IV. Conclusions, problèmes et perspectives

IV.1. Le niveau de la mer: une grandeur d'intérêt climatologique

Au cours de cette première partie, nous avons vu que le niveau de la mer exhibe un spectre de variation spatio-temporel très large. Aux courtes échelles de temps, diurne, saisonnière et interannuelle, les marées, les effets de la pression atmosphérique et les effets du vent gouvernent les fluctuations du niveau de la mer. En revanche, à plus long terme, la fonte et la formation de glaces continentales, la dilatation thermique de l'eau et les déformations de l'écorce terrestre sont responsables des variations eustatiques. On remarque en outre que plus les variations sont lentes, plus elles sont difficiles à déceler. En général, leur amplitude est d'autant plus faible, mais elles présentent une signature spatiale plus étendue.

Les variations séculaires du niveau des mers apparaissent comme un indicateur des changements climatiques à l'échelle mondiale. Elles ont accompagné la formation et la fonte des grandes extensions de glace de la dernière glaciation, mais aussi les glaciations moins connues des ères géologiques antérieures. La relation entre température et concentration en gaz à effet de serre est mise en évidence par les analyses isotopiques et chimiques effectuées sur les carottes de glace. De fait, la concentration atmosphérique en gaz carbonique s'avère plus importante pendant les épisodes interglaciaires. Or, depuis le milieu du dix-huitième siècle, on constate qu'elle s'est notablement élevée. Estimée à 260-270 ppm (parties par million) au début du XVIII^{e} siècle, la concentration en gaz carbonique était mesurée à 315 ppm à l'observatoire de Mauna Loa, à Hawaii, en 1958, puis à 355 ppm en 1990. Il est légitime de penser que cette perturbation, sans précédent connu dans l'histoire de la Terre, aura un effet sur le système climatique. La question est encore de savoir quelle sera la réponse de celui-ci. Selon nos connaissances actuelles des processus climatiques, un réchauffement global semble assez vraisemblable. Dans ce cas, nous devrions observer une élévation du niveau des mers en accord.

IV.2. Difficultés d'estimation et d'interprétation

Les nombreuses analyses des données marégraphiques montrent en effet une hausse du niveau marin qui, selon les études effectuées ces dix dernières années, se situe entre 0.8 et 2.4 mm/an, pour des observations remontant parfois à la fin du XVIII^{e} siècle. Toutefois, aucune accélération statistiquement significative n'a encore était décelée qui confirmerait une relation avec l'effet de serre d'origine anthropique. La confirmation est cependant limitée par des données qui, de fait, sont contemporaines de la révolution industrielle. Rappelons que les premiers marégraphes datent du début du XIX^{e} siècle, et que les mesures plus anciennes, lues à l'échelle de marée, sont rares et difficiles à exploiter pour les études à long terme du niveau de la mer. Par ailleurs, Pirazzoli nous explique qu'il existe une lacune chronologique pour le dernier millénaire, où nous manquons d'une « passerelle » fiable d'un point de vue méthodologique, qui nous permette de comparer les données géologiques aux données instrumentales avec une résolution analogue.

La relation entre changements climatiques et variations eustatiques n'est ni simple, ni directe. Les composantes climatiques sont multiples et complexes, autant que leurs interactions. En l'état actuel des connaissances, il est encore difficile de quantifier correctement l'importance relative des différents facteurs climatiques, et a fortiori de déceler la part de responsabilité due à l'Homme. Les caractéristiques temporelles de certaines composantes du climat peuvent expliquer le manque d'évidence d'accélération de la tendance du niveau des mers sur ce siècle par un retard dans leur réponse.

Mais, l'analyse des enregistrements marégraphiques soulève déjà quelques difficultés propres pour estimer la tendance séculaire. D'une part, les données marégraphiques présentent une couverture temporelle et spatiale peu homogène. Des séries temporelles de plus de quarante années sont en général nécessaires pour filtrer les signaux océaniques décennaux et interdécennaux, et établir des tendances du niveau de la mer précises à mieux que 0.5 mm/an. Or, la plupart des observatoires satisfaisant cette contrainte se trouvent dans les côtes de l'hémisphère nord, plus spécifiquement dans celles des pays d'Amérique du Nord, d'Europe et du Japon. Ce problème est bien illustré par Emery & Aubrey [1991] qui, dans leur analyse de 578 marégraphes d'au moins dix années de mesures chacun, trouvent que 68% sont localisés entre 30 et 60 degrés de latitude nord pour une surface océanique équivalente de seulement 12%.

D'autre part, les tendances indiquées par les marégraphes varient beaucoup d'un observatoire à l'autre. La variabilité apparaît non seulement à l'échelle mondiale, mais aussi aux échelles régionale et locale. Il est donc difficile de dégager une tendance générale du niveau de la mer à partir de ces données. Les résultats obtenus sur divers ensembles de marégraphes varient d'ailleurs autant d'une étude à l'autre que la valeur moyenne qu'elles fournissent. L'explication de cette incertitude se trouve dans la nature même de la mesure du marégraphe: locale et liée à la terre sur laquelle repose l'instrument. Aussi, les mouvements verticaux du support du marégraphe ressortent dans les enregistrements tout autant que les fluctuations océaniques. Bien qu'ils soient souvent négligeables à court terme, les soulèvements ou les affaissements de l'écorce terrestre d'origine volcanique, tectonique, isostatique, ou anthropique, apparaissent comme des facteurs régionaux et locaux, dont la signature à long terme dans l'enregistrement marégraphique est au moins aussi importante que celle des facteurs de changement de volume d'eau dans l'océan.

Ces difficultés ont conduit des scientifiques à ne retenir qu'un nombre critique de marégraphes pour estimer la variation séculaire du niveau des mers sur ce dernier siècle. Certains ont résolu le problème des mouvements épirogéniques en étudiant les indices géologiques disponibles à proximité des marégraphes, et en écartant alors les observatoires qui n'étaient pas sur une côte définie comme « stable ». De fait, ils ont renoncé à des sites géographiques qui attestent de mouvements épirogéniques passés. Les mouvements verticaux contemporains sont parfois repérés lorsque l'évolution à long terme de l'enregistrement est suspecte, notamment lorsque la tendance s'écarte notablement de la valeur préjugée, située entre 1 et 2.5 mm/an. Les dérives instrumentales sont de manière générale traitées de la même manière.

D'autres chercheurs ont corrigé les tendances des marégraphes à l'aide des vitesses verticales obtenues des modèles géophysiques et géologiques actuellement disponibles. A cet égard, seul l'effet de rebond postglaciaire est effectivement pris en compte. Les résultats fournis par ces modèles sont relativement fiables, mais quelques études récentes montrent que les valeurs des vitesses estimées sont encore trop sensibles à quelques paramètres du modèle de terre, à savoir, l'épaisseur de la lithosphère et la viscosité du manteau. Un historique de déglaciation fidèle à la réalité est par ailleurs de prime importance.

IV.3. La géodésie spatiale

Les techniques spatiales de positionnement et l'évolution de leurs performances offrent aujourd'hui la perspective d'une approche différente: celle de la surveillance dans le temps des repères de marée en permettant la détermination de leur position et de leur vitesse dans un système de référence absolu. La nouvelle approche corrigerait de manière rigoureuse le signal marégraphique de sa composante terrestre. Aussi, de nombreuses données écartées par les études récentes deviendraient exploitables, notamment les longues séries temporelles

scandinaves affectées par l'effet du rebond postglaciaire. Parmi les principales techniques modernes de géodésie spatiale, nous trouvons:

• l'interférométrie à très longue base (VLBI), qui repose sur l'observation simultanée de radiosources extragalactiques par au moins deux radiotélescopes;

• la télémétrie laser terre - satellite (SLR), qui mesure le temps de propagation aller - retour d'un tir laser sur les réflecteurs d'un satellite. Cette technique est désignée par LLR dans le cas particulier où l'objet visé est la Lune.

• le GPS (Global Positioning System), qui est un système américain de positionnement radioélectrique descendant, dont le segment spatial opérationnel est constitué d'une constellation de vingt-quatre satellites;

• et le système français DORIS (Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégrés par Satellite): système Doppler ascendant qui s'appuie sur un réseau de stations de poursuite terrestre de couverture mondiale homogène.

La liste ci-dessus se limite aux techniques de base qui contribuent aux activités du service international de la rotation terrestre, l'IERS, en raison de leurs performances reconnues en termes d'exactitude et de mise en oeuvre. D'autres techniques sont par ailleurs susceptibles d'y participer dans un avenir proche. C'est le cas par exemple du système allemand d'orbitographie précise, PRARE, ou encore, celui du système russe de navigation, GLONASS.

Par leurs déterminations ponctuelles de positions et de vitesses, les techniques de géodésie spatiale contribuent à la réalisation d'un système mondial de référence terrestre précis et géocentrique. En exprimant les repères des marégraphes dans cette référence par rattachements géodésiques répétés, nous espérons déceler les mouvements verticaux de l'écorce terrestre contenus dans la partie basse fréquence du signal marégraphique, d'une part, et comparer les résultats entre les différents marégraphes, ou encore entre la marégraphie côtière et l'altimétrie radar sur satellite, d'autre part, puisque les données seront dans le même système de référence.

IV.4. Définition des besoins

IV.4.1. Variations eustatiques prévues à moyen terme

Le groupe d'experts intergouvernemental de l'IPCC, établi en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), a déjà publié deux rapports, en 1990 et en 1995, décrivant les connaissances actuelles dans le domaine de l'évolution du climat. Les progrès réalisés dans ce domaine se sont avérés si considérables et significatifs en cinq ans qu'une nouvelle synthèse s'avérait nécessaire.

Le chapitre 7 du rapport de 1995 revoit en particulier les prévisions de changement du niveau des mers à la lueur des améliorations récentes apportées aux modèles climatiques. Ces améliorations résultent surtout d'une meilleure compréhension du rôle de l'océan et du couplage entre ce dernier et l'atmosphère. Les prévisions varient suivant les modèles considérés et suivant les scénarios d'émission en gaz à effet de serre pris en compte. Le tableau de la figure 66 donne des valeurs extrêmes et moyennes que nous avons extraites des graphiques présentés dans le dernier rapport de l'IPCC. On observe sur les courbes que les tendances s'accélèrent à partir de 2015-2020, auparavant l'élévation est linéaire.

Figure 66 : Prévisions de l'élévation du niveau des mers, estimées par les modèles climatiques suivant divers scénarios d'émission en gaz à effet de serre, d'après l'IPCC [1995]. Les vitesses correspondent à la variation par rapport à 1990.

Année	Prévision basse		Prévision moyenne		Prévision haute	
2020	2.9 cm	1 mm/an	8.6 cm	2.9 mm/an	18.6 cm	6.2 mm/an
2040	5.7 cm	1.1 mm/an	18.6 cm	3.7 mm/an	38.6 cm	7.7 mm/an
2100	13 cm	1.2 mm/an	55 cm	5 mm/an	110 cm	10 mm/an

L'objet d'étude de notre troisième partie sera en outre d'établir dans quelle mesure la synergie des techniques de marégraphie et de géodésie est capable de détecter l'élévation prévue du niveau des mers avec un niveau de précision et d'exactitude satisfaisants.

IV.4.2. Géodésie spatiale

Le besoin de surveiller la référence locale des marégraphes par géodésie spatiale a été exprimé à plusieurs reprises par les différents groupes de travail internationaux. C'est le cas notamment du groupe d'experts GLOSS de la Commission Océanographique Inter-gouvernementale de l'UNESCO [IOC, 1990], ou encore, de celui de la Commission du niveau moyen de la mer et des marées de l'AISPO [Carter et al, 1989 et 1994].

Selon le groupe de scientifiques de l'AISPO, réunis en décembre 1993 à Surrey, au Royaume Uni, la surveillance géodésique doit se développer autour du système de référence mondial de l'IERS, l'ITRS, adopté et recommandé par l'Union Géodésique et Géophysique Internationale depuis 1991. En outre, le mouvement du repère principal du marégraphe doit être déterminé dans ce système avec une exactitude d'au moins 1-2 mm/an sur des intervalles de cinq ans, et de 0.3-0.5 mm/an sur plusieurs décennies [Carter et al, 1994]. Ces valeurs furent estimées par analogie à la précision des résultats que fournissent en général l'analyse des séries temporelles des marégraphes de plus de cinquante années de données, et sous l'hypothèse de linéarité des mouvements verticaux de l'écorce terrestre sur les périodes de temps considérées. Deux questions méritent alors une attention particulière:

- dans quelles conditions les techniques de géodésie spatiale peuvent atteindre les précisions requises par Carter et al [1994] pour les études à long terme du niveau de la mer ?
- ces précisions sont-elles vraiment suffisantes au regard des prévisions récentes de l'IPCC [1995] ?

IV.4.3. Réseau mondial de marégraphes

Plus de la moitié de l'élévation du niveau des mers prévue d'ici la fin du prochain siècle serait due au seul effet de la dilatation thermique [IPCC, 1995]. Cet effet n'étant pas homogène sur l'ensemble des océans, il est légitime de craindre un biais dans l'estimation de la tendance globale si la couverture géographique des marégraphes considérés n'est pas améliorée. La répartition actuelle des enregistrements intéressants, de plus de quarante ans de données, montre en effet que certains bassins, notamment dans l'hémisphère Sud, ne sont pas représentés, ou peu (figure 19). Le réseau de marégraphes n'aurait toutefois pas besoin d'être très dense si par ailleurs les signaux parasites d'origine océanique ou épirogénique pouvaient être bien modélisés et filtrés. Aussi, sans un réseau mondial convenable, le problème semble encore une affaire incertaine.

Si la détermination des variations eustatiques paraît réalisable à partir des données de marégraphie côtière, la question de la qualité des appareils se pose. Conçus pour la prédiction des marées et la navigation maritime à proximité des estuaires et des zones

portuaires, les marégraphes traditionnels à flotteur ne sont en général pas adaptés à la surveillance des signaux de longue période. Or, les besoins nouveaux exprimés par la communauté scientifique exigent des instruments de grande qualité métrologique, notamment:

• la précision des mesures élémentaires doit tendre vers le centimètre;

• la référence interne du marégraphe doit être connue à quelques millimètres par rapport au repère de marée et aux repères auxiliaires en effectuant des étalonnages bisannuels;

• l'enregistrement doit être numérique, avec possibilité d'échantillonnage à haute fréquence et de transmission automatique des données. Des valeurs du niveau de la mer toutes les heures, voire tous les quart d'heure, sont désormais requises pour éviter les erreurs de sous-échantillonnage.

• la datation des données doit s'effectuer à mieux que la minute;

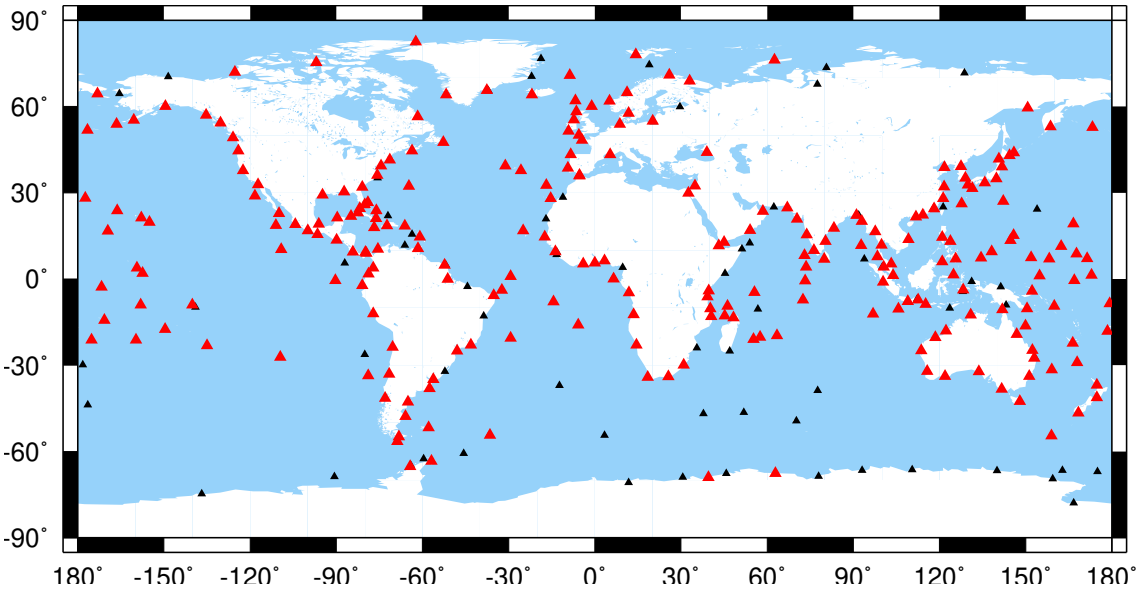
• l'observatoire doit être équipé d'instruments auxiliaires qui observent les paramètres environnementaux d'intérêt pour l'analyse des niveaux marins, à savoir, la pression atmosphérique, la température, le vent, etc.

De nombreux organismes nationaux, soucieux de satisfaire les utilisations pratiques comme scientifiques, ont appliqué le proverbe « qui peut le plus peut le moins » en remplaçant leur parc de marégraphes traditionnels par des appareils modernes à capteur de pression ou à ultrasons. D'autant que, d'une part, la détérioration de la qualité des données marégraphiques était constatée par ailleurs, et d'autre part, que le coût d'une station moderne est a priori réduit par l'économie du puits de tranquilisation indispensable au marégraphe à flotteur, et par la possibilité de contrôler à distance les performances du nouveau marégraphe, permettant des interventions rapides et ponctuelles.

La Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO assure depuis 1985 la coordination des efforts nationaux en vue de mettre en place un réseau mondial permanent d'observatoires du niveau de la mer. Ce réseau constitue de fait le système mondial d'observation du niveau de la mer connu sous le nom de GLOSS. Il est composé de quelques trois cent marégraphes, formant l'ossature autour de laquelle se rattachent les projets plus denses régionaux (IOCARIBE, Euro-GLOSS...) et nationaux (FLOSS...). La COI veille en outre à la pertinence des observations vis à vis des phénomènes globaux étudiés et des technologies disponibles, mais aussi à la qualité des stations, à la continuité des mesures, à leur couverture géographique, à l'amélioration des systèmes d'échange des données, et à la disponibilité des produits au PSMSL [IOC, 1990].

Le système GLOSS est un des éléments clés existant du système permanent d'observation systématique des océans appelé GOOS (Global Ocean Observing System). Ce système plus vaste et plus complet est apparu en 1992. Il est coordonné par la COI, l'OMM, le PNUE, et le CIUS. Les données de GLOSS supportent d'ailleurs les programmes TOGA, WOCE et CLIVAR du PMRC, établi en outre par l'OMM, le CIUS et la COI. Le programme TOGA cherche à établir les outils d'observation et de modélisation numérique nécessaires à une prévision des phénomènes couplés atmosphère - océan. Quant au programme WOCE, il a pour objectifs principaux la description globale de la circulation océanique et la collecte de données pertinentes pour les tester. Enfin, le programme CLIVAR s'intéresse aux processus physiques et dynamiques du système climatique qui agissent aux échelles de temps saisonnière, interannuelle, décennale et séculaire. La carte de la figure 67 montre la couverture du réseau GLOSS, tel qu'il est défini depuis les légères modifications apportées à ce dernier en 1993, en accord avec les réponses des organismes concernés au questionnaire qui leur fut envoyé. Le nombre des marégraphes prévus est désormais de trois cent huit [Tolkatchev, 1996], dont 251 fournissaient des données moyennes au PSMSL en juillet 1996.

Figure 67 : Réseau mondial des marégraphes GLOSS (308). Les symboles en rouge (de grande taille) représentent les marégraphes opérationnels en juillet 1996. « Opérationnels » dans le sens où ils apparaissent dans le catalogue du PSMSL, qui inventorie les données reçues.



L'étude des variations climatiques de l'océan repose donc sur des systèmes d'observation à long terme et à l'échelle mondiale. La coopération internationale s'avère essentielle pour coordonner les moyens nécessaires à la mise en place efficace de ce type de système. Mais, les moyens proviennent à la base des contributions nationales. Or, le maintien à long terme d'une activité régulière de service scientifique et technique telle que celle du PSMSL, de l'IERS, de l'IGS, ou encore du projet national SONEL, est souvent difficile pour les laboratoires de recherche. Ces derniers sont en effet tenus de faire évoluer sans cesse leurs travaux, au détriment d'activités ingrates de longue haleine, d'observation, de collecte, de contrôle, d'archivage et de diffusion de données, qui ne pourront être interprétées à court terme.

IV.5. Autres contributions techniques à la problématique

Les satellites équipés d'un altimètre radar, tels que GEOS 3, SEASAT, GEOSAT, ERS1, et le projet franco-américain TOPEX/POSEIDON, représentent désormais une nouvelle source de données susceptibles de contribuer au problème qui nous intéresse. Le niveau de la mer fourni par cette technique provient de la mesure du temps de propagation d'un signal radar qui émet vers le nadir et qui se réfléchit à la surface de la mer sur une superficie d'environ cinq à dix kilomètres de diamètre. Cette mesure est convertie en distance, en tenant compte des conditions de propagation de l'onde à travers les différentes couches de l'atmosphère. La connaissance de l'orbite du satellite permet alors de déduire la surface topographique marine dans un système de référence géométrique mondial. Cette technique spatiale est devenue un outil précieux pour les océanographes et les climatologues. L'analyse de ses données montre par exemple la dilatation saisonnière de la surface océanique, qui se révèle asymétrique entre hémisphères. La variation d'amplitude est en effet plus faible dans l'hémisphère Sud, de l'ordre de cinq centimètres, que dans l'hémisphère Nord, de l'ordre de quinze centimètres. Nous verrons plus en détail dans le chapitre X les caractéristiques de l'altimétrie satellitaire et l'apport de cette technique pour la surveillance à long terme de l'océan.

L'altimétrie radar par satellite permet aussi la surveillance des calottes de glace polaires. Or, nous avons vu l'importance de connaître le bilan des masses des glaces continentales pour mieux comprendre et quantifier les causes des variations eustatiques passées, présentes et futures. Il convient en effet de noter que:

$$\rho_{glace} \times \Delta V_{glace} = \rho_{eau} \times \Delta V_{oc\,an} \Leftrightarrow \rho_{glace} \times \Delta V_{glace} = \rho_{eau} \times S_{oc\,an} \times \Delta h_{em}$$

Soit: $$\Delta h_{em} = \frac{\rho_{glace} \times \Delta V_{glace}}{\rho_{eau} \times S_{oc\,an}} \qquad \textbf{(E.IV.1)}$$

avec:

ρ_{eau} :	densité de l'eau marine
ρ_{glace} :	densité de la glace
ΔV_{glace} :	variation du volume de glace continentale
ΔV_{eau} :	variation du volume d'eau marine due à l'apport de masse
$S_{océan}$:	surface de l'océan
Δh_{em} :	variation eustatique due à l'apport de masse d'eau

Ainsi, la contribution de la fonte des glaces continentales aux variations eustatiques est déterminée de manière indépendante, permettant une distinction des facteurs eustatiques. D'autres techniques d'observation sont susceptibles de déterminer le bilan des masses des glaces continentales. Schutz [1995] rapporte notamment le projet GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) de la NASA, prévu pour 2001/2002. L'objet de GLAS est de relever les petits changements d'élévation de la surface des calottes de glace, permettant de ce fait d'estimer les variations de volume de glace, autrement dit, la grandeur ΔV_{glace} de la relation ci-dessus (E.IV.1).

Par ailleurs, la mesure absolue de {g}, accélération due à la pesanteur de la Terre, constitue un autre moyen de détecter les mouvements verticaux de l'écorce terrestre qui contaminent les données marégraphiques. A proximité de la surface terrestre, le gradient vertical de pesanteur est d'environ 0.3×10^{-8} ms^{-2} par mm. Une élévation de l'écorce terrestre, sans apport de masse près du point d'observation, se traduira par une diminution de la pesanteur de 3×10^{-8} ms^{-2} pour chaque centimètre d'élévation. En revanche, si la déformation s'accompagne d'un afflux de matière, la variation de pesanteur enregistrée sera plus faible, elle dépendra en particulier de la densité du nouveau matériel. Considérons le cas où le marégraphe enregistre une élévation du niveau de la mer de 1 cm. Un accroissement de 3×10^{-8} ms^{-2}, mesurés à proximité, sur la même période, indiquera une subsidence locale du support de la station. Si au contraire le niveau global de la mer s'est effectivement élevé de cette quantité, alors la variation de pesanteur associée à l'attraction gravitationnelle du supplément d'eau n'excédera pas 0.4×10^{-8} ms^{-2}. La variation de {g} due à la charge de l'apport d'eau sur la croûte terrestre sera encore moins importante. La nature physique de l'information apportée par la gravimétrie absolue, combinée avec les données de marégraphie, s'avère donc intéressante pour distinguer les contributions eustatiques et épirogéniques enregistrées par les marégraphes.

D'autres études peuvent également apporter des informations sur l'évolution séculaire du niveau des mers de manière indirecte. Par exemple, il est vraisemblable que le transfert de masses d'eau des glaciers vers l'océan entraîne un changement du moment d'inertie terrestre autour de l'axe de rotation, et par conséquent un changement de la longueur du jour. L'étude de Trupin et al [1992] montre toutefois que l'influence de ce paramètre eustatique est difficile à mettre en évidence à l'heure actuelle.

Les études récentes sur l'évolution du climat à l'échelle des temps géologiques semblent indiquer un comportement avec des seuils et des constantes de temps longues encore mal déterminés. Par exemple, l'hémisphère Sud suivrait le refroidissement de l'hémisphère Nord avec un retard de l'ordre du millier d'années. Aujourd'hui, il apparaît urgent de bien comprendre les mécanismes du système climatique afin de prévoir son évolution et d'éviter, le cas échéant, de perturber celui-ci d'une manière irréversible à court et moyen terme. Dans ce cadre, l'évolution du niveau global de la mer apparaît comme une grandeur d'intérêt climatologique, relativement facile à mesurer. Le problème de sa détermination reprend de l'actualité après plusieurs décennies [Vignal 1935, Gutenberg 1941], non seulement à cause d'une menace environnementale ou socio-économique, mais aussi grâce aux perspectives offertes par les nouvelles technologies spatiales, notamment en géodésie.