VI. Le système de référence terrestre de l'IERS : l'ITRS

Nous abordons à présent l'étude du système de référence terrestre qui est réalisé et maintenu par le service international de la rotation terrestre, l'IERS, succédant dans cette tâche au Bureau International de l'Heure (BIH) et au Service International du Mouvement du Pôle (SIMP), depuis 1988. Ce système de référence est connu sous son sigle ITRS, qui s'explicite aujourd'hui ainsi : International Terrestrial Reference System. L'UGGI l'a adopté lors de sa vingtième assemblée générale de Vienne en 1991. Son utilisation est recommandée pour toute application géodésique ou géophysique qui demande une grande exactitude dans le positionnement, en particulier, la surveillance et l'étude des mouvements géodynamiques à la surface de la Terre.

L'objet principal de ce chapitre est de dégager les performances actuelles des réalisations de l'ITRS, mais aussi les améliorations escomptées dans un avenir proche, puisque j'ai eu la chance de travailler au LAREG avec les personnes de la section de l'IERS qui s'occupent du calcul du repère associé. Dans un premier temps, nous rappellerons brièvement la définition du système de référence terrestre conventionnel ITRS, et nous expliquerons comment sont construites les solutions du repère conventionnel ITRF : International Terrestrial Reference Frame. Ensuite, on regardera comment est évaluée la qualité du repère, et surtout, comment il doit être utilisé pour l'étude des déformations de l'écorce terrestre. Le but est également de mieux comprendre les résultats qui sont fournis par les techniques de géodésie spatiale afin de s'assurer la meilleure interprétation possible des mouvements verticaux observés.

VI.1. Définition et réalisation

VI.1.1. Le système conventionnel ITRS

Dans le cadre des concepts introduits dans le chapitre précédent, nous dirons que le système de référence terrestre conventionnel établi par l'IERS vise à réaliser un repère orthonormé de l'espace affine euclidien de dimension trois. La base vectorielle du repère est définie en accord avec les critères spécifiés par Boucher [1990-b]. Ils sont repris dans les conventions et standards de l'IERS, et s'énoncent ainsi:

• l'origine est géocentrique. Le centre de masse est défini pour la Terre considérée dans son ensemble, c'est-à-dire comprenant les composantes hydrosphère et atmosphère.

• l'échelle de longueur est isotrope. Elle est définie dans un repère terrestre local au sens de la théorie relativiste de la gravitation. L'unité est le mètre du Système International.

• l'orientation est fixée à celle du système de référence du BIH à la date 1984.0. La base vectorielle est directe, équatoriale, et mobile avec la Terre solide de façon à suivre son mouvement de rotation diurne.

• de plus, l'évolution temporelle du système ne doit pas engendrer de rotation résiduelle d'ensemble par rapport à l'écorce terrestre.

La contrainte globale introduite dans le dernier point est nécessaire pour permettre une description et une quantification correcte des déformations géophysiques à la surface terrestre en s'assurant que toute rotation artificielle du repère par rapport à l'écorce terrestre est éliminée au préalable. Mais elle est surtout indispensable pour définir le système de référence d'une réalisation numérique, à cause de la corrélation naturelle qui existe entre le mouvement de rotation de la Terre et l'évolution de l'orientation du repère autour de l'axe 'z'.

Les conventions et les standards publiés par l'IERS [McCarthy, 1989, 1992 et 1996] décrivent les éléments du système de référence terrestre adoptés. Ces publications précisent autant que possible les données et les méthodes d'analyse qui sont cohérentes avec la réalisation de l'ITRS. Les informations techniques fournies dans les standards de l'IERS concernent un certain nombre de définitions, les valeurs numériques des constantes physiques et astronomiques, et les divers modèles à utiliser. Notons entre parenthèses que l'ellipsoïde de référence choisi est le GRS80, dont les valeurs du demi-grand axe et de l'aplatissement sont rappelées dans le tableau de la figure 71 du chapitre précédent. On y trouve par ailleurs la formulation générale adoptée pour exprimer la position d'un point à la surface terrestre en fonction du temps. Elle est reprise ici dans l'équation suivante:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \vec{V}_0 \times (t - t_0) + \sum_i \Delta\vec{X}_i(t) \qquad \textbf{(E.VI.1)}$$

avec: t_0 : date de référence;
$\vec{X}_0, \vec{V}_0$: position et vitesse à la date t_0;
$\Delta\vec{X}_i(t)$: contributions d'origines diverses, a priori non linéaires dans le temps.

Le dernier terme du membre de droite regroupe en particulier les déplacements engendrés par les marées terrestres, le rebond postglaciaire, la marée du pôle, et les surcharges océanique et atmosphérique. Aussi, l'IERS présente dans ses standards les modèles actuellement disponibles qui permettent une correction adéquate des déformations induites par ces phénomènes. Les effets plus spécifiques dus au volcanisme, aux séismes, aux variations de niveau des nappes phréatiques, ou à d'autres instabilités locales, sont également à considérer si l'on souhaite atteindre un système de référence cohérent au niveau du millimètre à la surface terrestre. Il n'existe malheureusement pas toujours de modèle approprié qui permette un niveau de correction millimétrique de ces effets. Les erreurs de modélisation doivent être aussi petites que possible en relation avec les erreurs de mesure.

Le paramètre de vitesse de (E.VI.1) est souvent décomposé en deux termes: une contribution horizontale de la tectonique des plaques et une vitesse résiduelle. Ceci permet d'utiliser le modèle de mouvement des plaques recommandé par l'IERS, à savoir NNR-NUVEL1A établi par DeMets et al [1994]. Ce modèle s'appuie en particulier sur des contraintes de non rotation globale de l'écorce terrestre en accord avec le modèle physique d'axes de Tisserand. Son application dans l'analyse des coordonnées d'un ensemble de points permet d'assurer une évolution temporelle convenable de l'orientation du repère de référence terrestre sous-jacent. Il est toutefois important que ces points soient répartis uniformément à la surface de la Terre.

Tout centre d'analyse désireux de participer à l'élaboration du repère de l'IERS est sensé adhérer aux spécifications des standards cités ci-dessus et motiver leurs choix divergents le cas échéant. Les éditions successives de 1989, 1992 et 1996 témoignent des progrès techniques et scientifiques rapides accomplis en une décennie.

VI.1.2. Le repère conventionnel ITRF

Le repère de référence terrestre conventionnel de l'IERS est élaboré en combinant les coordonnées de plusieurs ensembles de points. Notons qu'ici la notion de coordonnées est employée dans un sens quelque peu abusif puisqu'elle comprend une signification paramétrique plus générale qui inclut les vitesses lorsque celles-ci sont effectivement disponibles. Nous expliciterons clairement par la suite les paramètres dans les modèles. Les coordonnées des points de chaque ensemble ou jeu sont obtenues à partir de l'analyse des observations de géodésie spatiale, en accord avec les conventions adoptées par l'IERS. En général, un jeu est

fourni par un centre d'analyse traitant un type de technique. Les points sont des repères matériels ou des stations de poursuite au sol. Ils constituent de fait un réseau géodésique de dimension mondiale. Le repère ITRF est alors concrétisé par un ensemble de points répartis à la surface du globe avec leurs coordonnées respectives combinées.

Les techniques spatiales considérées sont celles qui fournissent des jeux de coordonnées d'une qualité et d'une cohérence jugées suffisantes par l'IERS. Aujourd'hui, cela concerne l'interférométrie à très longue base (VLBI), la télémétrie laser terre - satellite (SLR ou LLR selon que l'objet visé est un satellite artificiel ou la lune), et les systèmes radioélectriques GPS et DORIS. Le GPS fut adopté par l'IERS en 1991, après étude de ses performances, et le système français DORIS en 1994.

Chaque technique de géodésie spatiale est plus ou moins sensible à certains éléments du système de référence terrestre de l'IERS. De fait, chacune définit un système intrinsèque exclusif, en fonction de ses particularités et des modèles qui sont effectivement mis en oeuvre pour analyser les observations. Une technique offre la possibilité de réaliser une multitude de repères suivant les choix adoptés par le centre d'analyse. Aussi, la stratégie de combinaison des jeux de coordonnées par l'IERS est fondée sur une appréciation convenable des qualités intrinsèques à chaque technique et des réalisations concrètes proposées par les divers centres. A titre d'exemple, la télémétrie laser sur satellite artificiel est sensible au centre de masse de la Terre. Il est alors approprié de fixer l'origine du repère à celui d'une ou de plusieurs solutions obtenues à partir de cette technique. Lorsque plusieurs techniques sont sensibles à un même élément, une combinaison des résultats individuels est envisageable, voire souhaitable. Les choix de réalisation du repère de l'IERS paraissent parfois subjectifs, à cet égard le repère adopté en fin de processus mérite pleinement son attribut de conventionnel.

La méthode de combinaison des jeux de coordonnées repose sur le modèle mathématique de transformation par similitude vectorielle à sept paramètres d'un repère orthonormé de l'espace affine de dimension trois, muni d'un système de coordonnées cartésiennes (x,y,z), vers un autre repère de même nature (x_S,y_S,z_S). Les paramètres de transformation sont : un facteur d'échelle, trois translations et trois rotations suivant chaque axe du repère. La formulation adoptée par l'IERS est une forme linéaire dérivée qui néglige les termes du deuxième ordre évalués à 10^{-10}, soit quelques 0.6 mm à la surface de la Terre. Elle suppose que les repères sont suffisamment proches pour permettre la linéarisation, autrement dit, que les origines sont près du géocentre; que les axes sont quasiment parallèles; et que les décalages en échelle sont petits. L'expression simplifiée s'écrit ainsi:

$$\begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \qquad \textbf{(E.VI.2)}$$

avec: Ti : translations suivant l'axe i;
Ri : rotations autour de l'axe i;
D tel que : $\lambda = 1 + D$. λ étant le facteur d'échelle. Notons que D est souvent désigné comme facteur d'échelle par abus de langage.

Ce modèle d'analyse est spécifié dans les standards de l'IERS. Il est utilisé en prenant comme paramètres d'ajustement les trois translations (Ti), les trois rotations (Ri), le facteur d'échelle (D), et le jeu combiné de coordonnées (x,y,z). Les observations sont alors les jeux de coordonnées (x_S,y_S,z_S) fournis par les divers centres d'analyse. Chaque jeu suppose a priori un lot associé de paramètres de transformation à estimer. A ce jour, la technique d'ajustement des paramètres s'est appuyée sur la méthode des moindres carrés. Le système d'équations requiert

néanmoins des informations supplémentaires si l'on souhaite combiner des jeux de coordonnées issus de techniques différentes. Ces informations sont apportées par des vecteurs mesurés avec précision entre les points concernés au sein d'un site. On parle de techniques en colocation. Les vecteurs locaux ainsi déterminés sont introduits dans le système d'équations sous forme de relations d'observation additionnelles. En théorie, un minimum de trois points liés de cette manière sont nécessaires pour que le système soit soluble entre deux jeux de techniques différentes. Mais il sera d'autant mieux déterminé que les sites en colocation sont nombreux et répartis uniformément à la surface terrestre.

Un modèle plus sophistiqué est étudié depuis quelques temps au LAREG de sorte que les vitesses des points et l'évolution dans le temps des paramètres de transformation soient pris en compte dans une analyse complète des jeux de coordonnées. Notons que jusqu'à présent la combinaison des positions et des vitesses était effectuée séparément par deux logiciels distincts. La méthode de combinaison des vitesses était toutefois équivalente à celle des jeux de positions, et cohérente avec le modèle physique adopté (E.VI.2) [Boucher et al, 1992]. Le modèle unifié est issu du précédent. Il est plus rigoureux et satisfaisant car il permet d'une part l'estimation de l'ensemble des paramètres dans un même calcul et, d'autre part, le traitement des jeux de coordonnées fournis à des dates de référence différentes. La formulation générale est explicitée dans la relation suivante (E.VI.3). Elle envisage les cas où des points d'un même jeu se rapportent à une date différente, indice par point i, et les cas où des jeux de coordonnées se rapportent au même repère, donc à une même transformation à *quatorze* paramètres, indice k. Les paramètres de transformation étant dans cette approche générale fonction du temps.

$$\begin{pmatrix} x_S^i \\ y_S^i \\ z_S^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{pmatrix} + (t_S^i - t_0) \times \begin{pmatrix} \dot{x}^i \\ \dot{y}^i \\ \dot{z}^i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_1^k \\ T_2^k \\ T_3^k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D^k & -R_3^k & R_2^k \\ R_3^k & D^k & -R_1^k \\ -R_2^k & R_1^k & D^k \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{pmatrix} +$$

$$+ (t_S^i - t_k) \times \left[\begin{pmatrix} \dot{T}_1^k \\ \dot{T}_2^k \\ \dot{T}_3^k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{D}^k & -\dot{R}_3^k & \dot{R}_2^k \\ \dot{R}_3^k & \dot{D}^k & -\dot{R}_1^k \\ -\dot{R}_2^k & \dot{R}_1^k & \dot{D}^k \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{pmatrix} \right] \qquad \textbf{(E.VI.3)}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_S^i \\ \dot{y}_S^i \\ \dot{z}_S^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}^i \\ \dot{y}^i \\ \dot{z}^i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{T}_1^k \\ \dot{T}_2^k \\ \dot{T}_3^k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{D}^k & -\dot{R}_3^k & \dot{R}_2^k \\ \dot{R}_3^k & \dot{D}^k & -\dot{R}_1^k \\ -\dot{R}_2^k & \dot{R}_1^k & \dot{D}^k \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{pmatrix}$$

avec: t_0 : date de référence du calcul;
t_k : date de référence des paramètres de transformation k;
t_S^i : date de référence du point i au sein du jeu de coordonnées s.

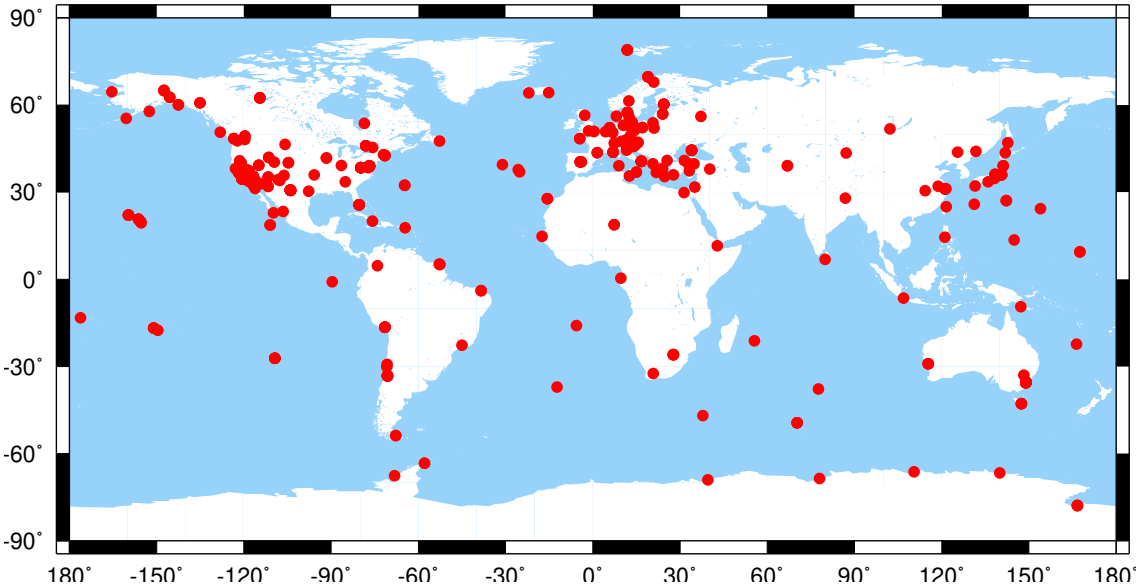
(Note: les dérivées par rapport au temps sont indiquées par des points sur les grandeurs).

Bien qu'elle ne soit pas encore appliquée dans le calcul du repère de l'IERS, la mise en oeuvre récente du modèle ci-dessus a été testée avec satisfaction [Altamimi et al, 1996]. Nous ne rentrerons pas davantage dans le détail des considérations techniques de l'établissement du modèle ou du processus de calcul, ni de l'utilisation délicate des diverses informations fournies par les centres d'analyse, notamment des matrices de covariance associées à leur solution. A cet égard, signalons toutefois l'étude de nouvelles méthodes d'analyse statistique effectuée par Sillard [1997-a] pour estimer de manière rigoureuse la qualité des jeux individuels fournis par les divers centres. Ce travail est effectué en vue d'obtenir une pondération plus convenable des lots de données qui, en outre, laisse peu de latitude aux appréciations subjectives parfois critiquées.

VI.2. Qualité des solutions concrétisant le repère ITRF

A ce jour* , sept solutions se sont succédées pour réaliser le système de référence terrestre de l'IERS, et concrétiser le repère conventionnel associé. Chacune est identifiée par le sigle générique ITRF suivi d'un nombre correspondant à l'année des observations les plus récentes, parmi celles qui ont servi à effectuer les calculs. Il s'agit en l'occurrence des solutions ITRF88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94. Les analyses et les résultats sont décrits dans les notes techniques de l'IERS. La figure 73 montre la répartition des 201 sites qui constituent l'ITRF94. Parmi ces sites, 104 comprennent du VLBI, 62 du SLR, 66 du GPS, 52 du DORIS, et 3 du LLR, bien qu'aucune solution de cette dernière technique ne fut utilisée dans la combinaison finale [Boucher et al, 1996].

Figure 73 : Répartition des 201 sites de la solution ITRF94 du repère conventionnel de l'IERS.



La stratégie de combinaison des jeux de coordonnées a considérablement évolué depuis l'ITRF88. Elle s'appuie sur l'appréciation la plus juste possible de la sensibilité naturelle de chaque technique spatiale aux différents éléments du système de référence, d'une part, et de la qualité observée dans les jeux individuels fournis par les centres d'analyse, d'autre part. C'est ainsi que, par exemple, les origines des solutions ITRF88 à ITRF93 étaient fixées à celles des solutions SLR successives du centre de recherche spatiale de l'Université du Texas, alors que l'origine de l'ITRF94 est une moyenne pondérée des origines de jeux SLR et GPS. Ces choix stratégiques sont revus dans un article de Boucher et Altamimi [1996] pour chacun des éléments du système. Par ailleurs, l'analyse des jeux de coordonnées individuels et de leurs matrices de covariance associées a conduit les chercheurs du LAREG impliqués dans l'IERS à revoir à plusieurs reprises les pondérations des données dans leur combinaison globale. En effet, les matrices de covariance fournies par les centres d'analyse s'avèrent parfois trop pessimistes, parfois trop optimistes au regard des résultats statistiques obtenus des comparaisons et des combinaisons préalables des jeux reçus [Boucher et Altamimi, 1993]. Elles ne sont donc pas utilisées directement comme pondération des données dans le calcul final. A cet égard, l'établissement de la stratégie de pondération est un travail délicat et quelque peu laborieux, qui a notablement évolué [Sillard, 1997-a].

---

* A l'heure où le mémoire de thèse était présenté, un nouveau calcul de l'ITRF était discuté. Le projet s'est concrétisé en août 1997 et des résultats préliminaires ont été présentés à l'Assemblée Générale de l'AIG qui s'est tenue à Rio de Janeiro [Boucher et al, 1997]. Dans la mesure du possible, il semblait opportun de rapporter des éléments sur la qualité de cette solution préliminaire de l'ITRF dans ce document. L'annexe E est rédigée dans ce but.

Au cours de ces dernières années, les techniques de géodésie spatiale, les méthodes et les modèles de traitement et de réduction des données ont beaucoup progressé. Des nouveaux systèmes de positionnement sont venus participer à la construction de l'ITRS depuis 1991, GPS et DORIS, et les liens entre techniques dans les sites en colocation se sont multipliés, apportant une meilleure couverture. Aussi, il est légitime de penser que la dernière solution de l'ITRF est de meilleure qualité que les précédentes. De fait, chacune des réalisations du système définit un repère intrinsèque, si l'on considère que deux repères sont rigoureusement identiques lorsque les paramètres de transformation qui les lient sont nuls. Nous verrons plus loin que ces paramètres sont en effet non nuls. Une première explication est que, par nature, nos réalisations numériques sont imparfaites. Des raisons plus spécifiques et techniques pourraient être évoquées, comme par exemple la date centrale différente des lots de mesures, ou encore, les contraintes de fixation appliquées dans un calcul d'orbite. La première semble en effet influer sur l'origine du repère, alors que la deuxième affecte son orientation en raison de la corrélation entre l'axe du pôle de rotation terrestre et l'axe 'z' du repère. Les explications possibles sont diverses et variées. Elles relèvent souvent de l'application de modèles, de constantes, etc. qui ne sont pas rigoureusement identiques. Le choix de la constante de gravitation géocentrique se répercute par exemple sur l'échelle du repère. Une erreur systématique de caractère global dans un jeu de coordonnées individuel peut donc se retrouver dans un des paramètres de transformation lors de l'ajustement par moindres carrés.

Outre l'adoption de l'ITRS par l'UGGI depuis 1991, la qualité de la réalisation de ce système de référence terrestre se reflète dans l'élaboration des conventions du système, d'une part, et dans les performances des solutions calculées pour le concrétiser, d'autre part. De notre point de vue, rappelons que nous souhaitons un référentiel géodésique universel, de façon à permettre l'accès à celui-ci en tout point du globe, et aussi stable et exact que possible, pour permettre la détermination précise et sans ambiguïté de toute déformation réelle de l'écorce terrestre. En ce qui concerne l'accès au système, la configuration du réseau de points n'est peut-être pas encore optimale, néanmoins elle s'améliore clairement au cours du temps grâce en particulier aux nouvelles techniques radioélectriques portables et relativement bon marché. La couverture des sites de l'ITRF94 est indiquée dans la figure 73. Quant à la qualité du jeu de coordonnées combiné de l'ITRF, elle dépend notamment des données considérées et de la pondération choisie. Les indicateurs statistiques de qualité sont issus de la méthode des moindres carrés appliquée au modèle de combinaison choisi. En particulier, le facteur de variance unitaire nous renseigne utilement de l'adéquation entre les modèles fonctionnel et statistique adoptés et les données employées, et par suite du déroulement général du calcul. Les paramètres de transformation estimés donnent par ailleurs une idée du niveau de cohérence interne entre les solutions individuelles des centres d'analyse et la solution combinée ITRF. Il apparaît dans l'analyse de l'ITRF94 que les origines des différentes solutions présentent un accord de l'ordre de 1-2 cm dans la plupart des cas, et que les échelles sont cohérentes au niveau de 10^{-9}, soit 6 mm à la surface de la Terre [Boucher et al, 1996].

L'exactitude du jeu de coordonnées combiné peut être évaluée à partir des résidus obtenus du calcul, autrement dit, à partir des différences entre coordonnées des solutions individuelles et coordonnées du jeu combiné après transformation à sept paramètres. Le terme d'exactitude n'est pas abusif dans la mesure où l'on considère des jeux de coordonnées provenant de techniques indépendantes de géodésie spatiale, en l'occurrence les plus précises du moment, et que leurs observations sont traitées par plusieurs centres d'analyse. L'intercomparaison des solutions individuelles de nature et d'origine variées est en effet le meilleur moyen de déceler l'existence d'erreurs systématiques au sein des techniques de mesure et des processus d'analyse des observations, et donc de stimuler les efforts de recherche pour les identifier et les modéliser.

Les rapports de l'analyse des solutions de l'ITRF présentent diverses synthèses de ces résidus, regroupés par sites géographiques ou par solutions individuelles, exprimés sans distinguer les composantes de l'espace ou en séparant les composantes horizontale et verticale, simples, normalisés, ou pondérés. Afin de donner des ordres de grandeur et une idée de l'évolution des performances des réalisations de l'ITRS, nous avons extrait des rapports techniques de l'IERS les résidus pondérés, sans distinction des composantes de l'espace, et regroupés par solutions individuelles. Ces résidus sont résumés dans le tableau de la figure 74 en donnant leur moyenne et les l'intervalles d'amplitude par technique et par repère. La dernière ligne du tableau permet d'apprécier la progression de la qualité des solutions de l'ITRF au cours du temps depuis la solution ITRF89. Nous ne devons pas cependant nous fourvoyer en identifiant ces chiffres à la valeur de l'exactitude du système de référence combiné pour au moins deux raisons. D'une part, les indicateurs construits à partir des résidus diffèrent de l'erreur moyenne quadratique, seul estimateur à prendre en compte en théorie les biais. L'erreur moyenne quadratique est d'ailleurs difficile à estimer de manière parfaite puisque les erreurs systématiques sont souvent inconnues. D'autre part, Sillard [1997-a] montre dans une étude récente la sensibilité des résultats de combinaison des jeux de coordonnées en fonction de pondérations empiriques jugées a priori satisfaisantes au regard des indicateurs classiques des moindres carrés. Il préconise à cet égard l'application d'une méthode rigoureuse d'estimation des matrices de covariance des jeux de coordonnées à partir de l'information a priori fournie par les centres d'analyse.

Figure 74 : Moyenne et intervalle d'amplitude par technique spatiale des résidus pondérés des combinaisons de coordonnées ITRF, regroupés par solutions individuelles, sans distinction des composantes de l'espace, fournis dans les rapports techniques de l'IERS. (Valeurs exprimées en centimètres. L'astérisque indique qu'il s'agit de résultats obtenus pour une combinaison à la date de référence 1993.0 au lieu de 1988.0).

Technique	ITRF89	ITRF90	ITRF91	ITRF92	ITRF93*	ITRF94*
VLBI	2.5 [0.9 ; 6.1]	0.9 [0.7 ; 1.5]	0.9 [0.7 ; 1]	0.8 [0.5 ; 1.5]	0.6 [0.5 ; 0.6]	0.9 [0.4 ; 1.9]
SLR	5.2[2.7 ; 10.8]	3.0 [1.6 ; 5]	3.2 [2.1 ; 4.4]	2.7 [1.5 ; 5.8]	2.0	1.1
LLR	6.0[2.5 ; 14.4]	3.1 [3 ; 3.2]	4.3 [3.1 ; 6.6]	3.5 [3.1 ; 3.9]	---	---
GPS	---	---	1.4	1.4 [0.7 ; 3.4]	1.0 [0.7 ; 1.3]	1.1 [0.5 ; 2]
DORIS	---	---	---	---	---	2.2 [1.8 ; 2.8]
Moyenne	4.5 cm	2.3 cm	2.5 cm	2.1 cm	1.2 cm	1.3 cm

Ainsi que le soulignent les auteurs des rapports de l'IERS concernés, les valeurs fournies ne cherchent pas à classer les techniques elles-mêmes, mais seulement les solutions incluses dans l'ajustement global de chaque ITRF. Le lecteur intéressé par ces résultats et leur obtention est invité à consulter ces rapports. Notons que les stations de l'ITRF94 sont classées en fonction de la confiance allouée à l'estimation de leurs coordonnées et vitesses. Quatre classes ont été définies:

• classe A : points présentant des résidus inférieurs à 2 cm dans les combinaisons effectuées aux dates 1988.0 et 1993.0. De plus, au moins deux techniques spatiales liées par un vecteur local, précis à mieux que 2 cm, ont contribué à la détermination des coordonnées.

• classe B : points non inclus dans A, présentant des résidus inférieurs à 3 cm dans la combinaison effectuée à la date 1993.0. Au moins deux techniques spatiales liées par un vecteur local, précis à mieux que 3 cm, ont contribué à la détermination des coordonnées.

• classe C : points non inclus dans A ou B avec des résidus raisonnables.

• classe Z : points présentant des résidus importants. Probablement une faute ou une mauvaise détermination.

VI.3. Exploitation pour l'étude des mouvements à la surface de la Terre

VI.3.1. La composante verticale

Le système de référence terrestre ITRS permet en particulier une détermination réaliste des déformations de l'écorce terrestre. A cet égard, il est intéressant de noter que, dans de nombreux sites, les vitesses horizontales obtenues par géodésie spatiale sont en bon accord avec les déplacements des plaques tectoniques estimés sur quelques millions d'années à partir des enregistrements géologiques. Les graphiques fournis par Boucher et al [1996] dans leur analyse de l'ITRF94 montrent d'ailleurs que cet accord est surtout visible pour les points éloignés des frontières de plaques qui ne sont pas affectés par d'autres causes de mouvement. Les résultats de géodésie spatiale servent désormais à l'élaboration des modèles de mouvement des plaques tectoniques [DeMets et al, 1996], puisque ces mouvements s'avèrent fondamentalement linéaires sur des périodes de temps géologiques.

Toutefois, force est de constater que la composante verticale est dans la plupart des cas moins bien déterminée. Cette remarque est illustrée dans le tableau de la figure 75, établi d'une manière analogue à celui de la figure 74, en considérant les résidus pondérés donnés suivant les composantes horizontale et verticale, lorsqu'ils étaient effectivement disponibles. Les sources d'erreur systématiques potentielles qui pourraient expliquer cette anisotropie sont diverses, nous les verrons plus en détail dans un prochain chapitre.

Figure 75 : Moyenne et intervalle d'amplitude par technique spatiale des résidus pondérés des combinaisons de coordonnées ITRF, regroupés par solutions individuelles, en distinguant les composantes horizontales et verticales, fournis dans les rapports techniques de l'IERS. (Valeurs en cm. L'astérisque indique qu'il s'agit de résultats obtenus pour une combinaison à la date de référence 1993.0 au lieu de 1988.0).

Technique	hor. ITRF92	vert.	hor. ITRF93*	vert.	hor. ITRF94*	vert.
VLBI	0.6 [0.3 ; 1.1]	1.3 [0.8 ; 2.6]	0.5 [0.4 ; 0.6]	0.8 [0.7 ; 0.9]	0.5 [0.3 ; 0.8]	1.3 [0.6 ; 3.2]
SLR	2.4 [1.3 ; 4.8]	3.3 [1.9 ; 7.2]	1.9	2.4	0.8	1.2
LLR	3.8 [3.6 ; 4.3]	3.0 [2.2 ; 3.5]	---	---	---	---
GPS	1.2 [0.4 ; 3.1]	1.9 [0.8 ; 4.4]	0.8 [0.5 ; 1.1]	1.6 [1.1 ; 2.2]	1.0 [0.3 ; 2]	2.1 [0.8 ; 4.7]
DORIS	---	---	---	---	2.2 [1.8 ; 2.8]	2.3 [2 ; 2.8]
Moyenne	2 cm	2.4 cm	1 cm	1.6 cm	1.1 cm	1.7 cm

Les relations (E.VI.4) et (E.VI.5) rappellent les transformations entre systèmes de coordonnées cartésiennes (x,y,z) et géographiques (λ,φ,h):

$$\begin{cases} x = (N+h)\times\cos\lambda\times\cos\varphi \\ y = (N+h)\times\sin\lambda\times\cos\varphi \\ z = \left[N\times(1-e^2)+h\right]\times\sin\varphi \end{cases} \qquad \textbf{(E.VI.4)}$$

avec: e : l'excenticité de l'ellipsoïde géodésique considérée;
λ, φ : longitude et latitude géographiques;

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\times\sin^2\varphi}}$$

et dans le sens inverse, nous avons:

$$\lambda = \arctan {}^{y}\!/_{x} \qquad \textbf{(E.VI.5)}$$

$$\begin{cases} \varphi_i = \arctan\left(\dfrac{z}{\sqrt{x^2+y^2}} \times \dfrac{1}{1 - e^2 \cdot \dfrac{N_{i-1}}{N_{i-1}+h_{i-1}}} \right) \\ h_i = \dfrac{\sqrt{x^2+y^2}}{\cos\varphi_i} - N_i \end{cases} \qquad \begin{cases} \varphi_0 = \arctan \dfrac{z}{\sqrt{x^2+y^2}} \\ h_0 = \dfrac{\sqrt{x^2+y^2}}{\cos\varphi_0} - N_0 \end{cases}$$

La latitude et la hauteur ellipsoïdale sont les limites des suites convergentes définies ci-dessus $(\varphi_i)_{i\in N}$ et $(h_i)_{i\in N}$.

VI.3.2. Stabilité des réalisations pratiques de l'ITRS

Les réalisations successives de l'ITRS présentent des paramètres de transformation non nuls entre elles. Le tableau de la figure 76 donne la valeur des paramètres de translation et d'échelle entre la solution ITRF94 à la date 1988.0 et les solutions précédentes à la même date de référence [Boucher et Altamimi, 1996]. Chaque solution, la meilleure possible au moment du calcul, définit en toute rigueur un repère intrinsèque. Néanmoins, les écarts systématiques entre ces solutions reflètent plutôt l'effet des données considérées, l'amélioration des analyses et des modèles. La dernière solution serait ainsi la plus fiable.

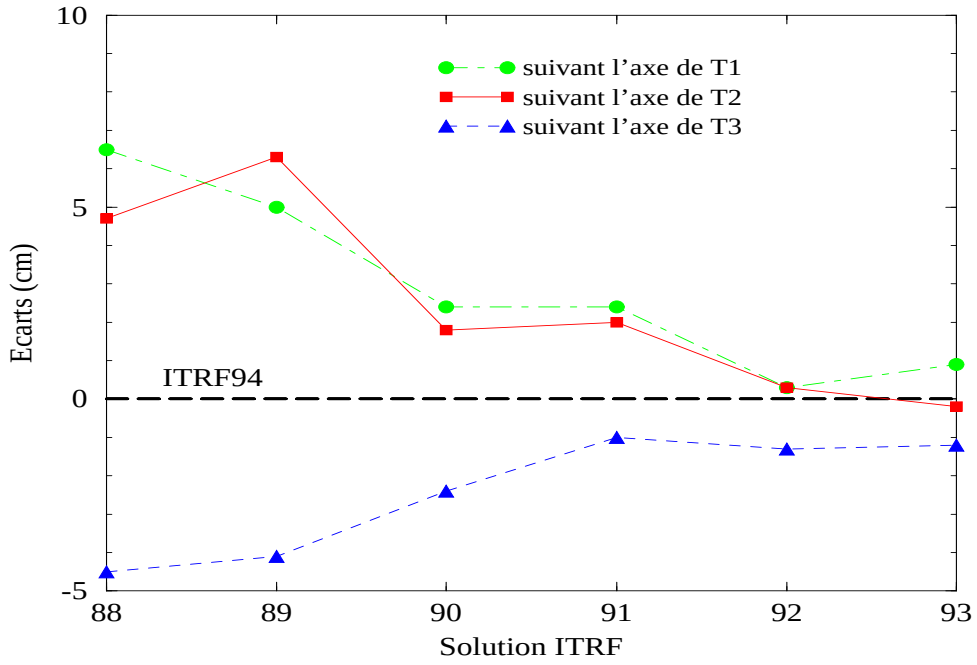
Figure 76 : Evolution des paramètres de translation et d'échelle entre la solution ITRF94 du repère conventionnel de l'IERS, à la date 1988.0, et les solutions précédentes, à la même date de référence, d'après Boucher et Altamimi [1996].

Paramètre	ITRF88	ITRF89	ITRF90	ITRF91	ITRF92	ITRF93
T1 (cm)	1.8	2.3	1.8	2.0	0.8	0.6
T2 (cm)	0	3.6	1.2	1.6	0.2	-0.5
T3 (cm)	-9.2	-6.8	-3.0	-1.4	-0.8	-1.5
D (10^{-8})	0.74	0.43	0.09	0.06	-0.08	0.04

La figure 77 montre la variation verticale de la position de trois points à la surface de la Terre suivant que leurs coordonnées sont exprimées dans un repère ITRF ou dans un autre. Les points considérés sont idéalement situés sur chacun des axes du repère et ne subissent en théorie aucune déformation réelle. L'ITRF94 est traité ici comme une référence parfaite. Les écarts de position ITRFYY-ITRF94 proviennent alors de l'effet artificiel et cumulé de la variation de l'échelle et du géocentre entre les solutions successives.

Les courbes confirment l'idée que les réalisations de l'ITRS convergent vers une solution numérique plus exacte qui se stabilise dans le temps au niveau centimétrique. Aussi, il est important de considérer la dernière solution de l'ITRF lorsque l'on cherche à établir des séries temporelles de positions à la surface terrestre, d'autant que l'on souhaite les interpréter par la suite d'un point de vue géophysique. Par conséquent, afin d'éviter les effets artificiels introduits par les calculs successifs du repère de référence, il est indispensable d'exprimer une série temporelle de manière cohérente dans un repère unique de qualité supérieure. Cela suppose donc de recalculer les positions obtenues dans le passé par la technique de géodésie spatiale considérée, ou encore, de leur appliquer les paramètres de transformation adéquats.

Figure 77 : Variations de la position de trois points à la surface de la Terre (a≈6378137 m) suivant qu'ils sont exprimés dans un repère ITRF ou dans un autre. Les écarts sont dus à l'effet cumulé de la variation de l'échelle et du géocentre. (Les points sont situés sur chaque axe du repère. L'ITRF94 est considéré parfait).



VI.3.3. Estimation de déplacements à la surface de la Terre

Outre l'établissement de séries temporelles cohérentes de positions qui pourront être exploitées avec une certaine marge de liberté par les géophysiciens, ces derniers peuvent également tirer parti des vitesses calculées dans l'ITRF. Pour nous faire une première idée de la confiance attribuée à ces vitesses, mais aussi de l'évolution de leur qualité, nous avons étudié les statisques associées aux champs de vitesse des solutions ITRF dans les rapports d'analyse de l'IERS. Elles sont résumées de la même façon que dans les tableaux des figures 74 et 75 en distinguant, lorsque l'information était disponible, les composantes horizontale et verticale.

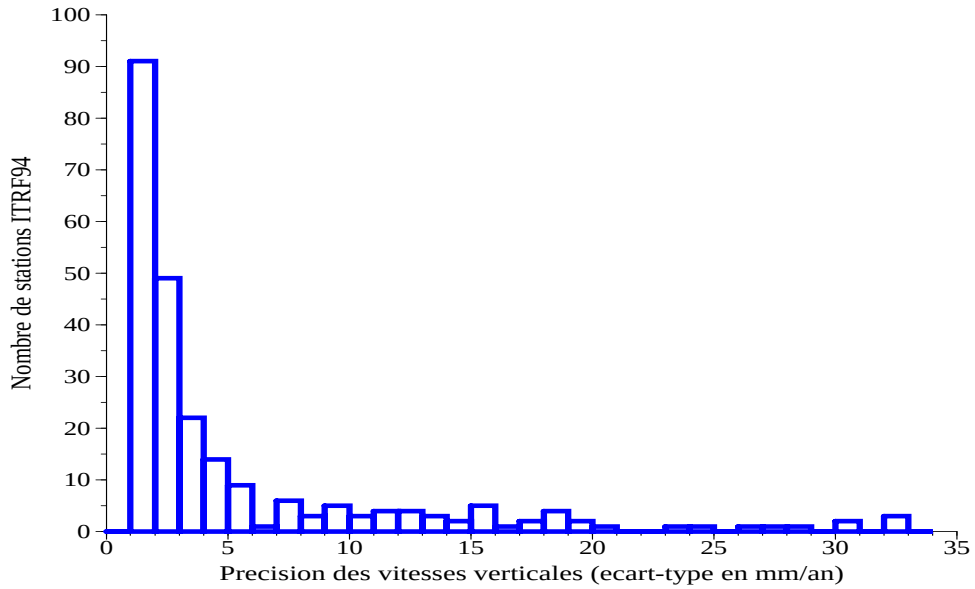
Figure 78 : Moyenne et intervalle d'amplitude par technique spatiale des résidus pondérés des combinaisons de vitesses ITRF, regroupés par solutions individuelles, en distinguant les composantes horizontales et verticales lorsque cette distinction est disponible dans les rapports techniques de l'IERS. (Valeurs en mm/an).

Technique	ITRF91	ITRF92	hor. ITRF92	vert.	hor. ITRF93	vert.
VLBI	1.1 [0.9 ; 1.5]	1.1 [0.7 ; 1.5]	0.8 [0.6 ; 1]	1.8 [0.5 ; 2.9]	0.7 [0.3 ; 1.2]	1.9 [0.7 ; 3.1]
SLR	4.5 [2.7 ; 5.9]	2.4 [0.9 ; 4.8]	2.4 [1.1 ; 5]	3.2 [2.3 ; 4.6]	2.3 [1.7 ; 3]	5.1
GPS	---	---	---	---	(5.7)	(10.6)
Moyenne	2.8 mm/an	1.8 mm/an	1.6 mm/an	2.5 mm/an	1.5 mm/an	3.5 mm/an

Note: Ces statistiques ne sont pas disponibles pour l'ITRF94, car son champ de vitesse a été calculé à partir des résultats des deux combinaisons globales de jeux de coordonnées effectuées respectivement aux dates de référence 1988.0 et 1993.0

Afin d'étudier la qualité du champ de vitesse de l'ITRF94, nous avons récupéré les vitesses verticales relatives à cette solution. L'annexe C donne les vitesses et les écart-types de chaque point. Les informations sont regroupées par sites géographiques et nous rappelons en outre la catégorie du point considéré (A,B,C ou Z). L'histogramme de la figure 79 donne une idée générale de la précision des vitesses de l'ITRF94. Cette précision est estimée par l'écart-type correspondant, obtenu du calcul de combinaison par moindres carrées. On constate que le mode principal se situe autour de 1 à 2 mm/ an, mais que seulement 38% des vitesses sont déterminées avec un écart-type inférieur à 2 mm/an; 67% étant déterminées à mieux que 4 mm/an.

Figure 79 : Histogramme de la précision des vitesses verticales de l'ITRF94.



Les histogrammes des figures suivantes 80 et 81 détaillent les résultats par technique et par classe de qualité des points. Des 242 points qui disposent d'une vitesse dans l'ITRF94, 86 points sont déterminés par VLBI, 62 par SLR, 52 par GPS, et 42 par DORIS. Toutes les techniques présentent un mode principal situé entre 1-2 mm/an, bien qu'il soit moins évident pour DORIS. En outre, 71% des vitesses GPS sont évaluées avec un écart-type inférieur à 3 mm/an. Du côté des techniques SLR et VLBI, un niveau de précision équivalent est atteint respectivement pour 63 % et 59% des stations, alors que la précision des vitesses DORIS reste assez hétérogène.

Par ailleurs, les 242 points se répartissent dans les trois premières classes de qualité que nous avons défini auparavant : 66 en classe 'A', 71 en classe 'B', et 105 en classe 'C'. Les premières catégories présentent un mode principal de l'ordre de 1-2 mm/an, alors que celui de la catégorie 'C' se situe plutôt entre 2-3 mm/an. Aussi, on constate que 77% des vitesses regroupées dans 'A' sont déterminées avec un écart-type inférieur à 2 mm/an. Le même niveau de précision est atteint pour 41% des vitesses de la classe 'B', et seulement pour 10% des vitesses de la classe 'C'.

Figure 80 : Histogrammes de la précision des vitesses verticales de l'ITRF94 regroupées par technique de géodésie spatiale.

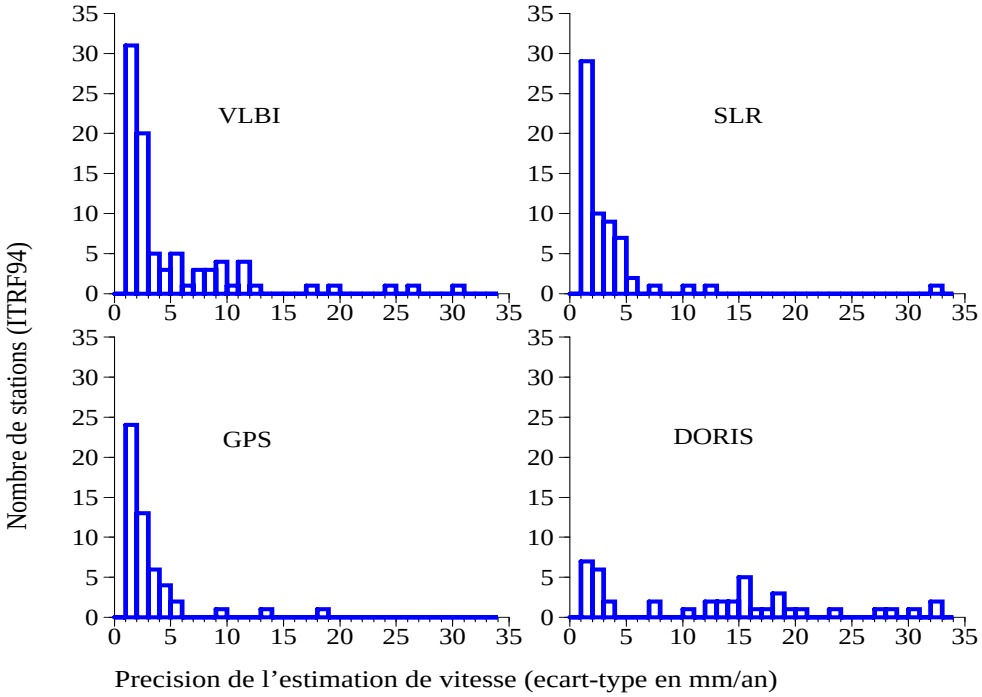
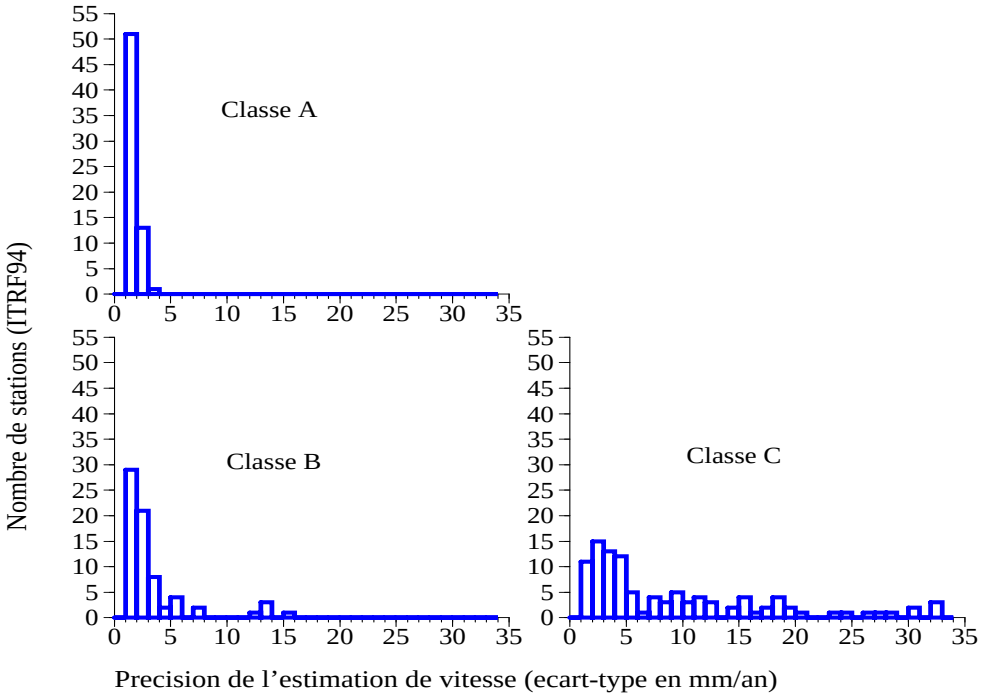
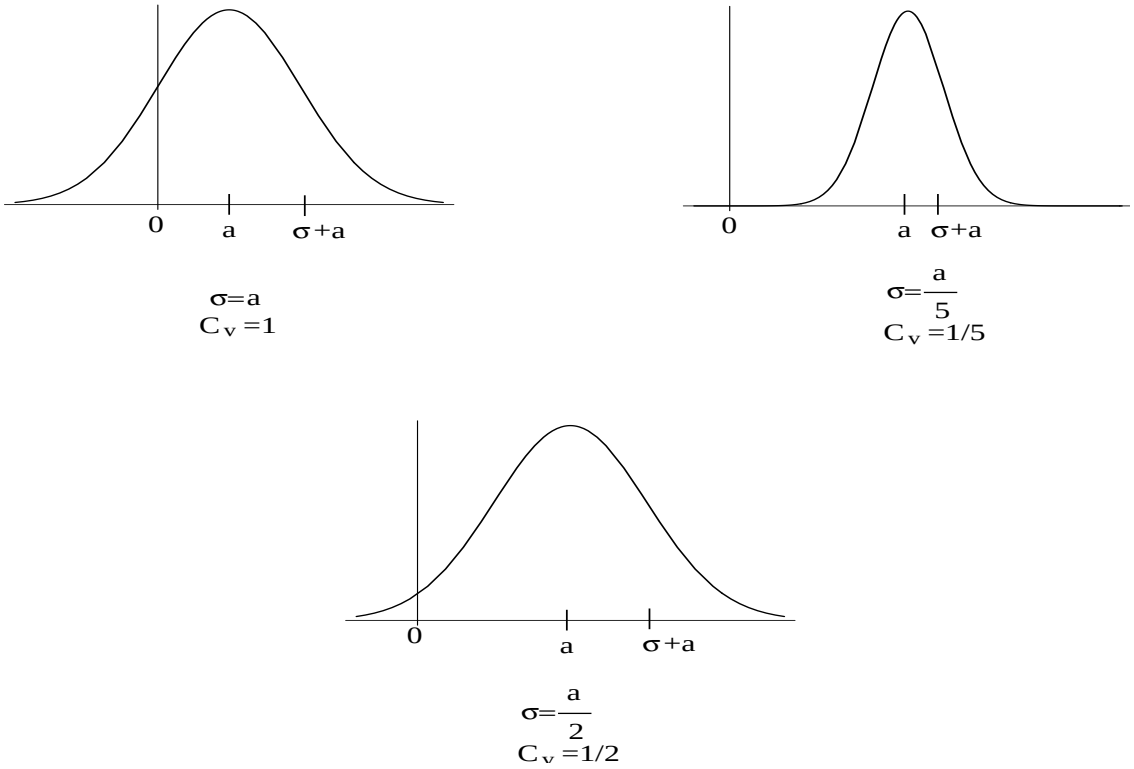


Figure 81 : Histogrammes de la précision des vitesses verticales de l'ITRF94 regroupées par classes de qualité (A,B ou C).



Nous avons étudié la précision relative de l'estimation des vitesses ITRF94 à partir de l'analyse du coefficient de variation, défini comme le rapport de l'écart-type à la valeur absolue de la variable aléatoire considérée (cf. relation E.II.9). Plus ce coefficient est faible et meilleure est la qualité de l'estimation. En effet, la figure 82 montre que, dans le cas d'une variable aléatoire gaussienne, un coefficient de variation de 1/5 permet de déterminer de manière certaine le signe de la variable. Un coefficient de 1/2 permet de connaître le signe avec une probabilité encore importante d'environ 98%, en revanche pour un coefficient de 1, la probabilité se réduit à environ 83,5%.

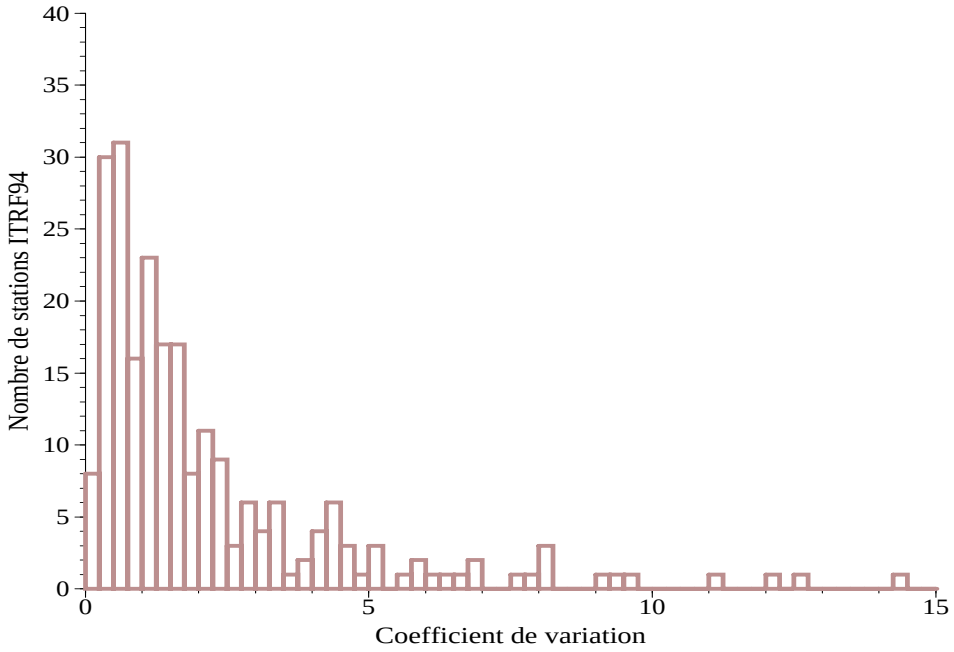
Figure 82 : Evaluation de la précision relative de l'estimation d'une variable aléatoire à partir de l'étude du coefficient de variation. (Nous considérons ici une distribution gaussienne).



Si l'on considère que la variable suit une loi de probabilité quelconque, un coefficient de variation supérieur à 1/2 ne permettra pas a priori de discriminer, avec un niveau de confiance statistique d'au moins 75% [Bougeard, 1990], si la grandeur vraie que l'on cherche à estimer est positive ou négative. Les coefficients de variation des vitesses verticales estimées dans l'ITRF94 sont fournies dans la dernière colonne du tableau de l'annexe C.

L'histogramme de la figure 83 indique un mode principal de 0.5-0.75 pour le coefficient de variation calculé sur les vitesses verticales de l'ITRF94. Il convient toutefois de noter que seulement 16% des vitesses ont un coefficient inférieur à 0.5, et 35% un coefficient inférieur à l'unité.

Figure 83 : Histogramme du coefficient de variation calculé pour les vitesses verticales estimées dans l'ITRF94.



Si l'on regarde le détail des résultats par technique spatiale, la figure 84 montre que le pourcentage des vitesses VLBI ayant un coefficient de variation inférieur à 0.5 est de 19%, il est de 16% pour les vitesses SLR, de 15% pour les vitesses GPS, et de 10% pour les vitesses DORIS. Lorsque l'on regarde les résultats pour un coefficient de variation inférieur à l'unité, nous trouvons 36% des vitesses VLBI, 39% des vitesses SLR, 44% des vitesses GPS, et 17% des vitesses DORIS.

Enfin, la figure 85 conforte quelque peu le classement de qualité des points de l'ITRF94 puisque 12% et 41% des vitesses de catégorie A ont des coefficients de variation inférieurs à 0.5 et 1 respectivement, contre 24% et 49% pour les vitesses de classe B, et 11% et 21% pour les vitesses de classe C.

Figure 84 : Histogrammes du coefficient de variation calculé pour les vitesses verticales estimées dans l'ITRF94 et regroupées par technique de géodésie spatiale.

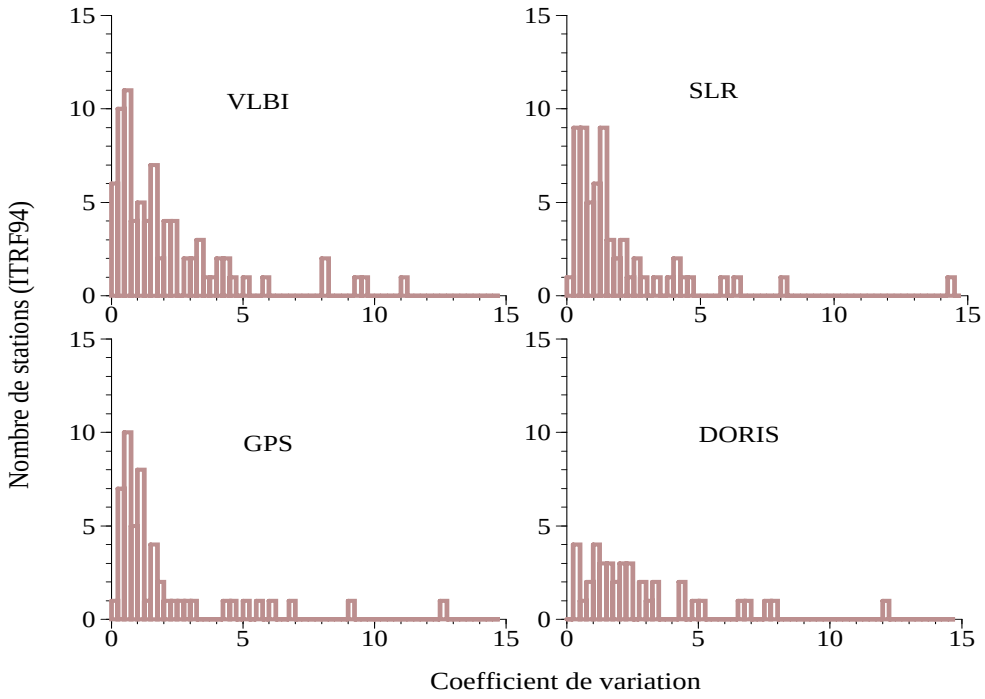
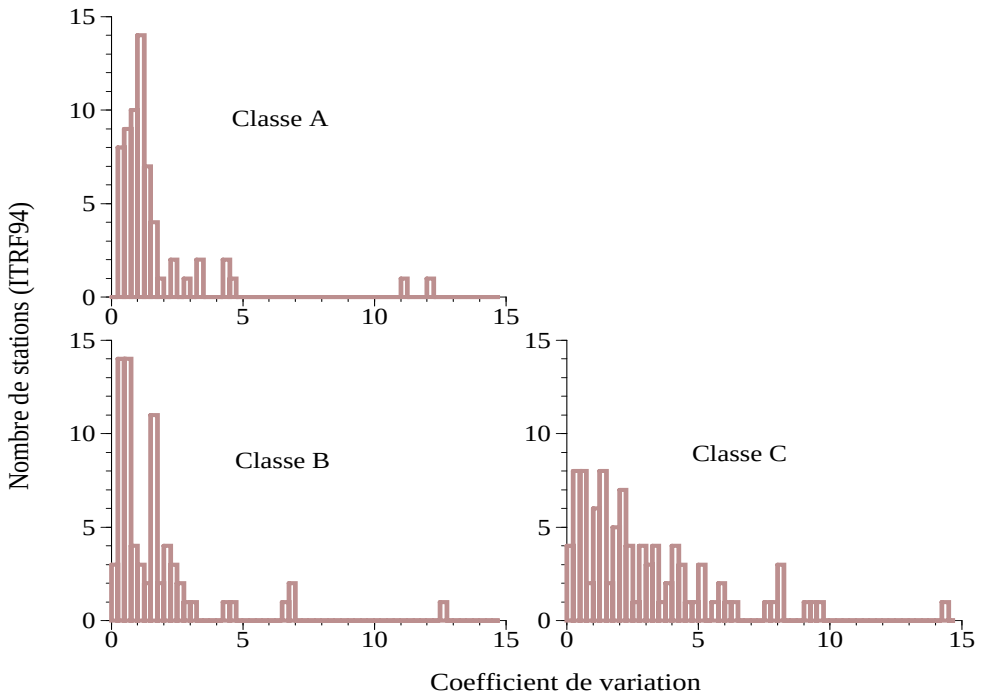


Figure 85 : Histogrammes du coefficient de variation calculé pour les vitesses verticales estimées dans l'ITRF94 et regroupées par classes de qualité (A,B ou C).



Plusieurs éléments ressortent de cette brève analyse. D'abord, la précision des vitesses verticales de l'ITRF94 s'avère, en termes d'écart-type, inférieure à 2 mm/an dans presque 40% des cas. Deux tiers des vitesses sont évaluées à mieux que 4 mm/an. Au regard de l'indicateur de qualité fourni par le coefficient de variation, il semble ensuite que les vitesses soient encore peu significatives. Dans au moins 65% des cas, nous ne sommes pas en mesure de discriminer si le point fait l'objet d'un affaissement, ou d'un soulèvement, avec un niveau de confiance statistique d'au moins 75%. Il est toutefois possible que les points soient effectivement stables, auquel cas cet indicateur relatif de qualité paraîtra toujours trop fort, ceci quelque soit la précision absolue de l'estimation. Rappelons par ailleurs que les mesures précises sont récentes, et par conséquent trop brèves pour fournir des résultats clairs et significatifs. Il est donc encore difficile de les interpréter comme des mouvements réels de l'écorce terrestre. C'est ainsi que la technique spatiale DORIS, récemment introduite dans le calcul de l'ITRF, donne en général des estimations moins fiables.

Si l'incertitude des vitesses ITRF94 paraît encore un peu large, nous ne devons pas oublier que nous cherchons à estimer le niveau d'exactitude des résultats. La précision affichée par les centres d'analyse est de fait bien inférieure car elle est évaluée en interne. De plus, les critères sont souvent fondés sur une théorie statistique qui suppose l'absence d'erreurs systématiques. La comparaison et la combinaison des solutions inter-centres et inter-techniques est à cet égard précieuse pour prendre conscience des problèmes. Notons toutefois que ces analyses comparatives dépendent fortement de la qualité liens mesurés localement entre les points d'un même site. Aujourd'hui, les rattachements locaux semblent en effet limiter la qualité des combinaisons des solutions globales individuelles. Leur précision est dans de nombreux cas insuffisante, et il devient nécessaire de prendre en compte par ailleurs leur évolution temporelle.

Nous avions songé dans un premier temps à effectuer un travail complémentaire à celui du chapitre II en corrigeant nos résultats marégraphiques par la donnée de vitesses verticales issues de la géodésie spatiale et disponibles dans l'ITRF94. L'hypothèse de départ entrevue était l'identification du mouvement vertical observé par la station de géodésie spatiale à celui du repère de marée. Cependant, au regard des résultats actuellement fournis par la géodésie spatiale et de la distance souvent considérable qui sépare les points géodésiques concernés des marégraphes intéressants de notre étude, nous avons abandonnée cette idée pour l'instant. Le tableau de l'annexe D donne la distance qui sépare les marégraphes de plus de 40 données annuelles de type RLR du PSMSL, de la station ITRF94 la plus proche. Aussi, des 200 marégraphes considérés, 98 ont un point de l'ITRF94 à moins de 200 km, dont 29 GLOSS. Seuls 30 marégraphes ont un point ITRF94 à une distance de 50 km, dont 7 GLOSS, mais parmi ces points, 9 ne fournissent pas d'estimation de vitesse dans l'ITRF94, dont 2 GLOSS.

Ces données montrent que peu de stations de géodésie spatiale sont à proximité des marégraphes. Les intérêts propres à la géodésie ne coïncident manifestement pas souvent avec ceux de la marégraphie. Un effort spécifique est par conséquent nécessaire si l'on souhaite corriger de manière satisfaisante les tendances apparentes du niveau de la mer déterminées à partir des marégraphes. En outre, il s'avère qu'au sein d'un même site les vitesses verticales ITRF94 diffèrent parfois de plus de 1 mm/an. Ces écarts pourraient traduire des déformations locales différentielles entre points, mais les valeurs des vitesses restent toutefois cohérentes avec leur fourchette d'incertitude. L'hypothèse d'un mouvement vertical identique entre le point géodésique et le repère de marée est par ailleurs audacieuse, mais surtout peu rigoureuse au regard de la variété des mouvements physiques possibles à l'échelle locale, d'une part, et du niveau de précision considéré, d'autre part, d'autant que la distance qui les sépare s'accroît.