

## IMPORTANCE DU SYSTÈME DE RÉFÉRENCE TERRESTRE DANS LA MESURE DU NIVEAU DES MERS

X. Collilieux (1), A. Santamaria-Gómez (1,2), G. Wöppelmann (3), Z. Altamimi (1), P. Bonnefond (4), P. Willis (5,6), C. Boucher (7), M-N Bouin (8)

(1) IGN/LAREG, GRGS

(2) Instituto Geográfico Nacional, Espagne

(3) Université de La Rochelle - CNRS, UMR 6250 LIENSS

(4) OCA/GéoAzur, UMR 6526, GRGS

(5) IGN/DT

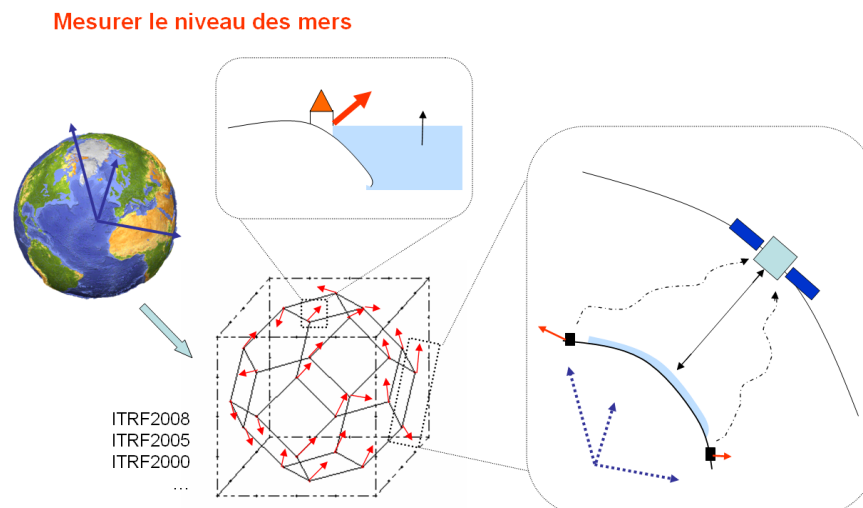
(6) IPGP – Sorbonne Paris Cité, Géophysique spatiale et planétaire, UMR 7154

(7) MEDDTL

(8) Météo-France

L'océan joue un rôle majeur de régulateur thermique du système climatique. Il est essentiel de l'étudier pour être à même de comprendre les évolutions du climat. Le niveau des mers varie en fonction de la masse des océans (échange d'eau avec les continents et les calottes glacières) et de la température de l'eau et de sa salinité. On observe actuellement une élévation du niveau moyen de la majeure partie des océans (latitude comprise entre  $-66^\circ$  et  $66^\circ$ ) de  $3.4 \pm 0.4$  mm/an sur la période 1993 à 2007 (Beckley et al., 2007). L'altimétrie spatiale a permis d'obtenir une couverture dense et homogène des observations, ce qui a considérablement augmenté la connaissance en océanographie. Il est dorénavant possible d'expliquer quelles sont les différentes contributions à l'élévation du niveau moyen de la mer observée (Cazenave et al., 2008) à l'aide de données in situ et de la gravimétrie spatiale (mission GRACE), bien que les incertitudes de chacune restent assez larges (Leuliette & Miller, 2009).

L'altimétrie spatiale fournit des mesures du niveau des mers depuis 1978 et la mission Seasat (Aviso, 2011), mais les premiers résultats significatifs ont été obtenus avec le satellite TOPEX/Poseidon lancé en 1992, suivi de Jason-1, Envisat puis Jason-2 toujours en activité. Avant cette période, seules les données marégraphiques permettaient une mesure précise des variations du niveau des mers, mais elles fournissent toutefois une mesure locale et relative.



**Fig. 1.** Principe de la mesure du niveau des mers. Le repère de référence terrestre, qui donne accès au système d'axes du système terrestre (gauche), est matérialisé par un réseau de points (bas) dont les vitesses sont représentées par des vecteurs rouges. Ces coordonnées permettent de corriger les données des marégraphes (haut) mais aussi de déterminer des orbites de satellites dédiés à la mesure du niveau des mers (droite).

Le Repère de référence terrestre (RRT) est un acteur fondamental dans la mesure du niveau géocentrique des mers (i. e. se référant au centre des masses), voir Figure 1. Notre objectif est d'illustrer son rôle et de quantifier l'impact d'une éventuelle inexactitude de sa définition en termes d'origine et d'échelle. Il est nécessaire au calcul d'orbites précises de satellites, à l'étalonnage des altimètres spatiaux, à la correction de données marégraphiques, à l'unification des références verticales

hydrographiques et terrestres, et à l'homogénéisation de séries temporelles du niveau des mers obtenues par les différentes missions altimétriques (Ries, 2009). Sa cohérence à long terme est donc fondamentale, elle fera l'objet de la partie 1. La partie 2 exposera plus en détails les différentes interactions entre le RRT et la mesure du niveau des mers.

## **1. Estimation de l'erreur des repères de référence terrestre internationaux**

Le Système de référence terrestre (SRT) est un système d'axes en co-rotation avec la Terre dans son mouvement dans l'espace. L'accès à ce système d'axes se fait de manière indirecte. En effet, on se positionne relativement à un ensemble de points dont les coordonnées sont connues par rapport à ce système, voir Figure 1. L'ensemble de ces coordonnées primaires constitue un RRT et est communément appelé « réalisation » du système. La Terre étant un solide déformable, ces coordonnées varient avec le temps (constantes et dérivées, plus des discontinuités occasionnelles), mais ces variations sont minimisées en moyenne par l'adoption de conventions (condition dite de non rotation). Pour l'intérêt du plus grand nombre, il est commode d'adopter un RRT unique pour faciliter la comparaison des résultats. L'Union de géodésie et de géophysique internationale (UGGI) recommande l'utilisation du Système international de référence terrestre (ITRS)<sup>21</sup> comme SRT privilégié pour les applications en géosciences, et valorise donc l'utilisation de ses réalisations nommées ITRF<sup>22</sup>. Comme ces réalisations sont les résultats d'estimations, elles sont entachées d'erreurs et il convient donc de les réévaluer régulièrement, intégrant de ce fait de nouvelles stations de mesures et bénéficiant de l'amélioration des nouveaux modèles et traitements des données de géodésie spatiale. Parmi les dernières réalisations, on peut citer la publication de l'ITRF2000 en 2001, l'ITRF2005 en 2006 et l'ITRF2008 en 2010 (voir *Altamimi et al., cet ouvrage*).

### **1.1. L'ITRF, forces et faiblesses**

Les différents ITRF ont été calculés par combinaison des coordonnées obtenues essentiellement par quatre techniques de mesure : le positionnement global par satellites (GNSS), essentiellement le GPS, l'interférométrie à très longue base (VLBI), la télémétrie laser sur satellites (SLR) et le système d'orbitographie DORIS. La combinaison consiste à moyenniser les coordonnées fournies par les quatre techniques de mesure sur les sites pour lesquels plusieurs instruments sont en opération (sites dits de co-localisation). Mais comme l'information de variance-covariance des données est introduite, l'ensemble des coordonnées combinées bénéficie de cet ajustement. Il est nécessaire d'introduire des mesures de positions relatives des instruments co-localisés (par exemple DORIS par rapport à GPS) pour permettre une homogénéisation des repères de référence de chaque technique de mesure. Le grand avantage de la méthodologie actuelle est que les axes du repère combiné peuvent être choisis et définis de manière conventionnelle, dans le but de répondre aux spécifications de l'ITRS.

L'origine de l'ITRS est le centre des masses de la Terre, incluant ses couches fluides<sup>23</sup> (atmosphère et océans), et celle de l'ITRF en est une estimation. Comme ses coordonnées varient essentiellement de manière séculaire, l'origine de l'ITRF représente le centre des masses moyen de la Terre sur la période d'observation des données utilisées pour sa construction. La technique de mesure d'excellence pour évaluer des coordonnées relatives au centre des masses de la Terre est la télémétrie laser sur satellite. Elle est donc adoptée pour définir l'origine de l'ITRF. Quant à l'échelle, c'est le Temps terrestre (TT) qui est adopté et qui définit en partie l'échelle des dernières réalisations de l'ITRS. L'information de distance entre stations des techniques SLR et VLBI a été jusqu'à maintenant privilégiée. L'origine et l'échelle en provenance des coordonnées SLR et VLBI sont transmises au repère ITRF calculé à l'aide d'une transformation géométrique de coordonnées (similitude). La distribution et la taille des réseaux des techniques VLBI et SLR, ainsi que le nombre de sites de co-localisation avec les autres techniques, sont donc des facteurs importants à considérer. Par exemple, la majeure partie des utilisateurs accède à l'ITRF via des coordonnées de stations GNSS. Il convient donc d'évaluer si le repère GNSS est bien connecté à celui des autres techniques. Nous avons estimé à 0.1 mm/an la qualité

<sup>21</sup> ITRS : International terrestrial reference system.

<sup>22</sup> ITRF : International terrestrial reference frame.

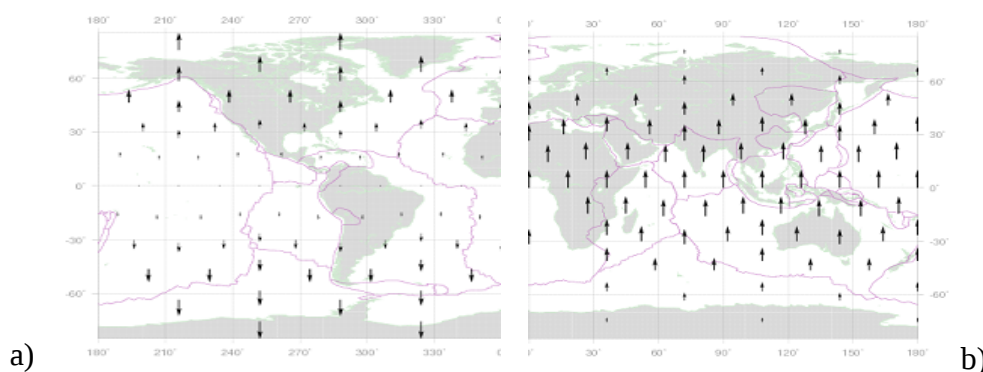
<sup>23</sup> Nous ne discuterons pas ici l'orientation du système de référence, car son importance est moindre pour les problématiques liées au niveau de la mer.

de ce rattachement sur chaque composante de l'origine et l'échelle pour l'ITRF2005 (Collilieux & Wöppelmann, 2010). Cependant, outre ces paramètres globaux, la précision et l'exactitude des coordonnées individuelles de chaque station doivent également être considérées car c'est à travers les coordonnées d'un réseau de stations qu'il est possible d'accéder à l'origine et l'échelle du RRT sous-jacent.

## 1.2. Exactitude de l'ITRF

Les coordonnées des réalisations de l'ITRS, et donc de l'ITR2005 et l'ITRF2008, se réfèrent à un système d'axes dont il faut évaluer la localisation en terme d'origine par rapport au centre des masses réel du système Terre. Il faut également évaluer l'échelle qui fixe l'unité de distance du réseau, et spécialement une dérive éventuelle qui se traduit par une incertitude sur les vitesses verticales.

Tout d'abord, regardons comment les coordonnées d'un réseau sont modifiées lorsque l'on change l'origine et l'échelle du repère terrestre. Si l'origine dérive selon la composante Z par exemple, les vitesses verticales et horizontales, composante nord uniquement, seront modifiées. La Figure 2 illustre cette modification pour une dérive positive. Les changements dépendent de la latitude uniquement et la modification est accrue à haute latitude pour les vitesses verticales et à l'équateur pour les vitesses horizontales. Une dérive d'échelle n'affecte, quant à elle, que les vitesses verticales, d'une même constante. Il convient, pour évaluer l'origine et l'échelle de l'ITRF, de connaître avec certitude, et en moyenne, quelles sont les caractéristiques attendues d'un champ de vitesses géocentriques. Nous ne disposons pas de modèles complets et suffisamment précis des déplacements attendus, ce qui rend cette analyse délicate. Nous concentrons donc ici notre discussion sur les observations des différentes techniques de géodésie spatiale qui sont indépendantes les unes des autres.



**Fig. 2.** a) Effet d'une erreur d'une dérive d'origine selon la composante Z sur les vitesses verticales. b) Même effet mais sur les vitesses en nord.

Une première évaluation grossière de l'erreur consiste à comparer les origines et échelles (et donc la différence de coordonnées moyenne selon chaque composante) des différentes solutions ITRF qui répondent aux mêmes spécifications. La publication d'une différence d'origine de +1.8 mm/an selon Z et d'une différence d'échelle de -0.3 mm/an entre l'ITRF2000 et l'ITRF2005 avait provoqué une certaine incompréhension mais aussi émulation dans la communauté scientifique car elle revoyait à la hausse le budget d'erreur sur l'exactitude des RRT (Altamimi et al., 2007). Les dérives observées aujourd'hui sont faibles et non significatives entre l'ITRF2005 et l'ITRF2008, mais on note toutefois une modification de l'échelle d'environ -6 mm (Altamimi et al., cet ouvrage). Bien que ce résultat soit notable et fondamental, il convient de noter que seule la technique SLR participe à la définition de l'origine et que l'absence de dérive observée ne traduit qu'une cohérence interne de ces résultats.

Toutes les techniques étant théoriquement capables de définir l'échelle du repère terrestre et son origine (excepté le VLBI), une comparaison des coordonnées de chaque technique fournit une information complémentaire. La Figure 3 présente les écarts moyens de coordonnées radiales (composante verticale) observés entre les différentes techniques de mesure. Bien que le résultat soit visuellement satisfaisant, on observe des écarts allant jusqu'à 6 mm et il est raisonnable de penser que le degré moyen d'accord cause une incertitude sur l'échelle de l'ordre de quelques millimètres pour

l'ITRF2008. Les écarts maximaux en terme de dérive sont de 0.3 mm/an, représentant la différence de dérive d'échelle entre les solutions SLR et VLBI. Notons que nous avons exclu les données GNSS de cette comparaison, en raison de leur dépendance aux valeurs conventionnelles de la position des centres de phase des antennes satellites. Concernant l'origine, les solutions DORIS et GNSS fournissent des dérives maximales sur la composante Z de respectivement 5 mm/an et 1 mm/an (Collilieux et al., 2010), avec un écart moyen centimétrique en 2005. Ces différences pourraient s'expliquer par des déficiences de la modélisation des orbites GNSS ou DORIS (pression de radiation solaire). Il n'est donc pas à exclure que ce type d'analyse conduise à une évaluation pessimiste de l'exactitude de l'origine et de l'échelle de l'ITRF.

Bien que la comparaison des données de géodésie spatiale fournisse une première évaluation de l'exactitude de l'origine et de l'échelle de l'ITRF, il est fondamental de rechercher de nouveaux moyens d'évaluation pour affiner ces chiffres et fournir à la communauté océanographique une estimation de l'erreur sur la définition du RRT. Il faut ensuite évaluer comment cette incertitude se traduira dans le budget d'erreur final de la mesure du niveau moyen des mers, ce qui fait l'objet de la partie suivante.

## **2. Relation entre repère de référence et niveau des mers**

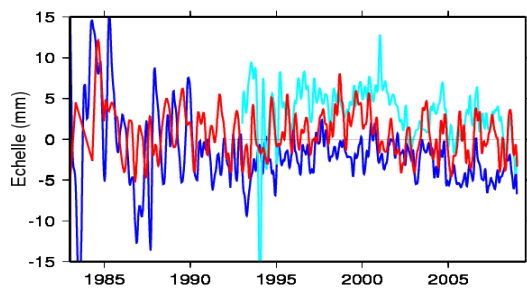
### **2.1. Marégraphie**

Nous avons déjà évoqué l'importance de corriger les données marégraphiques des déplacements crustaux obtenus par GNSS (Santamaría-Gómez et al., cet ouvrage). Historiquement, une correction issue d'un modèle de rebond postglaciaire était appliquée (phénomène lié à l'ajustement de la croûte terrestre suite au retrait des grandes calottes glaciaires lors de la dernière glaciation) car c'est un phénomène à très grande échelle dont l'amplitude peut atteindre plus d'un centimètre par an. La modélisation de ce phénomène reste encore incertaine, principalement car la structure en viscosité du manteau est un paramètre mal connu (Paulson et al., 2007). Il est essentiel de réaliser des prédictions des déplacements liés au rebond postglaciaire dans un repère lié au centre des masses de la Terre entière (spécialement si l'on souhaite faire des comparaisons avec des données altimétriques), ce qui n'est pas toujours le cas actuellement. Les modèles étant liés à la Terre solide (Peltier, 2004), des erreurs pourraient être générées à hauteur de 0.5 mm/an (Argus, 2007). La disponibilité de réseaux GNSS denses dans les zones affectées du rebond permet de fournir une contrainte sur le phénomène et d'évaluer les modèles existants. Cette évaluation est essentielle car toutes les stations marégraphiques ne sont pas équipées d'un instrument GNSS co-localisé ; l'utilisation de ces modèles est donc encore nécessaire pour certains marégraphes. Mais la validation des modèles par GNSS gagnerait à être conduite avec des données de déplacements relatifs pour faire abstraction d'une éventuelle erreur d'origine du RRT.

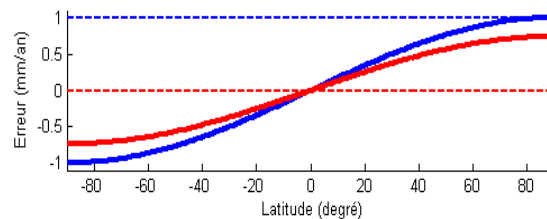
L'avantage d'une correction GNSS est qu'elle permet d'inclure les contributions de tous les autres effets pouvant engendrer un déplacement vertical. Elle est toutefois munie d'une incertitude liée au traitement des mesures et aux limites instrumentales. Les scientifiques du Consortium de l'Université de la Rochelle, dont l'IGN est membre, ont évalué la montée du niveau de la mer sur le 20<sup>ème</sup> siècle par rapport à l'ITRF2005 à  $1.6 \pm 0.1$  mm/an, en se basant sur un réseau de 27 stations marégraphiques co-localisées avec GNSS. Cette valeur est toutefois dépendante du repère de référence. Si les dérives d'échelle et d'origine de l'ITRF2005 (respectivement ITRF2008) étaient erronées de  $Dv_\lambda$  et  $(Dv_x, Dv_y, Dv_z)$  respectivement, la variation de niveau moyen serait réévaluée sur ce réseau de 27 stations par la quantité  $DS$  (Collilieux & Wöppelmann, 2010), telle que :

$$DS = Dv_\lambda + 0.5 \cdot Dv_z - 0.3 \cdot Dv_y + 0.1 \cdot Dv_x$$

où le facteur d'échelle  $Dv_\lambda$  est exprimé en millimètre par an. Il faut noter que toute erreur sur l'échelle est intégralement transmise à l'estimation des variations du niveau des mers obtenue par GNSS et marégraphes. Ce n'est pas le cas d'une erreur de dérive d'origine qui cause des disparités régionales, et donc une variabilité spatiale erronée du signal océanique (voir Figure 4, discutée au paragraphe suivant). En supposant que l'erreur de dérive d'échelle et d'origine (composante Z) soit de même amplitude et non corrélée, il faudrait une exactitude de 0.08 mm/an sur l'origine et l'échelle de l'ITRF pour assurer une exactitude de 0.1 mm/an sur le niveau moyen estimé avec marégraphie et GNSS.



**Fig. 3.** Facteurs d'échelle des techniques DORIS (bleu ciel), VLBI (rouge) et SLR (bleu). Les courbes ont été obtenues avec les données soumises pour l'ITRF2008 et sont lissées pour éliminer les variations à haute fréquence.



**Fig. 4.** Impact d'une dérive d'origine selon Z de 1 mm/an sur le niveau de la mer estimé par altimétrie (courbe rouge) et par marégraphie/GNSS (courbe bleue). Celui d'une erreur d'échelle d'1 mm/an est fourni en pointillés, mêmes couleurs.

La valeur de l'élévation du niveau moyen des océans sur le 20<sup>ème</sup> siècle est 2 fois inférieure à la valeur estimée par altimétrie ces 15 dernières années<sup>24</sup>. Mais on note ici que l'incertitude sur cette valeur pourrait être revue à la hausse si l'on disposait d'une évaluation convenable de l'inexactitude d'origine et d'échelle de l'ITRF.

## 2.2. Altimétrie

La mesure altimétrique fournit la hauteur du niveau de la mer dans un repère géocentrique, lié à l'orbite du satellite altimétrique. Cette hauteur est calculée en soustrayant de la position du satellite altimétrique la mesure de distance satellite - hauteur de l'eau. La précision de la restitution d'orbite sera discutée ici alors que la précision sur la mesure de distance sera évoquée dans la section 2.3.

Les satellites altimétriques sont des satellites bas (1336 km d'altitude pour TOPEX/Poseidon et Jason-1 et 2). Bien que leur période orbitale soit courte, le survol d'un même point de l'océan est effectué tous les 10 jours environ. Les trois derniers satellites altimétriques TOPEX/Poseidon, ainsi que Jason-1 et 2 sont munis de trois systèmes d'orbitographie complémentaires : un récepteur GNSS, un rétro réflecteur laser et un récepteur DORIS. La disponibilité de ces trois techniques est fondamentale pour étudier leurs biais éventuels et évaluer la précision des orbites (*Lemoine et al., 2010*), mais aussi pour pallier une panne éventuelle d'un des équipements. Aujourd'hui la précision radiale des orbites est évaluée de 2 cm (TOPEX/Poseidon) à 1 cm (Jason-1 et 2) sur les bases de résultats obtenus par des groupes indépendants, par l'analyse des résidus de mesure, et l'accord entre arcs d'orbite consécutifs (*Lemoine et al., 2010*). Il existe plusieurs procédures permettant de calculer une orbite de satellite bas. De façon générale (excepté le cas où l'on réalise un positionnement cinématique GNSS du satellite), il est nécessaire de modéliser l'ensemble des forces agissant sur le satellite pour réaliser une intégration numérique de sa trajectoire sur la base du principe fondamental de la dynamique (on parle de mode dynamique). La trajectoire intégrée est ensuite réévaluée sur la base d'un certain nombre de paramètres empiriques ou dynamiques en utilisant les observables de la géodésie spatiale pour mieux contraindre ces paramètres.

Les stations de poursuite des satellites nécessitent d'avoir des coordonnées connues dans un RRT géocentrique. Les interactions entre erreur du RRT et niveau des mers ont été spécifiquement étudiées pour les orbites calculées en mode dynamique. Il a été montré qu'une erreur d'échelle sur les coordonnées des stations de poursuite n'a pas d'impact sur l'orbite des satellites bas et donc sur le niveau de la mer estimé. En effet, les mesures de géodésie spatiale permettent de mettre à l'échelle l'orbite du satellite (par exemple, le temps de révolution est lié à l'altitude du satellite), suite à l'adoption de la constante géopotentielle GM du champ (*Morel & Willis, 2005*). Par contre, une erreur d'origine va affecter l'orbite du satellite et spécialement une erreur selon la composante Z, les composantes équatoriales étant peu affectées en raison de la rotation diurne de la Terre. Il est possible de traduire cette erreur en terme de niveau moyen des océans. Une dérive d'origine de 1 mm/an du RRT selon la

<sup>24</sup> La zone géographique sur laquelle le signal est moyenné est différente. Toutefois, la variabilité spatiale du signal océanique diminue lorsque la durée d'intégration augmente.



composante  $Z$  va se traduire par une erreur de  $-0.12$  mm/an sur le niveau de la mer (*Morel & Willis, 2005*). Ainsi, lorsque la montée du niveau de la mer a été réévaluée par altimétrie sur la base de l'ITRF2005 au lieu de l'ITRF2000, une différence de  $-0.26$  mm/an a été observée sur le niveau moyen des mers (*Beckley et al., 2007*). La valeur obtenue sur la base de l'ITRF2008 devrait être inchangée.

La montée du niveau des mers estimée par altimétrie ne répond pas de manière homogène à une erreur d'origine du RRT selon  $Z$ . Des variations régionales importantes sont attendues. La Figure 4 présente en rouge la fonction de transfert de l'erreur sur l'origine et l'échelle du RRT. Elle illustre par exemple comment une erreur de  $1$  mm/an sur l'origine du RRT selon la composante  $Z$  va affecter la montée du niveau de la mer en fonction de la latitude du point considéré : l'erreur est maximale à haute latitude et peut atteindre  $0.74$  mm/an selon les résultats de simulations (*Morel & Willis, 2005*). Il est intéressant de noter que cette erreur est atténuée comparativement aux valeurs obtenues par marégraphie et GNSS (courbe bleue). Alors que l'erreur d'échelle avait un effet maximal avec les données marégraphiques, elle peut être négligée avec les données altimétriques (voir les courbes en pointillés).

De manière générale, toute erreur sur l'orbite va affecter le niveau de la mer estimé. Ainsi, un autre référentiel fondamental est le champ de pesanteur dont l'incertitude peut provoquer des erreurs sur l'orbite, et donc sur le niveau de la mer, qui sont corrélées géographiquement (*Lemoine et al., 2010*). Des erreurs sur les variations temporelles du champ de pesanteur entraînent également des erreurs sur les variations temporelles du niveau des mers estimé. Les résultats de la mission GRACE ont permis de diminuer cette erreur.

### 2.3. Étalonnage des altimètres

Nous avons considéré jusqu'à maintenant que le système permettant d'évaluer la hauteur de l'eau par satellite n'était affecté d'aucune erreur. Un altimètre est constitué de deux composantes : un radar, dont la mesure fournit une distance, et un radiomètre qui va permettre d'effectuer une correction sur cette distance, qui est liée au contenu en eau de l'atmosphère, en particulier la troposphère.

La mesure de distance, corrigée de la traversée troposphérique, est régulièrement vérifiée sur des sites d'étalonnage situés sur ou proches des côtes comme Harvest, en Californie (*Haines et al., 2003*), Senetosa/Ajaccio, en Corse (*Bonnefond et al., 2003*) et Bass Strait, en Australie (*Watson et al., 2003*). L'étalonnage peut aussi s'effectuer sur des grands lacs (*Crétaux et al., 2009*). Le principe de l'étalonnage consiste à comparer sur un site donné la hauteur de l'eau obtenue par altimétrie à celle dérivée d'un marégraphe (il est également possible d'utiliser des bouées GNSS (*Watson et al., 2003*)). La donnée marégraphique doit dans ce cas être rattachée (dénivelée connue) à une station GNSS pour obtenir une hauteur géocentrique. La différence des valeurs obtenues fournit donc une valeur de biais dite absolue. Le site d'étude doit se trouver au plus proche de la trace des satellites et le géoïde local doit être connu très précisément pour propager la mesure du niveau de la mer obtenue au large à celle du marégraphe situé sur la côte. La précision de la mesure marégraphique est d'environ  $1$  cm, et celle de l'altimètre d'environ  $2$  cm, à raison d'une mesure tous les 10 jours. Un site seul ne permet donc pas, sur une durée raisonnable, d'étalonner une faible dérive de l'altimètre.

Toute erreur d'origine et d'échelle du RRT à la date de l'étalonnage affecte directement le positionnement GNSS et donc la mesure d'étalonnage. Nous avons surtout évoqué précédemment les erreurs potentielles sur les dérivées des paramètres du RRT, et donc sur les vitesses des stations. Ici, la valeur absolue est aussi fondamentale. Au 1<sup>er</sup> janvier 2000, il existe par exemple une différence de positionnement vertical de  $5.6$  mm entre l'ITRF2008 et l'ITRF2005, et de  $8.6$  mm entre l'ITRF2008 et l'ITRF2000. Les différences d'origine peuvent aussi atteindre un ordre de grandeur de quelques millimètres, mais les valeurs dépendent du site d'étalonnage. Il est donc intéressant de disposer d'un ensemble de sites d'étalonnage bien distribué. Une erreur éventuelle sur le RRT intervient doublement lors de l'étalonnage, car elle touche à la fois l'orbite restituée et le positionnement GNSS de la station d'étalonnage que nous venons d'évoquer. Les étalonnages sont donc différents si l'on considère l'un ou l'autre des repères de référence. Gardons toutefois à l'esprit que l'incertitude sur le biais estimé est d'au mieux  $2$  mm pour un étalonnage effectué avec 10 ans de données sur TOPEX/Poseidon par exemple (*Bonnefond et al., 2003*). Une autre source d'erreur importante affectant la mesure altimétrique provient des radiomètres (*Ablain et al., 2009 ; Brown et al., 2010*) qui peuvent être étalonnés à l'aide de données sol, de modèles ou lors des phases en tandem de deux altimètres (*Bonnefond et al., 2010*).

L'étalonnage des dérives éventuelles des altimètres est plus délicat à réaliser car il est nécessaire de se baser sur un réseau plus dense de stations au sol (*Chambers et al., 1998*). Il nécessite de connaître les variations de niveau géocentrique des océans obtenues par marégraphie sur un ensemble de sites pour les comparer aux valeurs altimétriques. Les études réalisées n'incluent généralement pas de mesures GNSS pour corriger du mouvement crustal, mais utilisent un modèle de rebond post-glaciaire. Elles n'ont en outre pas mis en évidence de dérives significatives des instruments, mais l'incertitude estimée s'élève à environ 0.4 mm/an en raison de la méconnaissance du déplacement vertical des marégraphes étalons (*Beckley et al., 2007 ; Mitchum, 2000*). Il est donc crucial de disposer de mesures GNSS ou DORIS continues sur ces sites et d'un repère de référence exact. Il est clair qu'une précision de 0.1 mm/an sur l'estimation de la dérive de l'altimètre nécessite une exactitude de 0.1 mm/an de l'échelle du RRT si l'on effectue des corrections de vitesses GNSS. Notons par ailleurs que lorsqu'une nouvelle mission altimétrique est opérationnelle, il est nécessaire d'effectuer un nouvel étalonnage. Les dates des étalonnages de chaque mission étant différentes, le RRT doit avoir une évolution temporelle de l'origine et de l'échelle stable car, sinon, les erreurs d'origine et d'échelle vont s'accroître avec le temps et les étalonnages ne seront plus aussi exacts. Le RRT réalise donc la connexion entre les différentes missions altimétriques par l'intermédiaire du calcul des orbites (il faut utiliser le même RRT), mais aussi par l'étalonnage des altimètres.

### III Conclusion

L'adoption d'un RRT précis et exact est fondamentale pour pouvoir fournir une mesure précise de l'élévation du niveau des océans. L'ITRF est le repère de référence privilégié pour toutes les applications en géosciences. Nous fournissons ici tous les moyens d'évaluer l'impact de son éventuelle inexactitude sur l'estimation du niveau moyen de la mer par altimétrie et par marégraphie et GNSS. Les attentes de la communauté scientifique en terme d'exactitude sont grandes, environ 0.1 mm/an (*Plag & Pearlman 2009*), et nous avons pu illustrer ici pourquoi une telle précision était nécessaire. Il reste toutefois à fournir une évaluation plus précise des erreurs de repère éventuelles car les moyens d'évaluation proposés en section 1 fournissent des valeurs encore grandes (~ 1 mm/an pour l'origine et 0.3 mm/an pour l'échelle), qui pourraient être aussi bien exactes que surestimées. Un travail méthodologique continu est également nécessaire pour améliorer l'exactitude du positionnement des quatre techniques de géodésie spatiale, pour fournir un plus grand nombre de rattachements géodésiques et pour améliorer les méthodologies de combinaison.

*Pour en savoir plus ...*

**Altamimi Z., X. Collilieux, L. Métivier (2011)** ITRF2008 : nouvelle réalisation du système international de référence terrestre. *Cet ouvrage.*

**AVISO (2011)** Site Internet de AVISO : <http://www.aviso.oceanobs.com>.

**Cazenave, A., E. Berthier (2010)** La montée des océans. Jusqu'où ? *Pour la Science*, n. 388 , p. 20-27.

**Santamaría-Gómez, A., M.-N. Bouin, G. Wöppelmann (2011)** Correction des tendances marégraphiques long terme avec du GPS. *Cet ouvrage.*

### *Bibliographie détaillée*

**Ablain, M. et al. (2009)** A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993-2008. *Ocean Sci.*

**Altamimi, Z. et al. (2007)** ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *J. Geophys. Res.*

**Argus, D.F. (2007)** Defining the translational velocity of the reference frame of Earth. *J. Geophys. Int.*

**Beckley, B.D. et al. (2007)** A reassessment of global and regional mean sea level trends from TOPEX and Jason-1 altimetry based on revised reference frame and orbits. *Geophys. Res. Lett.*

**Bonnefond, P. et al. (2003)** Absolute Calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon Altimeters in Corsica. Special Issue on Jason-1 Calibration/Validation, Part 1, *Mar. Geod.*

**Bonnefond, P. et al. (2010)** Absolute Calibration of Jason 1 and Jason 2 Altimeters in Corsica during the Formation Flight Phase. *Mar. Geod.*

**Brown, S. et al. (2009)** Microwave radiometer calibration on decadal time scales using On-Earth brightness temperature references: Application to the Topex Microwave Radiometer. *J. of Atm. and Ocean. Tech.*

**Crétaux et al. (2009)** An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain : Lake Issykkul in Central Asia. *J. of Geod.*

**Cazenave, A. et al. (2008)** Present-day sea level rise: A synthesis. *CR Geoscience.*

**Chambers, D. et al. (1998)** On the use of tide gauges to determine altimeter drift. *J. Geophys. Res.*

**Collilieux, X. et al. (2010)** Quality assessment of GPS reprocessed Terrestrial Reference Frame. *GPS Solutions.*

**Collilieux, X., G. Wöppelmann (2010)** Global sea-level rise and its relation to the terrestrial reference frame. *J. of Geod.*

**Haines, B. J. et al. (2003)** The Harvest Experiment: Monitoring Jason-1 and TOPEX/POSEIDON from a California Offshore Platform. *Mar. Geod.*

**Lemoine, F. G. et al. (2010)** Toward development of a consistent orbit series for TOPEX/Poseidon, Jason-1, and Jason-2. *Adv. Space Res.*

**Leuliette, E. W., L. Miller (2009)** Closing the sea level rise budget with altimetry, Argo, and GRACE. *Geophys. Res. Lett.*

**Mitchum, G. T. (2000)** An Improved Calibration of Satellite Altimetric Heights Using Tide Gauge Sea Levels with Adjustment for Land Motion. *Mar. Geod.*

**Morel, L., P. Willis (2005)** Terrestrial reference frame effects on global sea level rise determination from TOPEX/Poseidon altimetric data. *Adv. Space Res.*

**Paulson, A. et al. (2007)** Limitations on the inversion for mantle viscosity from postglacial rebound. *J. Geophys. Int.*

**Peltier, W. R. (2004)** Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) Model and GRACE. *Ann. Rev. Earth Planetary Sci.*

**Plag, H. P., M. Pearlman (Eds) (2009)** Global Geodetic Observing System Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, Springer.

**Ries, J. C. (2009)** The Terrestrial Reference Frame and its Impact on Sea Level Change Studies. NASA Sea Level Workshop

**Watson, C. et al. (2003)** Absolute Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 Using GPS buoys in Bass Strait, Australia. *Mar. Geod.*