VII. La synergie marégraphie - géodésie spatiale

L'expectative d'exprimer les mesures des marégraphes dans un système de référence terrestre tel que l'ITRS a soulevé l'intérêt de la communauté scientifique, et en particulier des chercheurs dont les résultats sont limités par le caractère local et relatif de ces mesures. Aussi, la combinaison des techniques de marégraphie et de géodésie spatiale apparaît comme une solution attractive à explorer. Elle permettrait de comparer avec précision les résultats des marégraphes à l'échelle mondiale, et d'estimer sans ambiguïté les variations absolues du niveau de la mer liées aux changements climatiques. Le présent chapitre étudie enfin le processus qui permet de rattacher les marégraphes à un système géodésique mondial, puis évoque quelques unes de ses autres applications.

VII.1. Description du concept

Le concept de rattacher les marégraphes à un système géodésique n'est pas nouveau. Il remonte au moins au début du siècle, alors qu'on cherchait déjà à comparer les niveaux marins des côtes méditerranéenne et atlantique obtenus à partir des marégraphes métropolitains en France [Vignal, 1935]. Toutefois, l'étude présentée au chapitre V montre quels sont les risques à utiliser les réseaux de nivellement comme référence verticale pour effectuer de telles comparaisons. Bonnetain [1987] prévient les interprétations océanographiques qui pourraient être tirées trop hâtivement des niveaux moyens de la mer exprimés dans le système d'altitude NGF-IGN69. Les données marégraphiques ainsi réduites à la référence nationale d'altitudes seraient en moyenne à +43 cm sur les côtes de La Manche, et à +33 cm sur les côtes atlantiques, au-dessus du niveau moyen de la mer établi en Méditerranée, à Marseille, entre 1885 et 1897.

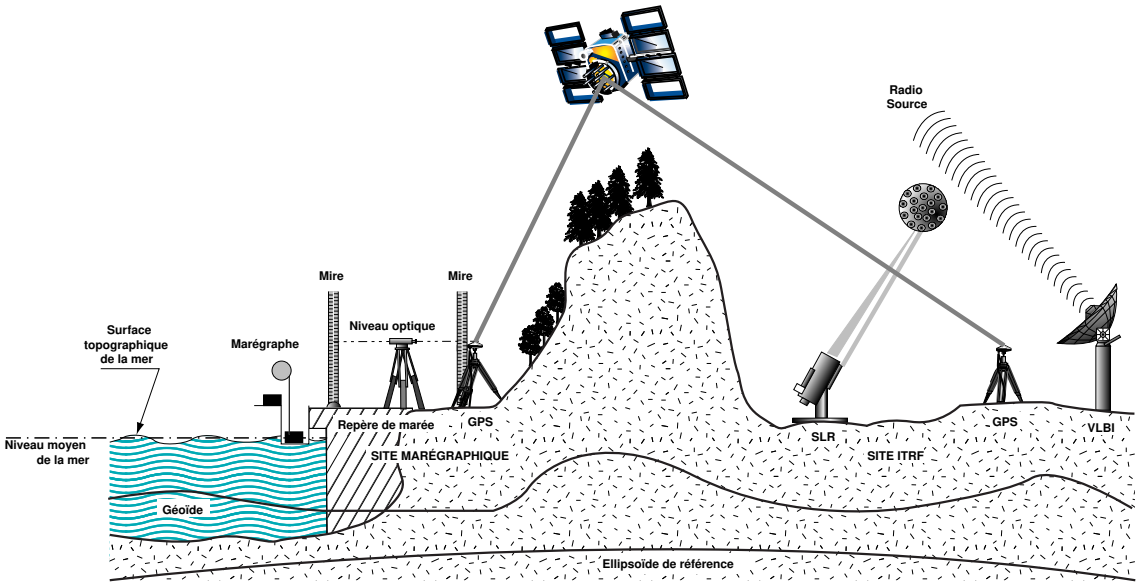
L'originalité du processus synergique que nous étudions ici réside dans la référence verticale considérée, de nature géométrique et géocentrique, et dans les techniques de géodésie spatiale qui permettent de la réaliser, et de s'y rattacher. La relation entre les données du marégraphe et la réalisation du système de référence terrestre est déterminée par les diverses techniques qui constituent ce processus. Chacune constitue un maillon de la chaîne qui relie de proche en proche le niveau de la mer et le système géodésique.

La figure 86 illustre les principaux éléments du processus de rattachement géodésique des marégraphes considéré. D'un côté, nous avons le niveau de la mer et la marégraphie, de l'autre, la matérialisation du référentiel terrestre et la géodésie spatiale. La liaison entre les deux se fait dans le cas général par nivellement et par techniques spatiales différentielles portables. La relation qui apparaît de prime abord s'écrit en considérant la contribution de chacune des techniques:

$$\mathbf{h_m = m + \Delta H_{MG} + h_G} \qquad \textbf{(E.VII.1)}$$

avec:
- h_m : hauteur ellipsoïdale du niveau de la mer;
- m : donnée du marégraphe;
- ΔH_{MG} : dénivelée entre le repère de marée (M) et le repère géodésique (G);
- h_G : hauteur ellipsoïdale du repère géodésique (G).

Figure 86 : Principaux éléments du rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence terrestre mondial par techniques de géodésie spatiale (dessin A. Pasquier).



Cette formulation générale est toutefois approchée. Elle pourrait suffire dans la plupart des cas, mais elle ne reflète pas quelques réalités qui peuvent en pratique poser des difficultés à obtenir des résultats, ou qui permettent d'expliquer la qualité médiocre de ces derniers. A titre d'exemple:

• Le transfert de hauteur par nivellement se réalise de fait par rapport à une surface de niveau, que l'on peut d'ailleurs assimiler au géoïde. Or, celle-ci présente parfois une pente non négligeable par rapport à l'ellipsoïde de référence. D'autant plus négligeable, il est vrai, que le relief est plat et le cheminement court.

• La donnée du marégraphe est rarement diffusée par rapport au repère de marée. Des confusions peuvent survenir lorsque les intervenants d'origines différentes ne s'entendent pas clairement sur les questions terminologiques de référence du marégraphe: référence interne de l'instrument, ou référence externe de l'observatoire définie par le biais du repère de marée, mais pas forcément confondue avec son sommet (cf. chapitre III).

Aussi, une formulation plus complète est donnée dans la relation (E.VII.2). Elle s'appuie sur la représentation vectorielle de la figure 87 qui aide à la retrouver et à la comprendre. A priori, chacune des grandeurs définies dans cette relation peut être considérée comme indépendante des autres. Les valeurs respectives sont en effet issues de techniques d'observation et d'analyse différentes. Par suite, les erreurs systématiques intrinsèques à chacune d'elles pourront également être estimées indépendantes dans un budget d'erreur.

$$\mathbf{h}_m = \mathbf{m} - \mathbf{D} + \Delta\mathbf{H}_{MG} + \Delta\mathbf{N}_{MG} + \mathbf{h}_G \qquad \textbf{(E.VII.2)}$$

avec:
$$\begin{cases} \mathbf{m} = \mathbf{g} + \mathbf{C}_M + \mathbf{D} \\ \Delta\mathbf{H}_{MG} = \mathbf{H}_M - \mathbf{H}_G \\ \Delta\mathbf{N}_{MG} = \mathbf{N}_M - \mathbf{N}_G \\ \mathbf{h}_G = -\mathbf{C}_G + \mathbf{h}_G^i + \mathbf{C}_T \end{cases}$$

{**m**} : Donnée du marégraphe;

{g} : Indication « brute » du marégraphe;

{C_M} : Valeur de calage de la référence interne du marégraphe;

{D} : Cote sous le repère de marée;

{$\Delta \mathbf{H_{MG}}$} : Dénivelée entre le repère de marée (M) et le repère géodésique (G);

{$\mathbf{H_M}$} et {$\mathbf{H_G}$} : Altitudes orthométriques des points (M) et (G);

{$\Delta \mathbf{N_{MG}}$} : Pente du géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence entre (M) et (G);

{$\mathbf{N_M}$} et {$\mathbf{N_G}$} : Hauteurs ellipsoïdales du géoïde aux points (M) et (G);

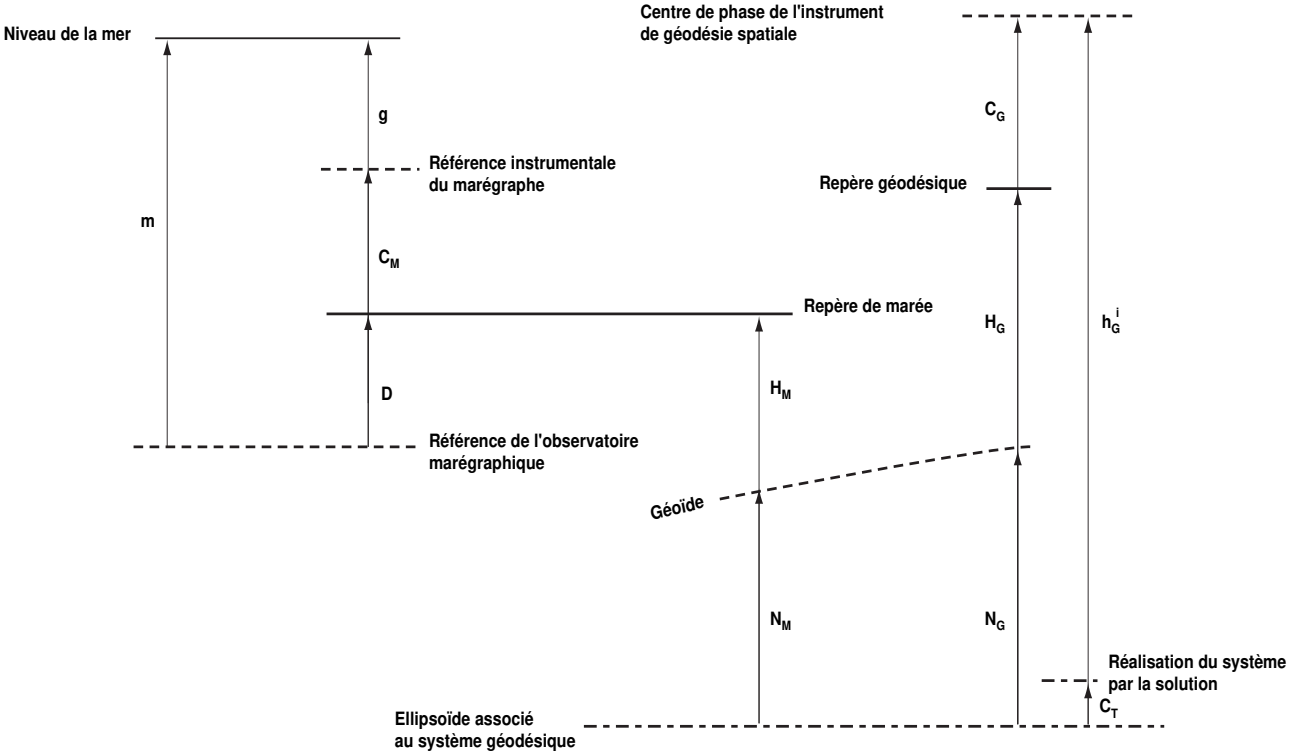
{$\mathbf{h_G}$} : Hauteur ellipsoïdale de (G) dans le système de référence terrestre adopté;

{$\mathbf{C_G}$} : Excentrement du centre de phase de l'instrument de géodésie spatiale par rapport au repère (G);

{h_G^i} : Hauteur ellipsoïdale du centre de phase de l'instrument de géodésie spatiale issue de la solution individuelle calculée;

{$\mathbf{C_T}$} : Décalage entre la solution individuelle et la réalisation adoptée pour le système de référence terrestre.

Figure 87 : Schéma des grandeurs intervenant dans le processus de rattachement des marégraphes dans un système géodésique mondial par techniques spatiales.



La relation (E.VII.2) a donc le mérite d'être plus rigoureuse, mais aussi de mettre en évidence les diverses grandeurs soumises à mesurage dont nous aurons à manipuler les valeurs dans le cas le plus général. Il s'agit des informations de:

• marégraphie. Outre la donnée du marégraphe {m}, nous devons connaître la définition {D} de sa référence par rapport au repère de marée. La valeur de {D} peut d'ailleurs varier suivant que le repère de marée est déplacé, détruit, ou remplacé.

• nivellement. La dénivelée $\{\Delta H_{MG}\}$ entre le repère de marée et celui de géodésie spatiale concerne a priori un cheminement local qui n'excède pas quelques kilomètres.

• géodésie physique. La pente du géoïde $\{\Delta N_{MG}\}$ peut être estimée à partir de modèles de géoïde. D'ordinaire ce terme est négligé car la distance qui sépare les deux repères est suffisamment courte, à peine quelques kilomètres. Toutefois, il faut étudier cette simplification au cas par cas, selon la configuration du site et la connaissance du géoïde localement.

• géodésie spatiale. La hauteur du repère géodésique $\{h_G\}$ est exprimée par rapport à l'ellipsoïde de référence du système géodésique mondial considéré, l'ITRS par exemple.

L'origine de certaines de ces grandeurs mérite toutefois quelques éclaircissements, notamment lorsqu'elles ne proviennent pas directement du traitement d'un type unique de mesure. C'est le cas de {m} qui est issue des indications {g} du marégraphe; du calage $\{C_M\}$ de son zéro au repère de marée, déterminé par étalonnage (cf. chapitre III); et de la cote {D} du repère de marée au-dessus de la référence conventionnelle de l'observatoire. C'est aussi le cas de la grandeur $\{h_G\}$ qui est établie à partir:

• de la hauteur $\{h_G^i\}$ obtenue à partir du traitement des données d'une technique de géodésie spatiale, fournissant ce que l'on appelle une solution individuelle, ou un jeu de coordonnées individuel, dans lequel figure en particulier la position de notre point (G).

• de l'excentrement $\{C_M\}$ du centre de phase de l'antenne du récepteur géodésique vers un point appartenant au système de référence terrestre considéré. D'ordinaire, le vecteur est mesuré localement par techniques de géodésie classique.

• et de la transformation $\{C_T\}$ qui se détermine à partir de l'analyse de combinaison de la solution individuelle avec la réalisation du système de référence terrestre adopté. C'est une analyse du type que réalise l'IERS pour construire l'ITRF (cf. Chapitre VI).

Notons que le traitement des observations d'une technique spatiale s'effectue en général par réseau de points, donnant lieu à un jeu de coordonnées associé. Ceci même si la technique n'est pas de type différentielle, afin de mieux contraindre les incertitudes liées au système de référence terrestre sous-jacent à la solution individuelle. Diverses stratégies de calcul en réseau sont possibles. Une stratégie en « réseau d'appui » contraint fortement les coordonnées d'un certain nombre de points, ou les fixe. Les coordonnées de ces points définissent alors le système de référence de la solution. L'inconvénient principal de cette méthode est que les incertitudes dans les positions des points fortement contraints se répercutent dans les estimations des coordonnées des autres points. Une autre stratégie est celle de « réseau libre », ou plus précisément à contraintes minimales. Les résultats d'une telle solution sont plus cohérents, dans la mesure où les données s'ajustent à un système de référence naturel, intrinsèque au processus d'analyse et aux observations. Ce n'est que par la suite que l'on retranche le biais de système de référence en combinant la solution obtenue en réseau libre avec la réalisation du système de référence terrestre auquel on désire se ramener.

Ces remarques expliquent quelque peu la nature de la grandeur $\{C_T\}$ introduite dans la relation générale (E.VII.2) qui, à l'image de l'étalonnage du marégraphe $\{C_M\}$, apporte une information de calage à une référence conventionnelle adoptée par ailleurs. Dans un cas, la dérive est supposée se traduire par une nouvelle valeur du biais, dans l'autre, on postule qu'elle est modélisée correctement par similitude à sept paramètres.

Enfin, la décomposition des grandeurs $\{\Delta H_{MG}\}$ et $\{\Delta H_{MG}\}$ n'avaient pas d'autre objet ici que de matérialiser le géoïde sous les points (M) et (G) pour une meilleure compréhension et visualisation de la formulation (E.VII.2).

VII.2. Types de rattachement

La mise en oeuvre d'une stratégie d'observation et de calcul particulière, plutôt qu'une autre, dépend toutefois de l'application visée, de la dimension du réseau de points, des moyens disponibles pour la mener à bien, et des résultats attendus. Les questions stratégiques sont toujours d'actualité. Elles sont discutées en particulier dans le groupe de travail de la Commission Niveau Moyen de la Mer et Marées (CMSLT) de l'AISPO [Carter et al, 1989 et 1994]. Ce groupe réunit les acteurs intéressés par les résultats du processus de rattachement géodésique des marégraphes: océanographes, géodésiens et représentants des services internationaux de l'IERS et du PSMSL, et plus récemment du Service international du système GPS pour la géodynamique (IGS).

L'évolution des techniques spatiales influe bien entendu sur l'approche du problème. Les deux rapports successifs du groupe de travail de la CMSLT reflètent en particulier les progrès considérables réalisés en quelques années par le GPS. Carter et al [1989] distinguent les techniques de base, à savoir la télémétrie laser et le VLBI, plutôt lourdes, des techniques radioélectriques, en l'occurrence GPS, DORIS, PRARE, beaucoup plus portables. Les premières affichent une précision de quelques centimètres, qui légitime leur participation à l'établissement du système de référence mondial de l'IERS. Les deuxièmes donnent une précision relative de l'ordre de 10^{-6}, autrement dit, sur une ligne de base de 100 km l'estimation de sa longueur est donné à un centimètre près. Elles permettent toutefois de conserver la qualité des points de l'ITRF en l'étendant à des points situés à quelques centaines de kilomètres.

En quelques années, cette précision a progressé de manière spectaculaire pour les techniques radioélectriques légères. D'une précision relative de 10^{-6} en 1988, elle est passée à 10^{-8} pour le GPS, en 1991, et se transforme en suivant en précision absolue centimétrique [Heflin et al, 1992]. Le GPS est ainsi adopté par l'IERS en 1991, suivi par DORIS en 1994. Le deuxième rapport du groupe de travail de la CMSLT considère ces performances, et envisage sérieusement le concept de stations permanentes équipées de marégraphe et de récepteur de géodésie spatiale [Carter ed., 1994]. De nouvelles questions se posent aussi. Comment va-t-on intégrer les réseaux régionaux dans l'ITRF ? Doit-on accepter les solutions régionales comme des solutions globales ? A-t-on les moyens techniques de le faire ? La volonté politique ? Comment profiter des nouveaux systèmes d'analyse qui prennent en compte les matrices de covariance complètes ? Quelle rôle peut jouer l'IGS [Neilan et al, 1995] ? Toutes ces questions et bien d'autres sont à l'étude par les groupes d'experts internationaux.

Différents types de rattachement peuvent être distingués suivant le type de résultat escompté, à savoir:

- une position singulière. Les coordonnées du point ne sont déterminées qu'une fois. Une seule campagne d'observation suffit a priori. En revanche, si le point était déplacé artificiellement ou naturellement d'une quantité jugée inacceptable, il est nécessaire de recommencer. Des vérifications peuvent aussi susciter une ré-observation ultérieure.

- une série temporelle de positions. Dans ce cas, des campagnes répétées dans le temps doivent être planifiées à plus ou moins long terme, et à intervalles réguliers.

- un enregistrement continu. Nous avons dans ce cas un système permanent couplé d'un marégraphe et d'un récepteur de géodésie spatiale. Ce système synergique permet d'envisager des séries temporelles comportant un échantillonnage temporel élevé, qui n'était pas compatibles avec l'organisation de campagnes: positions mensuelles ou hebdomadaires, par exemple.

L'intérêt d'avoir des mesures répétées n'est pas de confirmer la qualité des résultats, ou de l'améliorer en espérant réduire les erreurs aléatoires. Il mais surout, parce que les grandeurs définies dans la relation générale (E.VII.2) sont a priori fonction du temps. des spectres de variation assez différents qui permettent de faire des hypothèses et des simplifications. La qualité du processus de rattachement dépend des erreurs systématiques propres à chaque « maillon » du processus, de la prise en compte correcte des déplacements et des dérives associés aux grandeurs considérées. A cet égard, nous allons voir dans le prochain chapitre quelles sont les sources d'erreur systématique.

VII.3. Autres applications

L'intérêt d'exprimer le niveau de la mer en absolu pourrait surprendre au premier abord le riverain qui ne s'intéresse qu'à la variation relative du niveau de la mer par rapport à la côte, et à la modification du trait de côte qui s'en suivra. Toutefois, s'il souhaite prévoir l'évolution future du niveau marin, et les changements environnementaux qui l'accompagnera sur la zone littorale, il a besoin de comprendre quels sont les processus qui sont à l'origine de ses mouvements locaux, et quelles sont leurs caractéristiques spatio-temporelles. Or, nous avons vu que ce travail ne peut s'effectuer avec les seuls enregistrements des marégraphes.

Outre cet apport à la connaissance des phénomènes géophysiques inclus dans le signal séculaire du marégraphe, d'autres applications sont intéressées par cette synergie entre les techniques de la géodésie spatiale et de la marégraphie. Nous mentionnerons les deux suivantes:

• la première concerne l'unification des systèmes d'altitude. Nous avons vu dans le chapitre V que les surfaces de référence des systèmes d'altitude nationaux sont a priori cohérentes au niveau du mètre en raison de l'origine de chacune, fixée au niveau moyen de la mer en un point de la côte. Le tableau de la figure 88 donne les origines de quelques systèmes d'altitude nationaux en Europe [Boucher et Wöppelmann, 1994-b]. Nous avons vu par ailleurs que les références verticales sont plus ou moins directement liées entre elles par différents types d'informations (cf. figure 77). En particulier, on peut écrire la relation théorique suivante:

$$\mathbf{h} = \mathbf{H} + \mathbf{N} = \left(\mathbf{H_D} + \mathbf{B}\right) + \mathbf{N}$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{B} = (\mathbf{h} - \mathbf{H_D}) - \mathbf{N} \qquad \textbf{(E.VII.3)}$$

avec:
- h: hauteur ellipsoïdale;
- H_D: altitude orthométrique par rapport à la surface de référence d'un système d'altitude;
- B: biais entre le géoïde et la surface de référence du système d'altitude
- H: altitude orthométrique par rapport au géoïde;
- N: hauteur ellipsoïdale du géoïde, ou ondulation du géoïde.

Cette relation suppose que la différence entre la surface de référence d'un système d'altitude et le géoïde peut se modéliser par un simple biais. Rapp [1994] se fonde sur cette relation pour évaluer les biais respectifs entre les différentes surfaces de référence de quelques systèmes d'altitude nationaux. Pour ce faire, il utilise les points des réseaux de nivellement qui ont été déterminé par géodésie spatiale. Les hauteurs ellipsoïdales sont exprimées dans l'ITRF90. Il calcule par ailleurs les ondulations du géoïde à l'aide d'un modèle mixte de géoïde, issu des modèles OSU91A et JGM-2. Les résultats révèlent en particulier des écarts moyens qui oscillent entre -98 cm, en Tasmanie, et +4 cm en Allemagne. L'Angleterre se trouve par exemple à -87 cm. La dispersion des écarts est typiquement de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres. Elle est due notamment à l'incertitude d'environ 80 cm sur les hauteurs ellipsoïdales estimées à partir des données Doppler. Toutefois, la dispersion sur la valeur

moyenne est bien inférieure si l'on tient compte du nombre de déterminations qui contribuent à son estimation.

• la deuxième concerne l'évaluation de la dérive de basse fréquence des mesures d'altimétrie radar par satellite (TOPEX/POSEIDON, JASON, ...). En rattachant les marégraphes dans le même système de référence terrestre que celui de l'orbite du satellite, nous disposons de mesures indépendantes de la même grandeur physique. Leur confrontation permet alors d'évaluer l'ensemble du système altimétrique: erreurs instrumentales, mais aussi erreurs issues des corrections qui sont appliquées aux données satellitaires. Les résultats de comparaison entre données marégraphiques et satellitaires, présentés par Mitchum [1997], sont déjà intéressants. Elles indiquent que les données d'altimétrie radar sont stables à environ 2 mm/an. La méthode avait bien mis en évidence l'erreur de l'algorithme TOPEX qui était sensé corriger la dérive d'horloge [Hancock & Hayne, 1996]. Toutefois, bien que l'incertitude soit déjà sous les spécifications fixées pour la mission, Mitchum [1996] estime que la dérive résiduelle de 2 mm/an est encore trop importante pour qu'elle soit considérée comme aléatoire. Deux sources d'erreur systématiques sont susceptibles d'expliquer cette valeur. D'une part, ses marégraphes sont probablement affectés par les déformations verticales, d'autre part, des effets systématiques régionaux seraient engendrés par l'environnement. En effet, les marégraphes considérés sont situés dans une bande intertropicale, et par exemple, une sensibilité particulière du radiomètre à vapeur du satellite pourrait exister, par ailleurs des erreurs d'orbites régionales sont aussi envisageables.

Figure 88 : Origine de quelques systèmes d'altitude en Europe, d'après un inventaire effectué dans les archives de l'IGN [Boucher & Wöppelmann, 1994]. Le sigle NM désigne un niveau moyen de la mer, NT désigne le niveau moyen de la marée. Entre parenthèses nous ndiquons la période sur laquelle est calculée la moyenne.

PAYS / REGION	ORIGINE DU SYSTEME D'ALTITUDE
FRANCE	NM (1 Feb. 1885 - 1 Jan. 1897) à **Marseille** (Marégraphe)
CORSE	NM (1978) à **Ajaccio** (Marégraphe)
ITALIE	NM (1937-1946) à **Genova** (Marégraphe)
SARDAIGNE	NM (1955-1957) à **Cagliari** (Marégraphe)
ESPAGNE	NM L(1870-1872) à **Alicante** (Marégraphe)
YOUGOSLAVIE	NM (1875, 1875-1879, 1901-1904) à **Trieste** (Marégraphe) NM (1930-1941) à **Bakar** (Marégraphe)
PORTUGAL	NM (1938) à **Cascais** (Marégraphe)
POLOGNE	NM(1931-?) à **Gdynia** (Marégraphe) **Kronstadt** (Zéro du marégraphe)
TCHECOSLOVAQUIE	**Kronstadt** (Zéro du marégraphe)
GRECE	NM (?) à **Kavalla** (Marégraphe)
DANEMARK	NM (1817-1832) à **Kobenhavn** (Marégraphe)
ANGLETERRE	NM (1 Mai 1915 - 30 Avril 1921) à **Newlyn** (Marégraphe)
FINLANDE	**Helsinki** (zéro de l'échelle de marée du port)
SUEDE	NM (1900) à **Stockholm** (Marégraphe)
BELGIQUE	NM (1878-1885) à **Oostende** (Marégraphe)
IRLANDE	NM (?) à **Malin Head** (Marégraphe)
TURQUIE	NM (?) à **Antalya** (Marégraphe)
HOLLANDE	NT (1683-1684) à **Amsterdam**
ALLEMAGNE	NT (1683-1684) à **Amsterdam**

TROISIEME PARTIE

Evaluation du rattachement géodésique des marégraphes

«... J'aurais pu, d'après sa stérilité, lui donner fort convenablement le nom d'« Ile de la Désolation », mais pour ne pas ôter à M. de Kerguelen la gloire de l'avoir découverte, je l'ai appelée la Terre de Kerguelen... »
James Cook [1728-1779].

VIII. Budget d'erreur par « maillon »

A présent que nous avons vu le processus de rattachement géodésique des marégraphes dans un référentiel terrestre mondial, il convient d'évaluer sa qualité. Pour ce faire, nous avons décomposé celui-ci en ses trois maillons « naturels »; chacun correspondant à l'un des trois domaines techniques considérés : la marégraphie, le nivellement et la géodésie spatiale.

Le découpage choisi se justifie d'autant que les erreurs systématiques propres aux instruments d'un domaine peuvent raisonnablement être envisagées comme indépendantes des erreurs systématiques générées par les instruments des deux autres domaines. A cet égard, rappelons que les erreurs systématiques indépendantes subsistent, se cumulent, et se retrouvent dans le résultat final. Ceci quelle que soit la multiplicité des observations. En revanche, lorsqu'elles sont dépendantes, un effet de compensation peut se produire. Quant aux erreurs d'observation ou erreurs accidentelles, elles ne rentrent pas dans le propos de ce chapitre puisqu'elles ne se rapportent pas aux instruments eux-mêmes, mais à l'exploitation de leurs résultats. Ces erreurs sont dites accidentelles car elles se produisent tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, à l'inverse des erreurs systématiques qui se produisent *systématiquement* dans un sens. Si l'on suppose que les erreurs d'observation sont nombreuses, indépendantes, indifféremment positives ou négatives et où chacune d'elles est petite par rapport à la somme de toutes les autres, la loi des grands nombres postule que leurs valeurs tendent à se grouper autour de leur moyenne théorique zéro. La fréquence des plus grandes diminuant à mesure qu'elles s'écartent de la moyenne. La loi de probabilité des erreurs accidentelles est alors légitimement représentée par une courbe de Gauss centrée.

Notons que parmi les imperfections génératrices d'erreurs systématiques, les unes sont connues et déterminées, d'autres sont connues mais non déterminées, voire non déterminables, et certaines enfin ne sont pas connues et a fortiori ne sont pas susceptibles d'être déterminées. Aussi, il serait nécessaire de faire pour chaque instrument pris individuellement une étude complète et rigoureuse des erreurs systématiques dues à la fois à sa conception matérielle et aux conditions de son fonctionnement. Ce travail dépasse largement le cadre de ce travail. Nous nous sommes donc limités à quelques techniques de chaque domaine, en général les plus significatives à l'heure actuelle, sans toutefois rentrer dans les considérations des réalisations pratiques, spécifiques aux constructeurs.

VIII.1. Techniques de marégraphie

Nous avons déjà vu au chapitre II quelles sont les principales techniques de marégraphie en usage à l'heure actuelle. Le principe de mesure de chacune d'elles a alors été décrit. Dans le cadre du travail de thèse, nous avons naturellement porté toute notre attention sur les marégraphes mécaniques à flotteur. D'une part, ce type de marégraphe est encore le plus largement répandu, et d'autre part, le seul marégraphe aujourd'hui à la charge de l'IGN fonctionne suivant ce principe (cf. annexe A). La volonté de remplacer ce vieil instrument centenaire, nous a par ailleurs conduit à nous intéresser aux techniques modernes disponibles. Le choix s'est progressivement dirigé vers les marégraphes acoustiques, d'abord en raison des performances que nous avons pu constater dans les publications effectuées à leur sujet par différents chercheurs [Scherer 1986, Homes 1992, Gill et al 1993, Lenon et al 1993, Vassie 1993], mais aussi parce que le SHOM a opté pour ce type d'appareil après une phase expérimentale de plusieurs années [Dupuy 1993, Simon 1993]. Aussi, la perspective d'une collaboration nationale avec cet organisme nous encourage à maintenir ce choix initial, de manière à bénéficier des développements et de l'expertise déjà acquises et à maintenir un parc homogène d'instruments.

VIII.1.1. Erreurs des marégraphes à flotteur

D'un point de vue général, les marégraphes à flotteur ont les défauts de tous les appareils mécaniques, à savoir, qu'ils ne démarrent ni s'arrêtent instantanément en raison de leur inertie, qu'ils sont en retard sur le phénomène, qu'ils accusent des jeux, des décalages, des frottements, etc. En outre, les imperfections s'accentuent avec le temps, le matériel s'usant et se dérèglant plus fréquemment. Les sources d'erreurs systématiques sont donc potentiellement nombreuses et variées. Elles concernent les différentes parties constituant le marégraphe, plus spécifiquement:

• le flotteur. La variation de poids du flotteur, notamment son alourdissement à la suite d'une perte d'étanchéité ou de l'accumulation de dépôts marins, modifie l'équilibre du système mécanique. La réponse est biaisée dans un sens. Elle n'est probablement pas linéaire, car elle dépend de l'ampleur du phénomène. Des vérifications et des nettoyages réguliers sont recommandés pour se prémunir à ces erreurs et repérer le défaut rapidement. Le choix de matériaux conçus contre l'effet de corrosion et de dépôt permet de résister contre ces attaques naturelles. Par ailleurs, le flotteur évolue à l'intérieur d'un puits de tranquilisation. Des accrochages avec les parois ou les rails de guidage peuvent donc se produire, dégradant la mesure. L'effet ne se compense pas forcément entre la baisse et la montée du niveau de la mer.

• les fils de suspension. La longueur des fils est susceptible de varier avec la température. A plus long terme, il tend à s'allonger en raison des tensions permanentes exercées par le flotteur et les contrepoids. Le choix du matériel est encore une fois important. Par ailleurs le diamètre du fil à une incidence sur le rapport de réduction, car un glissement de celui-ci sur une poulie réduira le couple de torsion.

• les rouages et les contrepoids. Les contrepoids servent à tendre les fils de suspension, notamment celui du flotteur. Sa masse est choisie de sorte à vaincre toute friction de la partie mécanique dans les deux sens de déplacement. Si l'équilibre établi entre le poids et le flotteur est modifié par grippage ou usure des rouages, le rapport de réduction change et un défaut d'échelle apparaît.

• le système d'enregistrement. Les moyens d'enregistrement des données sont aujourd'hui assez variés. Aussi, le traditionnel style inscripteur, qui trace une courbe sur un tambour animé d'un mouvement de rotation uniforme et de vitesse connue, est progressivement abandonné et remplacé par des méthodes électriques, magnétiques, optiques, ou électroniques plus fiables. Il est toutefois encore fort répandu, et d'ailleurs, il constituait le système d'enregistrement à proprement parler du marégraphe de Marseille jusque 1987 (cf. annexe A). Le style inscripteur présente les défauts d'inertie et de retard d'un appareil mécanique. Sa pointe traçante s'accroche, génère des distorsions dues à la courbure du cylindre, à l'élongation du papier, ou à son mauvais calage. Les défauts se traduisent par des erreurs d'échelle aussi bien sur l'amplitude que sur la datation;

• enfin, le système d'horlogerie. La rotation du tambour est commandée par un mécanisme d'horlogerie. Souvent, il s'agit d'horloges à balancier, électriques, ou encore synchrones au réseau électrique. La tension des ressorts, la température, ou les variations de charge du réseau électrique, sont alors susceptibles d'entraîner des écarts de fonctionnement. Les décalages dans le temps ont peu d'incidence sur les études qui requièrent des valeurs moyennes. D'ordinaire, on prescrit une précision meilleure que la minute pour les applications pratiques de prédiction de marée ou de navigation.

Les performances d'un marégraphe à flotteur et la qualité de ses mesures dépendent du choix du matériel, mais également du soin et du suivi que l'on porte à cet instrument pour lutter contre ses dérèglements et sa détérioration. Aussi, l'incertitude sur la mesure de hauteur d'eau instantanée est évaluée entre un et plusieurs centimètres suivant le marégraphe. L'opération d'étalonnage et la mise en oeuvre du test de van de Casteele contribuent à la détection des défauts (cf. chapitre III).

L'étalonnage est par ailleurs indispensable pour recaler le zéro instrumental du marégraphe car la plupart des imperfections se traduisent par une réorganisation de l'équilibre des éléments du marégraphe. Si l'on souhaite atteindre le millimètre sur le niveau moyen mensuel, le calage du zéro du marégraphe doit se faire à mieux que le millimètre. Dans le cas du marégraphe de Marseille, nous avons vu que la dérive indiquée par les étalonnages successifs est lente, inférieure au millimètre par an (cf. figure 56). Elle ne peut toutefois être négligée lorsque l'on cherche des signaux de l'ordre du millimètre par an. Un étalonnage annuel s'avère suffisant dans ce cas pour conserver le niveau de précision millimétrique. Si l'on suppose par ailleurs que les erreurs systématiques ont un spectre basse fréquence, qu'elles peuvent donc s'assimiler à l'instabilité du zéro de l'instrument, et que les autres erreurs sont en grande partie aléatoires, alors une précision de trois centimètres sur la mesure instantanée du marégraphe suffit pour estimer des moyennes mensuelles du niveau de la mer à un millimètre près (cf. chapitre II).

VIII.1.2. Erreurs des marégraphes acoustiques

Le principe de mesure des marégraphes acoustiques est expliqué dans le chapitre II et décrit dans la figure 12. Le signal acoustique est émis par un appareil situé au-dessus du plan d'eau. Le faisceau est émis avec un angle d'ouverture de quatre à cinq degrés. L'onde se propage aussi bien dans un tube en plastique spécifique de faible diamètre ou à l'air libre. Des mesures élémentaires sont effectuées à une cadence élevée de l'ordre de la seconde. Une moyenne sur plusieurs minutes est calculée à partir de ces mesures élémentaires, elle constitue la donnée du

marégraphe. C'est une mesure intégrée sur quelques minutes qui est répétée toutes les heures par exemple. Un avantage de cette procédure est qu'elle filtre de manière satisfaisante les fluctuations de courte période du niveau de la mer sans recourir à un puits de tranquilisation. Elle permet par la même occasion de calculer des paramètres de qualité de la mesure, de rejeter les mesures élémentaires aberrantes, etc. La hauteur d'eau est déduite de la relation suivante, en respectant les notations de la figure 12:

$$\mathbf{H = D - L = D - \frac{\Delta t}{2} \times S(T, P, U)} \qquad \textbf{(E.VIII.1)}$$

H : hauteur du plan d'eau;
D : hauteur du centre de phase de l'appareil;
Δt : temps de propagation aller - retour de l'onde acoustique;
S : vitesse de propagation de l'onde. Elle est fonction de la température {T}, de la pression atmosphérique {P}, et de l'humidité relative {U}.

Les sources potentielles d'erreurs systématiques sont:

• la température, la pression atmosphérique et l'humidité relative qui influent sur la valeur de la vitesse de propagation de l'onde acoustique;

• la qualité de la mesure de temps;

• et la stabilité du centre de phase moyen de l'émission et la réception de l'onde par le senseur acoustique.

La vitesse de l'onde acoustique peut s'exprimer en fonction des paramètres cités ci-dessus par la relation du Bureau des Longitudes [Dupuy, 1993]:

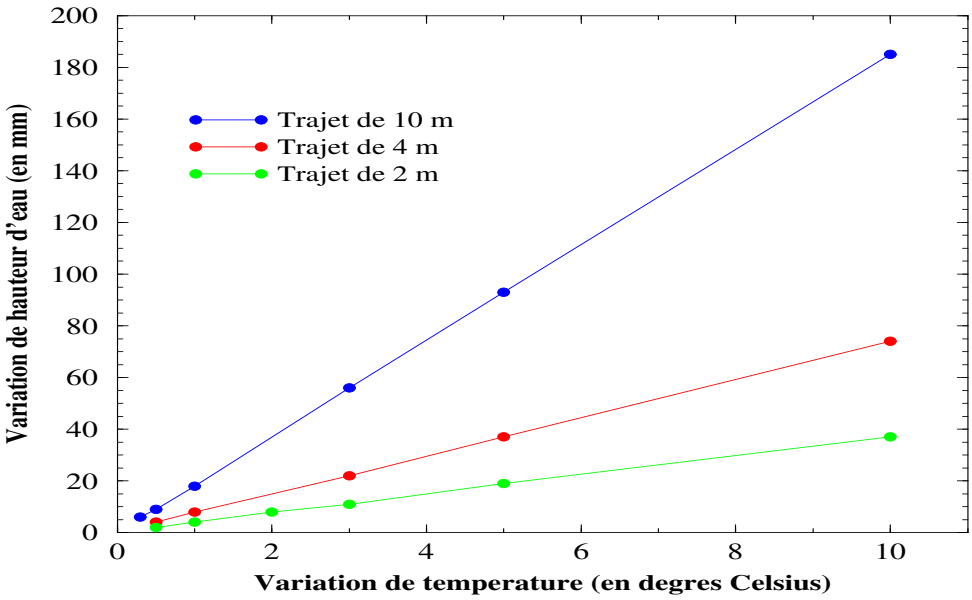
$$\mathbf{S = 331.2 \times \left(1 + 0.97 \times \frac{U}{P} + 1.9 \times 10^{-3} \times T \right)} \qquad \textbf{(E.VIII.2)}$$

avec S : la vitesse de l'onde sonore en m/s;
P : la pression barométrique en hPa;
T : la température en °C.

A partir de cette formule, une étude simple montre que la vitesse de propagation de l'onde sonore est beaucoup plus sensible aux erreurs introduites par les variations de température que par celles de la pression atmosphérique et de l'humidité relative de l'air. En effet, des variations extrêmes de l'humidité et de la pression, ΔU=90% et ΔP= 300hPa, introduisent des erreurs de quelques millimètres. Si la précision recherchée est millimétrique, l'utilisation de la formule du Bureau des Longitude (BDL) conjuguée à des mesures classiques de pression barométrique et d'hygrométrie est satisfaisante.

L'analyse de la formule du BDL montre que la sensibilité de la vitesse de l'onde sonore est d'environ 0.185% par degré Celsius de variation. Cette valeur s'accorde en outre avec celles que nous pouvons rencontrer dans la littérature [Gill et al 1993, IOC 1994]. Les courbes de la figure 89 donnent une idée de l'erreur commise sur la détermination de la hauteur du plan d'eau losqu'on utilise une vitesse du son constante qui ne tient pas compte de l'effet de la température.

Figure 89 : Influence de la variation de température sur la détermination de hauteur d'eau à partir d'un marégraphe acoustique dont on suppose que l'onde se propage à vitesse constante dans l'air (S=344m/s) sur des trajets de 10, 4, et 2 mètres.



Au regard de ces chiffres, il apparaît qu'une faible variation de la température génère des erreurs non négligeables sur les hauteurs d'eau. Par exemple, une variation de seulement un demi degré provoque déjà une erreur d'environ un centimètre sur un trajet de dix mètres. Plusieurs solutions sont mises en oeuvre par les divers organismes qui emploient cette technologie. En France, le SHOM mesure la température en un point du trajet de l'onde sonore, et applique une correction dérivée de la relation du BDL [Dupuy, 1993]. Aux Etats-Unis, le National Ocean Service dispose d'un appareil acoustique dont l'onde se propage à l'intérieur d'un tube en plastique de 1.3 cm de diamètre. Ce guide d'onde présente une discontinuité, en l'occurrence un petit trou, à une distance connue de la source sonore. Une partie de l'onde incidente est réfléchie au niveau du trou par effet d'impédance acoustique, tandis que le reste du signal poursuit son trajet. Une simple règle de trois permet ensuite de s'affranchir de l'inconnue de vitesse du son [Gill et al, 1993]. Enfin, en Australie, le National Tidal Facility emploie une méthode analogue à celle du NOS. La propagation du signal se faisant à l'air libre ou dans un tube en PVC de 25 cm de diamètre, une barre réflective est située à 75 cm de la source sonore [Homes, 1992]. Ces procédures de correction ne tiennent toutefois pas compte de l'effet du gradient vertical de température qui de fait peut exister le long du trajet de l'onde, notamment lorsque des effets d'ombre ont lieu. Les solutions envisagées sont de placer plusieurs capteurs de température le long du trajet, ou encore de discontinuités.

En ce qui concerne la mesure de temps de propagation du signal acoustique, signalons simplement que sa précision doit être de l'ordre de 0.01 milliseconde pour garantir une précision millimétrique de la hauteur d'eau. Quant à la stabilité du centre de phase de l'instrument, elle dépend bien entendu des caractéristiques intrinsèques au matériel du senseur. Les comparaisons menées par le SHOM entre les résultats de leur appareil acoustique prototype et un marégraphe à flotteur et d'une jauge à pression, ne montrent aucune dérive significative supérieure au centimètre entre 1990 et 1992. Gill et al [1993] montrent que les contrôles d'étalonnage effectués sur 53 marégraphes NGWLMS ne révèlent pas d'écarts supérieurs à six millimètres, la plupart étant d'ailleurs inférieurs à deux millimètres. Si ces

résultats perdurent sur de longues périodes, les marégraphes à ultrasons fourniront des observations fiables pour les études de variations du niveau de la mer à long terme. L'écart-type d'une donnée intégrée sur quelques minutes est typiquement de l'ordre du centimètre.

VIII.1.3. Erreurs des puits de tranquilisation

Le puits de tranquilisation est un élément indissociable du marégraphe mécanique à flotteur. Néanmoins, il est également utilisé avec d'autres types d'appareil. C'est pourquoi nous avons distingué les erreurs systématiques des puits de la section dédiée aux erreurs des marégraphes à flotteur.

Le puits de tranquilisation amortit les fluctuations du niveau de la mer de haute fréquence, à savoir, la houle, les vagues, les clapotis, etc. En toute rigueur, il devrait agir comme un filtre dit « passe-bas », qui n'altère pas les signaux de basse fréquence, mais qui élimine les signaux dont la fréquence est supérieure à la fréquence de coupure (cf. figure 14). En pratique, la réponse n'est malheureusement pas souvent linéaire. Elle dépend de la forme et des dimensions relatives du puits et de l'orifice, mais aussi de facteurs extérieurs comme l'envasement, la présence de vagues ou de courants. Les effets sont alors fonction de leurs caractéristiques propres d'amplitude, de période ou d'intensité.

Lennon & Mitchell [1993] montrent en particulier que l'effet des vagues est de l'ordre de 7 cm pour une oscillation de un mètre d'amplitude et sept secondes de période, mais l'effet peut atteindre 10 à 15 cm pour des vagues plus importantes [Simon, 1986]. Par ailleurs, un courant d'une intensité normale de 0.5 m/s induit dans un puits conique classique un abaissement de l'ordre de 4 cm [Lennon & Mitchell, 1993]. Simon [1986] rapporte à ce sujet des écarts de niveau de la mer s'abaissant jusqu'à 18 cm pour un courant perpendiculaire à l'axe de l'orifice du puits de 1.5 m/s. La différence de densité entre les eaux du puits et l'extérieur se traduit naturellement par une différence de hauteur d'eau. Le phénomène est fréquent à proximité des embouchures fluviales, d'autant que l'orifice du puits est petit et que le renouvellement de l'eau ne s'effectue pas complètement. L'effet peut se monter à plusieurs centimètres [Simon, 1986].

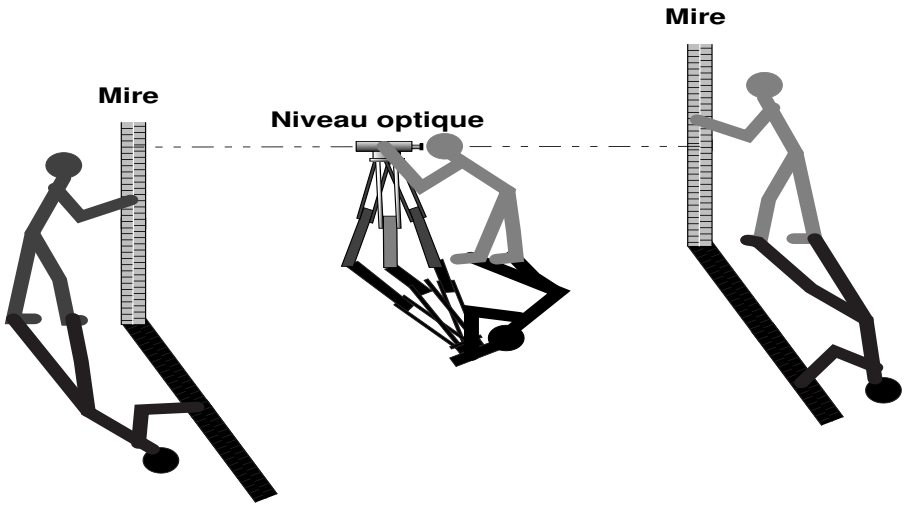
VIII.2. Techniques de nivellement

Diverses techniques de nivellement permettent de déterminer les différences d'altitudes, ou dénivelées, entre points matériels au sol. Parmi ces techniques, l'une d'elles mérite toute notre attention en raison de la qualité des résultats qu'elle peut fournir. C'est le nivellement géométrique de précision, connu également sous la désignation de *nivellement direct* ou encore de *nivellement par visées horizontales*.

Nous n'étudierons pas les autres techniques, dont la précision est loin d'égaler celle du nivellement géométrique. Aussi, le terme de nivellement est tacitement employé ici pour désigner cette technique. La figure 90 montre les différents éléments de l'opération élémentaire de nivellement, à savoir, le niveau optique, les mires, le trépied, les crapauds, et l'observateur. Cette opération élémentaire est désignée sous le nom de *nivelée*, et chaque visée sur une mire est une *portée*. L'inventaire des sources d'erreur peut s'organiser de la manière suivante:

- erreurs du niveau;
- erreurs des mires;
- erreurs de mise en oeuvre dans un environnement terrestre;

Figure 90 : Opération élémentaire du nivellement géométrique de précision.



VIII.2.1. Erreurs du niveau

Quelque soit le type, un niveau est conçu de façon à matérialiser une ligne de visée horizontale. Pour ce faire, il est équipé d'une nivelle et, selon le type de niveau considéré, d'un système compensateur qui assure l'horizontalité, même lorsque la lunette est faiblement inclinée. Si la visée n'est pas horizontale, une erreur proportionnelle à la distance est commise à moins que les portées soient égales, auquel cas les erreurs se compensent sur le résultat de dénivelée. Bonnetain [1987] estime l'erreur typique, engendrée par une différence de portée de deux mètres, à un dixième de millimètre sur la dénivelée lorsque la valeur de dérèglement est de deux millimètres sur 40 m. Par ailleurs, on appelle erreur de collimation l'erreur engendrée par l'angle que fait l'axe optique de la lunette avec la directrice de la nivelle. L'erreur peut-être réduite par le réglage préalable du niveau, mais les variations de température peuvent affecter ce réglage.

Les champs électriques et magnétiques affecteraient l'efficacité du compensateur. Le champ magnétique terrestre entraînerait ainsi des erreurs systématiques pouvant atteindre deux millimètres sur un cheminement de un kilomètre. Beaucoup de constructeurs équipent désormais les prismes compensateurs de « boucliers magnétiques ». L'incertitude des niveaux de précision est annoncée à environ 0.2 - 0.3 mm. Notons que le dispositif de lecture, ou micromètre, permet de lire le dixième de millimètre sur la mire, voire d'estimer le centième.

VIII.2.2. Erreurs de mire

Les mires sont des règles graduées en métal ou en bois. Elles sont chiffrées d'ordinaire en centimètres. Les erreurs systématiques associées peuvent survenir lorsque:

• le talon de la mire présente un défaut, par exemple, dû à un talon qui n'est plus orthogonal à l'axe de la mire, à l'usure, à des manipulations insouciantes, etc. Un contrôle simple avant le démarrage des opérations permet de déceler ces imperfections.

• l'échelle de la mire est mal étalonnée, sur une partie ou sur son ensemble. De nouvelles corrections métriques doivent alors être établies en laboratoire.

• l'inclinaison de l'axe de la mire avec la verticale est trop important, soit à cause d'un dérèglement de la nivelle, soit à cause d'un fort vent, etc. Pour un écart à son sommet de cinq centimètres avec la verticale, l'erreur engendrée est de quatre dixièmes de millimètre.

• l'échelle se dilate ou se contracte sous l'effet du changement de température. Un mode opératoire plus rapide est préconisé, mais le choix du matériel approprié est une solution plus acceptable. Le coefficient de dilatation de l'invar est par exemple de l'ordre de 0.001 mm/m/°C.

VIII.2.3. Erreurs dues à l'environnement

Les variations de l'indice de réfraction atmosphérique à proximité du sol sont une source de distorsion importante de la ligne de visée horizontale, et par suite elles sont génératrices d'effets systématiques. Le coefficient de réfraction varie selon la nature du sol, l'heure de la journée, les conditions météorologiques, etc. Il est fortement recommandé d'éviter la lecture des mires au-dessous d'une hauteur de cinquante centimètres, où les gradients thermiques sont plus instables. On distingue une partie symétrique dont on peut s'affranchir en respectant l'égalité des portées, et une partie asymétrique qui s'accentue lors du franchissement de pentes. Il est possible de corriger en partie l'erreur introduite par la réfraction en mesurant le gradient vertical de température le long des lignes de visée, et en utilisant des modèles de réfraction empiriques.

L'affaissement du sol sous le poids du matériel, mires ou niveau, est susceptible de générer des erreurs systématiques. De même, un effet de flexion du sol se produira sous le poids du porte mire ou de l'observateur. L'ampleur de la déformation est fonction de la nature du sol, du choix du trépied, des crapauds, du mode opératoire, etc.

L'influence de la courbure de la Terre est également à considérer lorsque les portées ne sont pas égales. Enfin, les effets des marées peuvent aussi être à l'origine d'erreurs systématiques. Toutefois, à défaut de les corriger par le calcul, on opte pour une méthode opératoire rapide, de préférence en aller - retour.

Cette revue des sources d'erreur systématique du nivellement révèle une multitude d'effets souvent négligeables sur une nivelée, mais qui se cumulent de toute évidence de proche en proche. Ils finissent par devenir visibles sur de longues distances. Il est intéressant de noter à ce sujet que la précision des réseaux NGF-Lallemand et NGF-IGN69 est évaluée par une erreur probable kilométrique (e.p.k.) de 1.7 mm/$\sqrt{\text{km}}$ et de 1.3 mm/$\sqrt{\text{km}}$ respectivement. L'indicateur de précision est calculé à partir des différences aller - retour. Mais comme le remarque justement Kasser [1989], il ne chiffre pas les erreurs systématiques de mesure, mais seulement la partie aléatoire. Or, la partie systématique semble loin d'être négligeable, puisque les écarts observés sont largement au-delà de l'espérance d'un modèle d'erreur gaussien. Leur orientation privilégiée suivant la direction nord-sud n'a pas encore d'explication satisfaisante. En outre, l'auteur souligne que la traversée réalisée en 1983 entre Marseille et Dunkerque présente une e.p.k. de 0.27 mm/$\sqrt{\text{km}}$. L'explication de cette amélioration nette proviendrait de la stratégie d'observation employée, qui se fonde sur:

• des lectures à une hauteur moyenne plus élevée. Il était en effet impossible de lire les mires à moins de 60 cm du sol.

• des visées dans une zone où les gradients thermiques sont plus stables. L'axe optique du nivellement motorisé est à une hauteur moyenne de 2.10 m.

• des équipements ayant une grande surface de contact avec le sol, minimisant ainsi les mouvements après la mise en station;

protection permanente du niveau de précision contre le rayonnement solaire direct,

• enfin, une extrême rapidité des mesures.

Mais force est de constater que ces travaux n'ont pas éclairci la question de l'origine des erreurs systématiques en nivellement de précision. Les causes physiques possibles sont innombrables et n'ont pas encore été analysées en détail. La précision du nivellement dépend donc du matériel utilisé, de son réglage, des contrôles réguliers apportés, de l'environnement, des opérateurs, et de l'application rigoureuse de méthodes de mise en oeuvre. A titre d'exemple, le respect de l'égalité des visées arrière et avant d'une nivelée élimine a priori l'erreur de collimation, l'erreur due à la partie symétrique de la réfraction atmosphérique, et l'erreur de courbure de la Terre. Plus de détails concernant ces questions techniques peuvent être abordés dans des manuels spécialisés tels que celui de Bonnetain [1987].

VIII.3. Techniques de géodésie spatiale

VIII.3.1. Le choix du GPS

A précision comparable, le choix du GPS s'est rapidement imposé parmi les techniques spatiales qui concourent à l'établissement du référentiel de l'IERS. C'est une technique portable, de mise en oeuvre aisée, qui fournit des résultats rapides et de qualité. De plus, son caractère *descendant* la rend accessible à tout utilisateur qui dispose de l'équipement nécessaire pour capter les signaux émis par les satellites GPS. A l'inverse, DORIS est un système *ascendant* qui collecte à bord du satellite les signaux émis par des balises au sol. L'équipement en récepteur GPS est en outre très bon marché par rapport à celui des autres systèmes de positionnement précis, tel que le SLR ou le VLBI. C'est ainsi que de nombreux projets fondés sur des campagnes de mesures GPS ont été entrepris au cours de cette décennie pour rattacher les marégraphes à un référentiel géodésique. Le tableau de la figure 91 donne une liste de quelques uns de ces projets.

Considérant l'intérêt manifeste du GPS pour le rattachement géodésique des marégraphes, nous avons choisi de présenter un bilan des principales sources d'erreur systématique qui peuvent affecter les résultats de positionnement par cette technique. Notons que certains postes d'erreur, comme par exemple ceux qui dérivent de la traversée de l'atmosphère par les ondes électromagnétiques, peuvent concerner d'autres techniques. Mais avant d'attaquer le bilan d'erreur, il convient de faire une brève présentation du GPS.

Le GPS est un système de positionnement par satellites développé par le département de la défense américain. L'objectif est de permettre à tout utilisateur muni de l'équipement approprié de déterminer sa position dans un système de référence terrestre mondial, ceci à n'importe quel moment, depuis n'importe quel point du globe, par n'importe quelles conditions météorologiques. Il est traditionnellement décrit suivant trois secteurs: le secteur spatial, le secteur utilisateur, et le secteur de contrôle. Quelques vingt-cinq satellites composent le segment spatial. Répartis sur six plans orbitaux, ils se déplacent à environ 20 200 kilomètres d'altitude. Les satellites émettent deux ondes radioélectriques, appelées L1 et L2, de fréquences respectives 1575,42 Mhz et 1227,60 Mhz, modulées par des codes pseudo-aléatoires avant d'être envoyées vers la Terre. L'ensemble des récepteurs GPS constitue le segment terrestre. Différents types de récepteurs existent sur le marché, on les distingue suivant les mesures qu'ils sont capables d'effectuer. Ceux qui intéressent la géodésie de précision effectuent des mesures de phase de battement sur les deux porteuses L1 et L2 et peuvent en général déchiffrer les divers codes. Quant au secteur de contrôle, il comprend cinq stations au sol dont le rôle est de vérifier le bon fonctionnement des satellites, de calculer leurs orbites et les écarts de leurs horloges par rapport à l'échelle de temps GPS.

Figure 91 : Liste de projets d'observation du niveau de la mer par réseaux de stations de marégraphie et de géodésie spatiale.

	PROJET	REGION
-	Atlantic Coast-Bermuda Sea Level Survey	Atlantique Nord-Ouest
ABSLMA	**A**ustralian **B**aseline **S**ea **L**evel **M**onitoring **A**rray	Australie
BSL	**B**altic **S**ea **L**evel project	Baltique
EPTN	**E**uropean **P**rimary **T**ide Gauge **N**etwork	Europe
EUVN	**EU**ropean **V**ertical GPS reference **N**etwork	Europe
EUROGAUGE	West European Tide Gauge Monitoring Project	Europe (Atlantique)
Euro-GLOSS	European GLOSS	Europe
GLOSS	Global Sea Level Observing System	Monde
HIBISCUS	**H**eight **I**nvestigations to **B**roaden **I**nformation both on mean **S**ea level **C**hanges and **U**nderstanding of **S**urface vertical movements	Caraïbes
MAREO	?	Pays-Bas
NIVMER	**NIV**eau de la **MER**	Antarctique et sub-ant.
NWLON	**N**ational **W**ater **L**evel **O**bservation **N**etwork	États-Unis
ROSAME	**R**éseau d'**O**bservation **S**ub-antarctique et **A**ntarctique du niveau de la **ME**r	Antarctique et sub-ant.
SELF	**SE**a **L**evel **F**luctuations	Méditerranée
SONEL	**S**ystème d'**O**bservation du **N**iveau des **E**aux **L**ittorales	France
TANGO	**T**rans-**A**tlantic **N**etwork for **G**eodynamics and **O**ceanography	Atlantique Nord
UKGAUGE	UK Tide Gauge GPS Network	Grande Bretagne
WEGNET	**WEG**ENER **NET**work	Eurasie et Groënland

La mesure qui intéresse le géodésien est la phase du signal de battement construit à partir du signal émis par le satellite et du signal généré par le récepteur. Le signal généré n'est autre qu'une réplique du signal du satellite. Les deux signaux sont décalés dans le temps d'une durée qui corespond au temps de propagation de l'onde entre le satellite et le récepteur. Le récepteur mesure continuellement l'évolution de la phase de battement. Plus exactement, il mesure une phase entre 0 et 2π, et, à chaque passage par 2π, il ajoute un incrément à son compteur. Pour un satellite donné, le récepteur mesure donc le nombre de cycles entiers, ou tours de phase, et une fraction de cycle. On dit que la mesure est ambiguë car il manque le nombre initial de cycles entre le satellite et le récepteur. On l'introduit dans l'équation d'observation comme inconnue; cette inconnue est appelée ambiguïté entière. La quantité inconnue est la même pour toutes les mesures réalisées entre un récepteur et un satellite tant qu'il n'y a pas d'interruption de la liaison. Une interruption de la réception du signal se traduit par un saut de cycle, autrement dit, par une nouvelle valeur de l'ambiguïté entière à partir de l'époque d'interruption.

La littérature décrivant le système GPS est de fait innombrable. Aussi, le propos du mémoire n'étant pas le GPS à proprement parler, nous suggérons au lecteur intéressé de se rapporter par exemple au manuel récent de Botton et al [1997].

VIII.3.2. Principales sources d'erreur systématique du GPS

Les mesures GPS de phases ou de codes (appelées aussi pseudodistances) sont réalisées par comparaison du signal venant du satellite avec le signal généré par le récepteur. Le bruit de la mesure est estimé à mieux que 1% de la longueur d'onde du signal sur lequel se fait la mesure, ce qui donne pour les phases un bruit de 1 à 2 mm. Ces mesures sont affectées par de nombreuses sources d'erreurs systématiques: horloges, orbite des satellites, variations du centre de phase de l'antenne, milieu de propagation des ondes, effets relativistes, etc. que nous allons décrire ici.

Nous avons vu qu'il existe un problème d'ambiguïté entière, car le signal a parcouru un nombre de cycles a priori inconnu lorsque le récepteur effectue sa première mesure. Ce nombre reste constant pour une paire récepteur - satellite donnée à condition que le récepteur capte le signal du satellite en permanence. Si un saut de cycle se produit à cause d'une perte momentanée du signal, la valeur de l'ambiguïté entière change. Dès que le récepteur accroche à nouveau le signal, il peut reprendre son comptage mais un nombre entier de cycles a été perdu. Si la perte de signal est courte, typiquement inférieure à quelques minutes, il est possible de corriger les sauts de cycle lors du prétraitement des données, ce qui évite d'avoir à déterminer une nouvelle valeur pour l'ambiguïté entière [Rothacher & Mervart, 1996]. Sinon, il est nécessaire d'introduire une nouvelle inconnue dans la résolution du système. Les causes physiques à l'origine des pertes de signal peuvent être nombreuses: masque momentané, changements erratiques de fréquence, activité géomagnétique, scintillations ionosphériques, etc. Elles dépendent souvent de la qualité intrinsèque du récepteur.

Les erreurs de synchronisation entre signaux émis, reçus, et générés, ont un effet direct sur la mesure. Une erreur d'une microseconde dans la mesure du temps de parcours du signal GPS entraîne une erreur de 300 mètres en distance. Les horloges des satellites sont très stables, quelques 10^{-13} et 10^{-14} sur un jour, toutefois des corrections doivent être apportées par rapport au temps GPS. Celles-ci sont fournies par un modèle d'horloge polynomial dont les paramètres sont calculés par le réseau de contrôle et sont diffusés dans le message de navigation. L'erreur du modèle est de l'ordre de 0.1 à 1 microseconde. Elle n'est pas acceptable a priori, mais il est possible de former une combinaison linéaire des observations de deux récepteurs observant le même satellite, appelée double différence, qui permet d'éliminer l'erreur d'horloge résiduelle du satellite en question. De même, l'observation de deux satellites par un récepteur permet de former des simples différences des observations qui éliminent l'erreur d'horloge résiduelle du récepteur. Notons que le décalage de l'horloge du récepteur au temps GPS est en général estimé au préalable avec une précision comparable à celle du modèle d'horloge du satellite à partir du traitement des mesures de codes.

La précision des éphémérides radiodiffusées varie entre cinq et trente mètres en moyenne en raison des erreurs de modélisation de l'orbite des satellites. Or, la détermination de la position d'une station suppose la connaissance de la position des satellites. La règle empirique formulée dans la relation (E.VIII.3) permet d'évaluer l'influence de l'erreur d'orbite sur le calcul de positions relatives [Wells et al, 1986].

$$\frac{\Delta \mathbf{b}}{\mathbf{b}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\mathbf{r}} \qquad \textbf{(E.VIII.3)}$$

avec $\Delta\mathbf{b}$: valeur absolue de l'erreur sur le calcul de la ligne de base;
$\Delta\mathbf{r}$: valeur absolue de l'erreur de la composante radiale de l'orbite;
$\mathbf{b}$: longueur de la ligne de base mesurée;
$\mathbf{r}$: distance séparant le satellite de la station.

Le tableau de la figure 92 donne une idée de l'ampleur de l'erreur. Il explique en outre pourquoi la communauté géodésique a établi l'IGS, dont les orbites diffusées ont une précision typique d'une dizaine de centimètres [Daniel, 1996].

Figure 92 : Erreur d'orbite maximale en fonction de la ligne de base si l'on souhaite obtenir une précision de un centimètre, d'après la relation empirique (E.VII.3).

Ligne de base (km)	Erreur d'orbite maximale (m)
1	250
10	25
100	2.5
1000	0.5
5000	0.1

La mesure du signal radioélectrique s'effectue au centre de phase. Celui-ci n'est en général pas confondu avec le centre physique de l'antenne. Son excentrement dépend de l'intensité du signal reçu. Il est différent pour L1 et L2. Les centres de phase sont naturellement instables et varient de l'ordre de 1 à 2 cm suivant l'angle d'élévation et l'azimut du signal. Si le même type d'antennes est utilisé, on peut considérer que l'excentrement est le même et s'élimine en mode relatif si les antennes sont orientées dans la même direction; mais ceci à condition que les lignes de base ne soient pas trop longues, en raison de la courbure de la Terre. Dans l'étude réalisée par Mireault et al [1993], le mélange d'antennes introduit une erreur systématique qui atteint presque 3 cm sur la composante verticale des résultats de positionnement relatif entre stations. L'étude plus récente de Rothacher et al [1995] montre que l'effet peut atteindre 10 cm sur la composante verticale du positionnement relatif si aucune correction des variations de centre de phase en élévation n'est appliquée. Lorsque des récepteurs de même type sont utilisés, l'erreur se réduit à 0.015 ppm sur la longueur de la ligne de base, soit 1.5 cm pour une ligne de base d'un millier de kilomètres. Les différentes solutions proposées par ces auteurs de modéliser et d'estimer les corrections des variations de centre de phase en élévation et en azimut à partir de mesures GPS réalisées sur des très courtes lignes de base, quelques dizaines à quelques centaines de mètres, éliminent les biais observés. La communauté géodésique est aujourd'hui bien consciente de la nécessité de ces corrections et les appliquent lors des traitements de données GPS. Elles sont plus aisées à obtenir que les corrections absolues issues des mesures GPS effectuées en chambre anéchoïque. Il s'agit toutefois de corrections relatives d'une antenne par rapport à une autre. Un biais absolu inconnu subsiste a priori pour l'ensemble du réseau des stations traitées. L'utilisation des corrections absolues d'une antenne du réseau ne résout pas forcément le problème pour autant. En effet, dans ce cas Rothacher et al [1995] observent encore un écart d'un peu plus de un centimètre lorsque les résultats sont comparés à l'ITRF93. Bien qu'ils reconnaissent qu'une part de l'erreur peut provenir de la solution de l'ITRF, il semble que tout ne puisse pas s'expliquer aussi simplement.

Les dégradations volontaires du signal, accès sélectif (SA) et antibrouillage (AS), n'ont pas d'incidence systématique dans le positionnement géodésique différentiel, mais dans le positionnement absolu issu du traitement des codes [Rocken & Meertens, 1991].

Lors de sa traversée de l'atmosphère, le signal GPS est affecté par la réfraction atmosphérique. D'une part, sa direction de propagation change, elle s'incurve. D'autre part, sa vitesse de phase est modifiée, entraînant une avance ou un retard du signal qui résultent en un raccourcissement ou un allongement apparent de son parcours. Ses effets sont regroupés sous le terme de réfraction. Ils dépendent de l'indice de réfraction, et diffèrent notablement suivant la couche de l'atmosphère où l'on se trouve. On distingue de fait:

• une réfraction troposphérique. La troposphère est un milieu électriquement neutre, elle agit comme un milieu non dispersif aux fréquences considérées par les signaux GPS, inférieures à 30 GHz. L'effet est donc identique pour les deux porteuses L1 et L2. L'indice de réfraction dépend de la température, de la pression, et de l'humidité du milieu. Le retard troposphérique produit sur le signal GPS est aussi fonction de l'élévation du satellite. Il est d'environ deux mètres si le satellite est au zénith, mais peut atteindre 30 mètres pour une élévation de 5° puisque la couche atmosphérique traversée par les signaux augmente en conséquence. La correction de l'effet troposphérique s'effectue à partir de modèles empiriques, tels que celui de Saastamoinen [1973] ou de Hopfield [1969]. De nombreux autres modèles existent par ailleurs. Leur nombre traduit la difficulté à modéliser la composante humide de la troposphère. Ceci est essentiellement dû à l'instabilité intrinsèque de la vapeur d'eau. En pratique, l'effet *humide* ne peut être modélisé à mieux que 10%, ce qui mène à une erreur de 2 à 5 cm en verticale dans le calcul de l'allongement du parcours. L'ajustement des paramètres d'un modèle troposphérique dans le traitement des données GPS permet néanmoins d'obtenir des résultats de positionnement vertical au niveau du centimètre, voire mieux.

• une réfraction ionosphérique. L'ionosphère est un milieu dispersif ionisé par l'action des radiations solaires. L'agitation ionosphérique dépend du rayonnement solaire incident. Par conséquent, l'effet présente des variations diurnes, annuelles, séculaires, et il est fonction de la latitude, du cycle solaire et du champ magnétique terrestre. L'effet sur la mesure de la distance en GPS peut varier entre 0 et 50 m. Le délai ionosphérique est très difficile à modéliser car il exige une connaissance continue de la densité électronique tout au long du parcours, or le contenu électronique total de l'ionosphère présente une variabilité spatiale et temporelle très importante [Warnant, 1996]. Toutefois, le caractère dispersif du milieu permet de déduire la valeur de la correction ionosphérique puisque l'on mesure la même distance sur les deux ondes L1 et L2. Ainsi, l'utilisation de la combinaison des phases L3 permet de corriger l'effet ionosphérique à mieux que le millimètre [Botton et al, 1996].

Les multitrajets sont liés à des obstacles proches qui réfléchissent les signaux vers l'antenne. L'effet est un allongement de parcours. L'amplitude de l'erreur peut atteindre quelques centimètres sur les résultats de positionnement [Arbour, 1994]. L'effet dépend de la géométrie relative entre le satellite, la surface réfléchissante et le récepteur; des obstacles; et du coefficient de réflexion de la surface réfléchissante. Il est d'autant plus important que la session d'observations est courte. On peut toutefois s'en affranchir en prenant quelques précautions, par exemple, en évitant la proximité des surfaces réfléchissantes; en choisissant des équipements spécifiques; et en évitant les satellites bas. Aussi, il peut être détecté en examinant attentivement les résidus liés aux mesures des codes. S'ils ne sont pas distribués aléatoirement, et varient considérablement en amplitude, de l'ordre de quelques mètres, les signaux ont vraisemblablement été contaminés par les trajets multiples.

L'étude récente effectuée par Elosegui et al [1995] montre que le support sur lequel est vissé l'antenne GPS peut être à l'origine d'erreurs systématiques atteignant jusque 10 cm sur la composante verticale. L'effet systématique serait produit par les piliers en béton, et le métal qui se trouve à son intérieur. Il disparaît en utilisant un matériel absorbant placé entre le pilier et l'antenne.

Les effets relativistes influent sur les conversions des temps propres des horloges à bord et au sol en temps GPS; sur la propagation des signaux entre les satellites et le sol en raison de la courbure et du retard dus à la gravitation terrestre; sur le modèle dynamique de forces s'exerçant sur les satellites GPS; enfin, sur l'expression des positions dans un système géocentrique tournant [Boucher, 1985]. Ils doivent être considérés dans une modélisation adéquate étant donné la précision des mesures et l'utilisation conjointe d'horloges situées à la fois sur Terre et à bord de satellites.

La qualité des résultats de positionnement par GPS est notamment fonction des performances du récepteur, de sa résolution, du traitement des mesures, du choix des modèles et des paramètres à estimer. Toutefois, on constate que souvent la modélisation ne permet pas à elle seule de réduire le budget d'erreur du GPS à moins d'un centimètre. Aussi, une alternative satisfaisante réside dans les combinaisons de données qui éliminent certains effets systématiques durant le traitement des données: simples différences, doubles différences, combinaisons linéaire (L3), etc. D'autres devront néanmoins faire l'objet d'une correction par des modèles. Si la modélisation et l'estimation des paramètres est correcte, nous devons obtenir un bruit blanc pour les résidus puisque cette quantité témoigne de la partie non modélisée de l'observable. A ce titre, leur étude permet parfois d'établir l'influence d'un effet systématique sur les données GPS, voire de le modéliser et le corriger. Blewitt [1994] signale par exemple l'évidence de corrélation entre des signaux GPS résiduels de 5 mm d'amplitude et les déplacements du sol calculés à partir de données météorologiques et d'un modèle de charge terrestre. L'auteur conclue que l'effet de charge atmosphérique ne devrait pas être corrigé au niveau des observations, mais a posteriori. En outre, il met en garde contre la précision souvent

insuffisante des données météorologiques. Zerbini et al [1996] rapportent des résultats de la campagne SELF en Méditerranée que l'amplitude de l'effet de charge atmosphérique n'excède pas quelques millimètres sur le positionnement relatif entre points. L'explication viendrait de la stabilité des perturbations observées au cours des journées. Les auteurs supposent que l'effet risque d'apparaître dans les comparaisons de résultats de campagnes différentes. Quant à l'effet de surcharge océanique, Blewitt [1994] reconnaît qu'il n'est pas souvent pris en compte dans les analyses GPS, car les calculs s'effectuent sur au moins une journée de mesures. Les effets moyens seraient négligeables. Il admet cependant que l'option n'est peut-être pas optimale si l'on cherche à descendre sous le centimètre en précision. Rappelons à cet égard que l'effet de surcharge océanique est aisé à calculer à partir du modèle proposé dans les standards de l'IERS [McCarthy, 1996], dès lors que l'on connaît les constituants de la marée du lieu.

En outre, la qualité du positionnement du réseau au sol va dépendre du nombre de mesures prises en compte, ou plutôt, de la durée d'observation, qui permet de faire évoluer la configuration géométrique du problème et de mieux estimer les divers paramètres. Mais, il s'avère que, quelque puisse être cette configuration, les nombreux effets systématiques de la composante verticale ne se compensent pas.

Il convient de rappeler qu'il est dangereux de pousser jusqu'aux limites les lois qui n'ont qu'un caractère statistique, telles que la loi des grands nombres. Des résultats très concordants peuvent être entachés d'erreurs systématiques importantes. Dans le cas du GPS, le nombre d'observations traitées est considérable, bien qu'il ne soit pas toujours jugé suffisant, et les erreurs formelles des coordonnées GPS sont donc des estimations statistiques des erreurs sous certaines hypothèses et ne doivent pas être vues comme des vraies erreurs sur les coordonnées. Pour établir la répétabilité entre sessions, des solutions sont calculées par session , puis comparées à la solution globale. Straub et Kahle [1995] remarquent à ce sujet qu'entre les erreurs statistiques et les répétabilités journalières, ils estiment qu'un facteur 20 est un rapport approprié entre les incertitudes réalistes et les erreurs formelles.

Les performances de positionnement évaluées en comparant les résultats d'une journée à l'autre sont en effet plus réalistes car les conditions ont évoluées, assurant un certain niveau d'indépendance. Mais, elles restent quelque peu liées aux récepteurs, aux opérateurs, à certains aspects environnementaux, etc. Aussi, la comparaison des résultats issus d'observations de campagnes distinctes apportera un indicateur de qualité a priori plus fiable. Il le sera d'autant que les données seront traitées par plusieurs centres de calculs ayant développé leurs propres algorithmes, stratégies d'estimation, etc. Néanmoins, on reste toujours au sein d'une même technique. Un niveau d'évaluation plus élevé de la justesse des résultats peut encore être estimé de la comparaison des résultats fournis par des techniques différentes au principe de mesure différents. Voilà résumée la philosophie que l'IERS s'efforce de suivre au travers des sites en colocation.

Les comparaisons effectuées par l'IERS entre techniques sont en théorie les meilleurs outils d'évaluation de l'exactitude que nous ayons à l'heure actuelle sur le positionnement. Si par exemple deux solutions individuelles donnent des résultats que l'on peut déclarer concordants, alors il y a une forte probabilité qu'elles soient toutes les deux exactes. En revanche, si leurs indications ne s'accordent pas, une alternative est possible: l'une d'elles est fausse ou toutes les deux le sont.

• Dans le premier cas, si l'une des deux solutions peut être considérée comme « étalon », il est presque certain que les erreurs sont le fait de l'autre. C'est sur ce principe que se fonde l'étalonnage d'un instrument, notamment d'un marégraphe, mais également le concept de rattachement géodésique des campagnes régionales à l'ITRS, quelles soient dédiées à la marégraphie ou pas. Cependant, les valeurs considérées comme vraies, qui servent de points de comparaison et d'appui, ne sont jamais connues avec une certitude totale. C'est une raison pour

laquelle la stratégie de « réseau libre » est préférée à celle de « réseau d'appui ». Le biais de système de référence étant éliminé dans une seconde phase.

• Dans le deuxième cas, si aucune des solutions ne peut être considérée comme « étalon », il est nécessaire de procéder à d'autres expériences pour déterminer les causes des discordances. Ce cas révèle le caractère délicat et fondamental du travail de pondération des jeux de coordonnées individuels reçus par l'IERS pour le calcul du repère terrestre.

IX. Etude de la qualité des résultats du processus synergique

IX.1. Marégraphes proches d'un site ITRF

Lors de notre étude du système de référence terrestre de l'IERS, nous avons identifié quelques marégraphes de plus de quarante années de données annuelles qui se trouvent à une distance inférieure à 50 kilomètres d'un point de l'ITRF94. Nous allons regarder à présent un peu plus en détail quels sont-ils, quels résultats ils affichent, et quelle contribution on peut en tirer à l'heure actuelle. Le tableau de la figure 93 est un extrait de l'annexe D pour ces points.

Figure 93 : Marégraphes situés à proximité de points de l'ITRF94 (extrait de l'annexe D).

MAREGRAPHE	$a_M \pm \sigma a$ (mm/an)	Distance	Site géodésique		$a_G \pm \sigma a$ (mm/an)	
TROMSO	0.31 ± 0.69	2 km	TROMSO	10302M002	-0.6 ± 1.9	RB
				10302M003	-0.4 ± 1.7	PB
GOTEBORG - KLIP.	-1.42 ± 0.23	36 km	ONSALA	10402M004	-1.1 ± 1.3	PA
				10402M006	0.0 ± 1.5	RA
				10402S002	0.3 ± 1.3	RA
VARBERG	-0.86 ± 0.15	37 km	ONSALA		Cf. ci-dessus	
MANILA, S. HAB.	5.64 ± 0.42	10 km	MANILLE	22006S001	1.7 ± 28.0	DC
HILO, HAWAII	3.58 ± 0.41	42 km	HAWAIAN VOLC.	40476S001	-3.3 ± 1.3	DC
		41 km	MAUNA KEA	40477S001	-3.1 ± 1.6	RC
VICTORIA	0.66 ± 0.17	9 km	VICTORIA	40129M001	6.8 ± 4.3	RB
			ALBERT HEAD	40129M003	6.9 ± 4.1	PB
SAN FRANCISCO	1.35 ± 0.09	1 km	PRESIDIO	40406M001	2.4 ± 5.0	RC
LOS ANGELES	0.76 ± 0.18	13 km	PALOS VERDES		-2.9 ± 9.5	RC
MIAMI BEACH	2.29 ± 0.26	30 km	RICHMOND	40499M002	1.4 ± 1.4	PA
				40499M005	1.5 ± 1.6	PA
				40499S001	1.2 ± 1.2	RA
				40499S015	1.4 ± 1.6	DA
				40499S016	1.4 ± 1.6	DA
				40499S018	2.6 ± 1.4	PA
ST. GEORGES	2.09 ± 0.41	1 km	BERMUDA	42501S004	1.2 ± 2.0	PC
WASHINGTON DC	2.71 ± 0.27	24 km	WASHINGTON	40451M102	-1.3 ± 1.5	RA
				40451M105	-1.4 ± 1.3	LA
				40451M114	-1.4 ± 1.6	LA
				40451M116	-1.3 ± 1.7	LA
				40451M117	-1.4 ± 1.6	LA
				40451M120	-1.6 ± 1.5	LA
				40451M121	-8.0 ± 154.2	LA
				40451M123	-1.3 ± 1.6	PA
				40451M125	-1.1 ± 1.5	RA