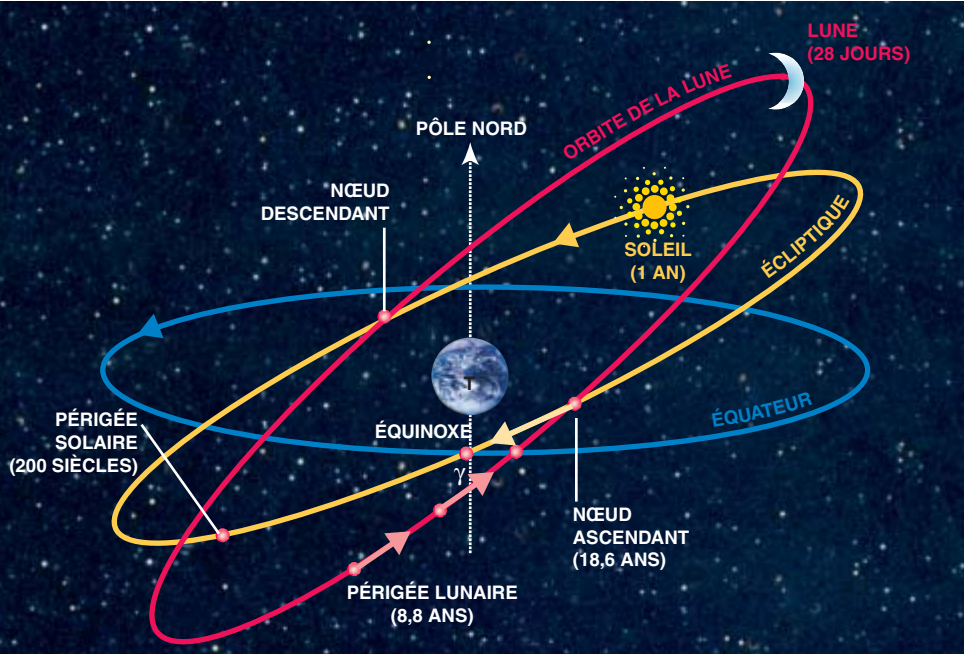




4. LA LUNE ET LE SOLEIL SONT RESPONSABLES DES MARÉES (la part du Soleil étant inférieure à la moitié de la force engendrée par la Lune). Les mouvements apparents sont représentés par rapport à un observateur terrestre fixe central. L'orbite de la Lune, celle du Soleil (nommée écliptique) et le plan de l'équateur sont représentés par des ellipses. L'intersection de l'écliptique et de l'équateur, nommée le point vernal, correspond au passage du Soleil de l'hémisphère Sud à l'hémisphère Nord au moment de l'équinoxe de printemps. Les nœuds, ascendant dans le sens Sud-Nord et descendant sinon, sont situés aux intersections de l'orbite de la Lune et de l'écliptique. Les périgées sont, sur les orbites, les points les plus proches de la Terre. Leurs mouvements apparents provoquent des marées plus ou moins importantes, dont les amplitudes fluctuent avec des périodes complexes, combinaisons de cinq périodes de révolution différentes (celles de la Lune, du Soleil, du périgée lunaire, solaire et des nœuds de la Lune). Par exemple, les marées ont des amplitudes maximales aux nouvelles Lunes et aux pleines Lunes, aux équinoxes, et quand le périgée lunaire et le nœud ascendant approchent le plan de l'équateur. Comme les périodes sont incommensurables deux à deux, les marées ne sont pas des phénomènes périodiques.

Une approche globale des marées

Une approche plus ambitieuse que la méthode harmonique consiste à résoudre directement le problème physique de la formation et de la propagation des ondes de marée dans leur milieu. Les pionniers de cette méthode sont D. Bernoulli, W. Whewell, H. Poincaré et J. Harris. Compte tenu de la complexité de la bathymétrie et du profil de côtes, il n'était pas envisageable d'obtenir des solutions exactes sans de puissants moyens de calcul. Des solutions analytiques ont néanmoins été trouvées qui expliquent à grands traits la propagation de la marée dans des bassins océaniques et qui rendent compte de l'existence de points amphidromiques.

La résolution pratique des équations de l'hydrodynamique pour les ondes de marée n'a été possible qu'à partir des années 1970. La méthode consiste à découper le domaine étudié (une partie de l'océan) en éléments à géométrie simple, nommés mailles, et à leur appliquer deux principes fondamentaux : le principe de conservation et le principe fondamental de la dynamique. D'après le principe de conservation, la varia-

tion de la hauteur d'eau dans une maille résulte de la différence entre la quantité d'eau qui y entre et celle qui en sort. Cette différence dépend des courants qui traversent les bords des mailles. Le principe fondamental de la dynamique indique que les variations de vitesse des courants dans une maille dépendent des forces extérieures qui s'exercent sur la colonne d'eau contenue dans la maille. Ces forces sont de trois types : les forces de pression dues aux différences de hauteurs d'eau entre les mailles voisines, la force de Coriolis due à la rotation de la Terre qui tend, dans l'hémisphère Nord, à infléchir la direction du courant vers la droite, et les forces de freinage, assimilables à des frottements au voisinage du fond et des parois des mailles.

Toutes les mailles sont interdépendantes, et le problème est résolu de façon globale. Les mouvements n'existent qu'à condition d'être induits par un «moteur», constitué ici par la force génératrice et la marée aux bords du domaine étudié. En pratique, le choix de la dimension des mailles est fondamental : plus elle est petite, plus la résolution est élevée. En contrepartie, plus les mailles sont petites, plus les calculs sont longs.

Aujourd'hui, un des défis majeurs consiste à améliorer la connaissance des profondeurs. Il serait illusoire d'améliorer la résolution d'un modèle si la description du milieu n'était pas réalisée à une échelle équivalente. De ce point de vue, les cartes marines sont peu aptes à fournir une bathymétrie adaptée à la modélisation. Elles font ressortir les éléments qui intéressent la sécurité de la navigation, les reliefs susceptibles de présenter un danger sont accentués, ce qui peut fausser la représentation des fonds. D'autre part, de nombreuses régions du Globe ne sont pas encore hydrographiées. En 1995, nous avons entrepris de constituer une base de données bathymétriques sous forme numérique, qui améliore la modélisation numérique de la marée.

D'importants progrès ont aussi été réalisés grâce aux mesures par satellites. Les techniques spatiales ont suscité un regain d'intérêt pour la modélisation des marées dans les océans. L'altimétrie satellitaire est fondée sur le principe du radar. La technique consiste à mesurer le temps de parcours aller et retour d'impulsions électromagnétiques qui se réfléchissent à la surface de la mer. On en déduit la distance parcourue par les impulsions, et donc la hauteur du satellite au-dessus de la surface, avec une précision de quelques centimètres. Cette technique comporte un certain nombre de difficultés. D'abord, il faut connaître avec précision l'altitude du satellite à partir de stations situées sous sa trace. Trois techniques sont utilisées pour positionner le satellite : GPS (*Global Positioning System*, «système de positionnement global»), le système français de géodésie spatiale DORIS (*Doppler orbitography and radiolocation integrated by satellite*) ou la télémétrie laser. Ensuite, l'altimètre à bord doit être calibré en comparant le résultat de la mesure par satellite à une mesure directe par un marégraphe.

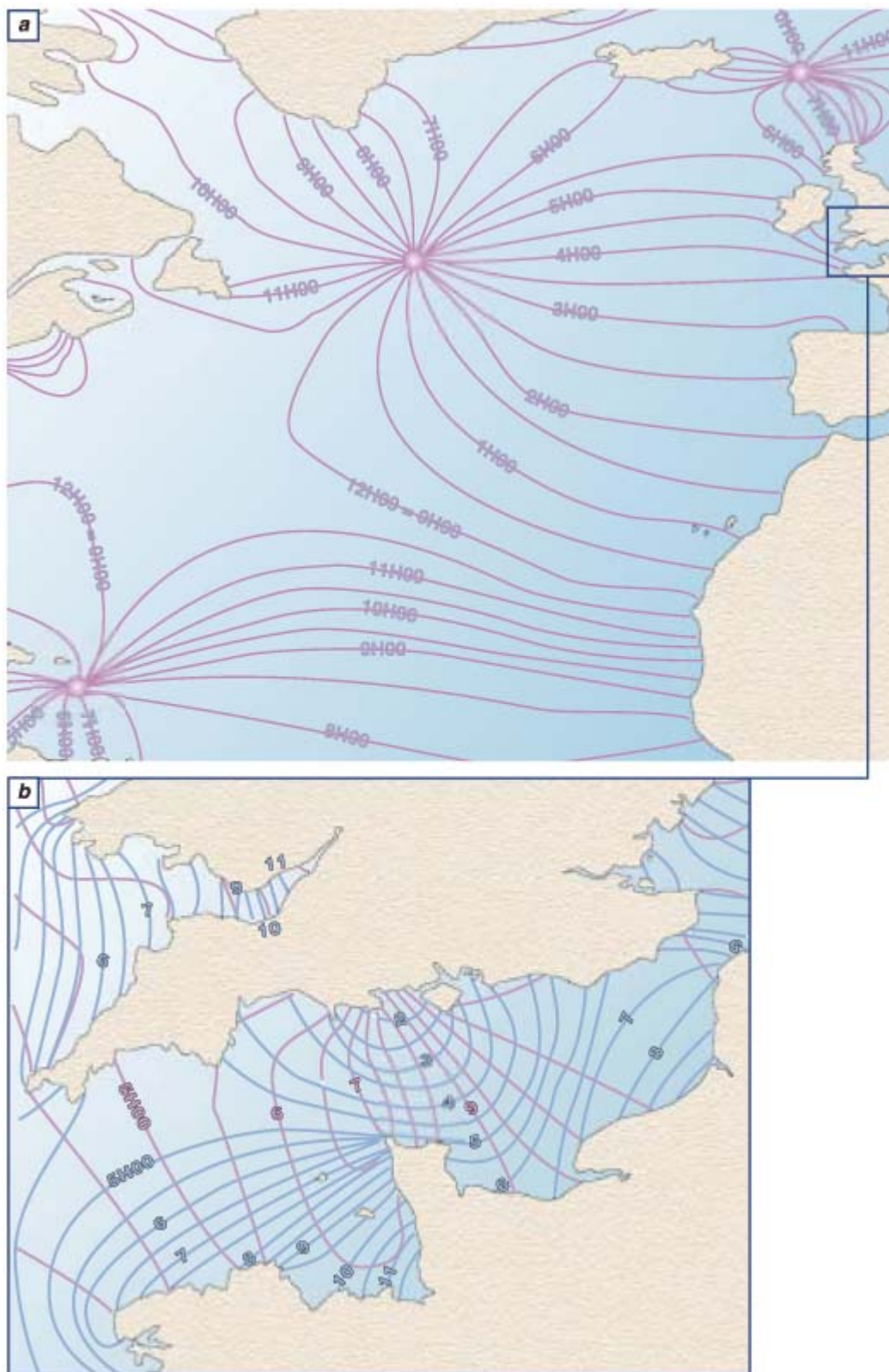
L'altimétrie satellitaire nécessite de disposer de stations marégraphiques de référence. Par ailleurs, elle ne fournit pas de données exploitables hors des traces des satellites, ni près des côtes (la trace du faisceau radar de l'altimètre sur la mer a un rayon d'une dizaine de kilomètres ; dès que le faisceau vise en partie une bande côtière, les mesures sont perturbées). Enfin, quelques jours séparent le survol d'un même point, ce qui pose des problèmes pour analyser des signaux de périodes plus courtes, tels ceux de la marée.

Le satellite *Topex-Poséidon*, lancé en 1992, utilise des altimètres radar pour effectuer des mesures du niveau de tous les océans (50 000 points mesurés par jour). Ces mesures, précises à trois centimètres près, servent à établir des cartes de topographie dynamique. Elles varient beaucoup en cours d'année et d'une année sur l'autre. Elles montrent toutefois qu'en huit ans, le niveau moyen des mers a augmenté de plus de 20 millimètres par an dans certaines régions, mais il a aussi diminué de 15 à 20 millimètres dans d'autres zones (voir la figure 1).

Les satellites apportent des progrès considérables, mais, contrairement à ce que l'on pourrait croire, ils ne vont pas remplacer les marégraphes. Au contraire, le rôle des marégraphes est renforcé pour la calibration en altimétrie et pour l'observation traditionnelle des marées. Les stations de Brest et de Marseille, sous la responsabilité du SHOM (Service hydrographique et océanographique de la Marine) et de l'IGN (Institut géographique national), font partie du réseau mondial GLOSS (Global Sea-Level Observing System, «système d'observation global du niveau de la mer») de surveillance du niveau de la mer. Nous entretenons le Réseau d'Observation du Niveau de la Mer (RONIM), qui regroupe, dans les principaux ports de France, des marégraphes côtiers numériques. Ils enregistrent en permanence la hauteur d'eau à l'aide d'appareils à ultrasons ou électromagnétiques, reliés par le réseau téléphonique et qui alimentent le fichier de données marégraphique du SHOM, à Brest.

La station marégraphique de Brest enregistre le niveau de la mer de façon quasi continue depuis le début du XIX^e siècle. Elle constitue une référence mondiale pour l'étude des évolutions à long terme. Le site de Marseille est également intéressant. En 1882, l'IGN y a installé un marégraphe pour déterminer le niveau moyen de la mer en Méditerranée, destiné à servir de référence pour les altitudes terrestres en France ; le marégraphe fonctionne toujours.

Les niveaux moyens annuels varient beaucoup en fonction de paramètres météorologiques (la force des vents, les champs de pression, etc.) et des courants océaniques. Les fluctuations sont si importantes que les durées d'enregistrement doivent atteindre un siècle pour que l'on puisse détecter une évolution à long terme. D'après les



5. L'ATLANTIQUE NORD (a) PRÉSENTE TROIS POINTS FIXES, où l'amplitude des marées est presque nulle. Ces «nœuds» se situent aux intersections des lignes dites cotidiales (en rose), où la pleine mer est atteinte au même instant. Les ondes de marées tournent autour de ces points amphidromiques. Dans l'Atlantique Nord-Est, les ondes de marée progressent du Sud au Nord. Dans la Manche (b), où l'on ne trouve pas de points amphidromiques, les lignes cotidiales (en rose) progressent d'Ouest en Est, signe que les ondes de marée se propagent dans cette direction (alors que les mouvements apparents de la Lune et du Soleil s'effectuent en sens inverse). Elles résultent d'une réfraction des ondes de l'Atlantique Nord sur le talus continental. Par ailleurs, d'après les lignes d'égales hauteurs d'eau (en bleu), l'amplitude des marées varie beaucoup entre le Nord et le Sud de la Manche.



Thomas Pignier

6. PRÈS DES CÔTES, la réponse de la mer à la force génératrice n'est plus linéaire. Le relief des fonds prend beaucoup d'importance.

mesures des marégraphes à Brest et à Marseille, le niveau moyen a augmenté d'environ 12 centimètres en 100 ans.

Le rejet de dioxyde de carbone d'origine fossile dans l'atmosphère est souvent invoqué. Pourtant, l'élévation du niveau moyen à Brest était déjà sensible avant le début de l'ère industrielle et ne présente pas d'accélération perceptible, ce qui semble exclure cette hypothèse. À Marseille et dans d'autres sites méditerranéens, le niveau moyen de la mer décroît même depuis le début des années 1960. Cette diminution proviendrait d'une augmentation de la densité de la Méditerranée, due à un déficit de l'apport d'eau douce par les fleuves et les précipitations.

Les observations de Marseille et de Brest ne sont pas représentatives de l'ensemble de celles disponibles dans le monde sur de longues durées, qui révèlent, certes, une augmentation moyenne de l'ordre de 10 à 20 centimètres par siècle, mais qui présentent une dispersion très élevée d'un site à l'autre. En outre, ces observatoires sont surtout situés dans l'hémisphère Nord.

La croûte terrestre descend-elle ?

La croûte terrestre n'est pas stable ; elle est soumise à des déformations élastiques dues à la force génératrice de marées qui s'exerce aussi sur la croûte (elle provoque des «marées terrestres»), à des déformations locales induites par les marées océaniques (la surcharge océanique) et à des mouvements d'origine sismique ou tectonique. Les marégraphes ne détectent pas ces mouvements verticaux de la croûte terrestre. Par conséquent, nous devons mesurer soit les élévations de la croûte terrestre, soit les variations du niveau de la mer par rapport à un repère absolu.

Grâce aux satellites, on positionne désormais, avec une précision centimétrique, des points terrestres et les niveaux des marégraphes dans un système de référence géocentrique nommé ITRS (*International terrestrial reference system*, «système de référence terrestre international»), un repère absolu, qui s'affranchit des repères terrestres.

Nous avons aussi entamé des campagnes annuelles de mesures gravimétriques. L'accélération due à la pesanteur varie comme l'inverse du carré à la distance au centre de la Terre. Nous mesurons l'accélération avec une précision suffisante pour détecter des variations de hauteur de quelques millimètres et nous surveillons ainsi l'évolution de la croûte terrestre localement.

La bathymétrie va profiter de ces progrès. L'une de nos missions est de fournir des cartes pour la navigation maritime. Les profondeurs portées sur ces cartes sont rapportées en principe au niveau des plus basses mers théoriques (par conditions météorologiques moyennes), nommé zéro hydrographique ou zéro des cartes. À proximité d'un observatoire de marées, le zéro est rapporté à des repères matériels. On calcule la profondeur que l'on veut porter sur la carte en retranchant à la profondeur mesurée par sondage la hauteur de marée lue au marégraphe et rapportée au zéro hydrographique. Cependant, les sondages au large posent des difficultés. Sans marégraphe, on a recours à la modélisation numérique de la marée et aux observations les plus proches (afin de prendre en compte les effets météorologiques, par exemple), mais la stabilité du zéro hydrographique positionné de cette manière n'est pas assurée. Depuis

quelques années, nous travaillons sur le principe suivant : la position de la surface moyenne de la mer fournie par l'altimétrie satellitaire et la surface instantanée au moment du sondage est mesurée à l'aide d'un GPS. On place ces deux surfaces dans le même repère ITRS et on positionne le zéro hydrographique par rapport au niveau moyen du point de sondage bathymétrique à l'aide de la modélisation numérique de la marée.

Les études locales progressent aussi beaucoup, grâce aux progrès des mesures. Même si, pour l'instant, l'influence de l'effet de serre n'est pas avérée, le niveau moyen des mers augmente de l'ordre de un à deux millimètres par an. Les prévisions des marées que nous établissons seront-elles fiables dans quelques années ? Comme la profondeur joue un rôle primordial dans le «comportement» de la mer, nous avons étudié l'impact d'une augmentation virtuelle de 60 centimètres du niveau des mers autour du Mont-Saint-Michel, à l'aide d'une modélisation numérique développée en collaboration avec le Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales à Toulouse (LEGOS). Nous avons montré que l'amplitude des marées diminuerait un peu : en vives-eaux, la diminution ne serait que de trois centimètres, ce qui représente seulement 0,2 pour cent pour ce site, où l'amplitude est exceptionnelle. Et ailleurs ? Des études restent à mener, mais elles sont difficiles à mettre en place, car elles requièrent une connaissance locale approfondie de la bathymétrie. Or, pas de mesures de la profondeur sans prévisions précises des marées, et pas de prévisions des marées sans bathymétrie précise : c'est l'histoire du poisson qui se mord la queue.

Bernard SIMON est ingénieur au Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM).

P. LAPLACE, *Traité de Mécanique Céleste*, 2 livre 4, 1799 et 5 livre 13, 1825.

H. POINCARÉ, *Leçons de mécanique Céleste*, Tome III - Théorie des marées, Gauthier-Villar, Paris, 1910.

B. SIMON et al, *La marée*, coll. Les guides du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 1997.

D. CARTWRIGHT, *Tides, a scientific history*, Cambridge University Press, 1999.

L'origine de l'élévation du niveau des océans

Le niveau des mers monte : lors de la dernière période glaciaire, il y a 21 000 ans, le niveau moyen des mers était inférieur de 120 mètres à celui d'aujourd'hui. D'où viennent les quelque 50 millions de kilomètres cubes d'eau supplémentaires ? Cet excès d'eau était alors stocké sous forme d'immenses calottes glaciaires, au Nord du continent américain et de l'Europe. Les glaciers continentaux étaient également plus étendus qu'aujourd'hui, et, dans nos régions, ils remplissaient le fond des vallées alpines. À mesure de la déglaciation, la température moyenne de la surface de la planète a augmenté d'environ 5 °C. Ces calottes et glaciers se sont rétractés, le niveau des mers a augmenté à une vitesse moyenne supérieure à cinq millimètres par an. Puis, il y a 6 000 ans, cette élévation s'est ralentie jusqu'à 0,5 millimètre par an, pour atteindre 0,1 à 0,2 millimètre par an seulement, en moyenne, au cours des derniers 2 000 ans.

En revanche, elle aurait brusquement augmenté au xx^e siècle, d'après les mesures effectuées depuis le début du siècle par des marégraphes. Toutefois, les marégraphes ne sont pas assez nombreux, ni assez bien répartis sur tous les océans pour que nous reconstituions sans ambiguïté les variations du niveau moyen global des mers. En outre, ils mesurent l'altitude de la surface de la mer par rapport à leur point d'ancrage, qui n'est pas forcément immobile. Ce dernier peut varier en fonction de l'activité tectonique, ou encore des mouvements de la croûte terrestre. La valeur de l'élévation du niveau des mers au xx^e siècle n'est, par conséquent, pas connue avec précision, mais elle est probablement comprise entre 10 et 20 centimètres.

Cette élévation rapide du niveau des mers provient-elle du réchauffement climatique actuel, qu'il soit dû ou non à l'activité humaine ? Des observations en surface montrent une augmentation moyenne globale de la température comprise entre 0,4 et 0,8 °C depuis la fin du xix^e siècle. Ce réchauffement climatique récent aurait peut-être provoqué une rétraction des glaciers et des calottes polaires. On observe en effet, depuis plus d'un siècle, un recul de nombreux glaciers dans le monde, dans les vallées alpines par exemple. Il n'est cependant pas régulier. La fonte est parfois interrompue par des périodes d'extension, et certains glaciers se sont même développés au cours des dernières décennies, preuve que le changement climatique n'est pas réparti de façon homogène sur le Globe. Dans certaines régions, la température aurait même diminué de un à deux dixièmes de degré lors de la seconde moitié du xx^e siècle. D'après les évaluations récentes, le retrait moyen des glaciers aurait contribué, au cours du xx^e siècle, à une élévation du niveau des mers comprise entre un à quatre centimètres.

Le retrait des glaciers est manifeste, mais l'évolution du volume des calottes polaires est moins marquée. Ainsi, le Groenland aurait contribué à l'élévation du niveau des mers pour un centimètre, au maximum, et l'Antarctique aurait contribué, non pas à une augmentation, mais à une diminution du niveau des mers ! Ce paradoxe n'est qu'apparent. La température de l'Antar-

tique reste tellement basse que la fonte est négligeable. En revanche, l'élévation de température de la planète provoque une augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère : les précipitations et le stock de glace augmentent sur la calotte. En résumé, les deux calottes auraient des contributions faibles et qui se compensent. En revanche, elles subissent toujours les conséquences de la déglaciation entamée voilà plus de 20 000 ans. À cause de cette déglaciation, les deux calottes auraient contribué à une élévation du niveau des mers atteignant cinq centimètres au xx^e siècle, bien supérieure à la contribution associée au seul changement climatique durant le xx^e siècle.

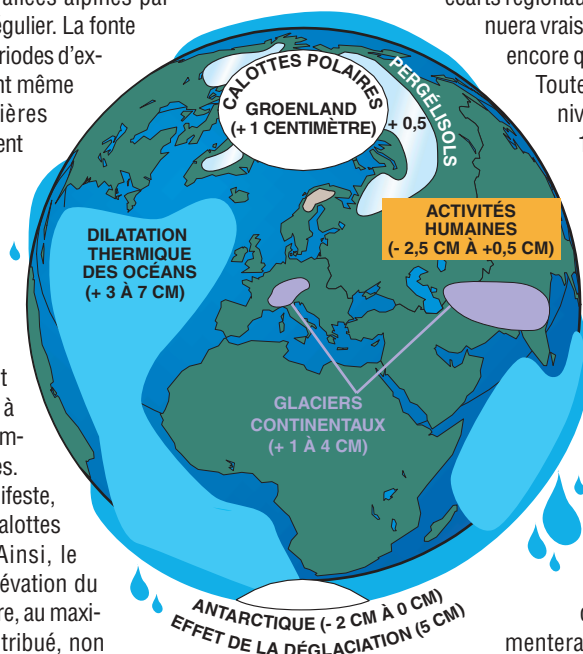
Une simple addition indique que la fonte des glaciers et des calottes ne peut expliquer l'augmentation du niveau des mers au xx^e siècle. D'où vient le reste ? Une partie de la glace stockée dans les sols gelés en permanence, les pergélisols, pourrait avoir fondu et avoir été évacuée vers l'océan. Ces pergélisols occupent 25 pour cent des terres dans l'hémisphère Nord, mais le contenu en eau de ces sols est faible : la fonte des pergélisols au xx^e siècle aurait contribué à moins de 0,5 centimètre.

D'autres contributions, liées à des activités humaines, telle l'agriculture, modifient le stockage d'eau sur les continents et les cycles d'évaporation. Cette contribution, mal connue, aurait représenté une baisse de un à deux centimètres par siècle. En fait, la contribution majeure à l'élévation du niveau des océans proviendrait de l'océan lui-même, par... dilatation ! L'eau se dilate avec la température et cette contribution atteint trois à sept centimètres en un siècle, soit un tiers de l'élévation totale estimée. Au total, l'évolution des glaciers, des calottes polaires et du pergélisol, la dilatation thermique des océans, et les stockages et déstockages d'eau sur les continents, toutes incertitudes confondues, peuvent expliquer l'élévation observée du niveau des mers au xx^e siècle.

Le réchauffement du climat qui est apparu au cours des dernières décennies va probablement se poursuivre et s'intensifier, avec des écarts régionaux considérables. Le niveau des mers continuera vraisemblablement à augmenter, mais on ignore encore quelles seront les régions les plus touchées.

Toutes origines confondues, une élévation du niveau des mers moyen global comprise entre 10 et 90 centimètres est prévue pour la fin du xxi^e siècle. Les glaciers, le Groenland et la dilatation thermique des océans auront sans doute une contribution positive. L'élévation du niveau des mers devrait s'accélérer à la fin du xxi^e siècle : même pour un réchauffement stabilisé à la fin de ce siècle, les glaciers pourraient disparaître presque totalement en moins de trois siècles, ce qui contribuerait à une élévation du niveau des mers de 50 centimètres. Si un réchauffement climatique, même modéré, persistait pendant plusieurs milliers d'années, le Groenland pourrait se réduire considérablement, voire même disparaître ! Le niveau des mers augmenterait alors de plusieurs mètres.

Christophe GENTHON, Catherine RITZ et Christian VINCENT, Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement



Contribution des divers facteurs identifiés à l'élévation du niveau des océans : elle aurait été de 10 à 20 centimètres au xx^e siècle.