



## A quelle vitesse fond la glace du Groenland?

### Forte dynamique en bordure de l'inlandsis dans l'Atlantique Nord

**La fonte de l'inlandsis groenlandais est un facteur déterminant de l'ampleur de l'élévation future du niveau de la mer. La contribution du Groenland à cette élévation est relativement faible actuellement, mais néanmoins déjà de 10 à 20% pendant ces dernières années. Elle pourrait toutefois augmenter sensiblement à l'avenir. La vitesse à laquelle l'inlandsis fondra au Groenland dépend de processus dynamiques qui peuvent accélérer fortement le déclin de la glace. Il n'existe pas encore de prévisions fiables pour l'évolution future de ces processus. Les observations actuelles, tant au Groenland que dans l'Antarctique, font apparaître de telles fluctuations dans la dynamique des glaces qu'il n'est pas possible de déduire des tendances claires. Il s'ensuit que les incertitudes au sujet de l'élévation du niveau de la mer sont relativement grandes, surtout pour la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle. Une élévation se situant entre environ 50 cm et 2 mètres jusqu'en 2100 semble possible.**

L'inlandsis groenlandais est, par sa dimension, le deuxième au monde, après celui de l'Antarctique. Sous forme d'eau, sa masse suffirait à élever le niveau de la mer d'environ 7 mètres sur la planète entière. Cette masse de glace gigantesque est un vestige de la dernière glaciation qui a pris fin il y a plus de dix mille ans. C'est à sa grande masse qu'elle doit de subsister dans les conditions climatiques actuelles, et au fait que sa région centrale atteignant jusqu'à 3'000 mètres d'altitude, les températures y sont basses et font tomber les précipitations

sous forme de neige. Il ressort d'observations du passé et de modélisations que dans les conditions climatiques régnant actuellement au Groenland, une calotte glaciaire de dimension comparable ne se formerait pas si elle n'existait pas déjà. Cela permet de conclure que la fonte éventuelle de cette calotte serait pour longtemps irréversible.

#### **Le processus de fonte se renforce lui-même**

Comme la température de l'atmosphère augmente quand l'altitude décroît, une diminution de l'épaisseur de la glace peut conduire à un processus s'accéléralant lui-même: si l'inlandsis s'amincit, la surface de la glace se trouvera à plus basse altitude et sera donc soumise à des températures plus élevées. Celles-ci accéléreront la fonte, l'épaisseur de la calotte diminuera encore et les températures augmenteront davantage, etc. Il s'agit donc d'un processus lent au départ, mais qui devient toujours plus rapide au cours du temps.

Cet effet associant altitude et température n'est pas le seul cercle vicieux qui peut affecter la masse de glace. Celle-ci n'est pas un milieu figé, mais s'étale de tous côtés, comme un pudding flasque, tant qu'il n'est pas retenu par des obstacles. La calotte commence par fondre sur ses bords, là où la glace est à faible altitude et la température relativement élevée. De la glace s'écoule alors des régions de plus haute altitude pour remplacer celle qui a fondu en bordure. Tant que les chutes de neige au centre de l'inlandsis compensent la fonte, l'épaisseur de la glace ne change pas. En revanche, si la fonte sur les bords prédomine, elle

y entraîne une diminution de l'épaisseur de la glace. Le bord de la calotte devenant ainsi plus escarpé, le flux de glace provenant de l'intérieur de l'inlandsis s'intensifie. La surface de la glace s'abaisse sur une aire plus étendue. La zone de fonte devient toujours plus grande. Ce processus est d'abord lent, mais se renforce lui-même et conduit à la réduction ou disparition de l'inlandsis en quelques milliers d'années.

### **Ecoulement accéléré de la glace dans la mer**

Une part considérable de la glace formée à l'intérieur de l'inlandsis est transportée par de gigantesques glaciers effluents directement dans la mer; là elle parcourt de grandes distances sous la forme d'icebergs et fond lentement. Or pendant les dix dernières années, la vitesse d'écoulement de nombreux glaciers effluents a fortement augmenté – elle est jusqu'à deux fois plus élevée pour certains d'entre eux. Celle du plus grand, le Jakobshavn Isbrae, a passé de 7 à 13 km par an; en conséquence, la glace s'écoule en plus grande quantité de l'inlandsis dans la mer. Des observations montrent que tant sur la côte orientale qu'occidentale, les glaciers ont perdu presque en même temps leur langue flottante et que leur flux s'est accéléré. A l'origine, la cause en a été attribuée à la forte augmentation de la fonte à la surface des glaciers: un apport accru d'eau de fonte parvient par des fissures et des grottes de la surface jusqu'à la base du glacier, où elle agit à la manière d'un lubrifiant, si bien que le frottement diminue et que la vitesse d'écoulement augmente. Ce processus est très bien connu dans les glaciers alpins. On a observé aussi des petites variations de la vitesse d'écoulement; elles se produisent lorsque des lacs d'eau de fonte, dont la taille est de l'ordre du kilomètre, se vident de leur contenu. Cette eau peut se frayer en peu de temps un chemin jusqu'au lit du glacier, avec un débit comparable aux chutes du Niagara. Toutefois, les grands fleuves de glace ne semblent pas réagir très fortement à l'accroissement de l'apport d'eau de fonte.

Des observations et modélisations effectuées entre-temps font supposer que l'accélération des glaciers effluents doit être attribuée à la hausse des températures des océans.<sup>1</sup> L'eau étant plus chaude, les langues flottantes des glaciers fondent, s'amincissent et finissent par se désagréger complètement. Les conditions de pression dans le glacier changent, si bien que la glace s'écoule

plus rapidement dans la mer et s'y rompt aussi plus vite. Du fait de l'accélération, davantage de glace est transportée de l'intérieur vers la périphérie de l'inlandsis et la surface de glace s'abaisse jusque loin à l'intérieur de la calotte. Vu que le Jakobshavn Isbrae s'écoule par un canal de 80 km de longueur jusqu'à 1500 mètres au-dessous du niveau de la mer, il est possible qu'un nouveau recul rapide de la zone de rupture se prépare, car pour l'heure, on sait peu de choses sur la stabilité de la position actuelle de cette zone.<sup>2</sup>

### **La dynamique de la glace mène-t-elle à la catastrophe?**

Ces derniers temps, la question a été discutée de savoir si cette dynamique du flux de glace peut entraîner une forte accélération de la fonte de l'inlandsis groenlandais et donc une élévation importante du niveau de la mer. Il a été dit notamment que celle-ci pourrait dépasser largement un mètre d'ici la fin de ce siècle. Pour l'heure, répondre à cette question est très difficile, faute de données permettant de saisir et d'interpréter avec suffisamment de précision les processus qui se sont déroulés pendant ces dernières années et décennies. Les points d'interrogation au sujet de la dynamique de la glace sont si grands que le récent rapport du GIEC a exclu cet aspect de ses évaluations sur l'élévation du niveau de la mer. Ceci a eu pour conséquence que les nouvelles projections du GIEC à ce sujet sont un peu inférieures à celles du dernier rapport, la raison en étant que la dynamique de la glace au Groenland a été laissée de côté.

De nouvelles données précisent-elles les choses, au moins en matière de développements et risques potentiels? Elles ont permis récemment de définir un seuil pour les scénarios catastrophes, lequel n'est à vrai dire pas très rassurant: l'ampleur de l'écoulement possible des glaciers effluents est limitée du fait que leur nombre et section le sont aussi. Des calculs montrent que les vitesses d'écoulement qui conduiraient à une élévation du niveau de la mer de plus de deux mètres d'ici la fin du siècle sont improbables du point de vue physique.<sup>3</sup> La mauvaise nouvelle est qu'une élévation de jusqu'à deux mètres n'est toutefois pas totalement exclue. Des petits glaciers en bordure de l'inlandsis, qui n'aboutissent pas à la mer, perdent aussi beaucoup de leur masse actuellement. Ceci contribue sensiblement à la diminution de l'inlandsis,<sup>4</sup> mais n'a été toutefois saisi jusqu'ici que régionalement de façon limitée.

### Élévation rapide du niveau de la mer dans le passé

Un regard vers le passé montre que des changements très rapides sont possibles. De tels changements abrupts et élévations rapides du niveau de la mer se sont produits en partie lors de périodes chaudes antérieures, ou pendant la transition de périodes chaudes vers des glaciations. Pendant la dernière période chaude, il y a de cela 125'000 ans, les températures au Groenland étaient d'environ 5 °C supérieures à aujourd'hui, et le niveau de la mer était 4 à 6 mètres au-dessus de sa cote actuelle. Le réchauffement étant plus prononcé aux hautes latitudes, de telles températures sont attendues pour un réchauffement global de seulement 2.5 °C. Les comparaisons avec des périodes remontant à 125'000 ou 15'000 ans, caractérisées par d'importants processus de fonte et élévations du niveau de la mer, sont de peu d'aide, parce que l'extension des glaciers de l'Arctique était alors différente d'aujourd'hui et qu'il existait d'autres grandes accumulations de glace (p.ex. l'inlandsis laurentidien qui recouvrait la totalité du Canada actuel et des parties des USA). Des études publiées

récemment montrent que la fonte de l'inlandsis laurentidien aurait entraîné des élévations du niveau de la mer d'environ un mètre par siècle. Bien que des comparaisons soient difficiles, les ordres de grandeur des conditions de l'époque sont semblables à ceux qui caractérisent la situation régnant aujourd'hui au Groenland.<sup>5</sup>

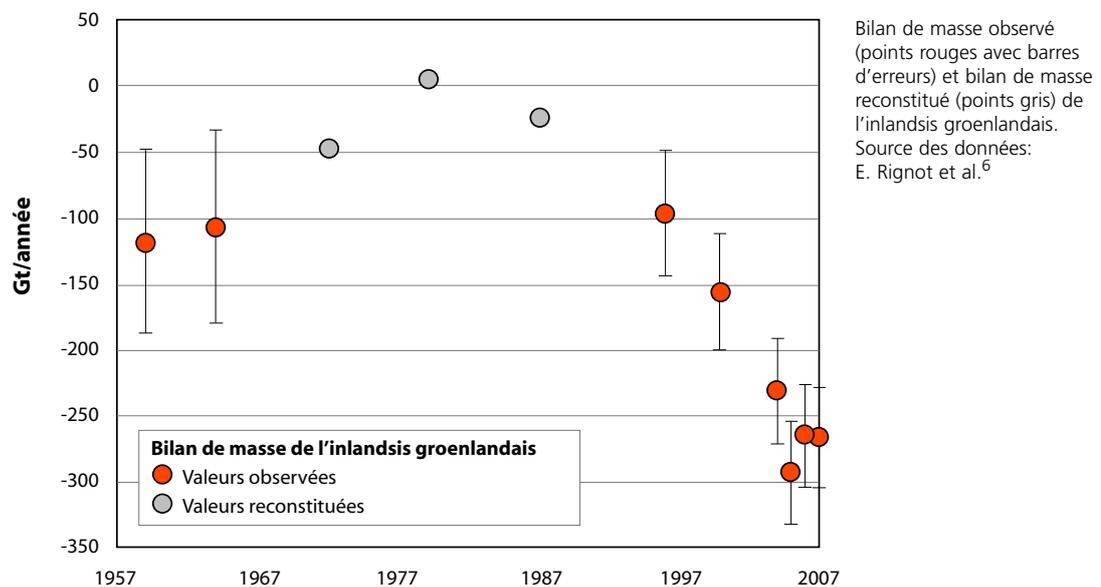
### Des pertes de masse considérables

Comme mentionné au début, les précipitations tombent fréquemment sous forme de neige au centre de l'inlandsis, qui est à l'altitude, et comme elles augmentent avec le réchauffement, la masse de glace s'accroît dans cette zone, du moins dans les conditions présentes. Quel est le bilan de masse actuel, prenant en compte le gain de masse en hiver et à l'altitude, la fonte en été et l'écoulement de la glace? Vu la dimension de l'inlandsis et la diversité des processus, il n'est guère possible d'évaluer le bilan de masse à partir de mesures locales. C'est pourquoi des méthodes de mesure sophistiquées ont été développées, qui peuvent être appliquées à grande échelle. Par exemple, des changements minimes



Cette vue du Groenland montre le changement de l'épaisseur de la glace du Groenland entre 2003 et 2006. Les surfaces grises n'ont pas changé. Les parties blanches indiquent un léger épaississement, les nuances de bleu un amincissement de la couche de glace.

Source: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio (<http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a003400/a003455/>)



de l'attraction terrestre, détectés par satellite, ont permis de déduire les variations de la masse sous-jacente. Deux évaluations différentes de ces données ont indiqué des pertes de masse nettes annuelles de l'inlandsis groenlandais d'environ 150 et 200 milliards de tonnes de glace pendant ces dernières années. Les calculs les plus récents concluent pour 2007 à une perte qui atteint déjà quelque 270 milliards de tonnes.<sup>6</sup> C'est en gros quatre fois la capacité du lac de Constance. Cette masse considérable ne représente toutefois qu'un quinze millième de la glace du Groenland. Seuls de très puissants processus d'accélération pourraient entraîner la fonte de cette masse en peu de siècles, mais ceci n'est théoriquement pas impossible. La perte de masse annuelle observée a presque triplé au cours de ces dix dernières années. Mais il n'existe pour l'heure aucune possibilité d'estimer ne serait-ce que l'ordre de grandeur de l'évolution future. D'autres investigations, telles que des mesures d'altitude par satellite au moyen

de laser, des mesures radar de flux de glace ou la détermination du mouvement longitudinal des glaciers à partir d'images satellitaires, de même que des mesures à haute résolution temporelle de la dynamique des glaciers au moyen du GPS ou d'instruments géodésiques, ou encore des méthodes sismiques, devraient aider à mieux saisir cette évolution et ces processus. Des systèmes de mesure GPS ont été installés sur la côte pour saisir avec précision le lent soulèvement, toujours en cours, de la croûte terrestre délestée des immenses masses de glace qui ont fondu à la fin de la dernière glaciation. Ce soulèvement doit être pris en compte dans la détermination des changements de masse de la glace. Un autre facteur d'incertitude dans cette évolution est l'actuel recul, rapide et inattendu, de la couverture de glace en été dans l'Arctique. Il n'existe pas de données sur ce que signifierait pour l'inlandsis, la fonte estivale de la banquise sur la côte nord du Groenland. D'une part, la surface d'eau

### La banquise arctique

A la différence des grands inlandsis du Groenland et de l'Antarctique, lesquels reposent sur des terres émergées, la banquise arctique flotte sur la mer. En fondant, elle n'entraîne donc pas d'élévation du niveau de la mer. Toutefois, son recul accroît le réchauffement de la région, car une surface d'eau absorbe beaucoup plus de rayonnement solaire que la glace, laquelle réfléchit en grande partie ce rayonnement. L'étendue de la banquise arctique en été a diminué en gros de 40% pendant ces trente dernières années – beaucoup plus vite que ne l'avaient calculés les modèles climatiques. L'épaisseur de la banquise a, elle aussi, fortement diminué. Le moment où l'Arctique sera pratiquement libre de glace à la fin de l'été pourrait ne pas être très éloigné (quelques décennies, voire seulement quelques années). Ces changements rapides dans l'Arctique modifient la distribution globale de la température et peuvent ainsi influencer les courants atmosphériques dans tout l'hémisphère Nord, si bien que des effets pourraient se faire sentir aussi en Europe centrale.

### L'Antarctique

L'inlandsis antarctique contient des masses de glace qui correspondent à une élévation du niveau de la mer de quelque 60 à 70 mètres. Toutefois même à long terme, il ne faut pas s'attendre à ce que toute cette glace fonde. C'est essentiellement la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental qui est menacée; sa masse correspond à une élévation du niveau de la mer d'environ 5 à 6 mètres. Ici aussi l'on observe une accélération de l'écoulement des glaces. Cependant, à la différence du Groenland, une part importante de la glace repose sur un fond situé jusqu'à 2500 mètres au-dessous du niveau de la mer. Si suite à la fonte, la glace s'amincit suffisamment en bordure de la calotte, elle se détache du fond. Et si la fonte s'intensifie, cette ligne se déplace toujours plus vers l'intérieur du continent et de nouvelles masses de glace se détachent. De ce fait, une part toujours plus grande de la glace baigne dans l'eau de mer. Un réchauffement de l'eau contribue ici aussi à la fonte. Très spectaculaires, mais aussi inquiétants, sont les événements qui se déroulent actuellement sur la presque île antarctique, la partie la plus septentrionale et la plus chaude du continent, où l'on assiste à la rupture de grands shelves. Ces langues de glace flottant sur l'eau deviennent plus minces, conséquence de la fonte qui se produit avant tout sur leur face inférieure sous l'action de l'eau de mer plus chaude, et se fracturent et fissurent davantage. Une fois les systèmes de fissures suffisamment denses et rapprochés, d'immenses champs de glace se fragmentent. Vu que ces shelves font barrage aux glaces situées plus à l'intérieur, leur désagrégation a également pour conséquence l'intensification des flux de glace du continent vers la mer. Ces processus dynamiques dans l'Antarctique ne sont eux aussi compris qu'au niveau du principe, et leur évolution future ne peut guère être quantifiée à l'heure actuelle.

ainsi dégagée entraînerait une intensification du réchauffement et des processus de fonte, d'autre part l'humidité augmenterait, ce qui pourrait provoquer des chutes de neige plus abondantes et la formation de glace supplémentaire au centre de l'inlandsis. De surcroît, il pourrait s'ensuivre également des changements des courants atmosphériques. La somme de ces effets ne peut pas être chiffrée. Mais à cet égard aussi, une accélération de la fonte est tout à fait possible.

### De nombreuses questions ouvertes concernant l'élévation du niveau de la mer

Il existe donc encore beaucoup de questions ouvertes. Nous allons à cet égard au-devant d'une évolution largement inconnue. A noter aussi qu'en matière d'élévation du niveau de la mer, nous n'avons pas seulement affaire au Groenland. A part la dilatation de l'eau de mer sous l'action du réchauffement, il ne faut pas oublier non plus la contribution des glaciers et d'autres inlandsis que ceux du Groenland et de l'Arctique. Ces masses de glace menacent de fondre en grande partie déjà pendant ce siècle; or leur contribution possible à l'élévation du niveau de la mer se situe au total entre 50 et 70 cm. En outre, nous sommes confrontés à des incertitudes similaires dans l'Antarctique (voir encadré), où une accélération des flux de glace a également été observée ces dernières années. Ici aussi, de gigantesques masses de glace gisent au-dessous du niveau de la mer et se décolleraient du sol en cas de fonte. Du fait que les températures au pôle Sud sont beaucoup plus froides qu'au pôle Nord, c'est moins le

réchauffement de l'air qui joue un rôle déterminant dans l'Antarctique que celui de l'eau de mer. Malgré tout, le cadre dans lequel elle se déroule limite un peu les possibilités. Une évolution catastrophique, qui provoquerait une élévation du niveau de la mer supérieure à deux mètres encore pendant ce siècle, est très improbable compte tenu des conditions physiques et géographiques. Cependant, une élévation du niveau de la mer d'un mètre seulement, qui ne semble pas irréaliste dans l'état présent des connaissances, n'est pas une bagatelle, vu la densité actuelle de population dans les régions côtières.

### Fonte irréversible

Enfin se pose la question de l'irréversibilité: à partir de quel réchauffement global la fonte des glaces au Groenland est-elle irréversible en raison des processus de rétroaction et ne peut

#### Personnes de contact pour renseignements:

Dr Martin Lüthi  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und  
Glaziologie, EPF de Zurich, Gloriastrasse 37/39,  
8092 Zurich  
tél. 044 632 40 93  
courriel: luthi@vaw.baug.ethz.ch

Prof. Wilfried Haeberli  
Geographisches Institut, Université de Zurich,  
Winterthurerstr. 190, 8057 Zurich  
tél. 044 635 51 20  
courriel: wilfried.haeberli@geo.uzh.ch

ni s'arrêter ni revenir en arrière? Comme déjà mentionné, aucun inlandsis ne pourrait plus se former avec les températures actuelles après avoir complètement fondu. Jusqu'à quel point l'inlandsis devrait-il reculer pour que sa reconstitution soit impossible, en raison par exemple de la faible altitude de la masse de glace, et quel

réchauffement global pourrait-il entraîner un tel recul? Les évaluations se situent entre 1 et 2 °C de réchauffement global. Nous ne sommes donc plus très loin de ce point, et il est fort possible qu'une augmentation de 2 °C – l'objectif général de stabilisation – soit déjà trop haute pour l'inlandsis groenlandais.

## Bibliographie

- 1 D.M. Holland et al., *Nature Geoscience*, Vol. 1, 659ff (2008) <http://www.nature.com/ngeo/journal/v1/n10/abs/ngeo316.html>
- 2 F.M. Nick et al., *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo394 (online 11 Feb 2009) <http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/abs/ngeo394.html>
- 3 W.T. Pfeffer et al., *Science* 321: 1340ff (2008). <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/sci;321/5894/1340>
- 4 I.M. Howat et al., *Geophysical Research Letters*, Vol. 35: L17505 (2008). <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2008GL034496.shtml>
- 5 A.E. Carlson et al., *Nature Geosciences* 1: 620ff (2008). <http://www.nature.com/ngeo/journal/v1/n9/abs/ngeo285.html>
- 6 E. Rignot et al., *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L20502 (2008). <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2008GL035417.shtml>