospace Information (1998).
- [2] H. Duquenne H., *Comparison between the EGM96 model and the French quasi-geoid model* In: Bulletin n°6 of the International Geoid Service. - DIIAR, Politecnico di Milano, Italy (1997).
- [3] J.J. Levallois, *Calcul du géoïde gravimétrique sur le territoire de la France*, présenté à la XV^e Assemblée générale de l'AIG, Moscou (1971). Archives IGN/SGN.
- [4] J.J. Levallois, *Comparaison des géoïdes astrogéodésiques et gravimétriques sur le territoire français*, présenté à la XV^e Assemblée générale de l'AIG, Moscou (1971). Archives IGN/SGN.
- [5] M. Deloménie, *Calcul d'un géoïde gravimétrique sur la France*, Rapport de stage, Institut Géographique National et Bureau Gravimétrique International (1987).
- [6] G. Balma, G. Balmino, M. Sarrailh, D. Toustou, *Géoïde gravimétrique français, état d'avancement et programme de travail au GRGS/BGI*, Toulouse, (1992).
- [7] Z. Jiang, *Méthodologie moderne de la détermination du géoïde, application à la réalisation d'une référence verticale opérationnelle : contribution au géoïde français*, Thèse de doctorat, Observatoire de Paris (1996).
- [8] H. Duquenne, *Le modèle de quasi-géoïde français QGF96 et la surface de référence d'altitude RAF96*, IGN et ESGT (1997).
- [9] W.A. Heiskanen, H. Moritz, *Physical Geodesy* (1967), Reprint Institute of Physical Geodesy, Technical University, Graz, Austria (1981)
- [10] J.J. Levallois, J. Maillard, *Le nouveau réseau de nivellement de premier ordre du territoire français*, présenté à la XV^e Assemblée Générale de l'AIG, Moscou (1971). Archives IGN/SGN.
- [11] R.H. Rapp, Y.M. Wang, N.K. Pavlis, *The Ohio State University 1991 Geopotential and Sea Surface Topography Harmonic Coefficients Model*,. O.S.U. Report number 410 (1991)
- [12] R. Forsberg, *Terrain effects in Geoid Computations*, lectures notes in : International School for the Determination and Use of the Geoid,. International Geoid Service, DIIAR, Milan, Italy (1994).
- [13] C.C. Tscherning, R. Forsberg, P. Knudsen, *The GRAVSOFIT package*. - First Continental Workshop on the Geoid in Europe. - Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography, Prague, Czech Republic (1992).
- [14] M. Kasser, *Un nivellement de très haute précision: la traversée Marseille Dunkerque*, C.R. Acad. Sci. Paris, t. 309, série II, p. 695-700 (1989).
- [15] H. Duquenne, *Comparison and combination of a gravimetric quasigeoid with a levelled GPS data set by statistical analysis* , Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 24 n° 1, (1999)
- [16] P. Willis, Rapport du sous groupe "conversion altimétrique RGF93-IGN69", CNIG (à paraître). Consultable et téléchargeable sur <http://lareg.ensg.ign.fr/CNIG.PSD/alti>

UNEXPECTED GEODYNAMICAL PERSPECTIVE OF THE SINAI AREA BY GPS

Federica Riguzzi ^(a) and Salah Mohamed Mahmoud ^(b)

(a) Istituto Nazionale di Geofisica, via di Vigna Murata 605, 00143 Rome Italy
phone ++39 6 51860266, fax ++39 6 51860303, e-mail riguzzi@ingrm.it

(b) National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Helwan, Cairo Egypt

ملخص

إن هذا المقال يعرض النتائج المحصل عليها بفضل التحليل المرفق لشبكة محلية لأجهزة تحديد المواقع، ممتدة من خليج السويس إلى شبه جزيرة سيناء، ولشبكة جهوية لأربع محطات دائمة لأجهزة تحديد المواقع، ممتدة من إسرائيل إلى قبرص. يظهر التحليل الخاص بعمليتي المسح المكررتين، إزاحات معتبرة في مواقع سيناء وقبرص. يمنح التقويم التقريبي للسرعات النسبية و المتوسطة إلى شبه جزيرة سيناء وقبرص أكبر قيم الشبكة، بحوالي 0.3 سم /في السنة و 2.4 سم /في السنة على التوالي. تتضاءل السرعة إلى حوالي 60% من قيمتها (1.8 سم - 1.4 سم /في السنة) على طول الانشقاق المحول المرجح للبحر الميت- الأردن. إن أنواع السرعات النسبية تدل على وجود تقدم نشيط على طول القسم المتواجد في أقصى جنوب نظام الانشقاق لعقبة في حين أن جزء البحر الميت - الأردن الذي يظهر إزاحات غير مهمة يمكن توقيفها. إن الإزاحات النسبية التي تم رصدها عبر منطقة خليج السويس تظهر عنصر ضغط. هذه الصورة الجيوديناميكية تقود إلى تفسيرين ممكنين: الأول هو أن حركة الانفتاح لخليج السويس قد تم تحويلها بصفة كاملة إلى حركة الانزلاق الناتجة عن الانشقاق المحول للعقبة-المشرق. أما التفسير الثاني فهو أنها صادرة فقط من التأثيرات الناتجة عن الزلازل.

في هذا المجال يتوجب إجراء عمليات مسح أخرى بأجهزة تحديد المواقع حتى يتسنى حقيقتنا فهم النوع الجيوديناميكي لشبه جزيرة سيناء.

RESUME

Cet article présente les résultats obtenus grâce à l'analyse jointe d'un réseau GPS local de 11 sites, allant du golfe de Suez jusqu'à la péninsule de Sinaï, et d'un réseau régional de 4 stations GPS permanentes allant d'Israël jusqu'à Chypre. L'analyse de deux levés renouvelés démontre des déplacements importants aux sites de Sinaï et de Chypre. Une évaluation approximative des vitesses relatives moyennes accorde à la péninsule de Sinaï et à Chypre les plus hautes valeurs du réseau avec respectivement 3.0cm/ Année et 2.4cm/ Année environ. La vitesse diminue jusqu'environ 60% de sa valeur (1.4-1.8cm/ Année) tout au long de la faille transformante supposée de la Mer Morte-Jordanie. Les types de vitesses relatives indiquent la présence d'un avancement actif le long de la partie extrême sud du système de faille de Aqaba, alors que le segment de la Mer Morte-Jordanie présentant des déplacements insignifiants, peut être bloqué. Les déplacements relatifs détectés à travers la zone du golfe de Suez présentent une composante compressive. Cette image géodynamique mène à deux interprétations possibles : la première est que le mouvement d'ouverture du golf de Suez a été entièrement transféré sur le mouvement de glissement dû à la faille transformante du Aqaba-Levant, la seconde interprétation est qu'il provient exclusivement des effets post-sismiques.

Dans ce contexte, d'autres levés GPS sont nécessaires pour comprendre réellement le type géodynamique de la péninsule de Sinaï.

ABSTRACT

This paper shows the results obtained by the joint analysis of a local GPS network of 11 sites, from the Suez Gulf to the Sinai peninsula, and a regional network of 4 permanent GPS stations, from Israel to Cyprus. The analysis of two repeated surveys shows significant displacements at the Sinai sites and Cyprus. A rough estimation of the mean relative velocities gives for the Sinai peninsula and Cyprus the highest values of the network with about 3.0 cm/y and 2.4 cm/y respectively. Velocity decreases at about 60% of its value (1.4 -1.8 cm/y) along the Dead Sea - Jordan transform fault. The relative velocity pattern indicates the presence of active creeping along the southernmost part of the Aqaba fault system, while the Dead Sea-Jordan segment, showing insignificant displacements, could be locked. The relative displacements detected across the Gulf of Suez area shows a significant compressional component. This geodynamical picture leads to two possible interpretations: the first is that the opening motion of the Gulf of Suez has been entirely transferred on the strike-slip motion of the Aqaba-Levant transform fault; the second is that it origins exclusively as post-seismic effect. In this context, other GPS surveys are required to really understand the geodynamical style of the Sinai peninsula.

Key words: GPS, displacement, post-seismic effect, Sinai, Aqaba-Levant fault

1. Introduction

The utility of GPS to detect crustal deformations at various scale dimensions is widely recognized, so that permanent GPS arrays are currently used for this purpose all over the world. Anyway, non-permanent networks play important roles in control surveys devoted to geophysical purposes at various network scales, both regional where few or not at all permanent stations are available (e.g. the African shore of the Mediterranean Sea) and local when it is economically not convenient to establish permanent GPS arrays. In this respect, the joint analysis of both permanent and non-permanent GPS arrays may be very useful to improve the analysis itself if a rigorous procedure is carried out.

The aim of this paper is to give a contribute to the study of the present-day geodynamics of the Sinai area by the joint analysis of a local GPS network composed by 11 sites located on the north-eastern corner of the African plate, from the Gulf of Suez to the Sinai peninsula, and a regional network composed by 4 permanent GPS stations, from Israel to Cyprus. The regional network is useful to constrain and to strengthen the solution of the local one.

2. Regional tectonic sketch

The area under investigation is comprised from latitude 27N to 36N and longitude 32E to 36E. Here, the Gulf of Suez area, the Sinai peninsula, the Aqaba-Levant Dead Sea transform fault system and Cyprus are included (Fig.1). From a geophysical point of view, the area is very interesting because its tectonics is mainly dominated by the active boundary between the African and the Arabian plates which are separating one from the other and where large deformations with high seismic activity take place.

From Neogene to Late Miocene, different phases of motion interested the Gulf of Suez and the Aqaba-Levant area: at the beginning, the north-eastward motion of the Arabian peninsula yielded the opening of the Red Sea with the characteristics of a new young basin and presence of extensional tectonics. Subsequently, the opening mainly interested the Red Sea and propagated along the Gulf of Suez area. In the end, the opening of the Suez area slowed and the Red Sea rift created a NNE left shear motion with extensional component in the Aqaba-Levant area.

Many geological and seismological investigations were developed in this area for petroleum researches since the beginnings of this century, so that now it is usually accepted that the Sinai peninsula is a sub-plate of the African plate which

accommodates the main motion of the Aqaba left-lateral transform fault with the low extensional motion of the Suez Gulf, in the framework of the Red Sea opening [1]. This sub-plate is bordered on its western margin by the Gulf of Suez, on its eastern side by the great Dead Sea-Jordan transform fault system and toward north by the Cypriot convergent arc.

The triple junction among the Gulf of Suez rift, the Aqaba-Levant transform fault (the southernmost part of the Dead Sea-Jordan transform) and the Red Sea rift is located south of the Sinai peninsula. The question of whether the triggered motion of the Aqaba-Levant fault system has entirely or partially replaced the Gulf of Suez opening is still under discussion.

Geological studies show that the oldest movements of the Aqaba-Dead Sea fault zone are surely younger than those in the Suez basin, thus suggesting the end of the extension of the Gulf of Suez and the transfer of the motion along the Aqaba-Levant fault zone about 10 Ma ago. According to these studies, the Gulf of Suez shows, at present, very low rates of extensional feature (< 1 mm/y) and tectonic subsidence [2]; on the contrary, the Aqaba-Levant transform system displays a higher rate of motion with geological evidences suggesting an average value of about 8-9 mm/y [3]. The Dead Sea-Jordan fault system extends over about 450 km, from the Gulf of Elat to the northern margin of the Hula Valley, where a complicated transition zone from the sinistral strike slip style toward the thrust components of the Taurus arc take place.

The tectonics of the Dead Sea-Jordan fault system is really much more complicated than the above mentioned description. In fact, although it is considered a sinistral transform as a whole, some peculiar characteristics appear at local scale [4]. First of all, the fault system is discontinuous and broken in a series of en-echelon left lateral strike slip faults that die out to the north by bending toward north-east [5]. Along the bending and the stepping of the faults, many pull-apart basins (like the Dead Sea itself) and push-up swells (like the Golan and the Hermon mountains) are generated, making peculiar local tectonic stress complications [6-7]. The expected present-day motion along the transform fault zone is about 1.5 cm/y [8].

Seismic activity mainly occurs along the borders of the Sinai sub-plate: in the southern part of the Gulf of Suez, along the Aqaba-Levant fault system, where it reaches the highest level, along the Dead Sea-Jordan transform; on the contrary, the intraplate seismicity is spread and low (Fig.1). Focal mechanism solutions show extensional

features in the southernmost part of the Gulf of Suez (only two events in late sixties [9]), left lateral strike slip and extensional styles in the southernmost Dead Sea-Jordan fault system (the Aqaba-Levant area) while, toward north, the strike slip component is prevailing. The largest earthquake occurred on November 22, 1995 in the Gulf of Aqaba with magnitude $M_w=7.2$. From south to north, the seismic activity decrease along the Dead Sea-Jordan transform fault system and then increase again toward the Cyprean arc, where is generally clustered south-west of Cyprus and shows some compressional components [10-13].

3. Data analysis

The local network consists of 11 non-permanent GPS stations, seven located on the Sinai Peninsula and the other four on the west shore of the Gulf of Suez. Two GPS campaigns were carried out with dual frequency Trimble 4000SSE and 4000SSI receivers [14]. The first in 1997, from November 20 to December 2; the return campaign was performed in 1998, from May 25 to 31. The observing session time span was 8 hours with 30 s sampling rate. Not all the sites were measured at the same time, being limited the number of the receivers involved in the two campaigns, so that the inclusion of the four GPS permanent stations into the analysis seems to be crucial to improve the analysis itself (Table 1 and 2). The permanent GPS tracking sites are located in Israel (ELAT, TELA and KATZ) and in Cyprus (NICO), so that the final network is composed by a local part having a mean baseline length of about 50 km and a regional part with mean baseline length of about 200 km.

The data analysis was performed according to a standard procedure [15] consisting in GPS data processing, network adjustments and comparison between the two network solutions by a statistical analysis to evaluate the significance of the observed coordinate differences. Taking into account the regional size of the network, in the following we focus our attention on two-dimensional (planar) analysis. In the end, the computation of the 2D vector displacements and the corresponding error ellipses on the local tangent plane is done.

GPS data processing was performed by the Bernese GPS software v. 4.0, developed at the Bern University [16], following the manual suggestions given for mixed network. Precise ephemerides, satellite clock corrections, antenna height phase center variations and some other general files provided by CODE (Center of Orbit Determination in Europe) of the Bern University were included into the computation. Relative and absolute tropospheric delay parameters every two hours were estimated respectively for local and long

baselines, starting from the Saastamoinen standard model.

Each observing session was processed separately. All the session solutions pertaining to each campaign were adjusted by NETGPS, a software suitably implemented to analyze GPS networks [17]. Table 3 shows some global parameters of the two network adjustments: the number of parameters estimated (unk.), the estimated variance of unit weight (σ_0^2), the number of equations (eq.) and the total observation redundancy (red.). Moreover the estimated and threshold χ^2 values testing the correctness of the normal variate observation model are reported. The test is passed by an iterative procedure when the estimated χ^2 results less than the threshold value.

Table 4 shows the precision of the two adjustments (1997 and 1998) in terms of maximum and mean error ellipse semiaxes (computed on the local tangent plane) at 95% confidence level. The maximum semiaxes range within 0.8 cm and the mean is within 0.6 cm. Note that the precision achieved for the 1997 is better than the 1998 adjustment; this fact is clearly due to a higher observation redundancy (in 1997 there are more observing sessions). Moreover, the joint solution between the two networks improves the accuracy of about 20% with respect to the Sinai local network single solution [18].

The observed coordinate differences between the two coordinate sets were submitted to the significance analysis by DENETGPS. This software performs a test based on the Fisher variate with the aim to separate the sites into two groups, those with coordinates significantly changed with respect to the error ellipsoids from the others whose coordinates are not changed. DENETGPS was successfully tested in suitably designed experiments by producing known displacements on one site of a GPS network [15], [19]. Table 5 shows the results of the analysis at 5% significance level in which the experimental Fisher values F_e are compared with the threshold value F_t ; sites with $F_e > F_t$ exhibit significant coordinate differences.

The analysis on the planar component shows how all the coordinate differences pertaining to the 7 sites located on the Sinai peninsula result significant, while the remaining 5 sites display small differences within the errors; moreover, significant is the difference detected for NICO. The result obtained by the present analysis confirms that the whole Sinai peninsula exhibits a rather uniform behaviour with the highest detected motion of the whole analyzed area. This fact is particularly evidenced by computing the 2D displacement vectors, their azimuths and the corresponding error

features in the southernmost part of the Gulf of Suez (only two events in late sixties [9]), left lateral strike slip and extensional styles in the southernmost Dead Sea-Jordan fault system (the Aqaba-Levant area) while, toward north, the strike slip component is prevailing. The largest earthquake occurred on November 22, 1995 in the Gulf of Aqaba with magnitude $M_w=7.2$. From south to north, the seismic activity decrease along the Dead Sea-Jordan transform fault system and then increase again toward the Cyprean arc, where is generally clustered south-west of Cyprus and shows some compressional components [10-13].

3. Data analysis

The local network consists of 11 non-permanent GPS stations, seven located on the Sinai Peninsula and the other four on the west shore of the Gulf of Suez. Two GPS campaigns were carried out with dual frequency Trimble 4000SSE and 4000SSI receivers [14]. The first in 1997, from November 20 to December 2; the return campaign was performed in 1998, from May 25 to 31. The observing session time span was 8 hours with 30 s sampling rate. Not all the sites were measured at the same time, being limited the number of the receivers involved in the two campaigns, so that the inclusion of the four GPS permanent stations into the analysis seems to be crucial to improve the analysis itself (Table 1 and 2). The permanent GPS tracking site are located in Israel (ELAT, TELA and KATZ) and in Cyprus (NICO), so that the final network is composed by a local part having a mean baseline length of about 50 km and a regional part with mean baseline length of about 200 km.

The data analysis was performed according to a standard procedure [15] consisting in GPS data processing, network adjustments and comparison between the two network solutions by a statistical analysis to evaluate the significance of the observed coordinate differences. Taking into account the regional size of the network, in the following we focus our attention on two-dimensional (planar) analysis. In the end, the computation of the 2D vector displacements and the corresponding error ellipses on the local tangent plane is done.

GPS data processing was performed by the Bernese GPS software v. 4.0, developed at the Bern University [16], following the manual suggestions given for mixed network. Precise ephemerides, satellite clock corrections, antenna height phase center variations and some other general files provided by CODE (Center of Orbit Determination in Europe) of the Bern University were included into the computation. Relative and absolute tropospheric delay parameters every two hours were estimated respectively for local and long

baselines, starting from the Saastamoinen standard model.

Each observing session was processed separately. All the session solutions pertaining to each campaign were adjusted by NETGPS, a software suitably implemented to analyze GPS networks [17]. Table 3 shows some global parameters of the two network adjustments: the number of parameters estimated (unk.), the estimated variance of unit weight (σ_0^2), the number of equations (eq.) and the total observation redundancy (red.). Moreover the estimated and threshold χ^2 values testing the correctness of the normal variate observation model are reported. The test is passed by an iterative procedure when the estimated χ^2 results less than the threshold value.

Table 4 shows the precision of the two adjustments (1997 and 1998) in terms of maximum and mean error ellipse semiaxes (computed on the local tangent plane) at 95% confidence level. The maximum semiaxes range within 0.8 cm and the mean is within 0.6 cm. Note that the precision achieved for the 1997 is better than the 1998 adjustment; this fact is clearly due to a higher observation redundancy (in 1997 there are more observing sessions). Moreover, the joint solution between the two networks improves the accuracy of about 20% with respect to the Sinai local network single solution [18].

The observed coordinate differences between the two coordinate sets were submitted to the significance analysis by DENETGPS. This software performs a test based on the Fisher variate with the aim to separate the sites into two groups, those with coordinates significantly changed with respect to the error ellipsoids from the others whose coordinates are not changed. DENETGPS was successfully tested in suitably designed experiments by producing known displacements on one site of a GPS network [15], [19]. Table 5 shows the results of the analysis at 5% significance level in which the experimental Fisher values F_e are compared with the threshold value F_t ; sites with $F_e > F_t$ exhibit significant coordinate differences.

The analysis on the planar component shows how all the coordinate differences pertaining to the 7 sites located on the Sinai peninsula result significant, while the remaining 5 sites display small differences within the errors; moreover, significant is the difference detected for NICO. The result obtained by the present analysis confirms that the whole Sinai peninsula exhibits a rather uniform behaviour with the highest detected motion of the whole analyzed area. This fact is particularly evidenced by computing the 2D displacement vectors, their azimuths and the corresponding error

References

- [1] Ben-Menahem, A., A. Nur and M. Vered, 1976. Tectonics, seismicity and structure of the Afro-Eurasian junction – The breaking of an incoherent plate, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 12, 1-50.
- [2] Steckler, M.S., F. Berthelot, N. Liberis and X. Le Pichon, 1988. Subsidence in the Gulf of Suez: implications for rifting and plate kinematics, *Tectonophysics*, 153, 249-270.
- [3] Le Pichon, X. and J.-M. Gaulier, 1988. The rotation of Arabia and the Levant fault system, *Tectonophysics*, 153, 271-294.
- [4] Ron, H. and Y. Eyal, 1985. Intraplate deformation by block rotation and mesostructures along the Dead Sea Transform, northern Israel, *Tectonics*, 4, 1, 85-105.
- [5] Kashai, E.L. and P.F. Croker, 1987. Structural geometry and evolution of the Dead Sea-Jordan rift system as deduced from new subsurface data, *Tectonophysics*, 141, 33-60.
- [6] Heimann, A. and H. Ron, 1987. Young faults in the Hula Pull-Apart Basin, central Dead Sea Transform, *Tectonophysics*, 141, 117-124.
- [7] Reches, Z., 1987. Mechanical aspects of pull-apart basins and push-up swells with applications to the Dead Sea transform, *Tectonophysics*, 141, 75-88.
- [8] Reilinger, R.E., S.C. McClusky, M.B. Oral, R.W. King, M.N. Toksoz, A.A. Barka, I. Kinik, O. Lenk and I. Sanli (1997). Global positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone, *J. Geophys. Res.*, 102, B5, 9983-9999.
- [9] Jackson, J.A., N.J. White, Z. Garfunkel and H. Anderson, 1988. Relations between normal-fault geometry, tilting and vertical motions in extensional terrains: an example from the southern Gulf of Suez, *J. of structural Geology*, 10, 2, 155-170.
- [10] Dziewonski, A.M., and J. H. Woodhouse, 1983. An experiment in systematic study of global seismicity; Centroid Moment Tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981, *J. Geophys. Res.*, 88, 3247-3271.
- [11] Fattah, A.K.A., H.M. Hussein, E.M. Ibrahim and A.S.A. El Atta, 1997. Fault plane solutions of the 1993 and 1995 Gulf of Aqaba earthquakes and their tectonic implications, *Annali di Geofisica*, XL, 6, 1555-1564.
- [12] Kalogeras, I., G. Stavrakakis and K. Solomi, 1999. The October 9, 1996 earthquake in Cyprus: seismological, macroseismic and strong motion data, *Annali di Geofisica*, 42, 1, 85-97.
- [13] Salamon A., A. Hofstetter, Z. Garfunkel and H. Ron, 1996. Seismicity of the eastern Mediterranean region: Perspective from the Sinai subplate, *Tectonophysics*, 263, 293-305.
- [14] Mahmoud, S., H. Koivula, A.S. Mohamed, H. Khalil and T. R. Kebeasy, 1998. Monitoring recent movements in Sinai and around Gulf of Suez, Egypt, The Ninth International Symposium On Recent Crustal Movements (CRCM '98), November 14-19, 1998, Cairo, Egypt.
- [15] Crespi, M. and F. Riguzzi, 1998. Software Available for analyzing GPS deformation, EOS, Transaction, American Geophysical Union, 79, 22, 259 and EOS electronic Supplement, http://www.agu.org/eos_elec/98059e.html.
- [16] Rothacher, M., G. Beutler, W. Gurtner, E. Brockmann and L. Mervart, 1995. Bernese GPS Software Version 4.0. Markus Rothacher and Leos Mervart editors. University of Berne, Switzerland.
- [17] Crespi, M., 1996. A software package for the adjustment and the analysis of GPS control networks, in Reports on Surveying and Geodesy; ed. Unguendoli M., University of Bologna, edizioni Nautilus, 237-264.
- [18] Riguzzi, F., S., Mahmoud and A. Tealeb, 1999. Displacement pattern of the Sinai area: first result from GPS, *Annali di Geofisica*, 42, 4, 755-762.
- [19] Betti, B., L. Biagi, M. Crespi and F. Riguzzi, 1999. GPS sensitivity analysis applied to non-permanent GPS network, *Journal of Geodesy*, 73, 158-167.
- [20] Kimata F., A. Tealeb, H. Murakami, N. Furukawa, S. Mahmoud, H. Khalil, K. O. Sakr and A. M. Hamdy, 1997. The Aqaba earthquake of November 22, 1995 and co-seismic deformation in Sinai peninsula, deduced from repeated GPS measurements, *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 32 (1-2), 53-71.
- [21] Wessel P, Smith W H F (1995) The Generic Mapping Tools (GMT) version 3.0 Technical Reference & Cookbook, SOEST/NOAA.

Figure captions

Fig.1: Main tectonic structures and seismic activity ($M \geq 5.0$) of the Middle East area from 1973 (NEIC) to now. Focal mechanisms of the main events ($M_w \geq 5$) reported by the CMT Harvard Catalog are shown in the map [10].

Fig.2: 2D displacement field and error ellipses at 95% confidence level.

**TABLE 1: Observing DOYS
Of the 1997 network**

SITE	324	325	326	327	328	329	331	332	333	334	335	336
GARB												
GEMS												
HURG												
SHAM												
KENS												
TOUR												
DERB												
CATH												
NABQ												
ZEIT												
DAHA												
ELAT												
TELA												
KATZ												
NICO												

**TABLE 2: Observing DOYS
Of the 1998 network**

SITE	145	146	148	149	150	151
GARB						
GEMS						
HURG						
KENS						
TOUR						
DERB						
CATH						
NABQ						
ZEIT						
DAHA						
ELAT						
TELA						
KATZ						
NICO						

TABLE 3: global parameters of the network adjustments (5% significance level)							
YEAR	a priori σ_0^2	Estim. σ_0^2	Threshold d χ^2	Exper. χ^2	eq.	unk.	red.
1997	1.00	1.00	119.87	95.61	138	42	96
1998	1.00	0.99	99.62	75.98	120	42	78

σ_0^2 = variance of unit weight; eq.= equations; unk.= unknowns; red.= redundancy

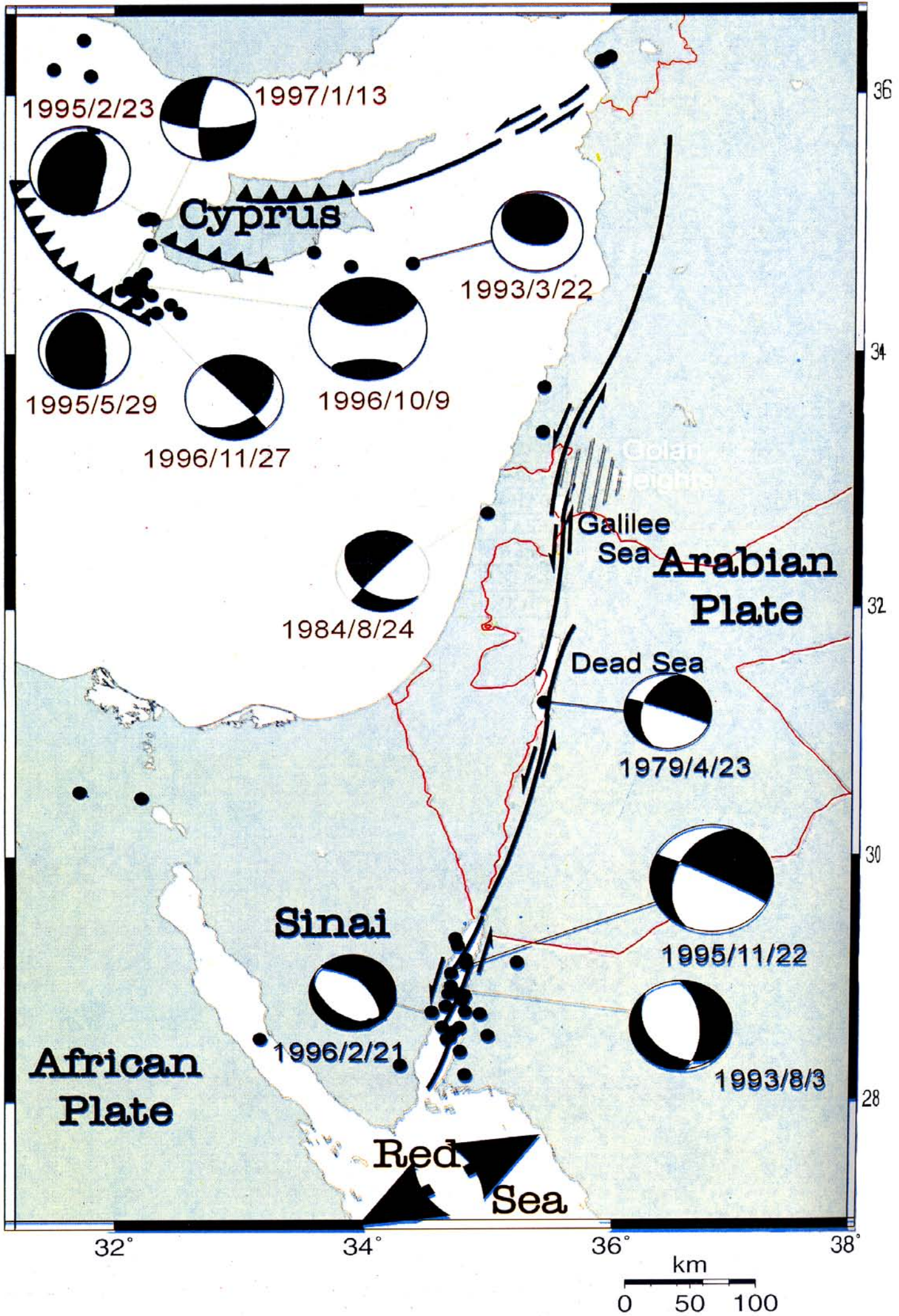
TABLE 4: precision at 95% confidence level		
Year	SMAX (cm)	SMED (cm)
1997	0.5	0.3
1998	0.8	0.6

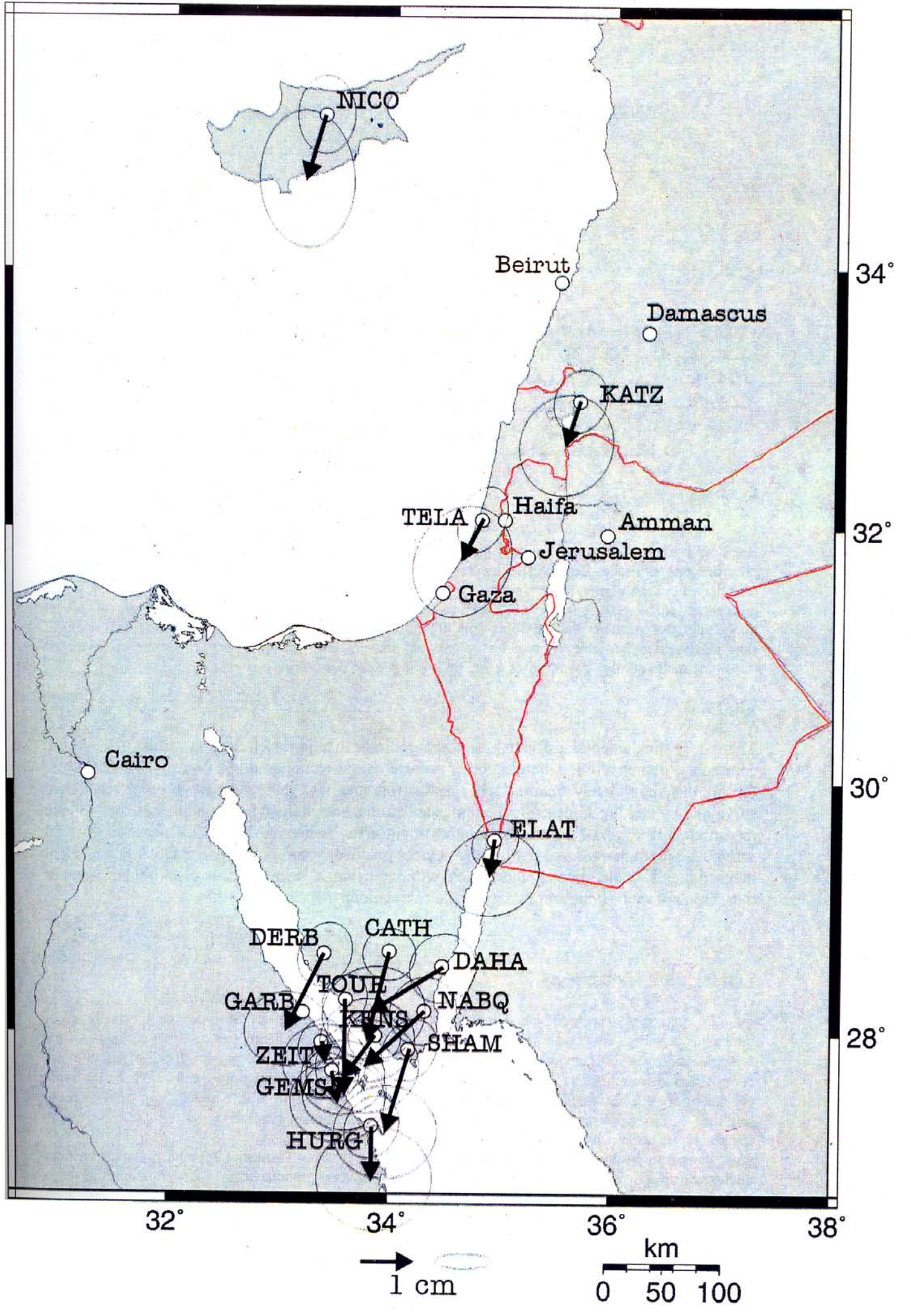
SMAX and SMED are the maximum and mean values of the error ellipse semiaxes

TABLE 5: planar deformation analysis (5% significance level)	
SITE	$F_t = 3.05$
GARB	2.06
GEMS	0.43
HURG	0.91
SHAM	6.29
KENS	3.42
TOUR	18.46
DERB	7.15
CATH	8.95
NABQ	5.30
ZEIT	0.47
DAHA	7.09
ELAT	0.37
TELA	2.21
KATZ	1.13
NICO	3.37

TABLE 6: 2D displacements, rms and azimuth

SITE	VT2D±rms (cm)	Azimuth (deg)
GARB	-	-
GEMS	0.6±0.6	169
HURG	1.0±0.7	179
SHAM	1.6±0.6	-164
KENS	1.0±0.6	-145
TOUR	1.8±0.5	-180
DERB	1.6±0.6	-154
CATH	1.7±0.6	-167
NABQ	1.5±0.7	-135
ZEIT	0.4±0.5	172
DAHA	1.6±0.6	-122
ELAT	0.7±0.6	-174
TELA	0.9±0.6	-154
KATZ	0.9±0.6	-162
NICO	1.2±0.7	-164





L'ENSEIGNEMENT DES METHODES DE LOCALISATION SUR SATELLITES

Par Claude Million

De l'Association Française de Topographie

Adresse : AFT 136 bis rue de Grenelle-75700 PARIS 07SP

Tel : 01 43 98 84 80 – Fax : 01 47 53 07 10

e-mail : aftopo@club-internet.fr

ملخص

توجد هناك صعوبة أساسية في تعليم طرق تحديد المواقع اللاسلكي على أقمار صناعية مسماة عادة (GPS) ، في حين أن كواكب أخرى ممكن أو يمكن استعمالها . مع ذلك فإن هذه الصعوبة تعتبر عامة تماما: وهي تنتج من كوننا قد تعودنا على تعليم المساحة الحقلية بطلبنا من التلاميذ إجراء حسابات يدوية ، وحتى بمساعدة آلات حاسبة ، على قياسات نادرة منجزة من طرف الحاسبين أنفسهم، في حين أن الآن ، فإن قياسات الأقمار الصناعية تعتبر عديدة ، وهي منجزة بأجهزة وفي معظم الأحيان بدون تدخل بشري، و أن الحسابات لا يمكن مباشرتها بدون استعمال آلة الحاسوب بسبب عدد القياسات و/ أو لكون هذه الحسابات نفسها معقدة.

RESUME

Il existe une difficulté fondamentale pour enseigner les méthodes de radiolocalisation sur des satellites artificiels, plus communément appelés G P S , alors que d'autres constellations peuvent, ou pourront être utilisées. Cette difficulté est, au demeurant, tout à fait générale : Elle résulte du fait qu'on était habitué à enseigner la topométrie en faisant faire aux élèves des calculs manuels, même aidés de puissantes calculettes, sur des mesures rares réalisées par les calculateurs eux-mêmes, alors que, maintenant, les mesures sur satellites sont très nombreuses, et réalisées par les appareils pratiquement sans intervention humaine, et que les calculs ne peuvent être entrepris sans utiliser un ordinateur, en raison même du nombre des mesures, et/ou de la complexité des calculs eux-mêmes.

ABSTRACT

There is a fundamental difficulty to teach radiolocalisation methods on artificial satellites, commonly named GPS, whereas, other constellations can or could be used. This difficulty is, for all that, completely general : It results from the fact that we were used to teach field surveying by making students do manual calculations, even helped by strong calculators, on rare measurements realized by the calculators themselves, whereas, now, the measurements on satellites are numerous and realized by devices practically without human intervention and that measurements could not be undertaken without using a computer because of the number of measurements and/or the complexity of the calculations themselves.

LES MESURES MODERNES

De fait, si on y regarde bien, de nos jours, toutes les mesures, tout en étant au moins deux fois plus nombreuses que jadis, sont faites et enregistrées directement par les appareils, que ce soit par des mesures au sol ou sur des satellites ; ces derniers n'ayant fait que remplacer les anciens points de triangulation, en gros, et même en très gros, au lieu de faire un relèvement sur des points connus on fait la même opération sur des satellites. De même, les calculs sont tout réalisés par des logiciels tout faits (les « canned software » des anglo-saxons).

Donc, le problème qui se pose, s'étend, en réalité, à tous les types de mesures, et des calculs, des géomètres ou des topographes. On a choisi celui de la localisation sur satellites comme emblématique, alors qu'il est très loin d'être le seul à être touché par ce phénomène absolument général.

Pour l'essentiel, les mesures modernes sont toutes automatisées, c'est-à-dire que personne n'intervient pour faire une appréciation quelconque, celle-ci, même la lecture sur une mire, étant automatique. A temps égal, ces mesures sont donc plus rapides et plus sûres,

donc plus nombreuses, leur nombre peut devenir tel qu'on ne puisse plus du tout les maîtriser manuellement : A titre d'exemple, on a eu à traiter par simulation 300.000 mesures sur 300 points. Il était bien évident que, sauf exception, les mesures fausses ne pouvaient être examinées que par le logiciel, tout examen manuel était exclu !

LES CALCULS MODERNES.

De même, les calculs sont devenus trop compliqués pour rester du ressort de calculettes, même très perfectionnées. En effet, le nombre des mesures augmentant, les compensations par les moindres carrés s'imposant même pour les déterminations les plus banales où elles pourraient avantageusement ne pas être employées, telles que les cheminements, il n'est plus possible de conduire les calculs autrement qu'à l'aide d'un ordinateur.

Mais il n'y a rien de pédagogique dans l'utilisation d'un logiciel « fermé », surtout lorsqu'on n'a pas participé à son élaboration. Il est tout à fait normal que le praticien emploie de tels logiciels, en revanche, on n'apprend rien à le faire, sauf si on est intervenu dans sa conception, voire son écriture, et on en est souvent très loin.

Tout le problème de l'enseignement moderne des calculs dans la topographie, et de bien d'autres disciplines est là.

L'enseignement supérieur de la topométrie et de la topographie doit donc naviguer entre deux écueils : la « suite, pimentée de topographie, d'un cours de programmation », et/ou l'utilisation confiante de logiciels du commerce dont l'usage a confirmé la validité.

LA OU LES SOLUTIONS.

On ne connaît pas bien les solutions françaises données à ce problème, on croit savoir que celles-ci varient de la calculette en conscience, à l'ordinateur en aveugle, ou l'ordinateur en conscience pour les « doctorants » ou les « pré-doctorants ». On connaît mieux les solutions données à l'étranger, et c'est celles qu'on va décrire.

L'écueil qu'on veut éviter est toujours de « plomber » un cours de topographie, ou au demeurant de n'importe quoi d'autre, en l'englantant de programmation informatique. Soit il ne faudrait dispenser les cours de calculs topographiques qu'aux élèves disposant d'une solide expérience en programmation, soit il

faut faire en sorte que les problèmes de programmation soient allégés. Bien que ce ne soit pas des programmeurs qu'on veuille former, c'est surtout la première solution qui prévaut en général. En effet, ce n'est pas pour rien que les professions de l'informatique, déficitaires en personnel, « piochent » dans le vivier des ingénieurs pour compléter leurs équipes, c'est surtout parce que le problème qu'on évoque n'est pas résolu correctement. On forme d'abord des informaticiens puis, ensuite seulement, des spécialistes de différentes disciplines techniques. A l'étranger, dans les pays du Nord et aux Etats-Unis, on utilise une forme allégée du système informatique. C'est elle qu'on voudrait examiner.

LE CHOIX DU SYSTEME INFORMATIQUE ALLEGE

La multiplicité des mesures, et surtout, pour tout dire leur nombre, rend inévitable le recours aux compensations par les moindres carrés.

Les calculs de compensation par les moindres carrés ne peuvent être menés sur des calculettes que dans des cas d'école qui ne sont pas ceux de la pratique, il faut donc bien avoir recours à l'ordinateur, et à des programmes d'algèbre linéaire.

Donc dès le début de notre démarche, qu'on le veuille ou non, l'ordinateur s'impose. Il s'agit, par conséquent, de « rapprocher » son emploi de celui d'une calculette.

Le choix du langage, après de probables essais semble s'être porté sur « Matlab » qui, à l'origine, avait été créé, à la fin des années 1970, dans les Universités de Stanford et du Nouveau-Mexique, pour enseigner la théorie des matrices et l'algèbre linéaire à partir de sous-programmes Fortran, mais en se libérant de la lourdeur d'écriture de ce langage, notamment de la déclaration des variables et du « dimensionnement » des tableaux, et, surtout, en le rendant interactif comme une calculette. D'où, d'ailleurs son nom : Mat lab pour Matrix Laboratory.

Depuis, ce langage s'est compliqué, pas toujours dans le sens initial, mais surtout pour copier les langages concurrents ou semblables, si bien que le langage s'est alourdi, sans pour autant que ce soit dans le sens qu'on souhaiterait, à savoir le calcul matriciel ou l'algèbre linéaire. Si bien que les utilisateurs sont obligés de le compléter en écrivant eux-mêmes les programmes qui manquent qui ne sont souvent que des programmes d'une très large utilisation en algèbre linéaire !

En effet, le langage étant encore resté trop général, des auteurs [1] ont dû développer des programmes spécialement dédiés à G P S, écrits selon son code particulier. Le bénéfice est donc réduit aux fonctionnalités intrinsèques du langage qui sont le développement en ligne, l'absence de déclarations, ce qui reste assez mince tout de même, si on note que ce qu'on écrit est traduit par un « interpréteur » avant exécution, c'est-à-dire qu'il n'est pas compilé, au contraire des instructions propres au langage lui-même qui, bien entendu, le sont, ce qui accélère d'autant le calcul. Contrairement à ce qu'affirme la notice cet enrichissement n'en est pas un, puisque les algorithmes développés par les utilisateurs n'ont pas été repris dans le langage, bien que certains comme les algorithmes de moindres carrés soient d'un usage très courant en algèbre linéaire. Il semble que Matlab se soit ingénié à faire comme ses concurrents, Maple et Mathematica, sans se soucier de son créneau propre, si bien que c'est un langage comme les autres, un de plus, et que ses avantages apparaissent après des efforts considérables pour se plier à sa programmation spécifique, donc que le but poursuivi n'est pas atteint. Bien sûr, on peut se servir des « briques logicielles » élaborées par les auteurs [1], mais si on se lance dans cette direction, qui est peut-être la bonne, il y a des solutions plus traditionnelles.

Donc une grosse déception, il semble qu'il serait possible de faire aussi bien en se passant tout simplement des fonctionnalités de Matlab et en les remplaçant par celles des langages plus traditionnels Fortran, Basic, Pascal, C++, et leurs variantes « Visual ».

C'est en ce sens qu'on va montrer qu'un assemblage de petits sous-programmes permettrait en les assemblant en travaux pratiques de faire tous les exercices illustrant un cours.

RAPPEL SUR LES CALCULS G P S MINIMAUX.

Tels qu'ils se présentent à l'enseignement de la topographie, les calculs n'ont pas à traiter tous les cas que l'usage de G P S pourrait permettre, notamment tout le domaine de la navigation peut rester de côté sans dommage pour l'« enseigné ». En outre, les situations les plus difficiles, telles que celles d'un récepteur mobile placé sur un avion pour faire, par exemple, de la photogrammétrie peut être laissée en attente. Enfin, dans les cas les plus difficiles lorsqu'on manque de temps, ce qui est généralement la situation dans l'enseignement,

le cas de la détermination cinématique peut être éludé, on peut ne traiter que le calcul statique.

Donc, on peut ne traiter que le cas où on utilise deux récepteurs ou plus, en **G P S différentiel** -ou plutôt « **différenciel** » comme on l'écrit souvent, en commettant une faute d'orthographe, mais en commettant cette faute pour être encore plus clair, ou pour dire G P S par différences en se pliant à la mode du jour !

En fait, l'organisation des logiciels professionnels de la topographie sont des plus simples ils comportent quatre ou cinq grandes parties qu'on peut résumer comme suit :

Déclarations générales

Lire les données et les mesures

Calculer (Calculs topologiques et calculs métriques)

Ecrire les résultats et les rendre utilisables soit en les affichant soit en les plaçant dans les fichiers adéquats.

Dessiner (Eventuellement)

Le programme général et même chaque sous-programme, peuvent donc être réduit à ces cinq macro-instructions !

Le premier travail consiste à stocker dans un fichier les mesures brutes dans leur format d'origine en format standard, RINEX par exemple, si ce n'est déjà fait par le récepteur.

Ceci peut constituer un premier élément tout fait du « Meccano » logiciel que l'étudiant devra bâtir en travaux pratiques. En plus des mesures brutes, il s'agira aussi d'éventuellement traduire en langage clair, A S C I I par exemple, les éléments des éphémérides nécessaires pour la suite des calculs, qui sont reçus en binaire - comme, d'ailleurs, tout ce qui est émis par les satellites - mais sous un format non directement utilisable, si le récepteur ne le fait pas. Pour cela, le langage Matlab ne présente aucun intérêt particulier. Il n'y a pas non plus un intérêt pédagogique particulier à faire programmer cette partie par l'étudiant, en revanche, ce peut être un exercice intéressant en informatique.

La « pièce logicielle » suivante, par ordre d'entrée en scène, serait le calcul des positions des satellites pendant le cours de la réception, après « conversion » du temps satellite en temps G P S. Ces positions se calculent, d'abord dans le plan de l'orbite, puis en 3D, à partir des éphémérides et de l'« heure G P S » du départ du signal, le message ne donne que l'« heure satellite » de ce départ. Ces calculs peuvent apparaître compliqués mais ne sont que des changements de temps, de référentiel en 3D, ce sont des calculs astronomiques banals ; l'intérêt pédagogique de leur programmation est aussi des

plus limité, on peut, pour voir, ne faire qu'un seul de ces calculs sur une calculette

On dispose ainsi des éléments permettant de faire un premier calcul assez grossier de la position approchée des **points isolés** - par opposition aux points groupés par paires de D G P S - on peut aussi introduire une position connue dans l'appareil, si on a des moyens plus fiables pour la déterminer, et sauter cette étape. On a proposé une formulation pour le faire [2], on a cité celle de Bancroft[3] et celle de Kleusberg[4]. C'est un sous-programme qui peut appeler un autre sous-programme absolument général de résolution d'équations linéaires et de compensation par les moindres carrés. Sa programmation, très facile, présente, en matière de G P S, un petit intérêt pédagogique, contenu surtout dans les différentes astuces utilisées.

Disposant d'une position assez approchée des points isolés on a de tous les éléments nécessaires pour calculer les corrections, d'abord aux mesures : réfraction **troposphérique** et **ionosphérique** qui sont fonction, notamment, de la distance zénithale de la distance mesurée, correction d'**aberration** aux positions des satellites, due à la rotation du référentiel pendant le parcours de l'onde, directement proportionnelle à la distance géométrique. Ce sont de petits calculs très simples parfaitement accessibles à une calculette.

Une fois les différentes corrections faites, on peut calculer les points isolés définitifs à l'aide des pseudo-distances. Il s'agit encore d'un programme de résolution de relations linéaires par les moindres carrés du point isolé. Ce calcul présente un intérêt pédagogique pour l'élève et cette programmation peut lui être réservée, étant entendu qu'il dispose des outils logiciels des calculs de compensation par les moindres carrés : normalisation, et résolution. Compliquer par une inversion paraîtrait totalement inutile à ce stade. Enfin, disons que l'usage de l'ordinateur est indispensable bien que certaines calculettes puissent faire ce travail, mais au prix de tant d'efforts inutiles !

On passe ensuite aux calculs par différences proprement dits : Le calcul classique par doubles différences, ou le calcul par simples différences qu'on a proposé [5], qui a l'avantage

entre autres, de permettre de calculer directement la matrice des variances-covariances par simple inversion de la matrice normale pour étudier la précision obtenue. Disons que, pour faire court, on peut passer, du moins en T P, sur les procédés utilisant les deux fréquences et leurs combinaisons linéaires éliminant la réfraction ionosphérique. On peut faire une détermination préalable des différences des ambiguïtés par filtrage des différences du code par les différences de la phase, c'est une opération simple, totalement indépendante de tous les autres calculs, qui permet de déterminer aussi les différences des variations des corrections ionosphériques qui sont un bon indice de la corrélation de ces erreurs, ou, par contre, déterminer en bloc : les différences des ambiguïtés, les différences des décalages d'horloge, en tant que simples variables auxiliaires, et surtout les différences de coordonnées des points, les seules utilisables.

CONCLUSIONS

Contrairement à ce qu'on avait pu croire en les abordant, les méthodes d'enseignement proposées ne sont pas un allègement du fardeau informatique qui pèse sur les épaules de l'enseignant, c'est une esquive, car l'apprentissage de Matlab ne sera, au final, d'aucune utilité à l'élève. Seule la tentative, même si elle ne fait que déplacer la difficulté est à applaudir.

REFERENCES

- [1] G.Strang & K.Borre Linear Algebra, Geodesy, and G P S Wellesley-Cambridge Press-1997
- [2] C.Million Le calcul du point approché de G P S in X Y Z n°68 pp 99-101 1996-3
- [3] S.Bancroft An Algebraic Solution of the G P S Equations in I E E Transactions Aerospace and Electronic Systems AES-21 pp 56 59 1985
- [4] AKleusberg Die direkte Lösung des Räumlichen Hyperbelschnitts in Zeitschrift für Vermessungswesen pp 188 192 1994
- [5] Million A propos du calcul du point approché de G P S et de la correction d'aberration in X Y Z n°80 Annexe pp 67-68 1999-3.

DEVELOPPEMENT D'UNE CHAINE D'ANALYSE ASTRO-GEODESIQUE "LOPAG"

B. GHEZALI, C. SAHEL, S. ABRUCHE

Centre National des Techniques Spatiales

Laboratoire de Géodésie - CNTS B.P. 13 ARZEW 31 200.

ملخص

إن العمل المقدم في هذا المقال ينص على تنمية سلسلة علاج وتحليل للبيانات الفلكية - الجيوديزية المسماة لوباق (برنامج حاسوبي لتحديد المواقع فلكي - جيوديزي).
إن هذا البرنامج الحاسوبي الذي تم تطويره على مستوى المركز الوطني للتقنيات الفضائية يتألف من قسمين :
القسم الأول يركز على حساب الجداول الفلكية.
والقسم الثاني يتعلق بتصحيح الثوابت الفلكية الجيوديزية.

RESUME :

Le travail présenté dans cet article porte sur le développement d'une chaîne de traitement et d'analyse de données astro-géodésiques dénommée LOPAG "LOGiciel de Positionnement Astro-Géodésique". Le logiciel LOPAG, développé au niveau du Centre National des Techniques Spatiales (CNTS), est constitué de deux parties: la première partie est consacrée au calcul d'éphémérides astronomiques et la deuxième partie porte sur l'ajustement des paramètres astro-géodésiques.

ABSTRACT :

The work presented on this paper concerns an astro -geodetic data analysis and processing chain development named LOPAG "An Astro-Geodetic Positioning Software". The software, developed at the National Center of Space techniques (NCST), is composed of two parts :
the first part focuses on the calculation of astronomic ephemeris and the second part concerns the adjustment of astro -geodetic parameters .

MOTS-CLES: *Aberration, BDA, Ephémérides, FK5, LOPAG, Mouvement propre, Précession, Nutation.*

Introduction :

Les principales fonctionnalités de LOPAG sont les suivantes :

- Edition des éphémérides des étoiles fondamentales basées sur le FK5.
- Edition des éphémérides des corps du système solaire (soleil, planètes et lune) basées sur le FK5.
- Calcul des événements astronomiques (lever, passage au méridien et coucher).
- Edition des catalogues d'observations astronomiques (hauteurs égales).
- Ajustement des paramètres astro-géodésiques par la méthode de moindres carrés (azimut et direction de la verticale physique dans un repère terrestre instantané).
- Réductions des paramètres astro-géodésiques au repère terrestre conventionnel.

Les différents paramètres que peut fournir le programme LOPAG présentent un grand intérêt

pour la géodésie (phénomène des Marées, système de référence dynamique, contrôle et/ou amélioration de l'orientation de réseaux géodésiques, géoïde local...), l'astronomie fondamentale (phénomène des éclipses, théorie des perturbations, ...), les besoins civils (instants du lever et du coucher des astres, calendriers,...), les observations physiques des astres et l'établissement d'éphémérides nautiques.

I Schéma général d'analyse de données astro-géodésiques "LOPAG" :

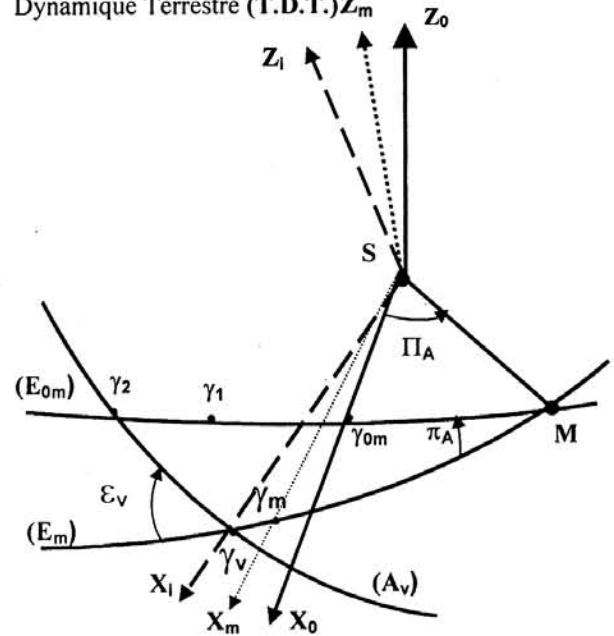
La version actuelle du logiciel "LOPAG" est basée sur le système de référence du catalogue FK5. Les formules de précession utilisées sont celles de J. Lieske et al., 1977 et les formules de la nutation sont celles de Wahr, 1981.

L'origine des temps ou *époque standard* est le 1^{er} Janvier 2000 à 12 heures (J2000.0) qui correspond au jour Julien 2451545,0.

I. Traitements et précision des résultats:

II.1. Calcul des éphémérides :

Les éphémérides des corps célestes (étoiles, planètes, etc.) sont rapportées au système de référence du catalogue FK5. Dans les réductions aux positions apparentes les constantes de précession, nutation et aberration sont celles adoptées par l'Union Astronomique Internationale (I.A.U.) en 1976 et 1982. L'époque standard est l'origine J2000.0 et l'échelle de temps utilisée est l'échelle de Temps Dynamique Terrestre (T.D.T.) Z_m .



Précession et Nutation

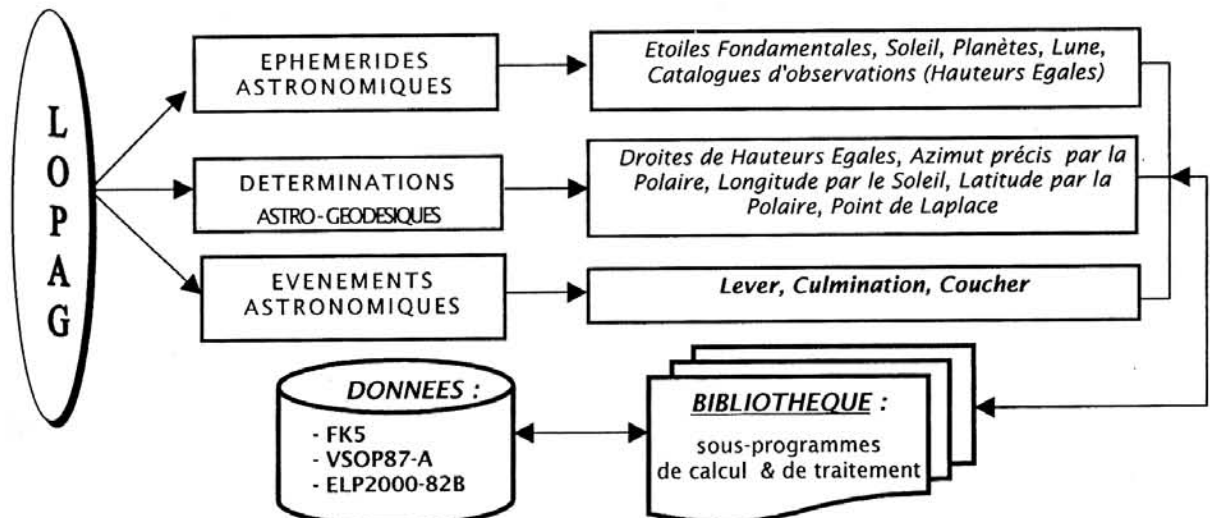


Schéma Général d'Analyse "LOPAG"

(E_{0m}): Ecliptique moyen de l'époque t_0 (J2000.0)

(E_m): Ecliptique moyen de la date t

(A_v): Equateur vrai de la date t

($SX_0Y_0Z_0$) : Repère céleste conventionnel [RCC] (repère écliptique moyen héliocentrique de l'époque t_0)

($SX_mY_mZ_m$): Repère céleste moyen [RCM] (repère écliptique moyen héliocentrique de la date t)

($SX_iY_iZ_i$) : Repère céleste instantané [RCI] (repère écliptique vrai héliocentrique de la date t)

Pour entreprendre un calcul de précession et de nutation, il est nécessaire de connaître les valeurs numériques des quantités suivantes :

Ψ_A : arc $\gamma_{0m} \gamma_1$: précession luni-solaire en longitude comptée sur (E_{0m})

$\Delta\Psi_A$: arc $\gamma_1 \gamma_2$: nutation luni-solaire en longitude comptée sur (E_{0m})

Π_A : arc $\gamma_{0m}M$: longitude du nœud ascendant M

π_A : précession en latitude

P_A : arc $\gamma_m M$ - arc $\gamma_{0m}M$: précession générale en longitude

λ_1 : arc $\gamma_m M$: $P_A + \text{arc } \gamma_{0m}M$: $P_A + \Pi_A$

N : arc $\gamma_m \gamma_v$: nutation en longitude

Φ : arc $\gamma_m \gamma_v + \text{arc } \gamma_m M$: $N + \lambda_1$: $N + P_A + \Pi_A$

W : nutation en obliquité

ε_m : obliquité moyenne

ε_v : $\varepsilon_m + W$: obliquité vraie

II.1.1 Ephémérides des étoiles :

La méthode, que nous exposons ci-dessous, permet de calculer les éphémérides d'étoiles en utilisant le système de repère écliptique et la transformation matricielle (changement de coordonnées rectangulaires), en formules finies qui ont l'avantage de la rigueur et de la généralité. En dehors de tout calcul machine, les formules de changement d'axes cartésiens constituent les méthodes de calcul les plus rigoureuses, par définition même, auxquelles on peut se référer pour contrôler toutes autres méthodes de calcul. Elles sont en outre valables pour toutes les catégories d'étoiles, en particulier les circumpolaires et fournissent une bonne précision numérique dans la mesure où les programmes de calcul sont simples (essentiellement lignes trigonométriques : rotations et translations d'axes). De même les coordonnées écliptiques paraissent s'imposer comme "véhicule" le plus commode pour le calcul des coordonnées des étoiles.

Les données nécessaires au calcul des éphémérides des étoiles sont celles du catalogue FK5. Ce catalogue contient 3522 étoiles (3417 étoiles non-circumpolaires et 105 étoiles circumpolaires) et fournit :

- les positions moyennes héliocentriques (α_0, δ_0) rapportées à l'équinoxe et à l'équateur moyens de l'époque J2000.0,
- les composantes du mouvement propre ($\mu_{\alpha_0}, \mu_{\delta_0}$) rapportées à l'équinoxe et à l'équateur moyens de l'époque J2000.0,

- les parallaxes annuelles (Π),
- et les vitesses radiales (V_r).

Le calcul se divise en trois parties :

1^{ère} Partie : Passage de (α_0, δ_0) aux coordonnées rectangulaires moyennes (X_0, Y_0, Z_0) rapportées à l'écliptique et à l'équinoxe moyens de J2000.0.

2^{ème} Partie : Passage de ($\mu_{\alpha_0}, \mu_{\delta_0}$) aux composantes rectangulaires ($\mu_{\alpha_x}, \mu_{\alpha_y}, \mu_{\alpha_z}$) rapportées à l'écliptique et à l'équinoxe moyens de J2000.0.

3^{ème} Partie :

Calcul des coordonnées sphériques équatoriales apparentes (α, δ) de la date à partir de (X_0, Y_0, Z_0) et ($\mu_{\alpha_x}, \mu_{\alpha_y}, \mu_{\alpha_z}$) : correction du mouvement propre, correction de la précession et de la nutation, correction de la parallaxe annuelle et correction de l'aberration annuelle.

- Correction à apporter à (α, δ) due à la variation du mouvement propre : effet du déplacement radial de l'étoile.

II.1.2. Ephémérides du Soleil :

Les éphémérides du Soleil sont calculées à partir des coefficients obtenus par la solution analytique du mouvement de la Terre VSOP 87-A. Cette solution est représentée par le type de coordonnées héliocentriques rectangulaires (X, Y, Z) rapportées à l'écliptique et à l'équinoxe dynamiques de J2000.0. Ces coordonnées sont des fonctions du temps T compté en milliers d'années Juliennes à partir de J2000.0 et sont mises sous la forme de séries périodiques et de séries de Poisson telles que :

$$X = \sum_i^n A_i T^\alpha \cos(B_i + C_i \cdot T)$$

$$Y = \sum_j^n A_j T^\alpha \cos(B_j + C_j \cdot T)$$

$$Z = \sum_k^n A_k T^\alpha \cos(B_k + C_k \cdot T)$$

A : Amplitude ; B : Phase ; C : Fréquence ;
 α : degré compris entre 0 et 5.

Etapes de calcul :

- Calcul des coordonnées rectangulaires héliocentriques moyennes (X, Y, Z) de la date rapportées à l'écliptique et à l'équinoxe dynamiques de J2000.0 à partir des coefficients obtenus par la solution VSOP 87-A

- Corrections d'équinoxe ($\gamma_{\text{dyna}} \cdot \gamma_{\text{FK5}} = 0'' \cdot 0990$) et d'obliquité ($\varepsilon_{\text{dyna}} \cdot \varepsilon_{\text{FK5}} = -0'' \cdot 0389$).

- Corrections de la précession et de la nutation en coordonnées écliptiques rectangulaires.

- correction de la parallaxe annuelle.
- correction de l'aberration annuelle..

II.13. Ephémérides des Planètes :

Les éphémérides des planètes sont calculées à partir des éléments héliocentriques moyens (a, λ, K, H, Q, P) tenant compte des principales perturbations à longue période pour les grosses planètes Jupiter, Saturne, Neptune et de quelques termes à courte période pour la planète Saturne. Ces éléments, fournis par la *Connaissance des Temps* du Bureau des Longitudes, sont rapportés à l'équinoxe et l'écliptique dynamiques de la date et sont issus de la théorie des variations séculaires des orbites planétaires (VSOP 82).

Etapes de calcul :

- Calcul des éléments orbitaux moyens ($a, e, i, \Omega, \omega, \lambda$) rapportés à l'équinoxe et l'écliptique dynamiques de la date à partir des éléments (a, λ, K, H, Q, P).
- Passage de ($a, e, i, \Omega, \omega, \lambda$) aux coordonnées moyennes héliocentriques écliptiques sphériques (l, β) de la date.
- Correction de la parallaxe annuelle.
- Correction de la nutation.
- Correction de l'aberration annuelle.

II.1.4. Ephémérides de la Lune :

Les éphémérides de la Lune sont calculées à partir des coefficients obtenus par la solution ELP2000_82B.

Type d'éphéméride	Coordonnées	Précision
Etoiles non-circumpolaires	Ascension droite	10^{-3} s
	Déclinaison	10^{-2} "
	Nutation en longitude	10^{-3} "
	Nutation en obliquité	10^{-3} "
Etoiles circumpolaires	Ascension droite	10^{-2} s
	Déclinaison	10^{-2} "
Soleil	Ascension droite	10^{-2} s
	Déclinaison	10^{-1} "
Planètes	Ascension droite	1 s
	Déclinaison	5 "
Lune	Ascension droite	10^{-3} s
	Déclinaison	10^{-2} "
Catalogue d'observations astronomiques	Heure Sidérale Locale	1 s
	Azimut	1'
	Calage	1 grade
Orientation de la terre dans l'espace	Heure sidérale de Greenwich	10^{-3} s

Cette solution est représentée par des séries périodiques et de séries de Poisson en coordonnées sphériques géocentriques écliptiques moyennes (r, l, β) rapportées à l'écliptique et à l'équinoxe dynamiques de J2000.0.

Etapes de calcul :

- Passage des coordonnées (r, l, β) aux coordonnées rectangulaires géocentriques écliptiques moyennes (X, Y, Z) rapportées à l'écliptique et à l'équinoxe dynamiques de J2000.0.
- Correction d'équinoxe et d'obliquité.
- Corrections de la précession et de la nutation en coordonnées écliptiques rectangulaires.
- Correction d'aberration annuelle.

II.1.5. Catalogue d'observations astronomiques :

Le catalogue d'observations astronomiques sert essentiellement pour la méthode des droites de hauteurs égales; Il permet, à l'aide d'instruments de mesure d'angles et de temps, de déterminer à un instant donné les coordonnées locales (HSL, AZ, Z) et le calage d'arrivée (S) d'une étoile. Ce catalogue est établi pour une époque donnée et les coordonnées des étoiles varient dans le temps, d'où la nécessité de le renouveler périodiquement (03 ans). Le programme d'édition des catalogues n'est valable que pour les régions de latitude comprises entre -60° et $+60^\circ$ et des étoiles non-circumpolaires de distance zénithale limitée entre 20° et 45° . L'établissement des catalogues d'observations astronomiques est basé sur l'utilisation des données du catalogue fondamental FK5.

Le passage de l'angle à l'astre (S) à la division micrométrique (calage d'arrivée) dépend du choix de la lunette d'observation. Dans notre cas, on cite l'exemple du Théodolite "Wild T3 A" qui nous fournit deux cas de figures :

Calage d'arrivée = $100^G - S$ [Passage Est (PE)]
 Calage d'arrivée = $100^G + S$ [Passage Ouest (PO)]

II.1.6. Précision des éphémérides :

Ici, la précision ne traduit qu'un écart entre les résultats obtenus par le logiciel "LOPAG" élaboré au CNTS et ceux publiés par la *Connaissance des Temps* du Bureau des Longitudes pour les Planètes, le Soleil et la Lune, et ceux publiés par "APFS" pour les étoiles.

Le tableau récapitulatif suivant, fournit les types de coordonnées des différents astres dont nous éditons les éphémérides avec leur précision :

II.2. Ajustement des paramètres astro-géodésiques :

II.2.1. Détermination de la direction de la verticale physique d'un lieu :

Les techniques de détermination des coordonnées géographiques astronomiques (ϕ, λ) d'un lieu utilisées lors de l'élaboration du programme LOPAG sont les droites de hauteurs égales, la longitude par le soleil et la latitude par la polaire.

La méthode précise de détermination de la direction de la verticale physique d'un lieu d'observations est celle des droites de hauteurs égales. Elle repose sur la datation des passages des étoiles par une distance zénithale constante Z , dont on connaît qu'une valeur approximative Z_0 . En résumé, elle consiste à mesurer à un instant t , la distance zénithale d'une étoile E identifiée de coordonnées équatoriales (α, δ) connues.

La linéarisation de la relation fondamentale liant les mesures (TU, Z_{obs}) et les inconnues (ϕ, λ) nous conduit à l'expression suivante :

$$dZ_i = -\cos(AZ_i)dY - \sin(AZ_i)dX$$

Avec :

$$\begin{aligned} dY &= d\phi & \text{et} & & d\phi &= \phi_{\text{déf}} - \phi_0 \\ dX &= \cos(\phi_0)d\lambda & \text{et} & & d\lambda &= \lambda_{\text{déf}} - \lambda_0 \end{aligned}$$

$i = 1, N$ (N : nombre d'observations).

AZ_i : Azimut de l'étoile calculé à partir des coordonnées approchées (λ_0, ϕ_0).

$$dZ_i = Z_{i\text{obs}} - Z_{i\text{cal}} + V_i$$

Comme on observe à une distance zénithale constante (30°), on obtient :

$$Z_{i\text{obs}} = 30^\circ + \Delta Z_{NIV} + \Delta Z_{REF} + \rho + Z_0$$

Avec :

ΔZ_{NIV} : correction de niveau

ΔZ_{REF} : correction de réfraction

ρ : erreur de réfraction et de niveau due aux variations de température et de pression

Z_0 : Z_0 de l'appareil

$$dZ_i = \Delta Z_{NIV} + \Delta Z_{REF} + \rho + Z_0 + (30^\circ - Z_{i\text{cal}}) + V_i$$

On obtient finalement, avec $R = \rho + Z_0$ et $\Delta Z_i = \Delta Z_{NIV} + \Delta Z_{REF} + (30^\circ - Z_{i\text{cal}})$:

$$\cos(AZ_i)dY + \sin(AZ_i)dX + R = -\Delta Z_i + V_i$$

C'est un système linéaire de la forme :

$$AX = L + V$$

Où X est le vecteur des inconnues, A est la matrice de configuration, L est le vecteur des mesures et V étant le vecteur des résidus.

La méthode de résolution utilisée est celle des moindres carrées qui consiste à minimiser la quantité $(AX - L)$ en norme L2 ($\sum V_i^2$ ou $'VV$ minimum). Si $'AA$ est non singulière, ceci nous conduit à l'expression suivante :

$$\bar{X} = ('AA)^{-1} ('AL)$$

II.2.2. Calcul d'un Azimut précis d'un repère : Azimut par l'heure.

La détermination de l'azimut sera la plus précise lorsque l'azimut variera peu en fonction de l'heure. L'étoile polaire dont l'azimut varie peu au cours du mouvement diurne sera un astre très favorable, à condition que le lieu d'observation soit tel que sa distance zénithale ne soit pas trop faible (à cause de l'erreur due à l'inclinaison des tourillons). La relation fondamentale de l'azimut du repère est la suivante :

$$AZ_R = AZ_E + (L_E + C) - L_R$$

Avec :

AZ_R : Azimut du repère terrestre

AZ_E : Azimut de l'étoile polaire (Azimut par l'heure)

L_R : Lecture horizontale sur le repère

L_E : Lecture horizontale sur la polaire

C : Correction d'inclinaison des Tourillons

La principale source d'erreur sur l'azimut du repère, AZ_R , provient de l'erreur due à l'inclinaison, C , de l'axe principal dans le plan des tourillons qui entraîne l'axe des tourillons.

II.2.3. Calcul des composantes de la Déviation de la Verticale :

Le passage des quantités astronomiques aux quantités géodésiques nécessite la connaissance des composantes de la verticale physique du lieu considéré et s'effectue à l'aide des équations généralisées de Laplace développées au premier ordre.

II.2.4. Corrections à apporter aux éléments calculés :

- **Réduction au pôle moyen** : Les éléments calculés ou ajustés (λ, ϕ, AZ) sont rapportés au pôle instantané. Il faut les réduire au pôle moyen (pôle conventionnel). Les coordonnées (x, y) du pôle instantané par rapport au pôle moyen sont déterminées par le Service International de la Rotation de la Terre (IERS) et publiées dans le bulletin annuel.

- **Correction d'aberration diurne en longitude:** D'une manière générale, l'aberration est un effet optique; C'est un changement apparent de la direction de l'astre, dû au mouvement relatif de l'observateur par rapport à l'astre et à la vitesse finie de la lumière. C'est un phénomène analogue à l'inclinaison apparente de la direction de chute des gouttes de pluie qui dépend de votre vitesse de marche.

- **Correction due à la courbure de la verticale physique :** Pour des applications géodésiques, la latitude astronomique doit être réduite à la surface de référence appelée "géoïde". Les verticales physiques sont en réalité des courbes dont la concavité est toujours dirigée vers l'axe de rotation de la terre ce qui entraîne une correction $\Delta\phi_{cv}$ négative.

II.3. Détermination et précision des événements astronomiques :

Pour calculer l'instant des événements astronomiques tels que lever, passage au méridien supérieur et coucher d'un astre dont on suppose connues les coordonnées (α , δ) au moment du phénomène considéré, il est nécessaire de connaître la valeur de l'angle horaire de l'astre à ces différents instants. Pour le passage au méridien supérieur la valeur de l'angle horaire est toujours nulle.

Le calcul de l'heure TU des événements astronomiques nécessite la connaissance des coordonnées équatoriales (α , δ) et de la parallaxe à ces mêmes instants.

Pour les corps célestes de longs mouvements tels que le Soleil, les étoiles et les planètes, le passage par un TU approché est suffisant pour le calcul de (α , δ).

Pour le cas de la Lune dont la variation des coordonnées est très importante, l'utilisation d'une interpolation parabolique de ces coordonnées ainsi qu'une itération s'avère nécessaire pour l'obtention d'un résultat précis. Ici, la précision ne traduit qu'un écart entre les résultats obtenus par le logiciel "LOPAG" et ceux publiés par l'annuaire du Bureau des Longitudes. Les événements astronomiques (Lever, passage au méridien et coucher) des astres sont calculés pour leur centre et ils sont fournis à la minute près.

III. Structuration des observations Astro-Géodésiques :

Les actions permettant la saisie et l'édition des observations astro-géodésiques (Azimut précis et Hauteurs Egales) ont été intégrées dans la Base des Données Astro-géodésiques (BDA) développée au niveau du laboratoire de géodésie. Ce système de BDA présente un caractère évolutif, dans la mesure où il peut être aisément enrichi par d'autres actions selon la dynamique des applications.

La manipulation, l'interrogation, la saisie et la mise à jour de la BDA s'effectuent par la création des objets tables, requêtes, formulaires, etc.) offerts par "Access" le SGBD utilisé.

Les actions réalisées dans le cadre de ce travail portent sur l'édition des éphémérides, des catalogues d'étoiles et des fiches signalétiques des points astronomiques, et sur la saisie des observations astro-géodésiques (azimut précis et hauteurs égales).

Conclusion

Le programme d'analyse et de traitement de données astro-géodésiques dénommé LOPAG "LOGiciel de Positionnement Astro-Géodésique" est implanté sur Micro Ordinateur, sous système MS-DOS et écrit en langage Fortran version 6.0.

Les résultats obtenus, cas des éphémérides des étoiles, sont identiques à ceux fournis par les volumes "APFS" ce qui conforte le choix de la méthode de calcul adoptée. La méthode de calcul d'éphémérides du soleil utilise la solution analytique VSOP 87A qui assure une précision de 0.01 seconde sur un intervalle de temps de l'ordre d'un siècle de part et d'autre de l'époque origine J2000.0. Le programme de calcul d'éphémérides des planètes est destiné aux utilisateurs qui se contenteraient d'une précision limitée (± 1 seconde). La position de la lune, obtenue à partir de la solution semi-analytique ELP2000_82B, est assurée avec une précision de $\approx \pm 0.001$ seconde. Ici, la précision ne traduit qu'un écart entre les résultats obtenus par le logiciel LOPAG et ceux publiés par la Connaissance des Temps du Bureau des Longitudes pour les planètes, le soleil, la lune et ceux publiés par " APFS " pour les étoiles.

La précision sur les paramètres astro-géodésiques dépend essentiellement de la technique d'observation, du type de matériel utilisé, des moments d'observations et de la qualité des données à priori.

L'intérêt essentiel de l'élaboration de LOPAG est de faire preuve d'autonomie et de disponibilité afin de satisfaire, à la demande et à tout moment, les utilisateurs qui se contenteraient de cette précision (géodésie, navigation spatiale ou marine, cadastre, génie-civil, télédétection, observations physiques des astres, etc.).

Le CNTS est prêt à fournir à ceux qui en feraient la demande, des éphémérides (étoiles, planètes, soleil, lune), sous forme de listings ou de disquettes et à effectuer des traitements d'observations astro-géodésiques.

Bibliographie

- [1] **ABROUCHE Said, 1997** : *Etablissement d'une base de données astro-géodésiques*. Mémoire d'ingénieur, C.N.T.S (ARZEW).
- [2] **ANNUAIRE DU BUREAU DES LONGITUDES, Ephémérides Astronomiques 1987** Edition GAUTHIER VILLARS (PARIS).
- [3] **BOUDRAA Djamel, 1988** : *Etablissement d'un programme FORTRAN d'édition des catalogues d'observations astronomiques*. Mémoire d'ingénieur, C.N.T.S (ARZEW).
- [4] **BUREAU DES LONGITUDES, Connaissances des temps, "Ephémérides Astronomiques 1985"** Observatoire de (PARIS).
- [5] **CHEMAA Boualem, 1983** : *Déterminations astronomiques d'azimut*, Mémoire d'ingénieur, E.N.S.G (ARZEW).
- [6] **DANJON André, 1980** : *Astronomie générale*. Librairie scientifique et technique, Seconde édition Albert MARCHAND (PARIS).
- [7] **GHEZALI Boualem, 1993** : *Comparaison des différentes méthodes de calcul des coordonnées des étoiles*, C.N.T.S (ARZEW).
- [8] **IVAN I. MUELLER, 1977** : *Spherical and practical astronomy as applied to Geodesy*, Seconde édition FREDERICK UNGAR (NEW YORK).
- [9] **LAURENCE G. TAFF, 1981** : *Computational spherical astronomy*, Edition JOHN WILLEY & SONS (NEW YORK).
- [10] **LEVALLOIS Jean Jacques & KOVALEVSKI J., 1971** : *Géodésie générale (Tome 4 Géodésie Spatiale)* Edition EYROLLES (PARIS).
- [11] **MEHENNI Abdelhak, 1993** : *Ephémérides des planètes*, Mémoire d'ingénieur, C.N.T.S (ARZEW).
- [12] **MORANDO B., 1986** *Le système solaire Amélioration de la connaissance du système (Article)* Bureau des Longitudes (PARIS).
- [13] **SAHEL Chérif, 1998** : *Etablissement d'un programme d'édition des éphémérides de la Lune*. Rapport technique, C.N.T.S (ARZEW).
- [14] **Union Astronomique Internationale U.A.I Apparent Place Of Fundamental Stars, "A.P.O.F.S 1980"**.
- [15] **WOOLARD Edgar W. & CLEMENCE Gerald M., 1966** : *Spherical Astromomy* Edition ACADEMIC PRESS (NEW YORK).

SOUTENANCE DE THESE

1^{ère} thèse : application de l'analyse en ondelettes aux observations VLBI et aux résidus d'orbite Laser.

Une thèse de Magistère a été soutenue par Mr Habib TAIBI le 31 Juillet 2000 au Centre National des Techniques spatiales sur le thème " **application de l'analyse en ondelettes aux observations VLBI et aux résidus d'orbite Laser**". Les travaux ont été menés au Laboratoire de géodésie du CNTS sous la conduite du Dr Kahlouche, maître de recherche, et ont été renforcés par un stage de 3 mois au CERGA (Centre d'Etudes et de Recherche en Géodynamique et Astronomie, FRANCE) encadré par le Professeur Exertier. Le Jury, présidé par Mr Oussedik, Directeur du CNTS, est composé du Dr M.A Trache chargé de recherche et Irbah, respectivement chef du Laboratoire de géomatique au CNTS et chef de département astrophysique au CRAAG. Le résumé des travaux est le suivant :

" L'analyse en multirésolution et plus particulièrement l'analyse en ondelette apporte un nouveau cadre à l'analyse du signal en général l'application de la transformée en ondelette à l'analyse des signaux exige l'élaboration de plusieurs techniques et algorithmes. L'implémentation de ces algorithmes sur ordinateur nécessite cependant une discrétisation (ou échantillonnage) de la transformée en ondelette suivant un maillage approprié. L'analyse en multirésolution et l'implémentation des différents algorithmes de la transformée en ondelette discrète ont permis l'utilisation de l'algorithme à trous pour la détection des sauts d'horloge dans les observations en VLBI et l'analyse des résidus laser.

Les données VLBI disponibles et qui ont permis cette analyse sont constituées d'une session de VLBI mobile du programme IRIS. La période d'observation est de 24 heures et date du 12 Mai 1992. Durant cette période, un total de 518 observations ont été obtenues sur 28 radiosources à partir de 04 stations (Westford, Mojave12, Wettzell, Toulouse). Dans toute l'analyse, l'horloge de WESTFORD a été choisie comme référence. Les dates des sauts d'horloge détectées par la méthode numérique utilisant la transformation en ondelettes se rapprochent de celles localisées par la méthode graphique.

Le CERGA a mis à notre disposition un fichier de données des résidus d'observation laser relatif au cycle 12 du satellite TOPEX (10 jours d'observation soit plus de 58000 mesures), le fichier est fourni par le service d'orbitographie (SOD) du CNES sous forme de points normaux condensés à la fréquence de 15 secondes, le fichier comporte plusieurs 'trous' dus à l'absence d'observation et qui atteignent parfois entre 15 et 20 minutes.

Le traitement consiste à analyser les coefficients d'ondelettes à différentes échelles d'analyse pour la détection des anomalies présentes dans les résidus qui constituent le signal à analyser ; ensuite comparer des orbites déterminées sur une période de temps de deux révolutions du satellite pour chaque jour. Les résultats obtenus lors du traitement n'ont pas permis de faire un diagnostic complet sur la qualité des observations à cause du jeu de données restreint utilisé.

La maîtrise de l'analyse en ondelettes aura des retombées sur le traitement du signal en général, elle fournira sans aucun doute de très bons résultats dans le domaine de la localisation spatiale par GPS pour la détection des sauts de cycles pour les observations GPS, et dans le domaine du traitement d'image (recalage géométrique, compression d'image,...) . "

2^{ème} thèse : Production d'une ortho-photographie numérique.

Dans le cadre du programme de recherche mené par le Laboratoire de Géomatique au Centre National des Techniques Spatiales, dans le volet portant sur le traitement et l'utilisation de l'imagerie aérienne numérique, un mémoire de magistère ayant pour thème "Production d'une ortho-photographie numérique" a été présenté par Mme AARIZOU Kheira le 04 juillet 2000 au CNTS. Le jury, présidé par M. BENMOHAMED, était constitué de MM. KAHLOUCHE S. (CNTS, Examineur), KEDJAR (INCT, Examineur) et TRACHE M. A. en qualité de rapporteur.

L'étude entreprise portait sur la mise au point d'outils informatiques en vue de l'établissement d'ortho-photographies numériques. Le processus de production de l'ortho-image s'appuie sur les éléments suivants :

une image numérique (photographie numérisée) remplaçant le cliché argentique,

les éléments d'orientation de cette image, déterminés par calcul en s'appuyant sur les coordonnées terrain de quelques points choisis de manière adéquate, un Modèle Numérique de Terrain dont la source peut être soit le cliché origine lui-même, soit une source externe (la carte, un MNT existant de la région, ...).

A partir de ces éléments, le logiciel de redressement calcule la position dans le fichier numérique final de chacun des pixels composant l'image numérique originale.

Le document présenté aborde les aspects généraux liés à l'ortho-photographie classique et numérique (sa définition, son mode de production, les appareils utilisés à cette fin et leur évolution avec le développement technologique, ses applications, ...) et à l'image numérique (sa définition, les conditions et le mode de son acquisition, le choix de la résolution de scannage de l'image et les caractéristiques du scanner utilisé pour son obtention). Il aborde également le **redressement simple** à travers la correction de l'effet de la non-verticalité de l'axe de prise de vue (applicable aux terrains plats) par **transformation projective**, les méthodes de construction de l'image redressée et les **techniques de rééchantillonnage** de l'image.

Les méthodes de détermination et construction des **Modèles Numériques de Terrain**, les formes sous lesquelles ils peuvent être disponibles et la précision nécessaire pour les besoins de l'ortho-photographie numérique ont également fait l'objet d'une analyse, en raison de leur importance dans la mise en œuvre du redressement numérique différentiel.

L'étude du **redressement numérique différentiel** a conduit à la mise au point d'une méthodologie de traitement, à travers l'élaboration d'une série de programmes informatiques en MS Fortran90 et en IDL (Interactive Data Language) et portant sur :

la transformation entre les systèmes de coordonnées "image" et "terrain",
l'orientation interne qui exprime le passage entre le système (de mesure) "image" et le système "photo",
l'orientation et la position de la caméra au moment de la prise de vue,
la transformation projective du plan "image" sur le plan "terrain", dans le cas d'une très faible variation du relief (redressement simple)
l'équation de la condition de colinéarité qui permet de redresser l'image avec l'utilisation du M.N.T de la zone considérée, dans le cas d'un relief accidenté (redressement différentiel)
le rééchantillonnage des grilles déformées par les méthodes d'interpolation bilinéaire, du plus proche voisin ou cubique

Dans la partie **Application**, les deux modes de redressement ont été testés : le redressement simple (cas d'une zone à faible variation d'altitude) et le redressement différentiel (cas d'un relief accidenté). Pour cela, deux jeux de données ont été utilisés : une photographie au 1/13000 d'un terrain pratiquement plat, numérisée à une résolution de 300 dpi, équipée de 17 points d'appui et une photographie au 1/20000 d'un terrain accidenté, numérisée à une résolution de 2000 dpi, équipée de 8 points d'appui.

Le M.N.T de la zone couverte a été produit par numérisation des courbes de niveau d'une carte au 1/25000. Des procédures développées sous IDL ont permis de calculer la triangulation, selon le critère de Delaunay, et de générer une grille rectangulaire régulière du modèle numérique de terrain correspondant à la zone d'étude.

Les programmes développés sont indépendants les uns des autres, et ce, afin de pouvoir les appliquer de façon autonome, chaque fois que cela est nécessaire. Ils constituent les modules de saisie, de redressement simple, d'orientation interne, d'orientation externe, de rééchantillonnage et enfin le module de redressement différentiel.

L'application de cette méthodologie de traitement a permis de produire des images redressées de bonne qualité visuelle, exemptes de défauts tels que le flou, les dédoublements ou manque d'images (qui résultent généralement des anomalies du M.N.T ou des points d'appui).

La qualité géométrique des images redressées a été évaluée sur la base de quelques points de vérification, donnant une erreur moyenne quadratique sur les distances entre ces points de 1.30m. Cette précision est jugée suffisante si l'on considère 0.1mm comme étant un déplacement planimétrique tolérable à l'échelle du document final (ce qui correspond à une tolérance de 1.80m pour le redressement simple et 2.80m pour le redressement différentiel).

Le logiciel mis au point ne permet de rectifier qu'une seule image à la fois. Il serait intéressant de joindre plusieurs images redressées d'un même territoire pour former une mosaïque, mais la principale difficulté viendrait de l'information commune à l'intersection des images, puisque chaque image est redressée selon un plan différent et les images communes ont des histogrammes de fréquence différents. De plus, le mosaïchage pose le problème de place mémoire (la taille finale du fichier de la mosaïque pourrait être énorme). La recherche de solution à ces problèmes peut constituer une extension ultérieure des travaux engagés dans le cadre de ce Magister.

COMPTE RENDU DE MISSION EFFECTUEE AU JPL PASADENA / USA DU 12 AU 18 FEVRIER 2000

Du 14 au 16 Février 2000, une mission a été conduite par Mr Kahlouche (CNTS) aux USA pour la participation à la retraite de l'Association Internationale de Géodésie (AIG), en tant qu'expert représentant les pays en développement, afin de définir les modalités de refonte des structures de l'Association et de ses missions. Cette retraite a été établie à Pasadena (USA) à l'invitation du Jet Propulsion Laboratory (JPL / NASA).

L'AIG est organisé actuellement en 5 sections (Positioning, Advanced space technology, Determination of the gravity field, General theory and methodology, Geodynamics) et chaque section comporte des commissions, des sous commissions et des groupes spéciaux d'étude ou groupes de travail.

Les membres de la retraite ont été désignés lors de l'Assemblée générale de l'UGGI de Birmingham : MM Beutler (Suisse), Brunner (Autriche), Dickey (USA) Feissel (France), Forsberg (Danemark), Rummel (Allemagne), Sanso (Italie) et Schwarz (Canada). Afin d'assurer une meilleure représentativité internationale, 7 groupes ont été dégagés :

Experts de l'AIG, représentant les services

Secteur académique (recherche et formation)

Instituts nationaux de géodésie

IUGG, IAU et autres IUSM associations, ISPRS,..

Unions nationales ou régionales de géophysiques (AGU, EGS,..)

Agences spatiales et programmes internationaux (NASA, ESA, COSPAR,..)

Pays en développement et pays non européen ou américain

Les participants à cette rencontre sont :

Nom	Pays	Représentation
G. Beutler	Suisse	Président du comité
F. Brunner	Autriche	Ingénierie
J. Dickey	USA	Associations de l'UGGI
M. Feissel	France	Institutions internationales (CSTG, FAGS)
R. Forsberg	Danemark	Organismes nationaux de Géodésie
R. Rummel	Allemagne	Universités & recherche
F. Sanso	Italie	Président de l'AIG
K.P Schwarz	Canada	Ex-président de l'AIG
J. Chen	Chine	Asie
V. Dehant	Belgique	Organisations internationales (IAU, COSPAR)
L.P. Fortes	Brésil	Amérique Latine
L. Fritz	USA	Président de l'ISPRS
J.A Joselyn	USA	S.G. UGGI
R.E. Neilan	USA	Services de l'AIG (IGS,..)
A. Dermanis	Grèce	Expert AIG / Services
K. Heki	Japon	Expert AIG / Services
J. Kouba	Canada	Expert AIG / Services
D. Milbert	USA	Expert AIG / Services
S. Kahlouche	Algérie	Pays en développement
J. Manning	Australie	Non US / Non Europe
C. Wilson	USA	Agences spatiales (NASA)
W. Gurtner	Suisse	Secrétariat du comité
I.I Mueller	USA	Ex-président AIG - Modérateur du comité

Les objectifs principaux de la retraite sont :

Analyse de la situation actuelle de l'AIG,

Définition des futurs objectifs de l'AIG,

Définition de mesures à entreprendre pour concrétiser ces objectifs, et

Proposer une nouvelle structure de l'AIG, pour relever les défis du futur.

Pour compléter les informations sur la situation de l'Association, un questionnaire comportant 8 rubriques (avec 14 jeux de questions) a été distribué sous Internet. Ces diverses rubriques portent principalement sur l'intérêt dans les domaines d'activités en géodésie, les rencontres et services scientifiques, l'information, structures et missions de l'AIG,...

Le questionnaire a été transmis en Décembre 1999 à 1800 adresses e-mail et 343 réponses issues de 50 pays ont été collectées. Par pays, le nombre de réponses est USA (73), Allemagne (33), France (18), Italie (17), Japon (15),

Russie (14), Chine (13), Grande Bretagne (11) Canada (11), Brésil (11), Hollande (9), Espagne (8),....., Afrique du Sud (3), Ukraine (2), Algérie (2), Egypte (2), Israël (1), Arabie saoudite (1),.....

Le problème majeur de ce questionnaire est sa sélectivité initiale car il n'a été destiné qu'aux géodésiens disposant d'un accès à Internet, ce qui a marginalisé la plupart des pays du Sud. Un rectificatif a été par la suite apporté par une consultation plus large par courrier, notamment au niveau Africain, afin de collecter et analyser les différentes réponses pour mieux définir le rôle de l'AIG au niveau du transfert technologique et de l'amélioration des activités de géodésie dans les pays en voie de développement. Les zones concernées par ce complément d'information et les experts chargés de la sélection des institutions sont respectivement pour l'Afrique (S. Kahlouche), l'Amérique du Sud (L. P. Fortes) et l'Océanie (J. Manning).

Au niveau de la structure proposée, afin d'alléger l'organisation interne de l'association, les sections ont été supprimées et seront remplacées par probablement 4 commissions qui seront définies par l'exécutif :

Systèmes de références

Champ de pesanteur

Géodynamique

Techniques de positionnement / Engineering

Les principaux débats ont porté sur le rôle du Conseil de l'AIG et la représentativité au niveau des différentes commissions ainsi que la focalisation de l'activité de l'AIG autour d'un projet global intitulé GIGGOS (Global Integrated Geodetic & Geodynamic Observing System) qui sera la référence (terrestre, céleste et temps) qu'établira l'AIG pour la communauté scientifique mondiale. Cette proposition est en débat pour être conduite par l'exécutif sous forme de projet intégrateur.

La structure finale de l'AIG sera présentée par le comité au conseil de l'Association qui se tiendra en marge de la prochaine assemblée scientifique prévue à Budapest en septembre 2001 et l'adoption des nouveaux statuts est prévue lors de l'assemblée générale de l'UGGI (Union Géodésique et Géophysique Internationale) qui se tiendra au Japon en 2003.

COMPTE RENDU DE MISSION EFFECTUEE EN TUNISIE DANS LE CADRE DU 1^{ER} ATELIER MAGHREBIN SUR LA GEODESIE (TUNIS DU 18 AU 20 MAI 2000)

Par, MM. B. Chemaa , S. Maarouf , A. Sellal INCT

Le premier atelier Maghrébin de géodésie a été organisé par l'Office de la Topographie et de la Cartographie de Tunisie (OTC), à Tunis du 18 au 20 mai 2000.

L'objectif de cet atelier était de définir et de construire une référence géodésique unifiée pour toute l'Afrique du Nord.

Par référence géodésique unifiée, on entend l'homogénéisation des différents réseaux de positionnement (essentiellement par GPS), de nivellement, de gravimétrie, des géoïdes locaux, en juxtaposant sur le toute une projection cartographique commune via un même ellipsoïde de référence.

Comme participants, il y avait les représentants de tous les états du Maghreb, des européens (Portugal, France et Pologne), des officiels et des experts d'organisations régionales (OACT, OSS, Ligue Arabe, CRTEAN) ou internationale (AIG).

Après la présentation des rapports nationaux, trois ateliers ont été constitués, consacrés respectivement aux réseaux de base en positionnement et nivellement, à la gravimétrie et aux géoïdes locaux et unifiés et enfin à la projection cartographique commune.

Des résolutions assez générales ont été adoptées demandant et recommandant aux payas et aux organismes nationaux concernés d'adopter et d'entériner les résolutions et vœux formulés lors des travaux de l'atelier.

L'essentiel de ces résolutions jointes est que c'est l'Organisation Africaine de Cartographie et de Télédétection (OACT), dont le siège se trouve à Alger qui a été chargée de coordonner les actions du projet, avec le support scientifique de l'AIG et le concours sous diverses formes d'autres institutions telles que l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), la Ligue Arabe ou encore l'UMA.

Sur le plan scientifique et technique, il s'agit de construire quelque chose de semblable à ce qui se fait en Europe [EUREF (Référence unifiée de positionnement pour l'Europe), UEVL (réseau de référence européen unifié de nivellement)], en Amérique du sud et en Asie.

En Amérique du Nord les Etats-Unis et le Canada se sont organisés pour unifier leurs réseaux en dehors des structures de l'AIG.

S'agissant de l'unification des réseaux gravimétriques et des géoïdes locaux, pratiquement sur toutes les parties de notre planète, les travaux ne font que commencer.

En résumé, la participation algérienne (INCT et CNTS) à cet atelier a d'abord apporté sa contribution (rapport national et des communications couvrant l'ensemble des sujets traités, sauf la partie relative à la projection cartographique qui ne présente pas de difficultés particulières).

Elle est ensuite revenue avec en vue des perspectives particulières quant à la réfection du réseau géodésique national sur la base de concepts et avec des outils modernes.

RECOMMANDATIONS

I.1 RECOMMANDATION GENERALE

Les pays d'Afrique du Nord (Mauritanie, Maroc, Algérie, Libye, Egypte et Tunisie) réuni à Tunis les 18-19 et 20 Mai 2000 à l'invitation de l'Office de la Topographie et de la Cartographie ont discuté et approuvé les résolutions jointes relatives à :

La mise en place d'un système de référence unique pour l'ensemble des pays d'Afrique du Nord.

L'élaboration d'un géoïde de l'Afrique du Nord.

L'adoption d'un système de projection unique et des spécifications harmonisées.

Les membres des groupes et les membres des organisations et institutions internationales présents, adressent à la Tunisie leurs vifs remerciements pour toutes les dispositions prises pour l'accueil chaleureux et l'excellente organisation des travaux par l'Office de la Topographie et de la Cartographie.

Le groupe d'experts exprime son souhait que les résultats de ces travaux soient validés par les premiers responsables des institutions topographiques des pays d'Afrique du Nord, pour entrevoir leur mise en œuvre dans les meilleurs délais ; sous l'égide de l'Organisation Africaine de Cartographie et de Télédétection (OACT).

Le groupe recommande de maintenir un cycle de rencontres périodiques sur de multiples aspects de ce projet à raison d'une réunion tous les six mois dans un des pays d'Afrique du Nord.

Le groupe charge l'OACT d'envisager toutes les démarches pour assurer une meilleure synergie des actions d'Afrique du Nord avec les autres sous-régions d'Afrique.

Le groupe demande le soutien de l'Observation du Sahara et du Sahel (OSS) tant au niveau de l'OACT qu'à celui des pays pour favoriser l'aboutissement de ce projet et souhaite la synergie avec les autres sous-régions d'Afrique pour tirer le meilleur profit d'une telle initiative pour la géodésie et dans la lutte contre la désertification et l'atténuation des effets de la sécheresse.

I.2 RECOMMANDATION DU GROUPE 1 (Définition et mise en œuvre d'un référentiel Unifié pour l'Afrique du Nord)

Considérant les résolutions et les recommandations pertinentes des organisations continentales africaines, de l'Union du Maghreb Arabe et de la Ligue Arabe relatives à la nécessité de mettre en place un réseau géodésique unifié, infrastructure fondamentale pour l'élaboration d'une cartographie appropriée, indispensable à l'exploitation des ressources naturelles et au développement des projets régionaux communs.

Considérant le besoin des pays d'utiliser les nouvelles technologies spatiales de positionnement leur permettant d'avoir des solutions économiquement rentables.

Considérant l'importance d'un tel réseau géodésique unifié pour le développement d'une cartographie Nord Africaine harmonisée.

Considérant l'importance scientifique d'un tel réseau pour le développement d'un espace Nord Africain de recherches dans les domaines de la géodésie et de la géodynamique.

Considérant l'importance et la disponibilité du patrimoine des données géographiques existantes et la nécessité de le consolider par l'acquisition de nouvelles données observées par les techniques spatiales en vue d'améliorer sa qualité scientifique et son adaptation pour les besoins des pays.

Il est recommandé de retenir le système **ITRF** (International Terrestrial Reference Frame) pour l'ensemble des pays de l'Afrique du Nord tant pour son caractère mondial que pour sa haute précision (1 à 2cm).

De même, l'**ITRF** fournit entre autres un système de références unique pour tous les pays se trouvant sur la même plaque tectonique. Cette qualité lui permettra d'être étendu ultérieurement à l'ensemble de tous les pays d'Afrique.

Le groupe recommande de :

Lancer ce projet dans les meilleurs délais,

Confier la coordination de sa mise en œuvre à l'Organisation Africaine de Cartographie et de Télédétection (OACT) avec la collaboration scientifique de la commission X de l'Association Internationale de Géodésie (AIG),

Créer une commission technique composée des représentants des différents pays pour tous les aspects scientifiques, techniques et opérationnels afin de :

Favoriser les contacts avec les organisations internationales compétentes,

Organiser une campagne pilote avec le plus grand nombre de pays possible,

Mobiliser tous les pays à l'initiative de ce projet,

Définir le mode d'organisation, de la collecte, de l'analyse et du calcul des données reçues,

Arrêter les modalités d'accès et l'emploi des données,

Concevoir un plan de formation,
Promouvoir l'installation des stations permanentes.

1.3 RECOMMANDATION DU GROUPE 2 (Définition d'un Géoïde Nord Africain Unifié).

Considérant l'importance du développement d'un géoïde Nord Africain pour le réseau géodésique et pour promouvoir la recherche géophysique, l'inventaire des ressources minières, tectoniques océanographiques et la réalisation du nivellement par le GPS, le groupe recommande :

Nécessité de l'harmonisation des bases de données nationales (géodésie, nivellement, gravimétrie) dans la perspective d'une base de données commune.

Choisir parmi les modèles globaux existants, un modèle optimal pour l'Afrique du Nord, collecter les informations sur les modèles numériques de terrain et densifier la couverture gravimétrique afin d'obtenir une précision compatible avec le GPS (1cm).

Pour atteindre ces deux objectifs, il est recommandé à l'OACT à travers un groupe de travail d'utiliser les nouvelles technologies de communications en s'appuyant sur les moyens disponibles au niveau du B.G.I. afin d'arrêter les spécifications de cette base de données qui sera proposée aux pays pour adoption.

L'OACT sera chargée de recenser et mettre à la disposition des équipes de l'Afrique du Nord les logiciels disponibles pour le calcul d'un tel géoïde.

Le groupe recommande de promouvoir des écoles d'été itinérantes en s'appuyant sur les opportunités existantes tels que CNTS - Algérie, RGI, IGeS, cours organisés par l'IGeS en 2001 au Caire.

Il recommande, également, à l'OACT en coordination avec les organisations internationales de formuler des propositions pour la mise en place d'un groupe de chercheurs d'Afrique du Nord sur le géoïde.

L'atelier recommande le travail à l'OACT d'achever la réalisation de l'ensemble des points sus - indiqués avant la fin de l'an 2000 pour être validés par les pays et mis en application aussitôt.

1.4 RECOMMANDATION DU GROUPE 3 (Définition d'une Représentation Plane Unifiée).

Considérant les recommandations pertinentes de l'Organisation de l'Unité Africaine et de la Commission Economique pour l'Afrique des Nations - Unies et la Ligue Arabe pour unifier les légendes des cartes des pays africains et promouvoir le développement économique des projets nationaux et régionaux de l'Afrique du Nord, Considérant le renforcement de la coopération entre les institutions cartographiques des pays de l'Afrique du Nord pour atteindre les objectifs précités et après avoir passé en revue les systèmes de représentations planes utilisés dans les pays nord africains, le groupe de travail présente les recommandations suivantes :

Adoption de la représentation UTM (Universal Transverse Mercator) comme représentation unifiée pour les cartes des pays de l'Afrique du Nord,

Découpage des fuseaux de 6° en général, tout en permettant aux pays d'utiliser des fuseaux différents selon leurs besoins internes,

Utilisation du découpage géographique suivant les normes internationales pour les échelles 1:250 000 (1°30' x 1°) et 1/200 000 (1° x 1°),

Application de ce découpage pour les cartes topographiques et thématiques à petites échelles à partir du 1/250 000,

Utilisation d'une légende commune suivant la nomenclature de l'Organisation Africaine de Cartographie et de Télédétection (OACT) adoptée par la 6^{ème} Conférence Cartographique Régionale pour l'Afrique tenue en 1986 à Addis-Abeba,

Lors de la réimpression des cartes existantes, un pseudo - quadrillage UTM en violet sera superposé à l'ancien en attendant l'application de ce système progressivement pour les nouvelles éditions.

Confier à l'OACT en collaboration, avec les experts des pays, l'unification des formules mathématiques utilisées pour les transformations des coordonnées géographiques en coordonnées rectangulaires et vice - versa et les transmettre aux pays membres en vue de les adopter et les mettre en vigueur,

Le suivi et l'application de ces propositions et recommandations seront assurés par l'OACT avec le concours d'un comité scientifique d'experts des pays de la région se réunissant chaque fois qu'il est nécessaire.

**ECOLE D'ETE SURL'ASTRONOMIE DE POSITION
ET LES TECHNIQUES SPATIALES LES PINS D'OR (AIN TURCK)
DU 24 AU 28 JUIN 2000**

Le Centre National des Techniques Spatiales (CNTS – Laboratoire de Géodésie) a organisé au complexe touristique "Les pins d'Or" du 24 au 28 Juin 2000, une école d'été sur l'astronomie de position et les techniques spatiales.

Cette école d'été, patronnée par le Professeur Bouziane, président de l'Académie Universitaire d'Oran, a été organisée en collaboration avec l'Ordre National des Géomètres Experts Fonciers (OGEF).

Le comité scientifique et pédagogique mis en place, présidé par M. Kahlouche (Maître de recherche et responsable du Laboratoire de Géodésie du CNTS) et M. Oussalah (président de l'Ordre des Géomètres Experts Fonciers) et composé d'enseignants chercheurs du CNTS (Ghezali, Djilali, Sahel, Abrouche, Gourine, Boudjemai) a procédé à la sélection des candidatures, la confection des supports pédagogiques, la diffusion des cours et l'encadrement des travaux pratiques.

Le programme dispensé a porté sur :

- Conférences sur les techniques spatiales (localisation, télédétection,...).
- Observations et traitement GPS (Global Positioning System).
- Cours / conférences sur l'Astronomie de position (temps, éphémérides, déterminations astronomiques, logiciels d'astronomie,...).
- Observations d'astronomie de position.

Des institutions nationales (Institut National de Cartographie et de Télédétection -INCT, Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique - CRAAG) ont été invitées à présenter leurs activités respectivement dans le domaine des applications astronomiques pour le réseau géodésique national (M Chemaâ) et la recherche en astrophysique au CRAAG (M. Grig Hassene).

Cette école d'été a été organisée au bénéfice de 34 candidats activant dans des associations nationales d'astronomie amateur, réparties sur 10 wilayas (Oran, Tlemcen, Chlef, Médéa, Alger, Tizi-Ouzou, Bejaia, Bordj Bou Arreridj, Ghardaïa, Constantine) ont été sélectionnés.

Cette manifestation pédagogique a permis d'une part la vulgarisation scientifique au profit des jeunes qui ont pris ainsi connaissance des activités du CNTS et d'autre part de fédérer et fournir un espace de rencontre et d'échange à ces associations scientifiques.

Lors de l'ouverture de cette école d'été par le Professeur Bouziane, Président de l'Académie Universitaire d'Oran, le Directeur du CNTS (M. Oussedik) et le Président de l'Ordre des Géomètres (M. Oussalah) ont présenté brièvement les activités des institutions et organes qu'ils dirigent.

Pour cette école d'été, une prise en charge totale a été assurée par le complexe touristique " Les pins d'Or " , pour les participants et le personnel d'encadrement .

CALENDRIER DES MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES INTERNATIONALES

OCTOBRE 2000

6^{ème} Conférence et Exposition GEOAsia Pacific Annuelle

Queen Siriki National Convention Center, Bangkok, Thaïlande

Du 01-04 Octobre .

Se renseigner au niveau de : Jason Ho,

135 Middle Road,#02-21Byland Building Singapour 188975

Tel : 65 () 883 1029,

Fax : 65 () 883 1027

E-mail: jho@mail.aip.com

Modélisation Environnementale avec les SIG et la Télédétection

ITC, Enschede, les Pays-Bas

Du 02-06 Octobre

Se renseigner au niveau de : ITC Student Registration Office, P.O..Box 6, 7500 AA Enschede, les Pays-Bas,

Tel : 31(53) 487 4205,

Fax : 31(53) 487 4238,

E-mail: education@itc.nl

Les 3 Réunions et Ateliers Annuels de la Commission FIG

Athènes, Grèce,

Du 04-07 Octobre

Se renseigner au niveau de : Chryssy Potsiou, Ktimatologio S.A.,

282 Mesogion Ave., 15562 Athènes, Grèce

Tel : 30(1) 650 5656

Fax : 30(1) 772 2677

E-mail: chrissy@survey.ntva.gr

Séminaire sur les Systèmes de Nivellement Hydrostatique

CERN, Genève, Suisse,

Du 09-11 Octobre

Se renseigner au niveau de : Michel Mayoud, CERN, European Laboratory for Particle Physics, CH-

1211 Genève 23, Suisse

Tel : 41(22) 767 3007

Fax : 41(22) 767 3456

E-mail: Michel.Mayoud@cern.ch

Planification de Radionavigation Mondiale

Moscou, Russie

Du 09-11 Octobre

Se renseigner au niveau de : Mrs L. Kudriavtseva,

2, Bolshoy, Trekhsvyatitelsky, pereulok, Moscou 109028, Russie

Tel : 7(095) 917 0127

Conférence Annuelle CartèGraph 2000 des Utilisateurs

Five Flags Holiday, Inn, Dubuque, IA, USA

Du 10-13 Octobre

Se renseigner au niveau de : Amy Wickham, CartèGraph Systems, Inc., 3600 Digital Drive, Dubuque, IA 52003, U.S.A.

Tel : 1(319) 556 8120

Symposium Allemand 2000 sur le Radar

Berlin, Allemagne

Du 11-12 Octobre

Se renseigner au niveau de : German Institute of Navigation, Adenaueralleen 118,

D-53113 Bonn, Allemagne

Tel : 49(228) 201 970

Fax : 49(228) 201 9719

E-mail: dgon.bonn@t-online.de

Jaarcongress GITA et Ravi 2000

Les Pays -Bas

Du 11-12 Octobre

Se renseigner au niveau de : J.H. Pongers,GITA,

Tel : 06-53 17 13 73

E-mail : j.pongers@wxs.nl

Intergeo et 85 .Geodatentag

Berlin, Allemagne

Du 11-13 Octobre

Se renseigner au niveau de : HinteMesse-Und

Ausstellungs-GmbH ?Beiertheimer

Allee 6,D-76137, Karlsruhe,

Allemagne,

Tel : 49(721) 931 3371

Fax : 49(721) 931 3371

E-mail: info@hinte-messe.de

La conférence ERSI 2000 des Utilisateurs Européens, Africains, et du Moyens -Orient

Istanbul, Turquie

Du 18-20 Octobre

Se renseigner au niveau de : ISLEM GIS,

13.CaddeNo : 14,06530 Beysukent,

Ankara, Turquie

Tel : 90(312) 235 6490

Fax : 90(312) 235 5682

E-mail : info@islem.com.tr

Foire Internationale de la Géodésie GEA 2000 VI

Torun, Pologne

Du 26-28 Octobre

Se renseigner au niveau de : Jacek Smutkiewics

Organising Bureau GEA,40-750 Katowice,ul.Armi Krajowej

287/7,Pologne

Tel : 48(32) 252 0660

Fax : 48(32) 252 0666

NOVEMBRE 2000**2^{ème} Conférence GCC-EU sur la Technologie de Pointe du Gaz et du Pétrole**

Bruxelles Belgique - Au mois de Novembre

Se renseigner au niveau de : Argiris Kagiannas,EPU-NTUA,Iroon Polytechniou str., 157773

Zographou, Athènes, Grèce

Tel : 30 (1) 772 3555

Fax : 30(1) 772 3550

14^{ème} Conférence et Ateliers Internationaux : Télédétection et Géologie Appliquée

Las Vegas NV, U.S.A.,

Du 06-08 Novembre

Se renseigner au niveau de : ERIM International Conferences, P.O Box 134008, Ann Arbor MI, U.S.A.,

Tel : 1(734) 994 1200,ext.3350,

Fax : 1(734) 994 5123

Application des Technologies Géodésiques et d'Information dans la Planification Physique des Territoires

Sofia, Bulgarie

Du 09-10 Novembre

Se renseigner au niveau de : J Randolph Camilleri, The Land Surveyors Society- Malte, c/o Block C Flat 13-16, Sky Apartments, 179 Marina Sea Front,

Pieta MSD 08, Malte

Tel : 356 ()237 914

Fax : 356() 251 040

E-mail : resltd@globalnet.mt

Le Jour SIG

Des milliers d'emplacements mondiaux le 15 Novembre

Se renseigner au niveau de : Karen Huribut, ESRI, Inc.,

Tel : 1(909) 793 2853, ext. 1582

E-mail : press@esri.com

Le GPS en Sylviculture : Atelier 2000

Kelowna Colombie Britannique, Canada

Du 20-22 Novembre

Se renseigner au niveau de : Ernst Stjernberg, Forest Engineering Research Institute of Canada, 2601 East Mall, Vancouver, B.C. , Canada,

V6T 1Z4,

Tel : 1(604) 228 1555,

Fax : 1(604) 228 0999

E-mail : ernest-s@vcr.feric.ca

AURISA 2000

Hyatt Regency Coolum, Queensland, Australie

Du 20-24 Novembre

Se renseigner au niveau de : AURISA 2000 Conference ,c/o Australian Convention and Travel Services Pty Ltd (ACTS), GPO Box 2200, Canberra, ACT 2601, Australie

Tel : 61(2) 6257 3299

Fax : 61(2) 6257 3256

DÉCEMBRE 2000

Conférence Internationale sur la Télédétection, les SIG et le GPS

Hyderabad, Inde

Du 01-04 décembre

Se renseigner au niveau de : Professor I V Murali Krishna,

Fax : 91 (40) 339 7648

E-mail : iyyanki@icorg.org

Conférence Fall 2000

Rhode Island Convention Center et Westin Providence Hotel complex,
Providence , RI , U.S.A. .

Du 01-05 Décembre

Se renseigner au niveau de : Temperance Battee, ASPRS, 5410 Grosvenor Lane,
Suite 210, Bethesda, MD 20814-2160, U.S.A.

Tel : 1(301) 493 0290

Fax : 1(301) 493 0208

E-mail : asprs@asprs.org

21eme Conférence Asiatique sur la Télédétection

Taipei, Taiwan,

Du 04-08 Décembre

Se renseigner au niveau de : ACRS 2000 ,Center for Space
and Remote Sensing Research, National Central University , Chung -Li,Taiwan,

tel : 886(3) 425 7232

fax : 886(3)425 5535

E-mail : maylai@csrsr.ncu.edu.tw

JANVIER 2001**3eme Atelier International sur la Cartographie Mobile**

Luxour Egypte

Du 04-06 Janvier

Se renseigner au niveau de : Naser El Sheimy,
Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, 2500 University Drive N.W.,
Calgary Alberta T2N 1N4 , Canada

E-mail: naser@ensu.ucalgary.ca

2eme Conférence Internationale sur l'Aménagement Foncier

Danbury Business Center of Anglia Polytechnic University, England

Du 08-10 Janvier

Se renseigner au niveau de : Professor Dr Richard K Bullard, The Old Post Office,
The Street, Terling, Chelmsford, Essex CM3 2PG, England

Tel : 44(1245) 233 351

Fax : 44(1245) 233 751

E-mail : richard.bullard@cwcom.net

FEVRIER 2001**Internationale Geodatische Woche**

Obergurgl, Tirol, Autriche

Du 18-24 Fevrier

Se renseigner au niveau de : A-6020 Innsbruck,
Technickerstraße 13 ,Autriche

Tel : 43(512) 507-6757, ou 43(512) 407-6755

Fax : 43(512) 507-2910

E-mail : geodaetischewoche@uibk.ac.at

Symposium Internationale de l'IAG sur les références verticaux
Cartagene Colombie
Du 20-23 Février
Se renseigner au niveau de :Dr Santiago Borrero
Presidente Comité Organizador
VeReS 20001 Symposium, Instituto Geográfico Agustín Codazzi,
Carrera 30 Nu. 48 -51, Bogota Colombie

MARS 2001

GITA XXIV
U.S.A. ,
Du 04-07 Mars
Se renseigner au niveau de :GITA , 14456
East Evans Avenue, Aurora,CO80014 U.S.A.
Tel : 1(303) 337 0513
Fax : 1(303) 337 0513
E -mail : education@gita.org

AVRIL 2001

La Conférence ASPRS
America's Center/Adam's Mark Hotel, St Louis, MO, U.S.A.
Du 23-27 Avril
Se renseigner au niveau de :ASPRS , 5410
Grosvenor Lane , Suite 210, Bethesda, MD 20814-2160,U.S.A
Tel : 1(301) 493 0290
Fax : 1(301) 493 0208
E-mail : meeting@asprs.org

MAI 2001

**68eme Comité de Réunion permanent
et symposium International FIG**
ASEM Convention Centre , Séoul Corée
En mois de mai
Se renseigner au niveau de :68th FIG Organising Committee, 624-1,Unhak, Yongin ,
Kyonggi, Corée
Tel : 82(335) 350 851
Fax : 82(335) 350 853
E-mail : juhkim@kesc.co.kr

Centenaire de la Conférence de la Cartographie et de la Géodésie
Canberra, Australie,
Du 11-13 Mai.
Se renseigner au niveau de : Tel :61(2) 6257 3299

JUIN 2001

KIS 2001

Banff, Alberta , Canada,

Du 05-08 Juin

Se renseigner au niveau de : KIS 2000 ,Department of Geomatics Engineering, University of Calgary,
2500 University Drive NW, Calgary,

Canada , T2N 1N4 ,

Tel : 1(403) 220 5834

Fax : 1(403) 284 1980

Conférence sur l'utilisateur Intergraph GeoSpatial

Atlanta, GA,USA ,

Du 18-20 Juin

Se renseigner au niveau de :Intergraph Corporation, Mailstop 1W17B2,
Huntsville, AL 35894-0001, USA

Fax : 1(256) 730 1263,

E -mail : GeoSpatialUsersCommunity@intergraph.com

Géomatique 2001

Sheraton, Fredericton, NB, USA

Du 24-28 Juin

Se renseigner au niveau de :

Tel : 1(506) 453 8855

Fax : 1(506) 4

E-mail : wayne@gov.nb.ca

JUILLET 2001

La Conférence CA/ GSP/SIG

Hyderabad, India

Du 06-07 Juillet

Se renseigner au niveau de :Shanti Nivas, GIS

India, 6-31149/1/A1,B.S .Makhta,

Begumpet, Hderabad 500016,India

Tel : +91(040) 331 4141

Fax : 91(040) 330 6770

E-mail : sukuki@hdl.vsnl.net.in

توصيات للمؤلفين

تعتبر هذه النشرة فضاء علميا مخصصا للعلوم الجغرافية

نوعية المقالات : يجب أن تكون المقالات الموجهة للنشر معالجة لمواضيع تختص بالعلوم الجغرافية.
تنقسم المقالات إلى فئتين

- بحث وتنمية
- تأليف

مقالات البحث والتنمية : تختص إما بالأعمال التي تتميز بالابتكار والمساهمة التجديدية المساعدة في تطوير العلوم الجغرافية، أو بالإنجازات والدراسات الملموسة التي تظهر أهمية في مجال السيطرة على مفاهيم العلوم الجغرافية .

مقالات التأليف : تهدف إلى إبراز النظريات، الطرق، التقنيات. أو المناهج المرتبطة بالعلوم الجغرافية، سيما مع حالات تطبيقية دقيقة.

اللغات: تصدر المقالات أساسا باللغة العربية، الفرنسية والإنجليزية .

مواصفات النشر: كل بحث يظهر أهمية سوف يتم نشره بغض النظر عن مصدره ، حيث أن انتماء مؤلفه إلى المعهد الوطني للخرائط و الكشف عن بعد ليس بالضروري.
يجب أن تقدم المقالات على قرص، مكتوبة بالورد 7 (7 word) ، بأعمدة، بمقياس 4 ، بتحشية ثنائية بين الأسطر و بهامش يقدر 2.5 سم على الأكثر على الجوانب الأربعة.
يجب أن يشمل كل بحث على عنوان مختصر و مبلغ.

الملخص: يجب أن تشمل كل مقالة على ملخص بالعربية مرفقا بملخص آخر بالفرنسية أو بالإنجليزية متكون من 100 إلى 200 كلمة.

الكلمات الجوهرية: أذكر 5 إلى 6 كلمات جوهرية.

الفهرسة: يجب أن تكون المراجع كاملة ومقدمة بالترتيب الهجائي لأسماء المؤلفين. يجب أن ينص المرجع بصفة واضحة على اسم ولقب المؤلف متبوعا بسنة النشر، عنوان التأليف، الناشر ومكان النشر. يجب أن يذكر كل مرجع في النص باسم ولقب المؤلف متبوعا بالرقمين الأخيرين لسنة النشر.

طريقة النشر: كل مقال موجه إلى النشر، إذا ما اعتبره رئيس التحرير مقبولا، يتم عرضه للتقييم من طرف عضوين من لجنة القراءة. في حالة ما إذا كان هناك رأي معارض، يتم عرضه على عضو ثالث. المقالات الغير مقبولة لا ترجع إلا في حالة ما إذا كان هناك طلب من طرف المؤلف.
يتحصل كل مؤلف على نسختين مجانا ، ويمكن الحصول على نسخ أخرى عند الطلب في حدود المخزون.

تاريخ الصدور: تصدر النشرة مرتين في السنة، في نهاية شهر أكتوبر وفي نهاية شهر أبريل.

RECOMMENDATIONS TO THE AUTHORS

This Bulletin is a scientific area, devoted to geographical sciences.

KIND OF ARTICLES: Articles intended to publication must deal with subjects referring to geographical sciences.

Articles are divided up into two rubrics: Research-Development, Synthesis.

RESEARCH-DEVELOPMENT ARTICLES: Deal either with works having an originality and an innovatory contribution, helping in the development of the geographical sciences, or deal with concrete studies and achievements presenting an interest in the mastery of geographical sciences concepts.

SYNTHESIS ARTICLES: Are aiming to bring out, theories, methods, techniques or processes related to geographical sciences with notably precise cases of application.

LANGUAGES: Articles appear mainly in Arabic, French, and English.

CRITERIA OF PUBLICATION: All papers presenting an interest, will be diffused whatever their origins are ;the membership of their authors to the INCT is not required.

Articles must be provided on diskette, written with Word 7, in column, in A4 format, with a double space between the lines, and with a maximum margin of 2,5cm on each of the four sides.

All papers must have a title, which must be brief and informative.

THE ABSTRACT: All papers must have an abstract in arabic with another abstract in french or in english containing 100 to 200 words.

KEY-WORDS :Mention 5 to 6 key-words

BIBLIOGRAPHY: References must be complete and presented in alphabetical order of author's names. The references must clearly mention the name and the first name of the author, followed by the year of publication, the work title, the editor and the place of edition. All references must be mentioned in the text by the name and the surname of the author followed by the two last figures of the year of publication.

MODE OF PUBLICATION: All Articles presented to publication :if they are considered admissible by the chief editor are submitted to the evaluation of two members of the reading panel, in the case of opposite an opinion, they are submitted to a third member. Articles which are not accepted are not turned back only if it is requested by authors

Two copies will be provided gratuitously to each of the authors ; other copies can be provided at request within the limits of the stock.

DATES OF PUBLICATION: The Bulletin appears twice in a year, at the end of October, and at the end of April.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

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 un originalité et une contribution novatrice aidant au développement des sciences géographiques, soit sur des réalisations et études concrètes qui présentent un intérêt dans la maîtrise des concepts des sciences géographiques.

LES ARTICLES DE SYNTHÈSE: 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.

CRITERES 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 et écrit en Word 7, en colonne et dans un format A4 en double interlignes, avec une marge de 2,5 cm au maximum sur chacun des quatre cotés.

Chaque communication doit comporter un titre, qui doit être bref et informatif;

LE RESUME: Chaque article doit comporter un résumé en arabe accompagné d'un autre résumé en français ou en anglais de 100 à 200 mots.

MOTS CLES: 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 clairement le nom et le prénom de l'auteur suivi de l'année d'édition, du titre de l'ouvrage, de l'éditeur et du lieu d'édition. Toute référence doit être mentionnée dans le texte par le nom et prénom de l'auteur suivi des deux derniers chiffres de l'année de publication;

MODALITE 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.

Bulletin d'abonnement

Pour souscrire à ce Bulletin il vous suffit de transmettre par courrier ou par Fax, la fiche ci dessous accompagnée de votre règlement à Monsieur le Directeur Général de l'Institut National de Cartographie et de Télédétection, Bulletin, des Sciences Géographiques, 123 rue de Tripoli Hussein Dey BP 430, Alger. 16040. Fax:213 (2) 23 43 81
Tél: 213 (2) 23 43 76 à 80 et 82, E-mail: inct99@wissal.dz, ou ANT Vertriebs GmbH Fuerstenrieder Str. 166-81377 Munich R.F.A Fax: 0049 89 71039 449, suivi de chèque de règlement.

Nom et prénom ou raison sociale.....

Fonction :.....

Adresse complète :.....

Tél-Fax :.....

Désire souscrire un abonnement au Bulletin des Sciences Géographiques pour une année.

Tarif d'abonnement : une année : Etudiant : 70 DA
Particulier : 80 DA
Etranger : 15 Euro

Prévoir en sus pour les frais d'expédition :

- Pour l'Algérie: 50 DA
- Pour l'étranger: 3 Euro

Mode de règlement :

Par virement CCP n° 1552.04

Par virement bancaire : CPA n° 101 401 78505 1
BEA n° 22 61 570 Q

- Pour l'étranger: par virement bancaire : **Banque Deutsche Bank AG Munich**
Compte Nr, 85 90 960 BLZ: 700 700 10

Le Bulletin des Sciences Géographiques

VU DE L'EXTÉRIEUR

« Nous recevons depuis le début de sa parution la revue éditée par vos services, nous avons donc pu la voir évoluer au fil des parutions et nous avons le plaisir de vous complimenter pour sa qualité en progression constante »

**Robert Chevalier : vice président directeur
de la rédaction de la revue XYZ.**

« Une publication qui impressionne tant que par la qualité de sa présentation que pour les auteurs qui ont fourni des textes pertinents et intéressants. »

**Alain Vallière, Directeur Général et Secrétaire
de la commission de toponymie
Québec, Canada.**

« Je voudrai dire merci à votre institut pour le Bulletin des Sciences Géographiques, il s'agit d'une revue magnifique et très utile »

**Peeter Päll : (Estonie) :Convocateur du groupe
de travail des Nations-Unies sur les systèmes
de romanisation.**

« It is interesting and impressive to see your intitulé is committed to the subject of toponymy »

Dr Jörn Sievers : Chairman Stagn. (RFA)

« je vous félicite pour la réussite de ce Numéro spécial , je vous remercie aussi de la part de l'ACI. »

**Ferjan ormeling : Secrétaire Général et
trésorier de l'association cartographique
internationale.**

“ أقر هذا العمل الجليل الذي تقومون به من أجل إثراء البحث العلمي ومن أجل تحسين الرأي العام حول هذا الموضوع الهام الذي ما يزال جمهورنا غائباً عنه بالرغم من كل الوسائل التي نقوم بها لتبصير ساكنتنا بأهميته .”

الدكتور عبد الهادي التازي
عضو الأكاديمية الملكية المغربية

Bourses de voyages

Pour la CCI 2001, Beijing, Chine, 6-10 Août 2001 et la CCI 2003, Durban, Afrique du Sud 10-16 Août 2003

L'Association cartographique internationale accorde des bourses de voyages à des jeunes cartographes de pays en voie de développement pour leur participation aux Conférences cartographiques internationales. L'ACI applique la définition des pays en voie de développement retenue par les Nations Unies, qui figure dans leur Annuaire statistique annuel. La définition la plus récente inclut tous les pays d'Afrique, d'Amérique centrale et du sud y compris les Caraïbes, et la plupart des pays d'Asie et d'Océanie. Les candidats doivent présenter une communication à l'ACI pour la première fois et avoir 35 ans ou moins. Ils doivent envoyer un exemplaire complet de leur texte et un résumé au secrétaire de la conférence et au secrétaire général de l'ACI au plus tard le 15 décembre 2000, pour la conférence de Beijing ou le 15 décembre 2002 pour la conférence de Durban. De plus, les candidats doivent transmettre une lettre de recommandation d'un cartographe reconnu de leur pays ou d'un autre pays (en même temps que le texte de la communication, destinée au secrétaire général de l'ACI). Avec les deux exemplaires de son texte, le candidat envoie une feuille séparée donnant les informations suivantes :

- 1) Nom, adresse, numéro de télécopie, adresse électronique, nationalité, numéro du passeport du candidat
- 2) Titre de la communication
- 3) Formation universitaire ou équivalente
- 4) Date de naissance (mois et année)
- 5) Sexe
- 6) Nom et adresse de la personne rédigeant la lettre de recommandation
- 7) Estimation du coût du transport jusqu'au lieu de la conférence
- 8) Nombre de jours de participation du candidat à la conférence
- 9) Contribution éventuelle antérieure à l'ACI (participation aux commissions ou aux groupes de travail)
- 10) Participation future envisagée à l'ACI (en particulier, intérêt pour les commissions et groupes de travail)

Les candidats doivent avoir au moins un diplôme universitaire ou équivalent. Les communications doivent présenter un caractère original et être correctement écrites avec les références appropriées des citations et des emprunts. Les communications doivent rendre compte de recherches ou de projets traitant de cartographie. Des rédactions collectives sont possibles si le candidat est auteur principal et présentera la communication. Les candidats retenus doivent participer au minimum à quatre journées de la conférence et sont encouragés à participer à la totalité de la conférence et à la cérémonie d'ouverture. Ils sont également encouragés à participer à au moins une réunion de commission ou de groupe de travail durant la conférence.

Les bourses couvriront les frais de transport (billet en classe économique) et les frais d'inscription à la conférence. Le Comité exécutif s'efforcera de répartir les bourses sur une base régionale et d'inclure des hommes et des femmes. En fonction de la qualité des propositions, jusqu'à 15 bourses pourront être attribuées. Une préférence pourra être accordée aux candidats des nations

membres à jour de leur cotisation même si le concours est ouvert aux jeunes cartographes de tous les pays en voie de développement.

Les bourses accordées seront notifiées au plus tard le (date : sept mois avant la conférence).

Secrétaire général de l'ACI :

Ferjan Ormeling
Association Cartographique Internationale
BP 80115
3508 TC Utrecht, Pays-Bas
fax #31 30 2540604
e-mail: f.ormeling@geog.uu.nl

Secrétariat de la Conférence de Beijing: ICC Beijing 2001

State Bureau of Surveying and Mapping
9 Sanlihe Road
Beijing 100830, Chine
Fax #86 10 68311564
e-mail : icc2001@sbsm.gov.cn

Secrétariat de la Conférence de Durban : ICA 2003

Private Bag X10
Mowbray
7705 Afrique du Sud
Fax #27 21 6891351
e-mail : dclarke@sli.wcapc.gov.za

Les candidats retenus pour la conférence cartographique internationale d'Ottawa 1999, et les thèmes de leurs communications étaient :

Temenjouka Bandrova, Bulgarie : Modélisation en trois dimensions des environnements urbains

Roshanak Darvishzadeh, Iran : Détection semi-automatique des variations pour l'actualisation des bases de données spatiales à grande échelle.

Alick Mwanza, Zambie : Dresser de nouveau la carte de Zambie pour des besoins électoraux, de recensement, et autres

Maxime Nyrtsov, Russie : Une base mathématique cartographique planétaire pour des corps célestes non-sphériques

Patrick Ogao, Kenya : Visualisation de la croissance urbaine utilisant des animations cartographiques temporelles

Romina Plastina, Argentine : Analyse des variations de l'utilisation des sols dans une région de Buenos Aires, Argentine

Dragan Stojanovic, Yougoslavie : Visualisation cartographique et animation des processus et phénomènes spatiaux dynamiques

Dr Yonping Zhao, Chine : Architecture standard pour metadata, basé sur 'digital earth'

Comité exécutif - 16 janvier 1996 & 23 août 1999

Disponible

