**Groupement de Recherches AGRET du CNRS**
**- Astrométrie, Géodynamique et Systèmes de Référence -**
**http://lareg.ensg.ign.fr/AGRET**

# L'observation géodynamique

**Enjeux de l'observation multidisciplinaire**
**pour la mesure des déformations de la Terre et la maintenance des référentiels**

**Difficultés rencontrées**

**Recommandations pour un soutien adapté aux besoins**

**Juin 2001**

Le Conseil scientifique du GDR AGRET

M. Feissel (1,2), M. Diament (3), R. Biancale (4), E. Calais (5),
P. Exertier (6), A.-M. Gontier (1), M. Greff (3), P. Sillard (2)

Avec des contributions de

Z. Altamimi (2), V. Ballu (3), A. Bonneville (3), C. Boucher (2,7),
S. Calmant (8), J.-F. Crétaux (4), N. Florsch (9), J. Hinderer (10),
F. Mignard (6), J.-M. Nocquet (2), B. Simon (11), G. Wöppelmann (9)

1. Observatoire de Paris
2. Institut Géographique National
3. Institut de Physique du Globe de Paris
4. Centre National d'Etudes Spatiales
5. UMR Géosciences Azur
6. Observatoire de la Côte d'Azur/CERGA
7. Ministère de la Recherche et de la Technologie
8. Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération
9. CLDG La Rochelle
10. Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg
11. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

## L'observation géodynamique

### SOMMAIRE

## 1. Préambule

L'accessibilité grandissante des techniques de géodésie spatiale au cours de la dernière décennie a favorisé, en France comme dans le reste du monde, le développement d'études de déformations crustales à l'aide de ces techniques. Le principal système utilisé est le GPS (voir en annexe la signification des sigles et acronymes) dont les usages scientifiques sont favorisés par des coûts d'achat et d'utilisation des récepteurs compatibles avec les budgets de recherche, l'existence d'un excellent service international dans le domaine, l'IGS, et l'accès à des logiciels de traitement de données développés et maintenus par quelques groupes universitaires de haut niveau. Les autres méthodes de la géodésie spatiale sont aussi utilisées pour des études géodynamiques locales ou globales, mais leur emploi moins aisé en réserve l'observation aux spécialistes de la technique : télémétrie par laser sur satellite artificiel (SLR) ou sur la Lune (LLR), méthodes radioélectriques DORIS (satellites artificiels) et VLBI (quasars) ; les logiciels disponibles pour le traitement de leurs données sont d'accessibilité et de niveau équivalents à ceux traitant le GPS. L'adoption de ces techniques par un milieu scientifique débordant largement leur milieu d'origine a entraîné la généralisation des études s'appuyant sur des mesures multidisciplinaires.

De son côté, depuis quelques années, la gravimétrie se trouve dans une phase d'évolution rapide. Le champ de pesanteur terrestre et ses variations à différentes échelles spatiales et temporelles seront beaucoup mieux connus dans les années à venir grâce aux progrès spectaculaires de l'instrumentation terrestre et spatiale. Entraînées par cette évolution, les méthodes de traitement, d'analyse et de modélisation sont en plein bouleversement. Ces progrès ouvrent la voie aux études locales dans les domaines de la volcanologie, de la surveillance des zones tectoniquement actives, de l'hydrologie, comme aux études globales pour la compréhension de la dynamique interne du globe ou la caractérisation des mouvements verticaux de la croûte terrestre.

En 1991, un rapport de la Section de Géodésie du CNFGG, « Géodésie en France », signalait déjà la contradiction entre une communauté scientifique pleine de vitalité, se développant à la frontière de plusieurs disciplines, et la pauvreté de la réponse des institutions, incapables d'investir dans un domaine nouveau mais déjà en pleine expansion : enseignements de géodésie éparpillés et presque uniquement liés aux besoins d'organismes de production, quasi absence d'enseignement et de recherche à l'Université, tout cela couronné par un recrutement de disette. Aujourd'hui, la communauté des géophysiciens utilisateurs de la géodésie spatiale pour les études de géodynamique en France est dangereusement réduite, aussi bien en regard d'autres disciplines que comparée aux pays voisins (voir par exemple la "force de frappe" d'organismes tels que le GFZ en Allemagne). Elle n'a pas la dimension requise pour exploiter et valoriser scientifiquement la quantité de données sans cesse croissante issues des mesures GPS continues, ou celles des missions spatiales gravimétriques dont le lancement est imminent. A titre d'exemple, on compte actuellement sur les doigts d'une seule main les chercheurs français maîtrisant le traitement de données GPS pour des applications géophysiques nécessitant une précision infra-centimétrique à l'échelle globale. C'est clairement insuffisant. Il est urgent d'afficher des postes de chercheurs fléchés sur les thématiques géodésiques de précision pour les applications géophysiques.

Le but de ce document est de rappeler les spécificités de la recherche s'appuyant sur l'observation géodynamique, de mettre en lumière les résultats obtenus et d'émettre une série de recommandations visant à renforcer et pérenniser les dispositifs d'observation dans lesquels la France a des responsabilités.

## 2. Les enjeux scientifiques de l'observation géodynamique

Nous rappelons ci-après les principaux enjeux de la recherche s'appuyant sur des observations géodynamiques globales permanentes par les techniques de géodésie spatiale (VLBI, GPS, SLR, DORIS), gravimétrie, marégraphie et autres. Ces enjeux s'articulent autour de quelques grands thèmes : mouvements et déformations de la lithosphère, effets dynamiques des enveloppes fluides (océan, atmosphère), détermination du champ de pesanteur terrestre et du niveau des mers, rotation de la Terre, référentiels d'espace et de temps.

### 2.1. Mouvements et déformations de la lithosphère

#### 2.1.1. Les mouvements horizontaux .

Il s'agit de la mesure fine des déplacements des plaques lithosphériques et de leurs déformations. Cet objectif est fondamental car ces mesures permettent de contraindre les modèles physiques de déformation de la Terre à différentes échelles, depuis celle de la géodynamique globale jusqu'à celle d'un séisme ou d'un volcan individuel par exemple. Parmi les enjeux au cœur du débat scientifique actuel, on peut citer :

- Validation des modèles cinématiques géologiques : les mesures géodésiques permettent des comparaisons de détail avec les modèles dérivés d'observations géologiques. On commence ainsi, par exemple, à mettre en évidence des variations temporelles récentes du mouvement des plaques lithosphériques.
- Vers un modèle de déformation global : grâce à la géodésie spatiale, on peut aujourd'hui dépasser la description de la cinématique lithosphérique en termes de rotation de plaques rigides, en intégrant les déformations inter- et intra-plaques, ainsi que leurs variations temporelles (voir l'exemple de l'Europe, figure 1).

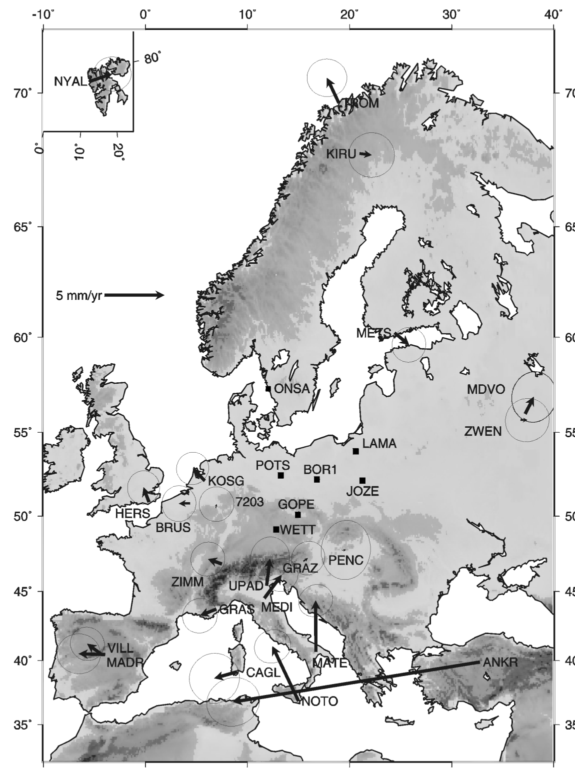


Fig. 1 - Vitesses de station (ITRF97) dans un référentiel « Europe stable ».

- Cycle sismique et interactions entre failles actives : les mesures géodésiques permettent des avancées considérables dans la compréhension du cycle mise en charge/décharge de la croûte terrestre lié aux séismes en permettant de valider, à partir de données, des modèles de déformation élastiques et viscoélastiques.
- Suivi des stations de référence : les études géophysiques des déformations lithosphériques basées sur des mesures de géodésie spatiale dépendent de la connaissance des coordonnées et vitesses de déplacement des stations géodésiques servant à définir les référentiels géodésiques. Les stations des réseaux mondiaux utilisés pour cet objectif requièrent le même type de suivi pluridisciplinaire que pour l'étude des mouvements locaux. Ce sont d'ailleurs en partie les mêmes stations qui servent aux différentes études.

**2.1.2. Les mouvements verticaux.**

L'étude des mouvements verticaux est plus difficile que celle des mouvements horizontaux, car leur amplitude est généralement inférieure d'un ou plusieurs ordres de grandeur. Elle est aussi plus complexe car, plus encore que l'étude des mouvements horizontaux, elle doit faire intervenir l'ensemble du milieu physique local et régional – terre solide, océan et eaux souterraines, atmosphère (voir ci-dessous). Les mouvements verticaux impliquent des phénomènes ayant différentes échelles temporelles, de quelques minutes à plusieurs siècles. Parmi les questions scientifiques dépendant de la connaissance des mouvements verticaux, on peut citer la caractérisation des variations actuelles du niveau de la mer, qui nécessite un ensemble de mesures complémentaires allant de la marégraphie à la géodésie spatiale en passant par la gravimétrie absolue. Par ailleurs, la détermination des géoïdes locaux à haute résolution est indispensable pour les études sur les références verticales et le niveau de la mer.

A côté des techniques de positionnement, la ***gravimétrie*** intervient dans l'étude des mouvements et des déformation de la lithosphère. Elle couvre une gamme de fréquences très large, allant de la seconde à des périodes supérieures à l'année (mouvement du pôle et termes séculaires). La figure 2 donne schématiquement un exemple des phénomènes qui peuvent être étudiés par l'observation précise des variations temporelles de gravité.

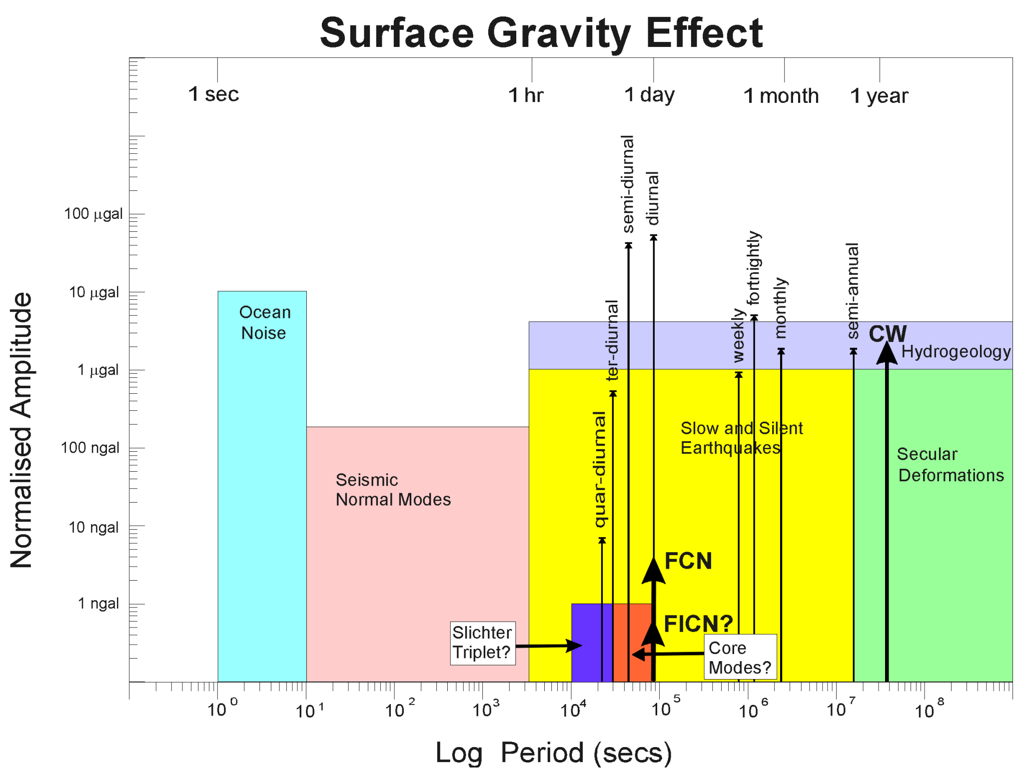


Fig. 2 – Les phénomènes géophysiques affectant la gravité en surface

### 2.2. Effets dynamiques des enveloppes fluides (océan, atmosphère)

Le traitement de données de géodésie spatiale ou de gravimétrie doit tenir compte de paramètres atmosphériques et océaniques locaux et régionaux, et inversement, la compréhension des déplacements sub-centimétriques des stations d'observation sous l'action de ces couches fluides exige d'en posséder une connaissance à la fois théorique et pratique. L'interprétation pertinente des variations globales du niveau des mers mesurées par altimétrie spatiale ou par les marégraphes requiert une interaction étroite avec la géodésie spatiale. Dans tous les cas, le contexte géophysique de chaque station d'observation est un élément essentiel aux études.

#### 2.2.1. Les surcharges.

Les effets de surcharge sont actuellement au cœur du débat scientifique en géophysique et en géodésie car ils sont le reflet de processus de surface complexes, comme la circulation globale des couches fluides et les interactions atmosphère-hydrosphère-lithosphère. De plus leur modélisation est nécessaire dans le cadre des études de déformation crustale pour "nettoyer" le signal mesure de ces effets et permettre ainsi d'obtenir des informations sur les déformations séculaires de la planète.

Les phénomènes de surcharge résultent des déformations élastiques et de la redistribution des masses à l'intérieur de la Terre, induites par des variations spatio-temporelles des masses océaniques, atmosphériques, ou des eaux continentales. La surface terrestre réagit à ces excitations en se déformant avec un impact plus important sur les déformations verticales que sur les horizontales(d'un facteur de l'ordre de 3), et à moyennes et grandes longueurs d'ondes (quelques centaines à quelques milliers de km). L'amplitude des effets de surcharge est de l'ordre de quelques millimètres à quelques centimètres. Elle dépend de la localisation de la station et présente une variabilité principalement diurne et saisonnière

La modélisation des effets de surcharge est possible à condition de disposer d'une part d'un cadre théorique et, d'autre part, de modèles de répartition des charges (fondés sur la théorie ou sur des mesures) permettant de quantifier les phénomènes à l'origine des perturbations. Le cadre théorique est, en général, bien établi : le comportement de la croûte terrestre étant supposé purement élastique, sa réponse à l'action extérieure est calculée par convolution avec la fonction numérique décrivant le phénomène agissant. Or, ces phénomènes sont difficiles à caractériser. Les effets concernant essentiellement des harmoniques degrés inférieurs à environ 40, il est nécessaire de connaître les champs de pression, marée océanique, ou de distribution des eaux continentales à l'échelle globale et en continu dans le temps. Cette description n'étant généralement pas possible par des mesures directes, on a recours à des modèles globaux de ces phénomènes, modèles qui ne sont ni uniques, ni complètement validés, dans l'état actuel de nos connaissances. Les mesures géodésiques de surcharge doivent donc aussi permettre de valider ces modèles globaux. La figure 3 montre, à titre d'exemple, la surcharge observée par le gravimètre absolu lors de la campagne « Bretagne » de 1998 ainsi qu'une surcharge prédite à partir d'un modèle de marée (voir § 4.3.3).

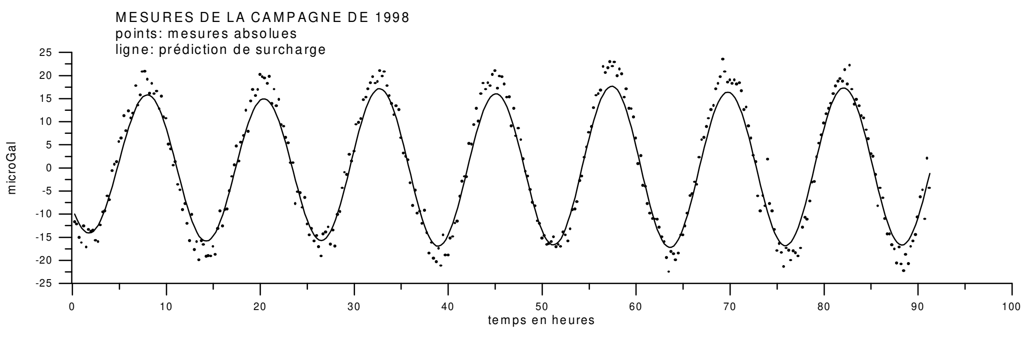


Fig. 3 – Mesure de la variation diurne de gravité attribuée à la surcharge océanique (points) et variation prédite d'après le modèle (ligne continue).

### 2.2.2. La vapeur d'eau atmosphérique.

La vapeur d'eau atmosphérique est le principal facteur limitant l'exactitude des systèmes de positionnement, en particulier pour la composante verticale, avec laquelle son effet est fortement corrélé dans les analyses. La prise en compte des erreurs liées à la propagation troposphérique est donc fondamentale pour améliorer l'exactitude des altitudes déterminées par les méthodes du positionnement géodésique. La réfractivité atmosphérique, qui induit des retards de propagation des signaux utilisés par la plupart des techniques de positionnement, dépend d'une composante humide (vapeur d'eau non en équilibre hydrostatique) très variable dans le temps et dans l'espace et difficile à mesurer directement comme à modéliser. Il a été démontré que la détermination du contenu en vapeur d'eau intégré par inversion des données d'observation GPS atteint des précisions comparables à celles de radiosondages (voir figure 4) et de radiomètres. Les observations permanentes permettent donc d'estimer directement la quantité de vapeur d'eau atmosphérique à partir des observables mesurées et donc de suivre l'évolution temporelle et spatiale de ce paramètre. Il y a là un enjeu fondamental car la vapeur d'eau joue un rôle crucial dans la dynamique météorologique et climatique, en y contrôlant en grande partie les transferts de matière et d'énergie. La connaissance de sa distribution, dans l'espace et dans le temps, est fondamentale pour la réalisation de prévisions météorologiques fiables. La vapeur d'eau est aussi un des gaz participant à l'effet de serre, la connaissance de son évolution à long terme est donc fondamentale pour comprendre les mécanismes du réchauffement global.

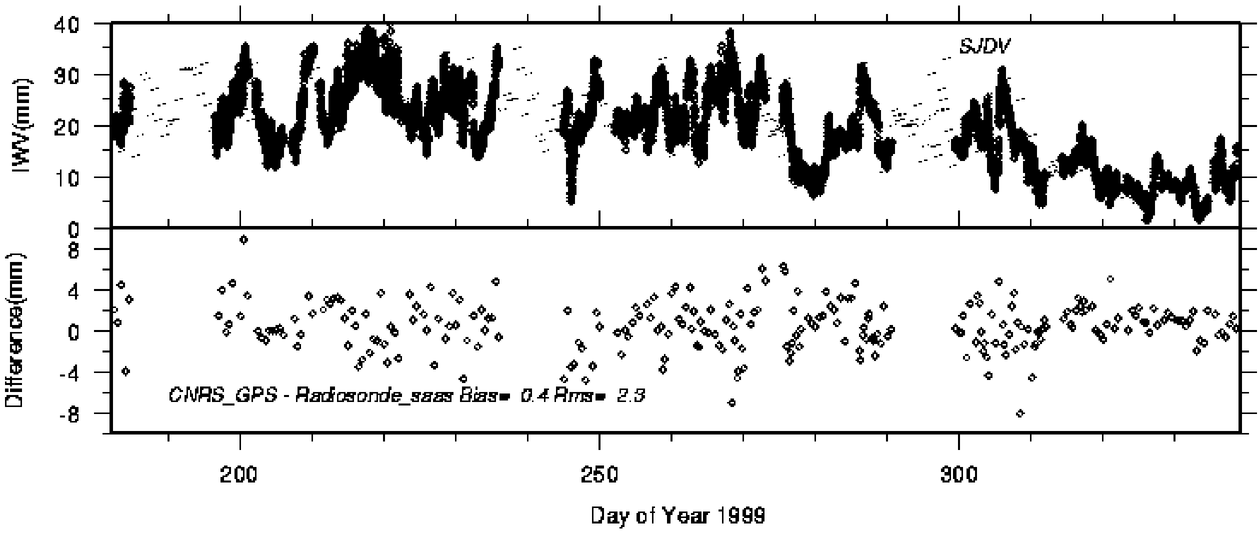


Figure 4. Variations de la vapeur d'eau troposphérique mesurées par GPS sur le site permanent de St Jean des Vignes, près de Lyon (une mesure toutes les 15 minutes), et une comparaison avec des mesures indépendantes réalisées par radiosondages (deux lancés par jour). L'accord entre les deux types de mesures est excellent, avec un biais inférieur à 1 kg/m2 et un résidu moyen de l'ordre de 2 kg/m2, ce qui valide la capacité du GPS à mesurer la vapeur d'eau troposphérique. On constate que le GPS détecte aussi une diminution générale de la quantité de vapeur d'eau entre les mois d'été, classiquement plus humides dans cette région, et ceux d'hiver.

## 2.3. Détermination du champ de pesanteur terrestre et du niveau des mers

### 2.3.1 Champ de pesanteur terrestre

La structure spatiale du champ de pesanteur témoigne des irrégularités de la structure interne du globe à différentes échelles de profondeurs ; la finesse d'interprétation est donc directement fonction de la résolution des modèles de champ disponibles, mais aussi de leur exactitude. D'un autre coté, les variations temporelles du champ de pesanteur sont directement liées aux redistributions de masses résultant des interactions entre la terre solide, les océans et l'atmosphère. Outre les applications géophysiques à caractère global, les modèles de champ de pesanteur à haute résolution spatio-temporelle constituent un maillon essentiel dans l'interprétation des mesures fournies par l'altimétrie spatiale. Cela est particulièrement important pour la connaissance précise de la circulation océanique et de sa variabilité.

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. Le modèle GRIM5 (2000), qui est issu d'une longue coopération entre le Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS, Grasse, Paris, Toulouse) et le GeoForschungZentrum (GFZ, Potsdam), est fondé 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 laser de précision centimétrique depuis 10 à 15 ans, a permis une amélioration sensible de la connaissance des grandes longueurs d'onde du géoïde ainsi que des termes de marées océaniques.

Les tentatives pour accéder à des longueurs d'ondes plus courtes du champ de gravité sont entravées par la faiblesse du réseau laser vis-à-vis des trajectoires d'altitude basse (par ex. le satellite GFZ-1 à 450 km, dont la couverture par la télémétrie n'atteint que quelques pour-cent), et par la mauvaise connaissance du freinage atmosphérique, qui est limitée par la difficulté à modéliser le comportement non stationnaire de la haute atmosphère terrestre. La mission CHAMP (à 470 km, mis en orbite en juillet 2000) et la future mission GRACE (à 450 km, lancement prévu en 2003), en délivrant des mesures accélérométriques avec un positionnement par GPS et par laser, apporteront une connaissance du champ de gravité qui sera améliorée d'un facteur 10 à la longueur d'onde de 1000 km. La qualité des hauteurs du géoïde devrait ainsi passer de 40 à 10 cm en moyenne sur le globe.

Dans le domaine de la géodynamique, l'étude du mouvement de LAGEOS, observé depuis plus de 20 ans en continu par la télémétrie laser, a pris une place considérable. Aussi, parallèlement à l'amélioration des modèles gravitationnels statiques et maréaux, des travaux ont été réalisés pour améliorer la modélisation des forces non-gravitationnelles qui agissent sur ce satellite, en particulier celles liées à la ré-émission thermique. En parallèle, l'analyse d'orbites à long terme a progressé, rendant possible la détermination des variations temporelles du champ, séculaires et à très longues périodes. Ceci est un point marquant pour l'avenir, car les missions de type GRACE ou GOCE (horizon 2004) ne pourront pas déterminer les caractéristiques du champ aux grandes longueurs d'ondes spatiales avec une très bonne exactitude, leur domaine de prédilection étant plutôt les structures à petite échelle et leur variabilité.

**2.3.2. Etude du niveau des mers**

La détermination de l'élévation globale du niveau de la mer, question essentielle dans le cadre de l'étude des changements climatiques globaux, est possible soit par l'analyse des données marégraphiques, soit par l'utilisation de l'altimétrie satellitaire. Les nombreux travaux déjà menés à partir des données des différents marégraphes existants, et qui indiquent une élévation du niveau de la mer de l'ordre de 2 mm/an, souffrent de deux principales limitations : d'une part, la répartition des marégraphes est très inégale malgré le développement du réseau international GLOSS et, d'autre part, la mesure marégraphique reste une mesure relative du niveau de la mer car l'instrument subit les mouvements verticaux de la croûte terrestre. Dans certains rares cas ces mouvements sont modélisés et donc connus, par le biais des modèles de rebond post-glaciaire, mais dans la plupart des cas, outre qu'on ne peut pas prédire ces mouvements, on ne sait pas non plus s'ils sont stables dans le temps. Pour corriger ces effets, et obtenir ainsi une mesure absolue de la variation du niveau de la mer, il faut faire appel aux techniques de géodésie spatiale qui donnent accès, pour les plus précises d'entre elles, au déplacement vertical de la croûte. Les techniques GPS et DORIS, qui disposent toutes deux de réseaux de stations globaux, sont utilisées à cette fin depuis environ cinq ans.

Les résultats de la mission d'océanographie spatiale TOPEX/Poséidon (lancée en 1992) sont sans précédent dans les communautés océanographique, géophysique et géodésique. La préparation de la mission d'océanographie de nouvelle génération Jason-1 a suscité d'importants travaux dans la communauté. La contribution scientifique des équipes du CNES, du CERGA, de l'Institut Géographique National (IGN) et du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)) porte notamment sur l'adoption et la proposition de nouveaux standards géodésiques, sur le calcul d'un repère de référence terrestre international DORIS/laser, et sur l'élaboration d'une nouvelle série de modèles de champ de gravité à partir des données de l'accélérométrie spatiale. De plus, la communauté a eu le souci de développer un site géodésique fondamental en Corse, afin d'y réaliser l'étalonnage des altimètres spatiaux.

Toutes les avancées sur la détermination du champ de gravité et la modélisation d'orbite, qui sont utilisées en bonne partie pour la détermination d'orbite des satellites océanographiques, sont vérifiables à travers le succès de l'assimilation des données dans les nouveaux modèles. La qualité croissante de l'orbite du satellite TOPEX/Poséidon entre 1992 et 1996, jusqu'à 2-3 cm aujourd'hui, et l'amélioration induite de l'orbite des satellites ERS, 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 TOPEX/Poséidon, sans oublier le système allemand PRARE sur ERS-2.

### 2.4. Référentiels d'espace et de temps, rotation de la Terre

La question des référentiels d'espace et de temps est intimement liée aux activités à finalité géodynamique. Ainsi, la maintenance du repère de référence terrestre international s'appuie sur des analyses globales faisant intervenir le même type d'observations et d'analyses que les études de déformation de la croûte. En retour, ces dernières permettent de contrôler et d'enrichir le repère. La maintenance du repère de référence céleste international repose sur le VLBI, les même observations fournissant aussi une contribution fondamentale à la mesure de l'orientation de la Terre et à la maintenance du repère de référence terrestre. L'échelle du Temps Atomique International, référence universelle indispensable à l'analyse correcte des observations dans le cadre de la relativité générale, est maintenue grâce à des comparaisons d'horloges à distance intercontinentale faisant appel aux techniques de la géodésie spatiale utilisée pour les études de géodynamique et la maintenance du repère de référence terrestre.

#### 2.4.1. Surveillance et extension du référentiel terrestre

L'ITRF (International Terrestrial Reference Frame, voir http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF) matérialise le système de référence terrestre international (ITRS). Il est employé universellement dans les applications scientifiques et techniques, ce qui entraîne une obligation permanente d'amélioration, de densification et de liaison avec les systèmes spatiaux pour répondre aux besoins des utilisateurs. En géodynamique, il est le référentiel sous-jacent dans les études de déformation crustales. Sa maintenance et sa densification reposent sur les observations des stations mentionnées précédemment. La requête spécifique, indispensable à l'unification des résultats des différentes techniques d'observation, est l'existence de sites bien répartis sur la Terre, dans lesquels plusieurs de ces techniques sont exploitées en parallèle. Un aspect essentiel de l'exactitude de l'ITRF résulte de l'utilisation conjointe de l'ensemble des techniques de géodésie spatiale. Ainsi chaque technique apporte à l'ensemble ses point forts: la géométrie globale du réseau (DORIS), le rattachement au centre des masses de la Terre (laser), la densification (GPS), l'échelle du repère (laser, VLBI), la liaison au référentiel inertiel (VLBI). La qualité de cette conjonction d'excellences repose entièrement sur le sous-réseau des sites équipés de plusieurs techniques. Le caractère exhaustif de l'ITRF en fait par ailleurs un outil exceptionnel d'investigation des mouvements actuels de l'ensemble des plaques tectoniques (voir figures 5 et 6).

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), requièrent 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, 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 sur des sites proches de l'océan et équipés de marégraphes. Car il est fondamental pour l'étude du niveau moyen des mers de distinguer clairement la part de soulèvement ou de subsidence de la croûte par rapport à celui du niveau des eaux.

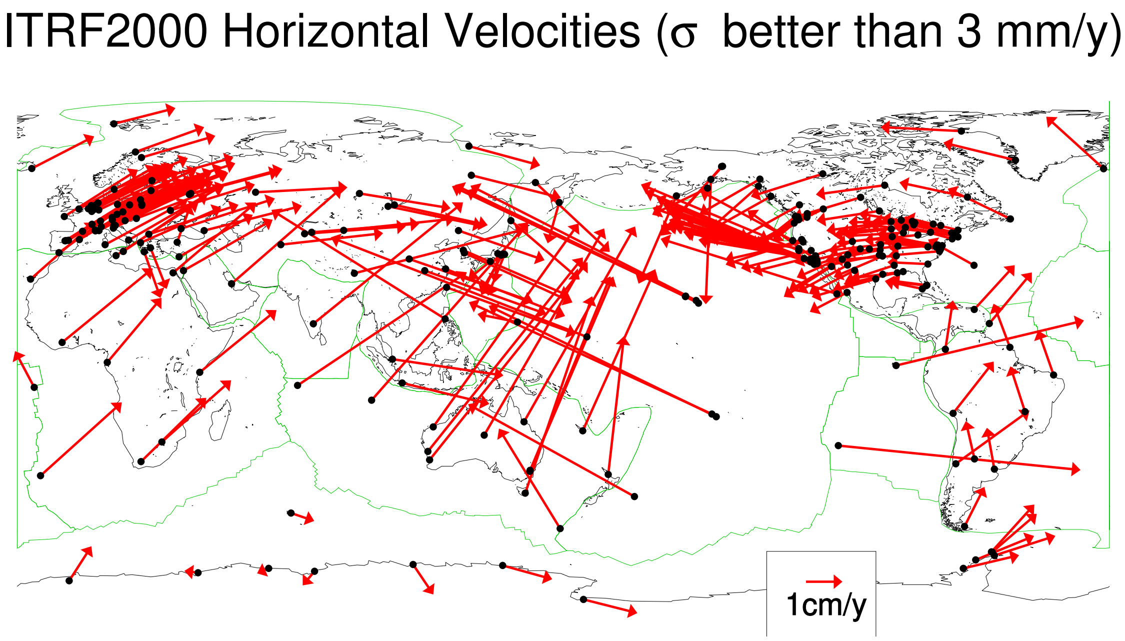


Fig. 5 – Le champ de vitesses horizontales du référentiel international ITRF2000

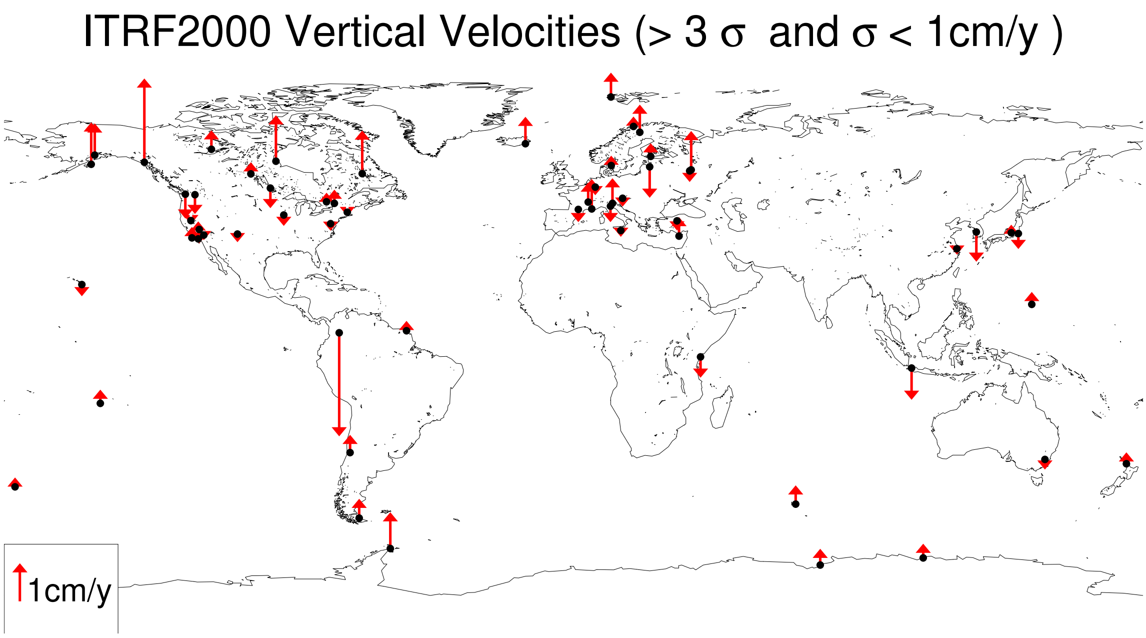


Fig. 6 – Le champ de vitesses verticales du référentiel international ITRF2000

**2.4.2. Maintenance du référentiel céleste international (ICRF).**

La maintenance de l'ICRF (http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc), référentiel qui matérialise le système de référence céleste international (ICRS) s'appuie sur l'observation répétée par le réseau VLBI mondial de plusieurs centaines de radiosources compactes extragalactiques. C'est le maintien permanent de la liaison à l'ICRF par ces observations qui rend possible l'unification de toutes les mesures globales de géodésie spatiale.

**2.4.3. Transfert de temps par techniques spatiales**

Le progrès continu de la stabilité des étalons impose la conception et le développement de méthodes de comparaison à distance permettant de transporter cette stabilité à des milliers de kilomètres. Le développement de nouvelles méthodes de transfert de temps est un sujet de recherche permanent. On peut citer actuellement le transfert de Temps par Lien Laser (T2L2) : tirs lasers à partir de deux stations terrestres sur un récepteur embarqué. La réalisation de l'expérience, qui fait appel à la géodésie spatiale, implique aussi une physique très fine.

**2.4.4. Surveillance de la rotation terrestre.**

L'orientation de la Terre est la liaison permanente entre les repères de référence terrestre et céleste décrits ci-dessus. Le suivi de ses irrégularités permet d'établir des séries temporelles de mesures longues et denses nécessaires à la compréhension des phénomènes dynamiques globaux impliqués. La mesure permanente des irrégularités de la rotation et des mouvements du centre de gravité ouvre un champ important de recherche pour la modélisation d'un grand nombre d'influences dynamiques ou statiques des couches qui constituent la planète, depuis la graine solide jusqu'à l'atmosphère.

*

*   *

Pour conclure ce chapitre, il convient d'insister sur l'interdépendance étroite des enjeux scientifiques d'ordres géophysique et géodésique mentionnés ci-dessus. Par exemple, une meilleure compréhension du rôle des fluides environnant les stations de mesures est fondamentale afin de pouvoir extraire un signal tectonique séculaire des mesures de positionnement géodésique. Autre exemple, la prise en compte des déformations crustales à toutes les échelles spatiales et temporelles est fondamentale pour la réalisation de référentiels géodésiques exacts.

## 3. Les observations géodynamiques et leur analyse

On entend par observations géodynamiques un ensemble de mesures dont l'analyse concourt à l'un ou l'autre des objectifs rappelés ci-dessus. L'analyse de premier niveau de ces mesures, en général très élaborée et coûteuse en moyens de calcul, est un élément fondamental du processus. On rappelle ci-après les caractéristiques principales du fonctionnement, telles que l'organisation des mesures et de leur analyse, les principaux résultats, les contributions nationales et internationales, les délais, etc.

### 3.1. Géodésie spatiale

La communauté française participe largement aux activités de recherche et d'exploitation des données des missions de géodésie spatiale, et au développement d'instruments, en obtenant des résultats reconnus et utilisés pour des interprétations en Sciences de la Terre, en apportant une technologie, mais aussi par une présence forte dans plusieurs campagnes et services internationaux. En effet, 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 comparer et, finalement, relier entre eux les repères propres à chacune des techniques. C'est le rôle de l'IERS (International Earth Rotation Service, http://www.iers.org), 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.

La communauté française apporte ses compétences à la coopération européenne et internationale au sein de plusieurs organisations et services : le CSTG (Coordination of Space Techniques for Geodesy), l'IERS, l'IGS (International GPS Service, http://igscb.jpl.nasa.gov), l'IVS (International VLBI Service for geodesy and astrometry, http://ivscc.gsfc.nasa.gov), l'ILRS (International Laser Ranging Service, http://ilrs.gsfc.nasa.gov). Elle a notamment mis en place des sites nouveaux d'étalonnage des altimètres radar et de surveillance géodésique, respectivement en Corse, à Brest et à Tahiti. Enfin, *last but not least*, elle a installé et fait fonctionner le réseau orbitographique DORIS.

Les techniques spatiales utilisées par la géodésie sont décrites ci-dessous.

#### 3.1.1. DORIS

Le système DORIS (voir http://ids.cls.fr) est un système français, développé par le CNES en collaboration avec l'IGN et le GRGS pour la détermination précise de l'orbite de satellites bas, et en vue de nombreuses applications en orbitographie, 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 au delà de sa durée de vie nominale). Depuis cette date, d'autres satellites ont embarqué des récepteurs DORIS : TOPEX/Poséidon (T/P) en 1992, SPOT-3 de 1993 à 1996, et SPOT-4 en 1998. Plusieurs autres satellites sont prévus dans un avenir proche, ENVISAT et Jason-1 en 2001, puis SPOT-5. Le système DORIS est un système ascendant : un réseau de balises permanentes émettent depuis le sol des signaux omnidirectionnels qui sont captés et stockés à bord du satellite, puis déchargés vers le centre de données au moment de son survol.

Plusieurs groupes français, 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 précisions de positionnement de l'ordre de 1-2 cm à partir de plusieurs jours d'observations. Une des limitations actuelles est le faible nombre de satellites équipés de DORIS, mais cela va changer en 2001 avec le lancement de Jason-1 et EnviSat. Sur plusieurs années, il a été possible de déterminer les vitesses de déplacement de ces stations, dues au phénomène de la tectonique des plaques. Plusieurs contributions majeures ont été publiées sur ce sujet par les équipes françaises. De plus, les calculs de position de stations du réseau peuvent être obtenus de manière rapide, sous forme de séries temporelles mensuelle ou hebdomadaires.

### 3.1.2. GPS et GLONASS

Le système GPS est constitué d'une constellation de 24 satellites actifs placés à une altitude de 20 000 km, constellation maintenue par le département de la défense des Etats-Unis. Les satellites émettent des signaux codés, qui sont captés par des stations de mesure attachées aux objets matériels dont on veut connaître la position : satellite, véhicule terrestre et, dans le cas qui nous intéresse, stations fixes consacrées aux études de déformation de la croûte terrestre. L'analyse des observations géodynamiques s'effectue après collecte et stockage des données dans des centres de données mondiaux.

Le GPS présente un intérêt important pour l'IERS, qui utilise massivement ses résultats de localisation géodésique des stations pour la maintenance de l'ITRF et ses déterminations précises de la rotation terrestre. Le coût d'installation, de maintenance et d'exploitation du segment terrestre du GPS le rendent très compétitif. De plus l'IGN, en charge de l'installation et de la maintenance des balises du réseau français a pris soin de répartir les stations de manière relativement homogène sur le territoire tout en essayant de favoriser les co-localisations avec d'autres systèmes existants de géodésie spatiale.

Le GPS a aussi des applications pour la détermination de certains paramètres de l'atmosphère terrestre. Le contenu électronique de l'ionosphère peut être cartographié grâce à l'existence du réseau permanent de l'IGS. Le système GPS est capable d'estimer, au niveau centimétrique, le retard troposhérique lié au pourcentage d'humidité de l'atmosphère au voisinage de la station, permettant ainsi des applications en météorologie ou en climatologie.

En plus des systèmes DORIS et GPS, de nombreux groupes français se sont intéressés à l'utilisation du système militaire russe de navigation GLONASS. Ce système est très proche dans ses principes du système GPS. Une vingtaine de satellites placés sur des orbites, à des altitudes d'environ 20 000 km, émettent des signaux codés qui peuvent servir à localiser des mobiles au sol à une précision de quelques mètres. Il est aussi possible de l'utiliser, comme pour le système GPS, pour des applications précises liées à la géodésie et à la géophysique. Bien que le système GLONASS ne soit toujours pas opérationnel (tous les satellites ne sont pas encore lancés) et que sa pérennité ne soit pas totalement assurée, certains constructeurs proposent déjà des récepteurs mixtes GPS/GLONASS. L'intérêt d'utiliser conjointement les mesures de ces deux systèmes de navigation est multiple, tant pour les applications de navigation que pour les applications géodésiques de précision : amélioration en terme de disponibilité, de fiabilité et d'exactitude. Afin de disposer d'un jeu de données test obtenu pour un réseau mondial d'observations, une campagne internationale GLONASS a été lancée en 1998, suite aux recommandations de l'Association Internationale de Géodésie à Rio en 1997. Les résultats de cette campagne montrent que des orbites précises ont pu être améliorées d'un facteur 10 par rapport aux orbites militaires radiodiffusées, laissant espérer de nombreuses applications géodésiques et géophysiques dans un avenir proche.

### 3.1.3. Télémétrie par laser

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-réflecteurs, d'un coût modeste, qui sont placés à bord de satellites ou qui, dans le cas de la Lune, ont été déposés par les missions Apollo et Luna entre 1969 et 1973. En revanche, la technique est tributaire de la météorologie et de la présence d'un personnel spécialisé pour la mettre en œuvre au sol. La situation est un peu opposée à celle des techniques radio-électriques citées plus haut, qui sont de type tous temps, très faciles d'utilisation sur le terrain et dont le coût majeur se trouve dans la technologie embarquée à bord des satellites. La télémétrie laser utilise des cibles spatiales ayant une durée de vie quasi infinie.

La télémétrie laser a beaucoup progressé ces dernières années en France et dans le réseau mondial. Dans ce contexte, la communauté française a participé à un renforcement de la coopération européenne pour comparer les mesures et les résultats entre eux. Elle participe aussi à un service international qui vient d'être mis sur pied, l'ILRS, qui s'est inspiré de ce qui se fait avec succès pour le GPS. Ce service 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, et des produits qui en découlent. Les centres d'analyse effectuent ainsi des contrôles de qualité des mesures dans des délais beaucoup plus courts qu'auparavant. La tenue régulière de réunions techniques et la publication de comptes rendus et de recommandations renforcent l'efficacité de cet effort commun international.

### 3.1.4. VLBI

Le VLBI (interférométrie à très longue base en ondes radio) repose sur l'observation du signal électromagnétique émis par des objets astronomiques extragalactiques (quasars pour la plupart) par une paire d'antennes. Les signaux recueillis sont recombinés ultérieurement dans un centre de calcul spécialisé (corrélateur). Le réseau international est constitué d'un ensemble d'antennes de diamètre entre 10 et 35 m pour la plupart, utilisées en interférométrie sur des bases de dimension continentale ou intercontinentale. Les sessions d'observation ont une durée de 24 heures. Une session comporte quelques milliers d'observations en bandes S et X, effectuées par cinq à dix stations (15 à 45 bases) sur quelques dizaines de radiosources extragalactiques. Chaque année, ce réseau collecte environ 150 000 observations sur 200 bases différentes.

Parmi les différentes techniques de la géodésie spatiale, le VLBI est la seule à être en mesure de déterminer l'orientation instantanée de la Terre dans l'espace inertiel. Il fournit aux techniques satellitaires les références que sont le Temps universel et les angles de précession-nutation. Il a une capacité inégalée de haute résolution temporelle sans perte d'exactitude. Les résultats principaux des analyses sont des séries de paramètres de la rotation de la Terre initialisées en 1980, et des référentiels terrestres et célestes, sous forme de résultats globaux (positions et vitesses de stations, coordonnées de radiosources extragalactiques), ou sous forme de séries temporelles de coordonnées des objets estimées pour chaque session.

### 3.1.5. Métrologie du temps

Nous prendrons ici l'exemple du CERGA, un département de l'Observatoire de la Côte d'Azur qui abrite depuis 25 ans sur le site d'observation du Plateau de Calern un des trois centres astronomiques français participant à la métrologie du temps et des fréquences. Les deux autres sont le Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences à Paris et l'Observatoire de Besançon. Quatre activités du CERGA relèvent du thème métrologie du temps :

- Maintien d'une station horaire de qualité et participation au TAF/TAI avec comparaison d'horloges au moyen du GPS.
- Diffusion d'une échelle de temps uniforme et de fréquences étalonnées à l'ensemble des installations astronomiques du Plateau de Calern, avec des exigences de permanence et de stabilité pour la télémétrie laser.
- Transfert de temps aller-retour par voie radioélectrique au moyen des satellites de télécommunications (technique dite *Two Ways*)
- Transfert de temps par lien laser (T2L2) dans le cadre du projet ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) qui devrait être embarqué sur la station spatiale internationale en 2005.

Le premier secteur relève d'un aspect de service au niveau français et requiert une très grande continuité dans la comparaison des horloges, la réception et l'émission des signaux de comparaisons. Le deuxième aspect est propre à l'organisation interne de l'Observatoire, mais il convient de noter que les expériences de télémétrie laser, en particulier sur la Lune, nécessitent une stabilité de l'échelle de temps sur quelques secondes de l'ordre de $10^{-12}$, et ceci en permanence.

La technique Two-Ways n'est pas nouvelle : émission et réception de signaux dans la bande K simultanément à partir d'une paire de station qui utilisent la voie montante et descendante. L'intérêt de cette méthode, si elle peut atteindre un stade opérationnel fiable, sera de fournir au BIPM des comparaison d'horloges participant au TAI de façon indépendante des comparaisons par GPS.

L'expérience T2L2 est basée sur la propagation d'impulsions lumineuses très brèves entre des horloges au sol et une horloge placée en orbite autour de la Terre. Une station de télémétrie laser tire en direction du satellite en enregistrant l'instant de départ dans l'échelle du laboratoire. L'équipement T2L2 placé à bord du satellite détecte et réfléchit l'impulsion lumineuse, et enregistre la date d'arrivée dans l'échelle de l'horloge embarquée. Le signal lumineux de retour est de nouveau daté au sol. Muni de ces trois dates et de modèles de propagation on peut en déduire le décalage entre l'horloge sol et l'horloge bord. Une observation continue permet de comparer la marche des deux oscillateurs et d'étudier la stabilité et l'exactitude des horloges. Des observations coordonnées entre deux sites permettent de comparer deux horloges distantes de plusieurs milliers de kilomètres. Cette technique optique doit permettre des transferts de temps avec une exactitude de 60 ps et une stabilité de $10^{-16}$ sur 24 heures.

**3.1.6. Les analyses de données de géodésie spatiale**

Un nombre important de centres d'analyse des différentes techniques de la géodésie spatiale contribuent aux services internationaux chargés de la maintenance des repères de référence ainsi que de la surveillance de la rotation de la Terre et de ses déformations, ou aux entreprises internationales de calcul du champ de pesanteur et d'océanographie spatiale. Certains laboratoires développent et utilisent des logiciels originaux, tels que les suivants :

- GINS — DORIS, télémétrie laser, GPS — Toulouse, Grasse, Paris, Strasbourg
- CALTIM — DORIS et télémétrie laser — Grasse
- CANEL/CODIOR — Analyse d'orbites sur de longues périodes — Grasse
- GLORIA — VLBI — Paris
- CAROLL — Télémétrie laser Lune — Paris

D'autres utilisent des logiciels développés par ailleurs (en Suisse ou aux Etats-Unis) pour traiter des données d'observation, surtout GPS :

- BERNESE (GPS) — IGN, LGCA Chambéry, LGTS Montpellier
- GAMIT (GPS) — Géosciences Azur, ENS Paris, IGN, LGIT Grenoble, OMP Toulouse
- GIPSY — Géosciences Azur (GPS), IGN (DORIS)

La variété des logiciels utilisés et la variété des statuts d'utilisation (développement/test/-exploitation) sont propices à la diversité des approches d'analyse et favorisent les contacts internationaux. C'est une richesse à exploiter dans le cadre de la coordination des activités nationales.

Les conséquences, à moyen et long terme, de ces travaux sont et seront importantes dans le rôle et le poids des équipes, des instruments et des sites français au niveau international. Plusieurs exemples peuvent être signalés :

- L'amélioration de la précision de l'instrument laser Lune au niveau millimétrique et la production importante de données de télémétrie, ces dernières années, ont permis et suscité de nombreux travaux scientifiques sur le mouvement de la Lune, la physique fondamentale et l'astrométrie.
- L'étalonnage absolu de l'altimètre radar Jason-1 en 2001 est basée sur la station laser ultra mobile française (unique au monde), dont les performances en précision et en stabilité du biais sont en cours d'amélioration actuellement.
- Le transfert de temps par lien laser - expérience T2L2 -, dont les performances prévues pour le transfert entre 2 horloges au sol sont de l'ordre de 30 picosecondes (ps) pour la précision, 60 ps pour l'exactitude, et 1 ps sur 300 sec pour la stabilité.
- La démonstration de la disponibilité (fiabilité et certainement aussi pérennité) du réseau DORIS devrait à l'avenir être porteuse de projets scientifiques reliés à la géophysique et à l'océanographie, ainsi que d'interactions nouvelles avec l'industrie du spatial.

Par ailleurs, le rôle des équipes françaises dans les travaux internationaux sur l'usage global des techniques de géodésie spatiale et les systèmes de référence est loin d'être négligeable. Les diverses participations sont rappelées ci-dessous.

- Centre de produit ICRF de l'IERS (Observatoire de Paris, http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc) ;
- Centre de produit ITRF de l'IERS (IGN, http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF) ;
- Centre de produit Rotation terrestre de l'IERS (Observatoire de Paris, http://hpiers.obspm.fr/eop-pc) ;
- Centres d'analyse de l'IERS (CNES, Observatoire de Paris, IGN), de l'IVS (Observatoire de Paris, Observatoire de Bordeaux); de l'ILRS (Observatoire de Paris) ;
- Co-responsable du programme GRIM de détermination du champ de potentiel terrestre (CNES).

### 3.2. Gravimétrie

L'étude des ***variations spatiales*** du champ de pesanteur permet de caractériser la structure interne du globe à différentes échelles, d'étudier le comportement mécanique de la lithosphère, de caractériser la mise en place des structures océaniques et autres phénomènes planétaires. Leur connaissance est également fondamentale pour la détermination des géoïdes locaux précis.

Les études des ***variations temporelles*** de la pesanteur relèvent des marées terrestres et de la caractérisation des mouvements de masse et/ou des changements de densité dans le sous-sol. Par exemple, en volcanologie, la gravimétrie peut être utilisée pour détecter des variations temporelles du champ de pesanteur et permet donc, associée à la géodésie, de quantifier les mouvements de masse et les changements de densité dans les structures. L'étude des variations temporelles de la pesanteur contribue également à la quantification des mouvements verticaux.

Depuis quelques années, la gravimétrie est entrée dans une nouvelle phase d'évolution. Le champ de pesanteur terrestre et ses variations à différentes échelles spatiales seront beaucoup mieux connus dans les années à venir grâce au progrès spectaculaires des capteurs terrestres, marins (voire de fond de mer), aéroportés et spatiaux. Plusieurs constructeurs, comme GWR (gravimètres relatifs cryogéniques), MicroG Solutions (gravimètres absolus) ou Scintrex (microgravimètre relatif "automatique", utilisable également en fond de mer), développent depuis quelques années de nouveaux instruments permettant de mesurer les variations de la pesanteur avec des résolution et des précisions croissantes. Les levés aériens se sont généralisés. On s'intéresse à la mesure des éléments du tenseur de gradiométrie du champ de pesanteur au moyen d'accéléromètres (Bell Aerospace : gradiomètre embarquable et aéroportable). À une autre échelle, à la suite des programmes d'altimétrie satellitaire (SEASAT, GEOSAT, TOPEX–Poséidon, ERS), la cartographie globale du champ de pesanteur et de ses variations dans le temps sera réalisée dans le courant de la prochaine décennie, grâce à des missions spatiales en cours (CHAMP) ou décidées (GRACE, GOCE). Parallèlement, les méthodes de géodésie spatiale permettent d'obtenir des modèles numériques de terrain de qualité et un positionnement rapide précis.

Ces progrès ont ouvert la voie de la gravimétrie temporelle à haute résolution, développée par exemple pour la volcanologie et la surveillance des zones tectoniquement actives ou l'hydrologie. Les variations temporelles de la pesanteur sont également un élément fondamental pour la compréhension de la dynamique interne du globe, via les analyses des marées, et pour la caractérisation des mouvements verticaux de la croûte terrestre. Enfin, rappelons que l'interprétation de la gravimétrie précise à haute résolution nécessite la prise en compte de paramètres annexes, par exemple le signal "environnemental" qui peut, lui, dépendre d'une échelle globale.

Parallèlement au progrès rapide de la mesure gravimétrique, les méthodes de traitement et d'analyse sont naturellement en plein bouleversement. Cela concerne par exemple l'analyse combinée de données issues de différents capteurs ayant des résolutions et des précisions très différentes, l'inversion des anomalies, le traitement des séries temporelles.

Plusieurs équipes françaises sont particulièrement actives sur ces différents domaines. Elles sont au CNES, à l'IGN, à l'IRD, à l'IPGP, à l'EOST, dans les Universités de Montpellier, de la Rochelle, etc. Enfin, mentionnons que la communauté nationale apporte un soutien actif au Bureau Gravimétrique International basé à Toulouse (http://bgi.cnes.fr).

### 3.3. Géodésie terrestre et nivellement

La géodésie terrestre a constitué pendant très longtemps l'unique support métrologique des études de déformations. Aujourd'hui encore, pour les déformations à très courte longueur d'onde spatiale, la géodésie terrestre joue un rôle prépondérant. Les techniques concernées sont le nivellement de précision et les techniques de topométrie, qui permettent de détecter des variations locales (sur quelques dizaines à quelques centaines de mètres) avec une résolution de bien meilleure qualité que les techniques de géodésie spatiale. Par exemple, les niveaux automatiques permettent d'atteindre des seuils de précision de 0.1 mm, là où le GPS ne permet d'atteindre que 5 mm au mieux sur des lignes de base de quelques dizaines de mètres. Ces techniques sont aujourd'hui peu utilisées dans des expériences scientifiques et sont plutôt réservées aux études de génie civil. Pourtant, l'analyse des déformations à moyenne longueur d'onde serait avantageusement complétée par l'observation simultanée des courtes longueurs d'onde spatiales, de façon à contrôler la stabilité locale d'un site d'observation. Il est probable que dans l'avenir, une approche conjointe des techniques prévaudra. En ce qui concerne les observatoires géodésiques, la surveillance systématique et continue de la stabilité métrologique du site est essentielle pour garantir une qualité d'observation ultime.

Dans les gammes de longueurs d'onde intéressant la géophysique (100 m à 100 km), si le nivellement apporte une information nettement plus précise que les techniques de géodésie spatiale, sa mise en œuvre est relativement lourde. En effet, pour effectuer un nivellement de qualité scientifique, il est nécessaire de compléter la mesure de dénivelée par la mesure de la gravité.

Pour la réalisation des système d'altitudes, le nivellement demeure l'outil privilégié. Il souffre toutefois de la présence de systématismes dans les très grandes longueurs d'ondes (à l'échelle d'un pays) qui limitent son utilisation. L'analyse de ces systématismes pourrait à terme redonner au nivellement ses lettres de noblesse scientifiques.

### 3.4. Géodésie de fond de mer

La Terre est couverte aux deux tiers par des océans qui masquent le fond de la mer vis à vis des ondes électro-magnétiques utilisées classiquement à terre pour la géodésie. La mesure des déformations actives en milieu sous-marin est un enjeu crucial pour répondre à nombre de questions géodynamiques. Or, de nombreuses zones tectoniquement actives sont situées en milieu sous-marin. Il est donc nécessaire de développer une géodésie de fond de mer. La mesure géodésique de fond de mer associe plusieurs technologies : capteurs de pression couplés à des sondes thermiques et à des gravimètres pour la déformation verticale, mesures acoustiques associées au positionnement par GPS de la bouée de surface pour la déformation horizontale.

Nous présentons ici quelques exemples à des échelles différentes pour illustrer les objectifs poursuivis.

A l'échelle locale, mentionnons les volcans et les failles actives. De plus en plus, on s'aperçoit que les glissements de flancs de volcans sont des phénomènes courants dans la construction volcanique. Ces phénomènes peuvent être catastrophiques, soit en association avec de fortes éruptions (exemple du Mont Saint Helen), soit par les tsunamis qu'ils peuvent générer. Par ailleurs, il existe de nombreuses questions ouvertes concernant les déformations associées aux failles actives en mer (par exemple en Grèce ou en mer de Marmara).

A l'échelle de la plaque tectonique, plusieurs questions scientifiques nécessitent la mesure des déformations en mer: limites de plaques en extension ou en subduction, déformation intra-plaque, ou même mouvement global de la plaque, lorsque celle-ci est totalement immergée. A l'échelle de la planète, l'information sur les mouvements à long terme des fonds sous-marins, associée éventuellement à la mesure des variations du champ de pesanteur en fond de mer, sera un paramètre important dans l'interprétation des futures données satellitaires (variations temporelles du géoïde, etc).

Un objectif à long terme est l'implantation de réseaux géodésiques permanents en fond de mer qui pourront être réoccupés au cours des décennies futures, comme à terre où le suivi de réseaux géodésiques établis parfois depuis plus d'un siècle et apporte des contraintes sur les mouvements à long terme. Cet aspect du projet se situe dans une logique d'observatoire.

Une équipe pluri-laboratoires se met en place pour développer la géodésie de fond de mer en France (http://www.ipgp.jussieu.fr/inst/org/gravi/geofm/). Le CNRS a manifesté son intérêt pour cette thématique en recrutant récemment une chargée de recherche.

### 3.5. Altimétrie satellitaire

Un domaine de recherche important pour l'avenir vise à la compréhension des relations Océans-Atmosphère, grâce à la mesure globale de la redistribution permanente de masses océaniques. La seule source d'observation globale précise est l'altimétrie satellitaire, mise en œuvre sur des durées de l'ordre de 20 ans et accompagnée par le suivi du référentiel terrestre par les systèmes spatiaux comme la télémétrie laser, DORIS et GPS.

Le projet Jason-1 (lancement en 2001, http://www.jason.oceanobs.com), premier satellite de la filière océanographique Jason prévue par le CNES et la NASA, est la continuation d'un processus de surveillance de l'état des mers, engagé en collaboration par les Etats Unis et la France il y a plus de dix ans avec TOPEX/Poséidon, et poursuivi avec succès par la Mission Etendue TOPEX/Poséidon (TPEM). La mission étendue prolongera d'au moins six ans les séries chronologiques de données altimétriques exceptionnellement précises fournies par la mission T/P.

Jason-1 fournira des données de haute précision sur la topographie de la surface des mers, utilisées pour déterminer la circulation globale des océans et son influence sur le climat de la Terre. D'autres objectifs consistent à mesurer et interpréter les changements du niveau de la mer à l'échelle globale et régionale, à enrichir les connaissances sur les marées océaniques à longue période et à observer la hauteur des vagues et la vitesse du vent pour les besoins de la météorologie marine. Les données Jason-1 seront aussi utilisées pour la géodésie, les recherches sur l'environnement côtier et les mers peu profondes, la circulation des mers fermées ou les mesures topographiques des eaux intérieures et des terres. La mission comporte la fourniture de données et de produits en temps quasi réel pour des activités opérationnelles, en météorologie marine et en océanographie, pour mieux prédire les états de mer, la circulation océanique et le climat.

L'étalonnage du radar altimètre embarqué a une importance critique dans toute mission spatiale altimétrique. Sa dérive éventuelle dans le temps, due à un vieillissement de l'électronique, ainsi que la dérive des instruments connexes (comme le radiomètre à vapeur d'eau) sont très préoccupantes pour l'étude de la variation séculaire du niveau des mers. Or, l'expérience de la mission TOPEX/Poséidon montre qu'il est absolument nécessaire de suivre cet étalonnage à un niveau de 1 mm/an sur plusieurs années. La mise en place et le maintien de sites d'étalonnage, comme celui de Corse, expériences géodésiques de niveau centimétrique en absolu, est un élément fondamental dans l'exploitation des missions d'océanographie.

**3.6. Marégraphie et géodésie**

L'observation du niveau de la mer par la marégraphie connaît un regain d'intérêt remarquable depuis une quinzaine d'années. Pour s'en convaincre, et en dehors des arguments très médiatiques du type « écologique », il suffit de regarder le développement des réseaux scientifiques de marégraphie dans le monde comme le réseaux mondial GLOSS, le réseau européen EOSS, le français ROSAME (resp. http://www.pol.ac.uk/psms/programmes/gloss.info.html, http://www.pol.ac.uk/psmsl/eoss/eoss.html, http://www.omp.obs-mip.fr/omp/legos/francais/obs/rosame), ou encore, de considérer les réseaux nationaux. Il convient de remarquer cependant que les nouveaux besoins requièrent une observation géodésique complémentaire pour contrôler la stabilité de la référence des hauteurs d'eau dans un référentiel terrestre mondial. C'est l'objet d'un thème scientifique national dans lequel le GDR AGRET prend une part active. Voir le site du SHOM pour ces activités (http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/maree14.htm).

Dans le même temps le développement de l'altimétrie satellitaire avec les missions TOPEX/Poséidon, ERS-1 et ERS-2 a permis d'accéder à la mesure absolue des variations temporelles du niveau moyen de la mer, avec de plus l'avantage par rapport aux marégraphes de couvrir l'ensemble des océans. Cependant cette technique peut, elle aussi, souffrir de certaines limitations, en grande partie associées aux dérives instrumentales qui doivent donc impérativement être estimées lorsque le satellite est opérationnel. Pour cela il a été démontré dans des études récentes qu'une conjonction de l'ensemble des techniques (marégraphes, altimétrie satellitaire et positionnement spatial GPS/DORIS) est devenue indispensable.

Dans le cadre des missions futures Jason-1 et ENVISAT (lancements prévus avant la fin 2001) cette problématique est plus que jamais d'actualité. La communauté scientifique impliquée dans ces études recommande donc fortement l'équipement du maximum de sites marégraphiques du réseau GLOSS par un, voire plusieurs systèmes de positionnement spatial. Jusqu'à présent le système GPS est apparu pour beaucoup comme la solution idéale. Cependant comme dans tous les problèmes de métrologie fine (ici on cherche à mesurer des mouvements verticaux de l'ordre du mm/an) l'expérience a souvent montré qu'il peut être trompeur de s'appuyer sur un seul système de mesure, surtout lorsque d'autres peuvent fournir la même précision de mesure.

Grâce à l'installation de stations GPS et/ou DORIS au voisinage de plusieurs dizaines de marégraphes dans le monde, on disposera d'une réelle robustesse des moyens de surveillance du niveau de la mer. L'objectif final est de déterminer la variation du niveau moyen de la mer avec une exactitude meilleure que le mm/an.

## 4. L'observation géodynamique en France

Les études de déformation s'appuient sur des services internationaux qui produisent des quantités géodésiques, données de base pour la recherche. Ses services reposent sur des ***réseaux mondiaux permanents*** d'observation et des centres d'analyse de données d'un certain nombre de pays. La France participe aux réseaux d'observation et à l'analyse de données d'un certain nombre de ces services internationaux.

L'observation géodynamique prend aussi la forme de ***réseaux régionaux permanents*** pour la mesure des déplacements, ou de réseaux de répétition (mesure des positions à intervalle de temps régulier), principalement par la technique GPS. L'emprise de ces réseaux va de quelques kilomètres au millier de kilomètres. Une troisième forme de collecte de données d'observation se fait au moyen de ***campagnes***, par exemple dans le cas de la gravimétrie et de l'étalonnage d'altimètres spatiaux. Dans le cas des campagnes comme dans celui des réseaux régionaux, les objectifs peuvent être soit le positionnement géodésique soit l'étude des déformations. La nature commune des mesures et de leur analyse permet souvent un échange de compétences et de données entre les groupes intéressés.

On décrit ci-dessous un certain nombre de programmes soutenus dans divers contextes nationaux et internationaux par un certain nombre de nos établissements de tutelle, en mettant en avant les forces et les manques dans l'organisation et le fonctionnement. Du point de vue de l'organisation, elles peuvent se présenter sous plusieurs formes, chacune étant adaptée aux objectifs de recherche : observatoires multi-techniques, réseaux permanents globaux ou régionaux, campagnes d'observation.

### 4.1. Observatoires géodynamiques multi-techniques

Ces observatoires ont une histoire et des statuts assez différents. Du point de vue de leur activité, ils partagent tout ou partie des caractéristiques énumérées ci-dessous.

Au plan opérationnel :
- l'appartenance à des réseaux internationaux permanents,
- la présence de stations d'observation permanentes de plusieurs techniques de géodésie spatiale (VLBI, GPS, SLR, DORIS),
- un programme de mesures gravimétriques régulières,
- le rattachement de marégraphes(s) voisins appartenant au réseau international GLOSS.

Au plan administratif :
- une infrastructure technique et administrative pérenne,
- du personnel technique (permanent ou renouvelable) affecté à la maintenance des stations et aux observations,
- (souvent) des co-tutelles administratives et scientifiques multiples, dont les actions vis-à-vis de l'observatoire nécessitent une bonne coordination.

On décrit ci-après un certain nombre observatoires géodynamiques actuellement soutenus par les établissements de recherche français.

#### 4.1.1. Calern (http://wwwrc.obs-azur.fr/cerga/default.html)

En France, la télémétrie laser s'est développée dès le début des années 65. La mise en place en 1974 d'une station de poursuite de satellites munie d'un télescope de 1 m de diamètre à l'Observatoire de Calern, l'instrument ayant une très bonne réceptivité, a permis de contribuer très largement à la Géodynamique par des tirs sur les satellites géodésiques laser LAGEOS (1976) et Starlette (1975) et, plus récemment, sur le satellite océanographique TOPEX/Poséidon (1992), puis sur le satellite accélérométrique CHAMP. Les travaux liés aux développements et évolutions de cet instrument ont cristallisé très tôt un pôle de savoir-faire important dans un domaine de pointe. L'effort consenti par le CNES, l'INSU, le GRGS, l'IGN et l'Observatoire a été important pendant de nombreuses années. Ainsi, les différentes évolutions technologiques en phase avec les besoins de la communauté de géodésie spatiale, sur une période de 25-30 ans, ont permis d'améliorer la précision instrumentale interne de pratiquement trois ordres de grandeur (de 1 m à 1-2 mm) et d'augmenter considérablement la production de données.

En outre, sur ce site, les autres techniques spatiales ont été implantées soit à titre permanent (le laser Lune, un récepteur GPS permanent à partir de 1995), soit à titre temporaire (une campagne VLBI en 1989, une balise DORIS lors de deux campagnes en 1992 et 1996, et le gravimètre absolu FG5 entre 1998 et 2001, lors de 6 campagnes).

Le site fait partie du réseau géodésique international de référence, à travers la présence de plusieurs instruments (techniques spatiales et géodynamique) de grande qualité dont les données parviennent régulièrement aux centres d'analyse mondiaux (ILRS, IGS). Ce site géodynamique prend une part de plus en plus grande à l'activité internationale dans le secteur du spatial, dont le dernier exemple est la participation à la campagne IGEX-98 d'observation de la constellation GLONASS (satellites russes de navigation et de positionnement).

Le site est en conséquence surveillé par des techniques géodésiques et gravimétriques, dont l'objet est de décorréler les signaux liés aux déplacements/déformations locaux des signaux à caractères globaux (mouvement du géocentre, effets de charge, …). Par exemple, l'analyse d'une série de visites du gravimètre absolu portable français FG5 à Calern a permis de mettre en évidence une diminution de g en été, de l'ordre de 6 microgal (1 microgal = $10^{-8}$ m.s-2), et un bruit de l'ordre de 2 microgal. Le calcul de l'évolution éventuelle du positionnement vertical déterminé conjointement par la télémétrie laser et le système GPS (récepteur permanent depuis 1995) est en cours.

Le site de Grasse-Calern, en altitude et pourtant proche de la Méditerranée, offre une excellente opportunité pour contribuer fortement aux études océanographiques en Méditerranée. La co-localisation avec les autres techniques de géodésie (laser-Lune, GPS, DORIS, VLBI, Gravimètre absolu) fait ainsi du plateau de Calern un point géodésique exceptionnel pour tous les travaux internationaux de la géodésie de demain : avec des applications géodynamiques et océanographiques et des développements relatifs à la métrologie et au transfert du temps. Pour toutes ces raisons et compte tenu du vieillissement du système laser de Grasse (unique en France mais âgé de 25 ans), la région PACA ainsi que le CNES ont proposé l'amélioration de la station laser fixe du CERGA, au niveau des infrastructures, du laser, du télescope et de l'informatique pour les trois prochaines années, de 2001 à 2004.

**4.1.2. L'Observatoire géodésique de Tahiti** (http://www.upf.fr/laser.html)

Situé sur le campus de l'Université de la Polynésie française à Punaauia, Tahiti, l'observatoire géodésique existe depuis 1998. Une certaine pauvreté des points de référence géodésiques dans l'hémisphère sud comparativement à l'hémisphère nord, une position idéale au milieu du Pacifique sud, ont fait naturellement de la Polynésie française un candidat de choix pour devenir un point de référence géodésique fondamentale. Les travaux de construction ont été financés dans le cadre du Contrat de Développement 1995-1998 signé entre l'Etat et le Territoire de Polynésie française. L'observatoire est organisé autour de la station de poursuite par laser MOBLAS 8 qui en constitue le principal instrument et mobilise l'essentiel des moyens humains et financiers. L'Université de la Polynésie française (UPF) est maître d'œuvre du projet en collaboration avec la NASA et le CNES. Un *Memorandum of Agreement* fixe le cadre général de la coopération autour de la station Laser pour les années 1997-2007. Les instruments des autres organismes sont hébergés dans le cadre de conventions particulières.

*Instruments installés*

- 1995 : DORIS (CNES-IGN) ;
- 1996 : PRARE (CSR-University of Texas at Austin) ;
- 1997 : GPS (CNES) - **IGS** ;
- 1997 : station laser MOBLAS8 (NASA) - **ILRS**;
- 2000 : GPS (NIMA = US National Imagery and Mapping Agency) ;
- 1998 : ARGOS (CLS Argos) ;
- 1999 : photomètre solaire CIMEL (NASA) (instrument non géodésique mais illustrant bien la politique d'accueil d'expériences pratiquée par l'observatoire).

*Personnel*

Placée sous la responsabilité du directeur scientifique, l'équipe technique comporte:

- un ingénieur de recherches MEN remplacé en septembre 2001 par un technicien MEN ;
- un volontaire aide-technique (VAT) financé par le CNES .
- un technicien, niveau BTS, en contrat à durée déterminée financé par le CNES à partir de septembre 2001 et pour lequel un poste MEN a été demandé.

*Fonctionnement*
La poursuite se fait en moyenne 16 heures par jour, 5 jours sur 7, 52 semaines par an en étant tributaire des conditions météorologiques, notamment durant la saison humide de novembre à mars. Environ 33% des jours ouvrables sont dédiés à la maintenance, les 15% sans données correspondent à des conditions météo défavorables. Les systèmes MOBLAS, malgré des mises à jour régulières, sont des stations anciennes et sujettes à des pannes nombreuses. Néanmoins, l'implication de la NASA dans la maintenance permet la plupart du temps de réparer et de reprendre la poursuite dans les meilleurs délais.

*Problèmes*
La balise DORIS et les récepteurs GPS présentent un fonctionnement sans problème majeur. Le récepteur Argos a connu une défaillance en janvier 2001. La balise PRARE est restée en panne de 1998 à 2000, elle a été changée et réinstallée en 2000 et fonctionne de façon optimale depuis avril 2001. C'est un matériel fragile pour lequel n'existe pratiquement pas d'assistance technique. MOBLAS8 a connu de nombreux problèmes techniques depuis 1999, auxquels est venue s'ajouter une météo exceptionnellement mauvaise en 2000. Avec 1000 poursuites réalisées en 2000 par MOBLAS8, le bilan n'est donc pas satisfaisant même si la qualité des données fournies placent la station parmi les meilleures du réseau. Une amélioration nette est attendue pour le 2nd semestre 2001. Au delà de ces problèmes circonstanciels, la trop grande rotation du personnel (deux ingénieurs en moins de quatre ans) a fortement nui au bon fonctionnement de la station, qui nécessite en fait plus de savoir-faire et d'expérience que de connaissances théoriques. Une nouvelle organisation favorisant le recrutement sur place sera testée à partir de septembre 2001.

*Perspectives*
2001 - Amélioration du fonctionnement en routine de MOBLAS8 ;
- Installation d'un GPS CNES sur le marégraphe dans le port de Papeete ;
- Réitération des rattachements (IGN-NASA).

Au delà :
- gravimètre enregistreur ;
- rattachement par un gravimètre absolu ;
- remplacement de MOBLAS8 par SLR2000 programmée pour 2004 ;
- projet d'installation d'une antenne VLBI.

**4.1.3. Ajaccio, site d'étalonnage des altimètres spatiaux**

L'étalonnage absolu d'un radar altimétrique a été utilisé dans le passé pour ERS-1 à Venise (1991, Italie), Poséidon à Lampedusa (1993, Italie), et TOPEX à Harvest (1993 à 2001, Californie). Ces expériences ''classiques'' se sont révélées très lourdes à mettre en œuvre, compte tenu de l'éloignement des sites et de la complexité due à la concentration de plusieurs techniques : spatiale, géodésique et marégraphique. Aujourd'hui, seul le maintien de l'expérience d'Harvest sur une grande période de temps a permis d'aboutir à un suivi régulier et permanent de l'étalonnage absolu, c'est-à-dire de la mesure du niveau moyen de la mer par deux techniques dans le même système de référence : l'altimétrie radar et l'orbitographie d'une part, la géodésie et marégraphie d'autre part. Les incertitudes fournies à court et long termes par plus de 200 cycles de données acquises sur ce site sont de l'ordre de quelques centimètres et de quelques mm/an respectivement.

Compte tenu des différents critères, de précision et de coût, il n'a pas été possible de choisir un site off-shore en Méditerranée, du type d'une petite île ou d'une plate-forme, très proche d'une trace ou d'un ensemble de traces de satellites altimétriques. On a choisi un double site en Corse : à Aspretto (proche d'Ajaccio) pour l'installation d'instruments de géodésie permanents, dont la station laser ultra mobile à titre semi-permanent, ainsi qu'au Cap de Sénétosa (Propriano, à 40 km au sud d'Ajaccio) pour l'installation de marégraphes et de points géodésiques de référence.

Le premier site est situé sur une base navale et a été équipé en 1999 d'un récepteur GPS et d'un marégraphe côtier numérique permanents, respectivement par l'Institut Géographique National (IGN) et le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). On a pu montrer, à l'aide de la station laser ultra mobile utilisée pendant quatre mois sur ce site, en 1996-97, qu'il convenait très bien à l'acquisition de mesures de poursuite laser quasi zénithales sur T/P et ERS, en complément de celles acquises par le réseau laser européen. Nous avons montré aussi que l'usage de ce type de mesures pouvait conduire à la diminution de l'erreur d'orbite radiale au niveau de 1 cm, et même mieux localement, grâce à une méthode géométrique d'ajustement par arcs courts basée sur les données de télémétrie laser. La station ultra-mobile sera re-installée sur ce site à partir de juin 2001, pour la phase de validation de Jason-1. Le second site, au Cap de Sénétosa, est survolé exactement par le passage ascendant de T/P numéro 85 ; il est équipé de trois marégraphes à capteur de pression (ANDERRAA) installés par le CNES et l'OCA/CERGA depuis fin 1996. Il a été équipé d'une station météorologique en 1999.

Le double site d'Ajaccio et du Cap de Sénétosa en Corse est extrêmement intéressant, puisqu'il couvre une zone géographique qui s'étend largement en Méditerranée occidentale. Or, à côté de l'intérêt économique de la surveillance de cette zone; du point de vue scientifique, la Méditerranée occidentale est devenue une zone d'étalonnage et d'expérimentation unique dans le monde, présentant un caractère de faible variabilité océanique en tant que mer quasi fermée. Les communautés scientifiques italienne et espagnole participent à ces expériences.

**4.1.4. Brest**

L'importance scientifique de l'observatoire du niveau de la mer de Brest n'est plus à démontrer. Ses données alimentent depuis bien longtemps les études qui portent sur l'évolution séculaire récente du niveau des mers. La plus importante de ses séries temporelles de mesures remonte à 1806. Elle démarre sous l'impulsion de l'illustre Pierre Simon de Laplace et ne connaît que très peu de lacunes, faisant d'elle la plus dense au monde et l'une des plus longues dans le temps. Elle serait la plus longue si l'on arrivait à retrouver sa liaison aux séries de mesures plus anciennes réalisées au début et à la fin du 18e siècle…

La continuité et la qualité des observations du marégraphe de Brest sont la conséquence du soin et de l'intérêt apporté par le Service Hydrographique à cet observatoire. La station de Brest est un élément important du réseau mondial GLOSS. Elle est souvent citée comme modèle par les experts de la communauté internationale, notamment depuis que l'IGN a complété son instrumentation par un GPS permanent destiné à surveiller les mouvements verticaux qui affectent le marégraphe. L'observatoire est par ailleurs équipé d'une station météo performante fournie par Météo-France. Il convient également de souligner que le SHOM a démarré en 1998 un programme de campagnes annuelles de mesures de gravimétrie absolue à Brest avec le soutien de la communauté nationale. Enfin, l'idée de réaliser des mesures avec le laser mobile est souvent évoquée avec espoir qu'elle se concrétisera prochainement.

**4.1.5. Marseille**

La France contribue à la composante « surveillance à long terme du niveau des mers » du programme mondial par deux stations séculaires, Brest et Marseille. La station de Marseille se trouve sous la responsabilité de l'IGN. Construit en 1884 pour définir l'origine des altitudes en France, le marégraphe démarre ses observations en février 1885. Il n'a cessé d'observer le niveau de la mer depuis, avec quelque rares interruptions pour entretiens ou réparations. Il s'agit d'un appareil mécanique à flotteur unique au monde, de très grande qualité métrologique, qui demande des compétences de plus en plus rares aujourd'hui pour assurer son entretien.

En 1998, l'IGN décide de mettre à niveau l'observatoire suivant les critères de qualité GLOSS et installe un GPS permanent et un marégraphe moderne à ultrasons en parallèle avec l'ancien marégraphe. Le nouveau marégraphe permet une acquisition numérique à distance des valeurs, ainsi qu'un échantillonnage temporel élevé. L'observatoire est une structure solide ancrée directement sur le socle rocheux. Cette situation est jugée idéale selon les experts GLOSS pour surveiller directement les mouvements verticaux du marégraphe et, par suite, de les corriger de l'enregistrement du niveau de la mer du marégraphe. Des observations de gravimétrie absolue sont prévues.

**4.1.6. Nouméa**

L'Observatoire Géodésique de Nouméa comprend actuellement une station GPS, une balise DORIS et une station PRARE. Ces instruments sont rattachés entre eux et au repère fondamental de l'observatoire marégraphique (lequel est en cours de renouvellement des instruments et de changement du site).

Le statut administratif et juridique de l'observatoire est flou. Il est établi sur un site prêté par FCR (filiale locale des Telecom). FCR ne souhaite pas qu'une convention soit établie pour ne pas s'engager sur une garantie de pérennité. La maintenance des instruments est assurée en partenariat par le Laboratoire de Géophysique de l'IRD à Nouméa et le Bureau de Géodésie et Nivellement de Nouvelle Calédonie. Le site présente de bonnes conditions de sécurité, d'alimentation électrique secourue et de stabilité géologique.

La station GPS est propriété de la Nouvelle Calédonie. La balise DORIS est propriété du CNES/IGN. La station PRARE est propriété du GFZ. La station GPS est intégrée au réseau IGS. Les stations DORIS et PRARE contribuent à leur réseaux propres d'orbitographie. Les stations GPS et DORIS sont intégrées a l'ITRF. La Nouvelle Calédonie assure le fonctionnement de la station GPS. Le GFZ et le CNES/IGN ont financé l'installation de leur instruments. L'IRD assure le fonctionnement de la station PRARE et de la balise DORIS. Hormis le coût en personnel, ce fonctionnement représente un coût marginal.

Quatre autres stations GPS permanentes sont actuellement maintenues par l'IRD dans la région, deux en Nouvelle Calédonie et deux à Vanuatu. Des campagnes GPS de densification sont réalisées sur ces archipels environ une fois par an.

Le problème qui peut se poser à terme est la remise en cause des observatoires à l'IRD. La structure qui assurait ces tâches, l'UTO, (dont le personnel est intégré au Laboratoire de Géophysique dans le cas particulier de Nouméa) est actuellement dissoute et son renouvellement est loin d'être acquis. La continuation de ce service par l'IRD relèvera alors strictement de la bonne volonté des gens sur place…

**4.1.7. Futuna**

L'Observatoire de Futuna comprend actuellement une station GPS, une balise DORIS et une station sismologique large-bande. La station GPS et la balise DORIS sont rattachés l'une à l'autre. Un réseau local GPS est réobservé annuellement.

L'observatoire est installé sur la concession de la Météo, sur une terrasse corallienne. Il présente donc de bonnes garanties de stabilité. Cependant, la zone est sismique et des mouvements inter/co-sismiques sont possibles quoique un événement sismique significatif (en termes de déplacements en surface à proximité du site) soit peu probable à l'échelle de quelques dizaines d'années. La situation de l'île en bordure de la « warm pool » rend la mise en place d'un marégraphe particulièrement intéressante en terme de suivi du niveau marin. Le financement de son installation et de son exploitation restent à trouver.

**4.1.8. L'Observatoire gravimétrique de Strasbourg**

L'Observatoire gravimétrique de Strasbourg effectue des mesures de variations relatives de gravité depuis plus de 12 ans à l'aide d'un gravimètre supraconducteur qui est, à l'heure actuelle, l'instrument le plus précis en gravimétrie relative, rendant possible, par intégration sur des séries de quelques années, l'observation de très faibles signaux de l'ordre de quelques nanogals (soit un pico-g = $10^{-12}$ g, où g est la pesanteur moyenne de la Terre en surface). Le remplacement de l'instrument initial (modèle T005) en 1996 par un gravimètre modèle compact C026 permet de poursuivre actuellement cette série temporelle et ce, dans d'excellentes conditions. L'observatoire est l'une des stations du projet GGP (Global Geodynamics Project) du réseau international de gravimètres à supraconductivité qui est opérationnel depuis juillet 1997 (voir paragraphe 4.2.7).

Ces études des variations temporelles de gravité ont bénéficié également de l'arrivée à Strasbourg en 1997 du gravimètre absolu FG5 (Micro-g Solutions Inc.) dont l'observatoire assume la responsabilité sur le plan national. Les nombreuses séries de mesures en parallèle des deux instruments permettent de suivre de façon précise l'étalonnage du gravimètre cryogénique et de connaître la dérive instrumentale à long terme de ce dernier.

L'installation d'un récepteur permanent GPS modèle Ashtech Z12 CGRS au site de l'Observatoire gravimétrique de Strasbourg (données en continu, 24 heures par jour et 365 jours par an) a été effectuée en novembre 1999 et ce système de positionnement précis par satellites permettra de déterminer la contribution en déformation dans ces variations de gravité précédemment décrites. Notre station GPS fait partie du réseau RGP de l'IGN, de même que du réseau REGAL.

L'Observatoire gravimétrique de Strasbourg bénéficie d'une labélisation de l'INSU en tant qu'Observatoire Géophysique Global et jouit à ce titre d'un soutien financier permettant d'assurer le fonctionnement de cet Observatoire. Le problème non encore résolu est le manque flagrant de personnel scientifique attaché à cet Observatoire depuis le départ d'un Physicien Adjoint qui n'a pas été remplacé.

**4.2. Réseaux globaux et régionaux permanents**

**4.2.1. DORIS et participation aux réseaux IGS, ILRS et IVS**

On a vu que la création et l'entretien du réseau DORIS sont une entreprise commune du CNES et de l'IGN. Le CNES contribue au réseau de l'IGS par trois stations dans l'hémisphère sud (Tahiti, Afrique du Sud, Kerguelen). L'observatoire du plateau de Calern contribue au réseau de l'ILRS par ses stations laser satellite et laser Lune.

La participation des sites et stations français dans le réseau multi-techniques international est résumée de façon quantitative dans le tableau 1, tiré de l'analyse de l'ITRF2000. Cette analyse, effectuée au LAREG, reprend l'ensemble des jeux de coordonnées et vitesses de stations par VLBI (R), Laser Lune (M), GPS (P), Laser satellite (L), DORIS (D) (environ 800 stations dans environ 500 sites mondiaux, analysées par un total de 27 centres d'analyse de géodésie spatiale) déduits des programmes d'observation s'étalant sur 10 à 20 ans. Le tableau donne, pour chaque station, la technique d'observation, le nombre de solutions disponibles pour cette technique, et l'erreur type des solutions individuelles par technique, en planimétrie et en vertical. On rappelle en fin de table les valeurs des erreurs types caractéristiques de chaque technique.

La France n'a actuellement aucune participation au réseau d'observation de l'IVS. Du fait de sa situation géographique, l'observatoire géodésique de Tahiti, qui est déjà équipé de stations laser, GPS et DORIS, serait un candidat privilégié pour l'installation d'une station VLBI. Le « manque » dans le Pacifique sud peut fournir une excellente occasion à la France d'intervenir au plus haut niveau dans un domaine où ses équipes de recherche se sont taillé une place plus qu'honorable, dans l'attente d'un accès direct à l'organisation des programmes d'observation.

Pour des raisons liées à la structuration de sa recherche en astronomie, en astrophysique et en géodésie spatiale, la communauté française n'a pas réussi, malgré des tentatives répétées au long des trois dernières décennies, à obtenir la mise en place d'une antenne de VLBI astrogéodésique. La figure 7 montre la situation réelle des bases observées dans plus de 6 sessions par an en 1999, et les bases qui seraient ajoutées par une station hypothétique à Tahiti. D'un point de vue quantitatif, le sous-réseau de pôle Tahiti augmente considérablement la couverture dans l'hémisphère sud, aussi bien en nombre de bases qu'en variété de longueurs et d'orientations. D'un point de vue qualitatif, l'amélioration est aussi très importante. En effet, du fait de l'implantation actuelle des stations, la géométrie du réseau souffre d'un déficit en bases ayant une longue composante dans la direction nord-sud, défaut qu'une station dans le Pacifique sud corrigerait sensiblement. L'Europe est aujourd'hui adéquatement présente dans le maillage observationnel global. Le rôle des équipes françaises dans les travaux internationaux sur le VLBI et les systèmes de référence est loin d'être négligeable. Ces groupes ont l'expérience de l'analyse des données et des résultats du VLBI. Ils sont tout à fait en mesure d'être parmi les premiers à  exploiter les bénéfices scientifiques d'observations VLBI à Tahiti.

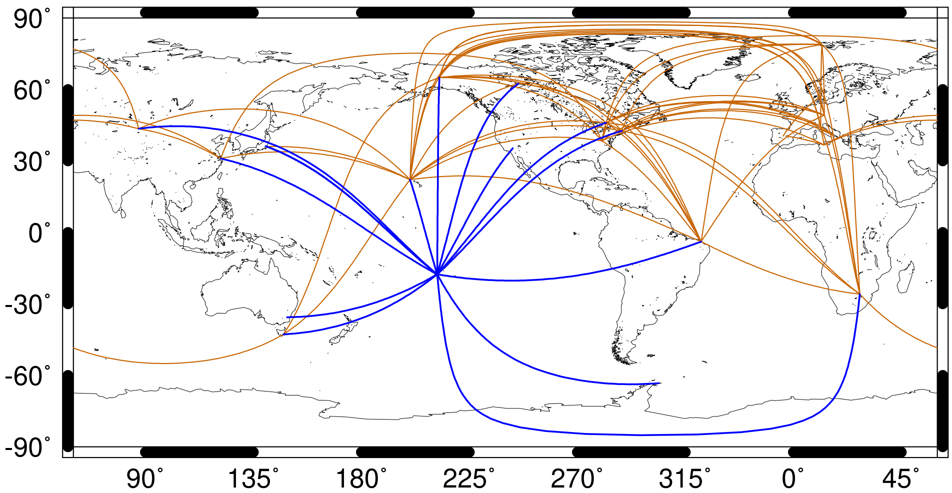


Fig. 7 –Le réseau international de VLBI astrogéodésique.
Les bases observées plus de six fois en 1999 sont en brun (gris) ;
les bases ajoutées au réseau par une station VLBI à Tahiti sont en bleu (noir).

Tableau 1 – Qualité du positionnement des sites et stations français dans l'ITRF2000

| Station | Technique Nb sol. | | Erreur type (mm) Horiz. | Vertic. |
|---|---|---|---|---|
| **Observatoires géodynamiques** | | | | |
| GRASSE | R | 2 | 2.4 | 19.6 |
| GRASSE | M | 8 | 9.2 | 10.3 |
| GRASSE | L | 8 | 3.9 | 6.8 |
| GRASSE | P | 8 | .5 | .4 |
| NOUMEA | P | 4 | 2.6 | 5.2 |
| NOUMEA | D | 3 | 18.5 | 22.9 |
| PAPEETE | L | 8 | 11.1 | 11.5 |
| PAPEETE | P | 3 | 3.0 | 11.0 |
| PAPEETE | D | 3 | 17.7 | 22.8 |
| **Réseau DORIS + IGS** (sites ou stations français) | | | | |
| HARTEBEESTHOEK | D | 3 | 8.2 | 9.1 |
| HARTEBEESTHOEK | P | 5 | 1.8 | 6.2 |
| KERGUELEN | D | 3 | 33.1 | 18.4 |
| KERGUELEN | P | 7 | 1.5 | 4.1 |
| KOUROU | D | 3 | 8.8 | 25.0 |
| KOUROU | P | 7 | 1.0 | 2.9 |
| ILE DES PETR | D | 3 | 15.2 | 20.8 |
| ILE DES PETR | P | 1 | .7 | 2.2 |
| LIBREVILLE | D | 3 | 8.8 | 11.3 |
| LIBREVILLE | P | (pas de résultats) | | |
| TOULOUSE | D | 3 | 7.6 | 30.7 |
| TOULOUSE | P | 7 | .3 | 1.3 |
| TOULOUSE | R | 2 | .4 | 24.1 |
| **Réseau RGP** | | | | |
| AJACCIO | P | 1 | .4 | 2.3 |
| BREST | P | 2 | .7 | 6.0 |
| BREST | R | 3 | 1.5 | 13.8 |
| LE MANS | P | 2 | .5 | 4.8 |
| MARNE LA VAL | P | 1 | .3 | .4 |
| MARSEILLE | P | 3 | .4 | 1.5 |
| **Réseau REGAL** | | | | |
| CADARACHE-GI | P | 2 | .2 | .3 |
| CHATEL | P | 1 | .3 | .1 |
| LA FECLAZ | P | 1 | .3 | .7 |
| MODANE-AVRIE | P | 2 | .4 | 1.6 |
| MONTPELLIER | P | 2 | .3 | 1.2 |
| SAINT JEAN D | P | 5 | .7 | .7 |
| SAINT-MICHEL | P | 2 | .3 | .7 |

| Station | Technique Nb sol. | | Erreurt type (mm) Horiz. | Vertic. |
|---|---|---|---|---|
| **Réseau DORIS (autres sites)** | | | | |
| AMSTERDAM | D | 3 | 26.8 | 9.6 |
| AREQUIPA | D | 3 | 12.4 | 32.9 |
| ARLIT | D | 3 | 11.4 | 9.4 |
| ASCENSION | D | 2 | 42.7 | 40.8 |
| BADARY | D | 3 | 15.6 | 11.9 |
| CACHOEIRA | D | 3 | 26.5 | 36.9 |
| CANBERRA | D | 3 | 14.4 | 14.4 |
| CARIQUIMA | D | 1 | 34.1 | 4.2 |
| CHATHAM ISLAND | D | 2 | 29.2 | 38.1 |
| CIBINONG | D | 3 | 19.7 | 33.8 |
| COLOMBO | D | 2 | 10.9 | 30.1 |
| DAKAR | D | 3 | 19.2 | 16.0 |
| DIONYSOS | D | 3 | 19.0 | 20.2 |
| DJIBOUTI | D | 3 | 18.5 | 7.7 |
| EASTER ISLAND | D | 3 | 13.7 | 24.1 |
| EVEREST | D | 3 | 23.5 | 21.6 |
| FAIRBANKS | D | 3 | 18.4 | 16.9 |
| FLORES | D | 1 | 7.0 | 1.6 |
| GOLDSTONE | D | 3 | 34.2 | 19.3 |
| GUAM | D | 3 | 29.7 | 30.0 |
| HUAHINE | D | 2 | 13.0 | 69.0 |
| IQUIQUE | D | 2 | 21.0 | 15.0 |
| KAUAI | D | 3 | 13.7 | 19.6 |
| KITAB | D | 3 | 17.4 | 9.9 |
| KRASNOYARSK | D | 2 | 10.5 | 42.5 |
| LA REUNION | D | 3 | 16.3 | 8.5 |
| MANILLE | D | 3 | 17.8 | 8.7 |
| MARION ISLAND | D | 3 | 7.5 | 20.2 |
| METSAHOVI | D | 3 | 21.7 | 13.6 |
| MOUNT STROMLO | D | 2 | 19.2 | 12.4 |
| NY-ALESUND | D | 3 | 18.0 | 18.5 |
| ONTARIO-OTTAWA | D | 3 | 12.7 | 9.6 |
| PONTA DELGADA | D | 2 | 17.1 | 10.3 |
| PORT MORESBY | D | 3 | 36.7 | 14.8 |
| PURPLE MOUNT. | D | 3 | 13.3 | 22.9 |
| RAPA | D | 3 | 11.5 | 19.4 |
| REYKJAVIK | D | 3 | 14.9 | 10.5 |
| RICHMOND | D | 3 | 20.2 | 68.0 |
| RIO GRANDE | D | 3 | 10.4 | 14.8 |
| ROTHERA | D | 3 | 6.0 | 21.5 |
| SAINTE-HELENE | D | 3 | 33.0 | 9.4 |
| SAN CRISTOBAL | D | 3 | 20.3 | 6.1 |
| SANTA MARIA | D | 3 | 20.0 | 15.3 |
| SANTIAGO | D | 2 | 16.7 | 11.6 |
| SOCORRO ISLAND | D | 2 | 10.4 | 26.8 |
| SYOWA | D | 3 | 9.6 | 20.7 |
| TRISTAN DA C. | D | 3 | 21.2 | 10.0 |
| WALLIS | D | 3 | 13.9 | 24.6 |
| WANAHAM/ILE | D | 3 | 19.0 | 34.2 |
| YARRAGADEE | D | 3 | 13.6 | 36.3 |
| YELLOWKNIFE | D | 3 | 18.3 | 24.1 |
| YUZHNO-SAKHA. | D | 2 | 5.6 | 14.9 |

**Valeurs caractéristiques par technique (mm)**

| | Horizontal min | Max | Vertical min | Max |
|---|---|---|---|---|
| **DORIS** | **27.8** | **33.6** | **20.8** | **20.9** |
| **GPS** | **1.0** | **4.4** | **2.6** | **7.4** |
| **VLBI** | **1.2** | **2.1** | **4.3** | **5.7** |
| **SLR** | **2.9** | **13.4** | **4.4** | **15.1** |
| **LLR** | **50.8** | | **73.3** | |

### 4.2.2. Le réseau GPS Permanent (RGP)

Le Réseau de stations GPS Permanentes (RGP, http://lareg.ensg.ign.fr/RGP) est décrit en Annexe 1. Le RGP bénéficie des investissements d'un ensemble d'organismes et laboratoires. Il a été mis en place par l'IGN en 1998. Démarré sous la forme d'un projet pilote dans un cadre de recherche, ce réseau est aujourd'hui passé à un stade de production.

A ce jour, l'IGN gère huit stations GPS permanentes, archive et traite les données de 39 stations en France et en Europe. Les observations sont rapatriées à l'IGN, archivées sur CD-ROM et mises à la disposition des utilisateurs gratuitement sur un serveur ftp au format RINEX. L'ensemble du réseau est calculé par session de 24 heures. La position de chaque station est estimée à partir des observations de la semaine. Actuellement, trois ans et demi de traitement sont disponibles. Une solution spéciale est transmise au centre de combinaison européen EUREF, où la solution française est comparée aux autres solutions européennes. Le RGP est donc à la fois un centre de calcul EUREF et une densification nationale du réseau européen de stations permanentes.

Les stations permanentes sont utilisées comme stations d'appui pour les applications topographiques et géodésiques courantes. Ce réseau est aussi utilisé pour des besoins de navigation, en particulier pour le calcul et la diffusion de corrections permettant un positionnement instantané avec une précision sub-métrique (DGPS). Des études sont en cours dans le but d'obtenir des précisions centimétriques en temps réel. Les usages scientifiques possibles du réseau concernent le suivi dynamique d'un référentiel terrestre (séries temporelles de positions), la mesure des déformations à plusieurs échelles de temps, la marégraphie, l'étude de l'atmosphère.

Les contraintes des utilisations scientifiques et appliquées sont différentes. Celles qui sont liées aux utilisations appliquées concernent la localisation des stations (proximité des agglomérations) et la transmission des données, tandis que celles qui sont liées aux utilisations scientifiques concernent essentiellement la qualité et la continuité des observations. Il est souhaitable qu'une structure de concertation existe, où les orientations de développement du RGP soient discutées avec l'ensemble des utilisateurs de ce réseau.

Les stations GPS permanentes sont appelées à se multiplier dans les prochaines années car d'une part les utilisations des données d'un réseau permanent se développent, et d'autre part le coût des stations permanentes ne cesse de diminuer. Il n'est pas envisageable de faire en sorte que toutes les stations installées en France répondent aux spécifications des utilisations scientifiques. Cependant il reste essentiel que les plus intéressantes d'entre elles puissent faire l'objet d'une exploitation scientifique.

**4.2.3. REGAL**.

Le programme REGAL (Réseau GPS permanent dans les Alpes, voir détails en Annexe 2, http://kreiz.unice.fr/regal) est la fédération d'efforts de laboratoires de recherches universitaires et d'organismes dans le but d'équiper et de maintenir un parc de stations GPS permanentes opérant en continu sur le territoire national, pour des objectifs scientifiques géophysiques (terre solide et atmosphère) et géodésiques.

Les objectifs scientifiques sont les suivants :

- Déformation crustale sur les principales structures actives
- Déformation intracontinentale lente
- Troposphère
- Géodésie, référentiels
- Mouvements verticaux, surcharges, relations avec la gravité
- Comparaisons inter-techniques
- Soutien aux campagnes et aux mesures semi-permanentes

Le réseau REGAL est propriétaire de quinze stations GPS permanentes (Le Chatel, Chize, Chateaurenard, La Feclaz, Cadarache, Joux, St Michel l'Observatoire, Modane, Montpellier, Nice, Le Sauvan, St Jean des Vignes, Sophia Antipolis, Strasbourg, Welschbruch). Il intègre en outre les stations d'Ajaccio et Marseille (RGP) et de Grasse (IGS/CNES). Six stations supplémentaires verront le jour en 2001 : Mont Aigoual (Cévennes), Aiguilles Rouges (Haute Savoie), Bure (Dévoluy), Queyras, Pyrénées, sud Toulouse. Le réseau REGAL adhère aux standards internationaux utilisés en matière d'équipement GPS, de choix des sites et de monumentation pour la mesure des déformations crustales. Les données sont enregistrées en continu, 24 heures sur 24, à la cadence de 30 secondes. Le réseau REGAL participe aux réseaux RGP et EUREF

Les partenaires de REGAL sont

- en France : LGCA Chambéry, LGIT Grenoble, LGTS Montpellier, EOST Strasbourg, CLDG La Rochelle, OMP Toulouse, ENS Paris, CERGA Grasse, Géosciences Azur, IPSN, LDG/CEA, LAREG/IGN, CNRM/MétéoFrance ;

- à l'étranger : Office Fédéral de Topographie de Berne, ETH Zürich, Université de Karlsruhe, Agence Spatiale Italienne, Université de Gênes, Institut Cartographique de Catalogne.

Le réseau REGAL est maintenu de manière décentralisée. Chaque laboratoire partenaire se charge de la maintenance de ses stations et de la récupération des données. La gestion des données des 18 stations REGAL actuellement opérationnelles est par contre centralisée à Géosciences Azur. Les données y sont quotidiennement formatées, contrôlées, archivées et mise à la disposition des utilisateurs en format RINEX avec un délai de 24 heures.

Un traitement de routine des données GPS REGAL est réalisé à Géosciences Azur à l'aide du logiciel GAMIT-GLOBK. Ce traitement fournit des séries temporelles de position des stations ainsi que des coordonnées et vitesses rattachées à l'ITRF. L'ensemble de ces informations est mis à la disposition des utilisateurs sur le site web REGAL.

*Les difficultés :*

***Reconnaissance d'instrument national et moyens récurrents.*** Le réseau REGAL a vu le jour grâce à une opportunité de financement de Géofrance 3D, puis au travers d'initiatives des laboratoires impliqués. Certains de ces laboratoires appartiennent à un OSU et peuvent donc prétendre aux financements récurrents associés aux OSU, mais ce n'est pas le cas pour la majorité des laboratoires participants. Le réseau REGAL est en fait un "observatoire hors murs" et il n'existe pas, à l'heure actuelle, de moyens financiers récurrents permettant d'assurer, sur le long terme, le fonctionnement et la maintenance de l'ensemble du réseau. Ceci va de pair avec le fait que le réseau REGAL n'est pas encore reconnu comme "instrument national" par l'INSU (aucune demande dans ce sens n'a jusqu'ici été faite). Ceci est néanmoins en train de changer. Les laboratoires participants au réseau REGAL ont en effet émis un accord de principe pour la constitution d'une structure, par exemple de type SIG, afin (1) d'obtenir le statut d'instrument national, (2) d'obtenir les financements permettant la maintenance et le développement du réseau en associant plusieurs partenaires, en particulier l'INSU, le CNES et l'IGN.

***Interaction REGAL/RGP.*** Le réseau REGAL s'est développé en 1997-99 en parallèle avec le réseau RGP, alors dans sa phase de projet pilote. La coordination entre les deux projets (par ex. déploiement des réseaux respectifs, normes de monumentation) visait à assurer complémentarité et compatibilité entre les programmes. Avec le passage du RGP au statut de réseau de production destiné à servir les besoins des géomètres (applications en temps quasi réel dans les zones urbanisées), la différenciation de ses objectifs d'avec les objectifs scientifiques de REGAL a rendu la coordination plus difficile. Il semble que l'on se dirige actuellement vers simple la coexistence de deux réseaux GPS permanents en France. Les instruments et les données du RGP production et du réseau REGAL étant intrinsèquement les mêmes, il faudrait encourager les interactions entre ces deux projets, par exemple dans les choix d'implantation des sites, dans l'exploitation des données, leur archivage.

#### **4.2.5. SONEL**.

SONEL (http://sonel.ensg.ign.fr)est un Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales qui s'appuie sur les techniques modernes d'observation de marégraphie et de géodésie spatiale. L'ambition du projet est d'organiser de manière raisonnée et rationnelle les ressources et les efforts nationaux pour mesurer le niveau de la mer en un ensemble d'observatoires côtiers, et de surveiller l'évolution de ce paramètre dans des référentiels local et mondial.

SONEL est d'abord un système informatique de collecte, de traitement, d'archivage et de diffusion de données et d'informations sur ces données, mesures ou résultats de traitements. Le système s'appuie essentiellement sur des stations ou des réseaux d'observation existants, souvent mis en place par des organismes pour d'autres applications que celles qui sont visées dans SONEL. Ces organismes peuvent trouver dans SONEL une diffusion et une valorisation complémentaires de leurs données, tout autant qu'un soutien et un retour scientifique et technique sur la qualité de leurs observations.

L'idée de SONEL a été proposée et soutenue par les deux organismes naturellement producteurs des types de données mentionnés, à savoir le SHOM et l'IGN. Bien qu'ils représentent une source importante de données, de nombreuses mesures et résultats sont produits par d'autres organismes comme les DDE, les Ports Autonomes, les laboratoires du CNRS ou de l'INSU. Il est important de regrouper et diffuser largement ces données, dont les valeurs historique et scientifique sont inestimables, et d'assurer leur pérennité par un archivage satisfaisant, que ces organismes négligent souvent parce qu'ils n'en ont pas la mission.

L'objectif de SONEL est aussi d'apporter une information de qualité et de mettre à la disposition des utilisateurs scientifiques des produits élaborés à partir de la synergie des données de marégraphie et des résultats de géodésie spatiale. C'est également de servir d'interface avec la communauté internationale, notamment dans les projets européens tels que EOSS ou EUVN, les programmes mondiaux tels que GLOSS, ou encore dans les échanges avec les centres de données internationaux tels que le PSMSL.

Il convient de souligner ici que les missions de l'IGN et du SHOM ne sont pas clairement définies sur les questions d'observation systématique et de surveillance du niveau de la mer et qu'une tutelle nationale manque à ce propos pour apporter le cadre nécessaire aux activités liées à ces questions (échange d'informations, coordination des ressources, procédures unifiées d'échanges, d'analyses, études des variations à long terme du niveau de la mer…)

#### 4.2.6 Participation au réseau GGP (Global Geodynamics Project)

Ce projet scientifique de l'UGGI, soutenu par le groupe SEDI (Study of the Earth's Deep Interior), consiste en un réseau mondial de gravimètres supraconducteurs (actuellement 17 instruments répartis en Europe, Amérique du Nord, Japon, Chine, Australie, Indonésie, Antarctique, Arctique, voir figure 8). Une première période d'observations communes de six ans a débuté le 1er juillet 1997 et il existe une base de données gérée à Bruxelles dans le cadre d'ICET (International Centre for Earth Tides) (cf. GGP Information System and Data Center, http://etggp.oma.be). Le CD-ROM des premières données (1997-1998) est disponible depuis l'été 2000. Une description complète du projet GGP est disponible sur le site http://www.eas.slu.edu/GGP/ggphome.html.

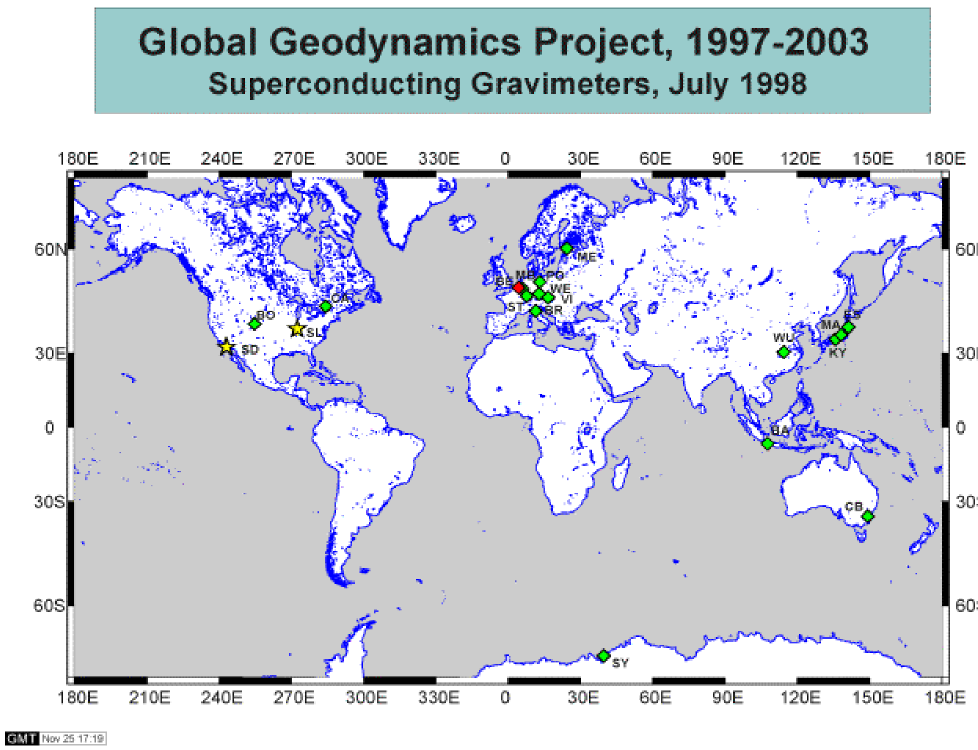


Fig. 8 – Le réseau de gravimètres supraconducteurs GGP (Global Geodynamics Project)

### 4.3. Campagnes d'observation

#### 4.3.1. Campagnes d'observation GPS.

*Objectifs scientifiques et chantiers*

Les observations par campagnes sont le mode opératoire classique d'acquisition de données GPS pour une grande variété d'objectifs scientifiques, avec, parmi les plus importants la tectonique, dans des contextes cinématiques variés (subduction, extension, décrochement), la sismologie (interventions post-séismes), la volcanologie, les glissements de terrain, la glaciologie. Toutes ces applications requièrent la répétition des campagnes sur plusieurs années.

Les zones géographiques sur lesquelles interviennent les équipes françaises sont très variées. Parmi les plus importantes, on peut citer : le Chili, la Grèce (surtout Corinthe), la Chine, le Népal, l'Islande, l'Iran, la Mongolie, les Caraïbes, l'Indonésie, le Vietnam, la Birmanie, les Afars et, en France, les Alpes, les Pyrénées et le Fossé rhénan.

*Tutelles et financements*

***Le parc GPS INSU.*** Les campagnes GPS sont le plus souvent réalisées à l'aide de récepteurs empruntés au parc national INSU (http://www.ipgp.jussieu.fr/dept-sce/insu_gps). Le parc INSU comprend actuellement 21 récepteurs bifréquences de qualité géodésique. Le parc est fortement sollicité et fonctionne en flux tendu pendant la majeure partie de l'année. Il est maintenu à l'IPG. En tant que parc national, il est financé à 100% par l'INSU (maintenance, remplacement d'équipement, augmentation du nombre d'instruments). Le parc INSU est utilisé régulièrement par une vingtaine d'équipes de recherche françaises.

***Les financements.*** Les campagnes GPS sont financées dans le cadre des programmes de l'INSU (par exemple Intérieur de la Terre, PNRN, PNTS), de Programmes Internationaux de Coopération Scientifique du CNRS (PICS), de programmes nationaux (Géofrance 3D), et de programmes spécifiques du Ministère de la Recherche. Les instruments du parc sont prioritairement réservés aux campagnes financées de cette manière. D'autres campagnes sont financées pour tout ou partie par des programmes européens (DG XII, INTAS), dans le cadre de programmes OTAN (pour les pays éligibles) ou du Ministère des Affaires Etrangères. En France, certaines campagnes sont financées pour tout ou partie par des régions et/ou départements, en particulier dans le cadre d'agences comme par exemple le Pôle Grenoblois des Risques Naturels ou par des organismes, par exemple l'IPSN et le LDG.

*Productions*

Les campagnes d'observations GPS produisent tout d'abord des données brutes, qui resteront utilisables sur le long terme, pour peu qu'elles soient stockées sur des supports adéquats. Les équipes en charge des programmes scientifiques liés aux campagnes GPS réalisent généralement le traitement des données des campagnes GPS au retour de celles-ci et produisent des solutions géodésiques associées. La répétition des campagnes permet de produire des séries temporelles, dont on peut déduire un champ de vitesses et de déformations. Ces produits servent ensuite de base à l'interprétation géophysique et à la modélisation.

*Personnel nécessaire*

Les campagnes d'observations GPS sont réalisées par les personnels des laboratoires (chercheurs, ingénieurs, techniciens, étudiants), en collaboration avec du personnel des laboratoires partenaires lorsqu'il s'agit de campagnes à l'étranger. La mise en œuvre de mesures GPS sur le terrain ne requiert pas de compétences particulières, mis à part la mise en station de l'antenne, qui doit se faire avec un soin tout particulier.

*Problèmes non résolus dans l'organisation actuelle*

***Un technicien pour la gestion du parc GPS INSU.*** Une grande partie des activités de gestion du parc d'instruments GPS INSU concerne des opérations de routine qui devraient être du ressort d'un technicien (emballage, envoi, réception, petites réparations). Ces tâches incombent pour l'instant à un ingénieur de recherche et pour partie à un chercheur. De fait, il est difficile de conserver les instruments à un niveau de fiabilité optimale. Par exemple, les instruments ne peuvent pas toujours être vérifiés en retour de campagne.

***Veiller à l'augmentation régulière du parc.*** Le parc actuel (21 récepteurs + deux à acquérir en 2001) permet de couvrir les besoins de la communauté. Cependant, ces besoins augmentent régulièrement, pour les applications "classiques", mais aussi pour de nouvelles applications liées, par exemple, au GPS cinématique. De plus, il faut noter que la France est loin de disposer de la "force de frappe" d'autres pays, où certaines équipes disposent à elles seules d'un parc largement plus important. Ceci est parfois un handicap pour les régions/thématiques à forte compétition internationale. Enfin, il existe actuellement de nombreuses périodes dans l'année pendant lesquelles tous les récepteurs du parc sont sur le terrain. Si une intervention urgente était nécessaire, par exemple lors d'un séisme, il faudrait, dans l'état actuel, sacrifier certains projets. Il est donc nécessaire de veiller à l'augmentation régulière du parc GPS INSU pour (1) augmenter la capacité d'intervention lors de campagnes lourdes mobilisant l'ensemble du parc, (2) permettre une plus grande flexibilité de l'utilisation du parc, avec par exemple plus de campagnes au même moment, (3) permettre l'émergence de nouvelles applications (glissements de terrain, troposphère, etc.).

***Base de données.*** Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de base de données regroupant l'ensemble des données GPS acquises par les équipes françaises. La gestion des données est laissée à l'entière responsabilité des équipes de recherche. Cette situation n'est pas critique car la communauté est essentiellement constituée de chercheurs relativement jeunes et généralement en bons termes. Il faut pourtant penser à l'avenir, en gardant en mémoire le fait qu'il est encore possible aujourd'hui de valoriser scientifiquement des données de triangulation du 19$^{ème}$ siècle archivées à l'IGN! Il est urgent de constituer une base de données GPS qui regrouperait les données acquises par les équipes françaises, au moins pour les campagnes financées par des moyens publics nationaux (Ministères, CNRS, INSU). Cela est particulièrement important pour les données acquises en France car il s'agit de conserver un patrimoine scientifique national, qui restera utilisable pendant des décennies s'il est correctement archivé ; il sera définitivement perdu si la gestion des données GPS ne tient pas compte de l'évolution des personnes et des laboratoires. Il faut que les données survivent à leurs "propriétaires"…

***Financer les remesures.*** Tous les chercheurs impliqués dans les campagnes d'observations GPS convergent pour dire qu'il est très difficile de financer la répétition de campagnes de mesures. En effet, la durée d'observation nécessaire est supérieure à (1) les durées des projets telles qu'elles sont classiquement permises par les programmes (généralement un an, parfois, deux ans, au maximum trois ans), (2) la durée de vie de ces programmes (typiquement 3-5 ans). La plupart des applications des observations GPS par campagnes requièrent des observations sur 5 ans ou plus. Cinq ans correspondent typiquement à un réseau qui serait mesuré trois fois, ce qui est le minimum pour s'assurer d'un résultat fiable, même dans les régions à forts taux de déformation. Pourtant, aucun programme ne s'engagerait actuellement à financer trois campagnes sur cinq ans. Il est important de faire comprendre qu'il ne suffit pas de financer une campagne sur un chantier donné, mais qu'il faut obligatoirement en financer au moins deux autres sous peine de perdre l'investissement initial et l'information scientifique.

**4.3.2. Remarques sur les campagnes d'étalonnage d'altimètres spatiaux en Corse**

La première difficulté rencontrée dans l'expérience d'étalonnage (voir § 4.1.3.) est liée à l'évaluation de la pente du géoïde sous la trace de l'altimètre au voisinage d'un marégraphe installé sur une île de grande taille. Les mesures altimétriques sont plus fortement perturbées à l'approche de la côte qu'elles ne le sont dans le cas d'une plate-forme off-shore - autre choix d'implantation de station d'étalonnage. D'une part l'altimètre ne voit plus exactement un signal océanique pur, le spot éclairant en partie les côtes, d'autre part le radiomètre à vapeur d'eau embarqué, dont les mesures sont indispensables au calcul de la correction de propagation du signal altimétrique (distance radar), voit un changement brutal de la valeur de l'humidité. Pour ces raisons, la précision des mesures altimétriques diminue fortement, passant de 3 cm à 5-7 cm, et l'on doit donc arrêter les mesures à environ 5-10 km du marégraphe. Or, la hauteur du géoïde peut varier sur cette distance, en particulier en Corse où sa pente peut atteindre quelques cm par km. En outre, il peut y avoir sur cette même distance des effets océanographiques locaux qui introduisent momentanément des distorsions dans les hauteurs de mer mesurées par les marégraphes et par l'altimètre.

La seconde difficulté provient de l'erreur d'orbite du satellite altimétrique, et plus particulièrement de l'erreur radiale d'orbite constante au-dessus du site. Sans détermination géométrique d'orbite, cette erreur (provenant du champ de gravité) est en effet indétectable dans les éphémérides dynamiques précises fournies par le projet (CNES et NASA). L'usage d'une station de télémétrie laser, sous la trace de l'altimètre ou très proche, et rattachée à un réseau global, est un moyen très puissant pour réduire l'erreur radiale d'orbite au moment des passages d'étalonnage, à condition toutefois de connaître les coordonnées de la station avec suffisamment de précision (de l'ordre de 5 mm sur l'altitude) et dans le même repère de référence que celui utilisé pour le système spatial. Le site d'Aspretto a été testé en 1996-97 grâce à une campagne probatoire d'environ 4 mois impliquant la station laser ultra-mobile. La période de temps, relativement courte à l'échelle d'un cycle de 10 jours, a impliqué relativement peu de passages d'étalonnage observés par la station laser. En outre, l'étalonnage avait été affecté par la présence de systématismes (plusieurs cm) liés essentiellement à la méconnaissance du géoïde sur le site du Cap de Sénétosa. Pour ces raisons, des campagnes géodésiques avec des bouées équipées de récepteur GPS ont été réalisées en 1998, 1999 et 2000.

Après plusieurs expériences probatoires menées sur le site en Corse, les résultats sont aujourd'hui d'une cohérence de l'ordre de 1 cm dans le positionnement vertical des marégraphes et des points de référence. De plus, afin d'apporter un contrôle de la référence verticale, indépendant de la géodésie spatiale, un premier point gravimétrique a été réalisé en 1999 avec le gravimètre absolu portable FG5. Un second point est prévu courant 2001.

D'un autre côté, des efforts se sont également portés sur la station laser ultra mobile et sur la réalisation en 2000 d'un plan d'amélioration de ses performances (datation, chronométrie et détection)

: une précision de quelques mm, une exactitude de 0.5-1.0 cm, et une stabilité ou dispersion des biais de 5 mm au plus. La station mobile devrait jouer un rôle essentiel dans l'étalonnage de l'altimètre Jason-1 en 2001, en fournissant des mesures de distance à la verticale de chaque passage altimétrique au -dessus de la région, soit tous les 10 jours.

### 4.3.3. Campagnes de gravimétrie

Des campagnes de mesures gravimétriques sont menées par les équipes françaises pour une vaste palette d'objectifs scientifiques. On peut distinguer deux grands domaines :

- Les études des variations spatiales du champ de pesanteur terrestre pour les applications géophysiques (structure interne du globe à différentes échelles) et géodésiques (détermination précise du géoïde).
- Les études des variations temporelles du champ de pesanteur pour l'étude des mouvements verticaux, des marées terrestres, des surcharges, en volcanologie, tectonique, hydrologie, etc.

Dans un proche futur, des campagnes de mesures spécifiques en vue de l'étalonnage des capteurs spatiaux (CHAMP, GRACE et GOCE) ou de l'acquisition de données sol à intégrer avec les données spatiales dans des analyses combinées, seront également menées.

Les chantiers géographiques où interviennent les équipes françaises sont très variés. On peut citer notamment, le territoire métropolitain (Bretagne, Sud-Est), les volcans des DOM-TOM, Djibouti, l'Iran, l'Indonésie. Outre les mesures à terre, les équipes françaises réalisent des acquisitions en mer (extension de la couverture spatiale) et développent des campagnes de mesures en fond de mer.

Pour réaliser ces campagnes la communauté peut actuellement mettre en œuvre des instruments relatifs de terrains et un instrument absolu.

**Campagnes avec des instruments relatifs**

La communauté gravimétrique française dispose de quelques gravimètres relatifs à ressorts de type "microGal" permettant à la fois la réalisation de levés sur le terrain et l'acquisition de séries continues. Ces gravimètres, de type Scintrex CG-3M, sont pour partie au sein d'un parc national géré et maintenu par l'IPG Paris.

Le nombre restreint d'instruments ne permet pas de répondre actuellement à toutes les demandes exprimées par les équipes, notamment du fait de l'augmentation significative des besoins, pour des levés de haute résolution comme pour des enregistrements en différentiel continus sur de longues périodes. Rappelons que la réalisation de levés de haute résolution avec des instruments à ressorts nécessite des protocoles de mesure rigoureux (mesures simultanée de paramètres annexes et nécessité d'avoir une ligne d'étalonnage à proximité de la zone étudiée) et l'utilisation simultanée d'au moins deux gravimètres.

Il est donc nécessaire de poursuivre l'effort en équipement instrumental pour les mesures gravimétriques sur le terrain, aussi bien pour les mesures de la pesanteur que pour les mesures "annexes" : positionnement précis, météorologie, etc. Cet effort devra tenir compte de l'évolution instrumentale, en particulier des développements récents de gravimètres absolus de terrain. Ces gravimètres absolus de terrain, utilisés conjointement avec des gravimètres relatifs à ressorts, permettrons la réalisation de levés plus précis et une amélioration significative des réseaux de répétition temporelle.

**Campagnes de gravimétrie absolue**

La communauté gravimétrique française a acquis en 1996 un gravimètre absolu portable (modèle FG5 de Micro-g Solutions Inc., Colorado, USA, voir figure 9). L''INSU a désigné la station gravimétrique de Strasbourg comme site de base de cet instrument, ce qui rend l'EOST de Strasbourg responsable de cet **outil national**. C'est à ce titre qu'il met en œuvre les campagnes de gravimétrie absolue au profit des organismes et laboratoires de la communauté gravimétrique qui ont participé à l'acquisition du gravimètre absolu.

L'instrument est un gravimètre balistique. Son principe est basé sur la chute d'un corps dans le vide, la trajectoire étant déterminée par des mesures de position par interférométrie laser, et de temps à l'aide d'une horloge atomique. Il est qui est capable de mesurer la vraie valeur de la gravité g avec une précision de 1 microgal (ce qui représente $10^{-9}$ g). Une photographie de l'instrument en opération à Strasbourg est donnée figure 9. L'ensemble de l'équipement pèse environ 500 kg et peut être transporté en plusieurs caisses à l'aide d'une camionnette. En général, cet instrument mesure dans des conditions de type laboratoire mais il peut aussi mesurer en extérieur (sous tente) et en complète autonomie (groupe électrogène) comme cela a été le cas en Iran.

Fig. 9. Gravimètre absolu FG5 modèle 206 dans son site d'accueil à Strasbourg.

Les objectifs scientifiques dans lesquels interviennent les mesures du gravimètre absolu sont variés :
- étude des variations temporelles de la gravité en divers lieux à partir de mesures répétées sur de longs intervalles de temps afin de mettre en évidence les mouvements verticaux et les transferts de masse ; applications à des problèmes de volcanisme, de tectonique, de géodésie (positionnement DORIS, GPS et VLBI) et de marégraphie (niveau moyen des mers et surcharges de marée océanique) ;
- développement du réseau de bases gravimétriques absolues en France ;
- établissement de lignes de base d'étalonnage pour micro-gravimètres ;
- participation au réseau gravimétrique mondial de bases IAGBN (A) et (B) ;
- étalonnage des gravimètres relatifs portables et de gravimètres cryogéniques du réseau GGP (dont l'instrument français à Strasbourg).

En dehors des missions sur le terrain effectuées depuis maintenant plus de trois ans à un rythme soutenu (en moyenne plus de 100 jours hors site par an pour une équipe composée d'un ingénieur et de scientifiques), un des intérêts des mesures répétées de gravité absolue au site de base de Strasbourg est leur superposition avec les mesures en continu du gravimètre supraconducteur, ce qui permet de mener les recherches sur les variations temporelles de gravité dans d'excellentes conditions.

Les rapports d'activités détaillant les missions accomplies de 1997 à 2000 sont disponibles sur le site web de l'Observatoire Gravimétrique (http://eost.u-strasbg.fr/obsgrav/). Parmi les missions effectuées, citons :

- Sites français : Ajaccio (Base d'Aspretto), Brest (SHOM), Grasse (CERGA), Le Mans (ESGT), Orléans (BRGM), Sèvres (BIPM), Montpellier et Mont Aigoual (ISTEEM), Dunkerque, Grenoble, Dumont d'Urville (IFRTP), Ile de La Réunion, Kerguelen ;
- Sites européens : Wettzell et Bad Homburg (Allemagne), Dubrovnik et Osizek (Croatie), Josefoslaw (Pologne), Penc (Hongrie), Pecny (Tchéquie), Medicina et Trieste (Italie), Spitzberg (Norvège) ;
- Autres sites : Table Mountain (Colorado), Mount Stromlo et Hobart (Australie), 5 sites en Iran, Sutherland (Afrique du Sud)

Chaque mission de mesures de gravimétrie absolue hors site nécessite la participation de deux personnes : un ingénieur responsable de la maîtrise technique de l'instrument et un scientifique responsable de la mission. Dans certains cas (mission lointaine de type IFRTP avec embarquement sur bateau), les missions sont longues et peuvent entraîner une absence continue de presque deux mois. De plus, le rythme des missions est extrêmement soutenu et, s'il est possible d'alterner actuellement entre deux scientifiques, la partie technique ne repose que sur une seule personne. Une des priorités est clairement l'obtention d'un autre poste de technicien pour poursuivre dans de meilleures conditions cette activité en constant développement, comme le souligne d'ailleurs une motion adoptée lors de l'assemblée générale du CNFGG en février 2001.

#### 4.3.4. Campagnes 1998 et 1999 pour la mesure des surcharges océaniques en Bretagne

L'objectif de ces campagnes était d'étudier la modélisation de la surcharge océanique. Du point de vue géométrique, la surcharge concerne la flexion de la croûte sous le poids des marées océaniques, tandis que du point de vue dynamique, elle correspond à une variation de la gravité locale $g$ qui intègre les effets de redistribution de masse et d'attraction Newtonienne. Elle atteint en Bretagne environ 20 cm crête à crête pour une variation concomitante de $g$ de l'ordre de 400 $nms^{-2}$ (40 μGal). Vers l'intérieur des continents les valeurs observées sont inférieures d'un ordre de grandeur.

L'intérêt d'étudier les surcharges est multiple. En particulier, la surcharge résulte d'un processus intégrateur, qui, sur les zones côtières, permet la validation des modèles de marées à proximité du littoral. Ce point est à souligner en référence aux marégraphes qui ne donnent que des hauteurs d'eau ponctuelles ou aux résultats des méthodes d'altimétrie spatiale dont l'efficacité s'affaiblit au voisinage des côtes. Dans ce sens, la gravimétrie côtière - encore peu développée - peut aussi contribuer au processus d'assimilation pour les modèles de marées océaniques. Enfin, l'extraction du signal de surcharge peut servir à valider les algorithmes de traitements des signaux GPS.

Le Centre Littoral De Géophysique (CLDG - Université de La Rochelle) a mené ces expériences en collaboration avec le SHOM, le CERGA, l'ESGT, l'EOST et l'IGN. Un aspect essentiel de ces expériences repose sur la colocalisation d'instruments mis en œuvre : gravimètre relatif, gravimètre absolu et GPS.

L'ambition aujourd'hui est, tout d'abord, de mener une nouvelle campagne (printemps 2002) en allongeant le temps d'acquisition des GPS (qui n'ont été mis en œuvre, en réseau serré, que quelques jours). Par ailleurs, la modélisation des phénomènes inclinométriques montre que la mesure de ces signaux compléterait avantageusement les jeux de données acquis lors de ces colocalisations. En effet, pour l'instant, le rapport signal/bruit du seul signal géométrique disponible (GPS) est faible. On peut s'attendre à ce que l'inclinométrie - qui constitue une mesure géométrique indépendante des systèmes spatiaux - permette de mieux contraindre les modèles. Enfin, la station laser-satellite mobile en cours de mise au point au CERGA peut trouver là un atelier de validation pertinent. Par la suite, de nouvelles stratégies expérimentales pourront être envisagées.

Les difficultés rencontrées lors de ces expériences sont logistiques et financières, plus que techniques. En effet, ces campagnes reposent pour l'instant sur le volontariat de chacune des équipes qui s'y impliquent et ne sont pas prises en charge par des programmes existants. Le GDR AGRET constitue déjà une Agora qui permet les échanges entre les chercheurs concernés.

## 5. Recommandations du GDR AGRET concernant l'observation géodynamique

L'une des raisons des difficultés rencontrées dans la poursuite de programmes reposant sur l'observation géodynamique provient de sa généralisation même, avec des actions ciblées engagées par un certain nombre d'organismes, dont les missions sont diversifiées et les statuts assez différents les uns des autres. Cette diversité est illustrée par les appartenances des auteurs de ce rapport : Observatoire de Paris, IGN, IPGP, CNES, UMR Géosciences Azur, OCA/CERGA, IRD, CLDG La Rochelle, EOST, SHOM.

Une autre difficulté résulte de l'échelle de temps caractéristique des problèmes étudiés. A la différence des études à échelle de temps géologique, la mesure directe - depuis peu très précise - et l'analyse des déformations à l'échelle de la fraction de siècle ne trouvent pas toujours leur place dans une programmation scientifique gérée par des comités de durée de vie inférieure à la demi décennie.

Enfin, ces programmes de recherche ont pour originalité de pouvoir faire usage d'observations et de méthodes de traitement que se partagent laboratoires scientifiques et organismes orientés vers la production et le service public. La valorisation mutuelle des deux types de potentiels ne se fait pas toujours spontanément.

### 5.1. Le statut des stations, campagnes et réseaux d'observation

Un ensemble de problèmes non résolus sont pointés en ce qui concerne le support logistique des observations géodynamiques, qu'il s'agisse des stations ou réseaux permanents, ou de séquences de campagnes de mesure. Il est nécessaire d'assurer à ces dispositifs un certain nombre de qualités, par exemple :

- pour les sites géodynamiques : un suivi observationnel multi-techniques coordonné (géodésie spatiale, gravimétrie, marégraphie) ;
- pour les campagnes : la possibilité de programmation pluriannuelle ;
- pour tous les dispositifs : une infrastructure technique et administrative pérenne, du personnel technique affecté à la maintenance des stations et aux observations, une bonne coordination dans le cas de tutelles multiples.

Les actions suivantes, relevant du CNES, du CNRS/INSU, de l'IGN, de l'INSU, de l'IRD, du MEN, du MRT, ou du SHOM, peuvent concourir à la réalisation de ces objectifs.

- ***Poursuivre l'effort en équipement des parcs de stations: récepteurs GPS, gravimètres, etc.***
- ***Identifier et soutenir à long terme un ensemble de tâches d'observatoire géodynamique.***
- ***Créer un Programme National permettant le financement de campagnes de mesure à objectifs géodynamiques.***

### 5.2. La coordination des programmes d'observation et d'analyse

Force est de constater que la coordination entre les programmes reste trop souvent le fait d'individus de bonne volonté qui, de façon opportuniste, tentent de faire converger les intérêts de leurs organismes respectifs. D'où une perte d'efficacité, qui entraîne en outre un déficit de visibilité aux niveaux national et international. Nous notons ci-après un certain nombre d'actions concrètes, impliquant le CNES, le CNRS/INSU, l'IGN, l'IRD, le SHOM, pour tenter de remédier à cette situation.

- ***S'efforcer de coordonner le déploiement des réseaux GPS permanents à objectifs de production (ex. : RGP) et à objectifs scientifiques (ex. : REGAL).***
- ***Faire de SONEL un acteur français central de l'analyse conjointe marégraphie-géodésie.***
- ***Coordonner les programmes géodynamiques en métropole, DOM-TOM et à l'étranger.***
- ***Maintenir un réseau mondial de colocalisations de balises DORIS avec des marégraphes.***
- ***Développer l'International DORIS Service.***

La section de Géodésie du CNFGG envisage d'établir un groupe de coordination des stations permanentes de géodésie spatiale installées ou hébergées par des organismes français. Le rôle de ce groupe serait de servir de forum d'information mutuelle, de discussions et de recommandations éventuelles, afin d'améliorer l'efficacité, la cohérence et la visibilité des actions de chacun. Ne relevant d'aucun organisme en particulier, il représenterait principalement une force de proposition en vue des intérêts collectifs.

- ***Le GDR AGRET encourage fortement la mise en place d'un groupe de coordination des stations permanentes de géodésie spatiale installées ou hébergées par des organismes français.***

**5.3. Le personnel scientifique et technique**

Le GDR AGRET a adressé, en mars 2001 aux sections du CNRS dont il relève, et en juin 2001 au Département SDU du CNRS, des recommandations sur les thèmes à soutenir en Géodésie spatiale, Géodynamique et Métrologie de l'espace et du temps. Les thèmes prioritaires sur lesquels nous demandons des ***recrutements de chercheurs*** dans les prochaines années sont les suivants :

- ***Le champ de gravité terrestre et ses déformations dans le temps***
- ***Mouvements verticaux et surcharges***
- ***Atmosphère et mesures géodésiques***
- ***Géodésie et niveau des mers***
- ***Métrologie des systèmes de référence d'espace et de temps***
- ***Repères de référence et déformations crustales***
- ***Intérieur de la Terre et géodésie***
- ***Physique fondamentale***

Ces recommandations concernent le recrutement par le CNRS, le MEN/CNAP et tout autre organisme de recherche susceptible de soutenir ces activités.

L'observation géodynamique requiert aussi du ***personnel technique***, pour la maintenance et l'exploitation des stations et réseaux permanents et des parcs d'instruments. Cette contribution essentielle peut être apporté par du personnel CNES, CNRS, IGN, INSU, IRD, MEN, MRT, ou SHOM. Nous sollicitons ces organismes de dégager des ressources pour soutenir les thèmes prioritaires d'AGRET en liaison avec leurs propres objectifs. Mentionnons en particulier la faiblesse en personnel de SONEL, qui représente pourtant un programme d'avenir de bonne tenue internationale.

**5.4. Le rôle spécifique de Tahiti dans le dispositif international**

Considérant le rôle privilégié du site de Tahiti pour assurer une participation significative de la France à l'étude géodynamique du Pacifique sud et la maintenance des référentiels terrestre et céleste internationaux, il importe de renforcer de façon pérenne la situation de l'observatoire géodésique de Tahiti et d'utiliser toutes les possibilités de compléter son caractère pluridisciplinaire.

Les actions suivantes, qui concernent le CEA, le CNES, le CNRS/INSU, l'IGN, l'IRD, le MEN, le MRT, le SHOM, peuvent concourir à la réalisation de ces objectifs.

- ***Définir un organisme de rattachement principal pour l'Observatoire géodésique de Tahiti.***
- ***Stabiliser le personnel.***
- ***Organiser le suivi géodésique de(s) marégraphes(s) proches de Papeete.***
- ***Dans la recherche du site d'installation d'une antenne radio de poursuite de sondes interplanétaires, considérer sérieusement le site de Tahiti et la valeur ajoutée que représenterait sa participation au réseau VLBI astrogéodésique international.***