Une exploitation des données géodésiques fournies ci-dessus dans le but d'estimer une tendance absolue du niveau des mers repose sur au moins les deux hypothèses suivantes:

• la contribution de tous les autres maillons de la chaîne de rattachement du marégraphe sont négligeables;

• les déplacements de l'écorce terrestre sont linéaires sur plusieurs dizaines d'années. Ainsi, le mouvement observé par la station de géodésie spatiale est vraisemblablement celui qui a affecté les mesures passées du marégraphe.

Mais, notre étude de la première partie montre que la dérive des marégraphes ne peut être négligée sans un suivi régulier. Or, ce suivi n'est pas acquis en pratique, notamment lorsque l'application visée par les responsables de l'observatoire est la navigation et la prédiction des marées. Le deuxième postulat est certainement plus raisonnable, bien que des informations in situ de nature complémentaire devraient venir confirmer l'hypothèse. Par ailleurs, ces mouvements sont d'ordinaire extrêmement ténus. Les incertitudes de la correction géodésique s'avèrent donc encore trop importantes. Mais il ne faut pas oublier que les valeurs sont estimées à partir de séries temporelles de données qui s'étalent sur quelques années seulement. Aussi, il est déjà intéressant de noter la cohérence des vitesses des points dans certains sites, par exemple Tromso, Hilo, Victoria et Washington. D'autant qu'elles sont estimées par des techniques différentes. Dans d'autres sites, on observe des écarts qui dépassent le millimètre par an, mais qui restent en accord avec les incertitudes. Ils traduisent peut être des instabilités locales, auquel cas la contribution du maillon reliant le point de l'ITRF au repère de marée n'est peut être pas négligeable.

IX.2. Campagnes GPS de rattachement des marégraphes

Les premières campagnes GPS de rattachement des marégraphes dans un système de référence terrestre mondial ont vu le jour il y a environ dix ans maintenant, en particulier très tôt en France et en Angleterre, 1986, dans le but de déterminer le biais entre les surfaces de référence des systèmes d'altitudes respectifs, NGF-IGN69 et ODN [Willis et al, 1989]. Depuis, les expériences se sont multipliées en Europe comme en témoigne l'inventaire ci-dessous que nous avions effectué en 1994 dans l'objet de définir un réseau de marégraphes de base en Europe [Boucher et Wöppelmann, 1994-b].

- La Manche 1986 (OSGB, IGN)
  1 Campagne, 1986
  12 Marégraphes observés en France et en Angleterre
  [Willis et al, 1989]
- EUROGAUGE (IESSG, IAGE, IGNE, IGNF, IGCP, POL, OSGB, UNT)
  2 Campagnes, 1993 et 1994
  16 Marégraphes observés en France, Portugal, Espagne et Angleterre
  [Baker et al 1992, Carter (Ed) 1994]
- Projet SELF (ETHZ, IFAG, NTUA, POL, Université de Bologne)
  2 Campagnes, 1992 et 1993
  19 Marégraphes observés en France, Grèce, Italie et Espagne
  [Baker et al 1992, Carter (Ed) 1994]
- Projet hollandais NEREF-MAREO
  2 Campagnes, 1990 et 1994
  11 Marégraphes observés en Hollande et 1 en Belgique
  [Baker et al 1992, Carter (Ed) 1994]

- Projet anglais UKGAUGE (IESSG, POL, OSGB and UK Military Survey)
  3 Campagnes, 1991, 1992 et 1993
  9 Marégraphes observés
  [Baker et al 1992, Carter (Ed) 1994]
- Projet BSL
  2 Campagnes, 1990 et 1993
  38 Marégraphes observés au Danemark, Estonie, Finlande, Allemagne, Latvie, Lituanie, Pologne, Russie et Suède
  [Kakkuri (Ed.) 1994 et 1995]
- Projet WHAT-A-CAT (DGFI, ETHZ, IGNF, NTUA, Universités de Bologne, Naples and Bari)
  Plusieurs campagnes entre 1987 et 1994
  Le réseau comprend au moins 13 marégraphes
  [Kahle et al 1993]
- Campagnes françaises en Méditerranée (IGN)
  3 Campagnes, 1986, 1988 et 1990
  13 Marégraphes en France et Italie
  [Boucher, 1991]

La plupart de ces campagnes résultent de l'élan enthousiaste qui suivit le rapport de la CMSLT en 1989 [Carter et al, 1989]. Mais, aujourd'hui, force est de constater que, malgré la volonté d'appliquer les techniques spatiales à la marégraphie et l'intérêt scientifique de leur synergie, peu de résultats ont été diffusés aux utilisateurs, et encore moins sous une forme pratique de base de données complémentaire à celle du PSMSL. Les explications peuvent être multiples, liées en particulier à:

- des techniques nouvelles en essor: incertitudes méthodologiques dans la stratégie d'observation et dans le traitement des données, problèmes instrumentaux, etc.
- l'envergure internationale des projets: problèmes logistiques, coûts élevés, etc.
- la situation géographique des marégraphes qui induit des problèmes spécifiques de modélisation: surcharge océanique, etc.
- la multiplicité des intervenants: marégraphie, nivellement, géodésie spatiale.

Il est d'ailleurs très instructif d'examiner les deux rapports très détaillés qui furent publiés sur les résultats des campagnes du projet baltique [Kakkuri (Ed.), 1994 et 1995]. On comprend aujourd'hui mieux les résultats médiocres obtenus avec le GPS jusque 1990. « Médiocres » vis à vis des résultats théoriques espérés et annoncés dans Carter et al [1989], on peut comprendre que certains instituts ou scientifiques se soient gardés de les faire connaître aux utilisateurs.

Dans les résultats du projet de la mer baltique, on remarque que les sessions journalières de chaque centre de calcul présentent des répétabilités de plusieurs centimètres, de 5 à 10 cm suivant le centre. La comparaison des solutions globales de chacun montre par la suite des écarts moyens de plus de 10 cm [Poutanen, 1994]. Les causes ne semblent pas manquer pour expliquer les discordances observées. D'abord, la qualité des données était nettement moins bonne que prévue. Des sessions entières étaient inexploitables sur de nombreux points, tous les types de récepteurs employés étaient concernés par ce problème. La stratégie de « réseau fixe » en était même compromise, de même que le calcul des orbites des satellites. En outre, les effets systématiques des variations de centre de phase de l'antenne et des mélanges d'antenne sont évoqués dans la plupart des compte rendus de calcul. L'effet des perturbations ionosphériques est également avancé. Notons que l'activité solaire se trouvait alors proche d'un maximum du cycle de onze ans.

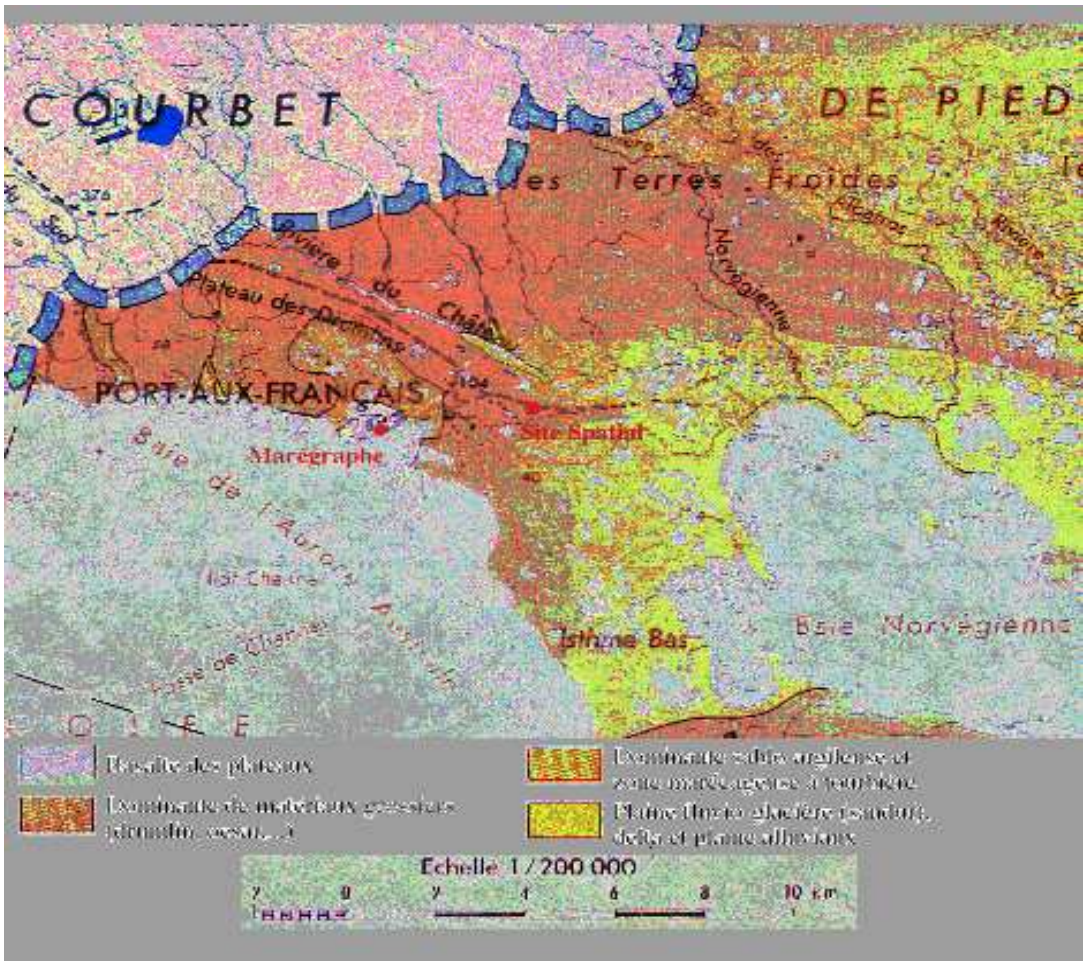
Les résultats de la campagne GPS de 1993 indiquent en revanche un accord de 2 à 3 cm sur la composante verticale entre les diverses solutions globales individuelles produites par les différents centres de calcul [Poutanen, 1995]. Zielinski & Zdunek [1995] citent parmi les facteurs qui ont permis cette amélioration: une constellation de satellite plus complète; des observations de meilleure qualité; une ionosphère plus calme; l'amélioration des modèles de traitement des données (version 3.4 du Bernese Software); la disponibilité d'orbites IGS du centre CODE; des meilleures coordonnées du réseau fixe (ITRF93), et un calcul distingué suivant le type d'antenne.

IX.3. Cas particulier de Kerguelen

Le site de Kerguelen situé dans l'océan Indien sub-antarctique fait partie du Réseau d'Observation Sub-Antarctique et Antarctique du niveau de la MEr (ROSAME). Il s'agit d'une contribution française au réseau international GLOSS. Le marégraphe en question est un appareil à capteur de pression installé à Port-aux-Français dans un puits fixé contre le quai, non loin de l'ancien emplacement du marégraphe qui servit en 1962 à établir une référence altimétrique [Guichard, 1964]. Le niveau technologique de cette station répond au normes de qualité de WOCE, notamment en ce qui concerne la transmission des données en temps réel via ARGOS. Aussi, tel que le recommande le projet GLOSS [IOC, 1990], nous avons étudié le moyen de rattacher ce marégraphe par techniques de géodésie spatiale à un système de référence terrestre mondial.

A cet égard, le site de Kerguelen est justement équipé d'un récepteur GPS permanent et d'une balise d'orbitographie DORIS, implantés non loin de là, à environ trois kilomètres. Mais, comme nous allons le voir par la suite, la partie n'est pas gagnée pour autant. Le GPS, un récepteur Rogue SNR-8C, est opérationnel dans l'IGS depuis novembre 1994, soit un mois après notre campagne NIVMER-94 [Le Provost & Wöppelmann, 1994]. Ce site est donc surveillé en permanence par deux techniques de positionnement précis. Sa configuration et son environnement nous ont fait opté pour l'installation d'un pilier géodésique à moins de 50 m du marégraphe. Le support rocheux du pilier est du basalte des plateaux, dont les caractéristiques de stabilité étaient fortement recommandées par le géologue de l'IPGP, Mr Cheminée, consulté avant la mission. Aussi, nous devons remarquer que, dès la base de Ports-aux-Français et en direction du site où se trouvent les instruments de géodésie spatiale, le terrain est de dominante sablo-argileuse et constitue une zone marécageuse à tourbière (cf. extrait de la carte géologique Nougier, 1970). La stabilité absolue du site géodésique, et par suite la stabilité relative de notre marégraphe par rapport à ce dernier, est loin d'être acquise si l'on se fie aux indications géologiques. Aussi, il est regrettable que les objectifs du CNES et les nôtres n'aient pu coïncider. Un maillon supplémentaire est donc ajouté au processus de rattachement du marégraphe de Kerguelen, il correspond au vecteur liant le pilier géodésique du marégraphe aux instruments permanents.

Figure 94 : Extrait de la carte géologique de reconnaissance des îles Kerguelen [Nougier, 1970], à proximité de la base de Ports-aux-Français.



Voyons à présent quel est l'état de connaissance de ces « maillons » dans le cas pratique de Kerguelen. La grandeur {m} de la relation (E.VII.2) est mesurée depuis quelques années à présent. Toutefois, ses indications se réfèrent à sa référence instrumentale. Elle n'est matérialisée par aucun repère de marée, et ne peut donc pas être surveillée dans le temps. Lors de notre campagne NIVMER-94, nous avons complété le réseau de points de nivellement existant afin de mettre en place la base matérielle d'une surveillance de la stabilité du site sur plusieurs années. L'un d'eux convient parfaitement à la fonction de repère de marée. Nous avons également tenté une opération d'étalonnage avec le prototype de l'Observatoire Royal de Belgique (cf. chapitre III), sans résultats concrets jusqu'à présent. Les grandeurs $\{C_M\}$ et {D} n'ont par conséquent pas de détermination encore.

La quantité $\{\Delta H_{MG}\}$ n'était pas déterminable pendant NIVMER-94, puisque l'un des propos de la campagne était justement de mener une reconnaissance de terrain, et de choisir l'emplacement du pilier. Sa construction s'est effectuée entre notre campagne et celle du géomètre de l'IGN, dont l'une des missions était de rattacher les divers repères entre eux: DORIS, GPS, et nivellement. En revanche, nous avons observé le réseau local de repères de nivellement. La comparaison des dénivelées avec celles qui furent déterminées dans les années 1960 donne des résultats remarquablement cohérents, à mieux que 3 mm. Ces résultats sont d'autant plus significatifs d'une remarquable stabilité locale que Guichard [1964] évaluait la précision des dénivelées entre 2 et 3 mm en raison du matériel employé. Les écarts s'expliqueraient donc plutôt par l'incertitude de la détermination que par un mouvement réel du sol.

Le géomètre a observé sa dénivelée en aller - retour comme prévu, avec les contrôles de rigueur. Seulement, n'ayant pas effectué les calculs de dénivelée sur place, il n'a pu déceler la faute qui s'est glissée dans une des nivelées du cheminement, et qui s'est de toute évidence compensée dans le contrôle de marche. Aucune autre dénivelée n'a malheureusement été observée par ailleurs, qui aurait pu identifier la faute: sur la dénivelée aller, ou sur la dénivelée retour. En attendant, leur écart est de 1 cm, soit un facteur 10 par rapport à ce que l'on attend du nivellement géométrique de précision.

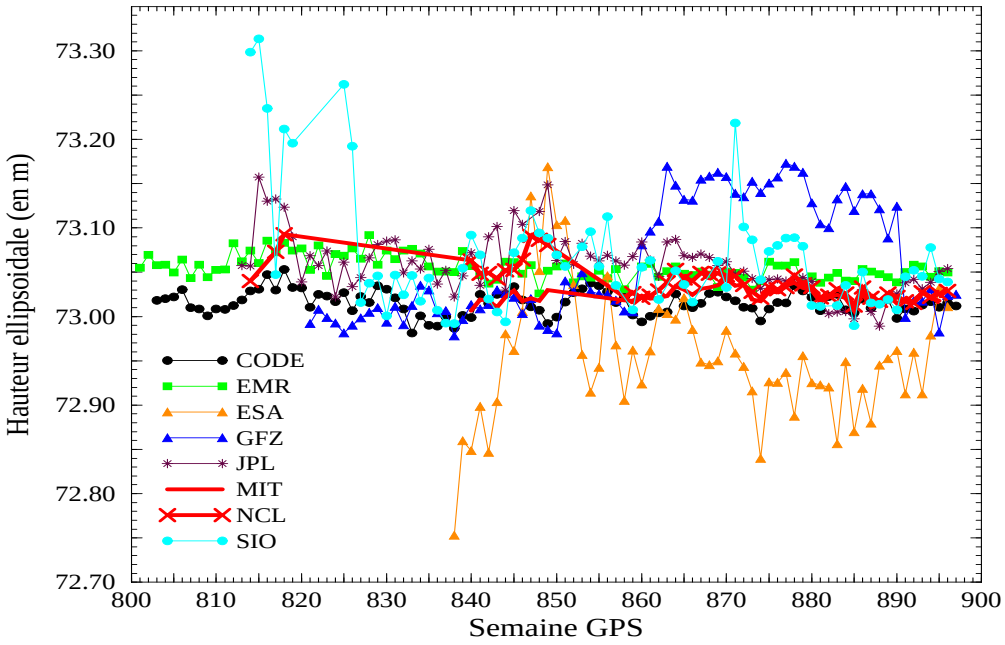
Le rattachement supplémentaire entre le pilier du marégraphe et les points de géodésie spatiale DORIS et GPS ont été observé par ce géomètre en novembre 1994. En décembre 1995, un collaborateur australien installait un récepteur GPS sur le pilier marégraphique pendant quelques jours. Les résultats de la première opération de rattachement figurent dans le rapport de Fagard [1995]. Il effectue un calcul de compensation de l'ensemble des rattachements locaux disponibles. Les résultats indiquent une précision de l'ordre de trois millimètres sur les trois composantes, à peine dégradée en vertical.

Quant aux données de 1995, nous les avons récupérées via internet, et calculées avec le Bernese Software, version 4.0. Deux sessions ont pu être constituées, l'une de 8 heures pour le premier jour, l'autre de 12 heures pour le second. En effet, les fichiers ont été mal assemblés ou mal transformés au format d'échange RINEX, résultant en des données disparates et mélangées au sein de chacun. La quantité de données sauvées était a priori suffisante pour assurer un rattachement à quelques millimètres sur une ligne de base de trois kilomètres à peine. La comparaison des deux solutions journalières montre un désaccord de deux à trois millimètres pour les deux composantes horizontales, et de 1.3 centimètres en vertical. Après de nombreuses recherche, l'explication est venue d'un collègue du centre IGS CODE avec lequel le LAREG est associé (M. Rothacher). L'antenne du récepteur GPS ASHTECH de l'australien (GEODETIC L1/L2) est un des plus anciens modèles de cette marque. Ses performances sont médiocres en raison du haut niveau d'instabilité de son centre de phase. Aussi, malgré l'utilisation des corrections de variation du centre de phase de l'antenne, on ne peut obtenir mieux que le centimètre en vertical. La comparaison avec le rattachement de 1994 reflète ce niveau d'incertitude.

Enfin, nous nous sommes intéressés aux données du récepteur GPS ROGUE qui est en place de manière permanente depuis novembre 1994. Les centres d'analyse de l'IGS traitent ces données de manière routinière en raison de la situation stratégique intéressante de Kerguelen pour les calculs d'orbite des satellites GPS. Aussi, nous avons récupéré sur le centre de données global IGS de l'IGN les produits calculés qui nous intéressaient. La figure 95 donne les séries temporelles de la composante verticale des positions calculées par chacun des centres. Il s'agit de données hebdomadaires exprimées dans un système de référence terrestre inhérent à chaque centre, proche de l'ITRS puisque l'IGS l'a adopté et que les orbites des satellites GPS y sont exprimées.

Nous avons estimé la tendance de chacune des séries temporelles proposées par régression linéaire. Le tableau de la figure 96 donne les résultats obtenus. On constate en moyenne une pente très faible à la baisse de l'ordre de -0.20 mm/an avec une incertitude de 0.1 mm/an environ. Ce tableau donne par ailleurs les positions moyennes calculées pour chacun des centres, puis pour l'ensemble. Les déterminations sont en général cohérentes à mieux que deux centimètres. Les solutions combinées de l'IGS, produites par le MIT et le NCL, sont isolées dans la figure 95.b. Elle permet de mieux apprécier la cohérence de ces séries temporelles.

Figure 95.a et 95.b : Hauteurs ellipsoïdales $\{h_G^i\}$ calculées par les divers centres d'analyse GPS de l'IGS et mises à disposition des utilisateurs sur le centre de données global situé à l'IGN.



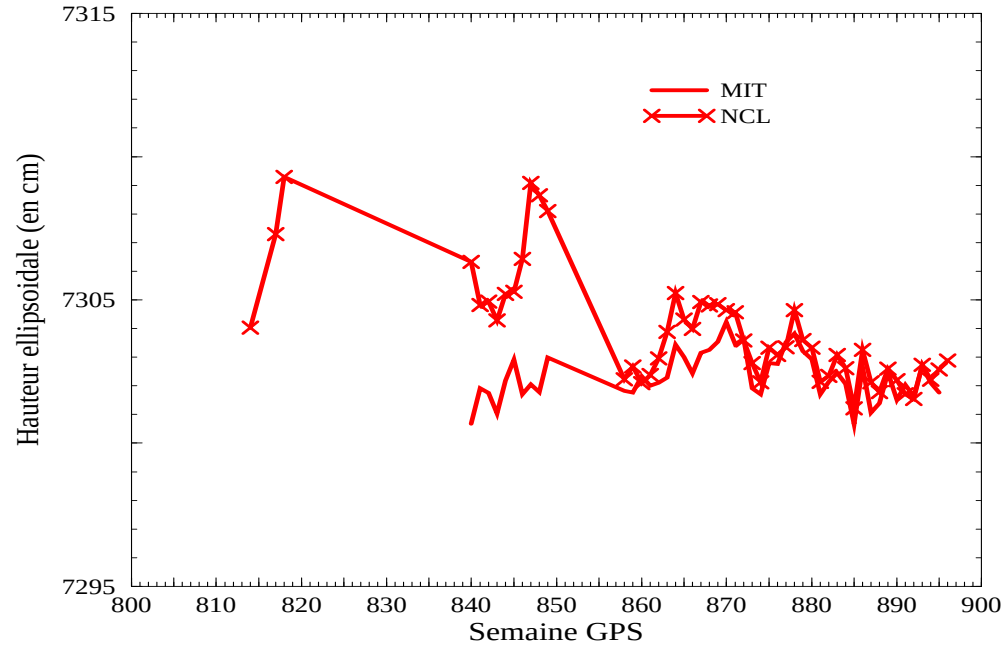


Figure 96 : Composante verticale des séries temporelles de positions fournies par les centres d'analyse GPS de l'IGS.

Centre de calcul IGS	Hauteur moyenne (m)	Vitesse (mm/an)
CODE [803-897]	(73.016 ± 0.013)	(-0.07 ± 0.04)
EMR [801-896]	(73.055 ± 0.013)	(-0.24 ± 0.04)
ESA [838-896]	(72.954 ± 0.073)	(-0.47 ± 0.56)
GFZ [821-897]	(73.060 ± 0.066)	(1.76 ± 0.27)
JPL [813-896]	(73.059 ± 0.033)	(-0.71 ± 0.13)
MIT [840-895]	(73.023 ± 0.008)	(0.04 ± 0.07)
NCL [814-896]	(73.039 ± 0.019)	(-0.68 ± 0.09)
SIO [814-896]	(73.068 ± 0.070)	(-1.20 ± 0.32)
MOYENNE	(73.034 ± 0.018)	(-0.20 ± 0.09)

L'exemple de Kerguelen illustre encore une fois qu'il n'est pas immédiat d'obtenir un rattachement de qualité pour la référence du marégraphe, et par suite pour l'expression des variations de niveau marin en absolu. Les maillons de la chaîne du processus sont nombreux et nécessitent chacun une attention particulière. Le nivellement géométrique de précision est encore le maillon le plus précis de la chaîne. Toutefois, nous constatons à notre détriment que l'on ne se trouve pas à l'abri de surprises.