

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DES CALOTTES POLAIRES AU COURS DU TEMPS

Philippe Huybrechts – Département de Géographie, Vrije Universiteit Brussel

Les variations dans l'altitude et l'extension des calottes de l'Antarctique et du Groenland jouent un rôle important dans la modulation des processus atmosphériques et océanographiques globaux. Elles contribuent aussi de manière significative à l'établissement du niveau moyen des mers. Durant les dernières décennies, d'importants progrès ont été réalisés dans la compréhension des calottes glaciaires grâce au développement de modèles numériques. Ces modèles sont capables de décrire la forme globale ainsi que l'écoulement de la glace se produisant dans ces calottes en réponse aux changements environnementaux. Ces développements s'appuient sur les progrès récents en matière de capacités de calcul, de forages glaciaires ou encore de télédétection, des techniques permettant de mener à bien les calculs et permettant de fournir les données en entrée nécessaires aux modèles. De plus, un effort particulier s'est porté sur les notions de bilan de forces dans les calottes ainsi que sur le développement d'algorithmes numériques plus performants et plus rapides. La génération actuelle de modèles tri-dimensionnels, domaine dans lequel le Département de Géographie de la Vrije Universiteit Brussel joue un rôle pionnier, permet de reproduire correctement les caractéristiques observées des calottes glaciaires polaires et rend du même coup, les prédictions beaucoup plus fiables. Cet article a pour but de décrire les calottes glaciaires, et particulièrement le comportement simulé de l'Antarctique et du Groenland durant les périodes glaciaires ainsi qu'en cas de réchauffement lié à l'effet de serre.

Les caractéristiques des calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland

Des deux grandes calottes glaciaires encore présentes aujourd'hui sur Terre, l'Antarctique est de loin la plus grande. Son volume est d'environ 25 millions de km³ et représente plus de 80% des ressources en eau douce de la planète. L'importance de cette calotte est telle que si elle venait à fondre complètement, la hausse conséquente du niveau marin global serait de 65 mètres. Cette hausse proviendrait alors à 90% de la désintégration de la calotte terrestre de l'Antarctique de l'Est, séparée de

la calotte marine de l'Antarctique de l'Ouest par la chaîne Transantarctique. En outre, la calotte glaciaire Antarctique joue un rôle prépondérant dans le fort gradient de température du pôle à l'équateur pour l'hémisphère Sud, dans la forte circulation océanique et atmosphérique qui en résulte et dans l'approvisionnement en eaux froides des océans. Tous ces phénomènes ont une forte influence sur le système climatique global.

Les calottes glaciaires doivent leur existence à un bilan de masse (la différence entre l'accumulation neigeuse et l'évacuation par fusion) qui reste positif en surface sur des étendues suffisantes pour pouvoir contrebalancer les pertes aux bordures. La différence de bilan de masse entre le centre et la bordure est alors compensée par un écoulement permanent de glace dans le sens de la pente. Le bilan de masse est intimement lié aux conditions climatiques. Dans les actuelles conditions froides en Antarctique, pratiquement aucune fusion n'est possible, même sur la côte. Par conséquent, la quasi totalité de la glace Antarctique est transportée vers la mer, où, une fois parvenue, elle se transforme en "ice shelves", c'est-à-dire en des langues de glace qui viennent flotter sur la mer et finissent par se désintégrer en "vêlant" des icebergs.

Dans ces conditions, l'étendue de la calotte glaciaire est limitée principalement par la profondeur de l'océan qui l'entoure et par la capacité de ce dernier à faire flotter les ice shelves. La position de la ligne d'échouage, la ligne qui sépare la calotte glaciaire posée sur le substratum rocheux des ice shelves flottants, dépend de l'épaisseur de la glace et de la profondeur locale de l'océan. Un changement du niveau de la mer, par exemple, causerait un déplacement immédiat de la ligne d'échouage afin de préserver l'équilibre hydrostatique. Les changements dans l'épaisseur de glace ont un effet semblable. De ce fait, les plus fortes potentialités de changements se localisent au niveau de l'Antarctique de l'Ouest, là où le lit rocheux reste bien en dessous du niveau marin, même après une éventuelle disparition de la glace et la remontée isostatique conséquente. Le fait que la calotte n'occupe pas l'intégralité de la plateforme continentale et que celle-ci soit relativement plate avec une pente à tendance croissante vers l'intérieur favorise encore cette mobilité. Cette configuration pourrait même être à l'origine du

comportement instable de la calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest. Il a été souligné à plusieurs reprises dans la littérature de la fin des années septante, que l'Antarctique de l'Ouest, avec ses ice shelves pourrait être instable au point qu'un léger changement climatique amènerait à une situation dramatique où sa majeure partie disparaîtrait en l'espace de seulement quelques siècles (Mercer, 1978). Bien que ce point de vue soit actuellement considéré comme étant exagéré (Huybrechts et Oerlemans, 1990), la possibilité d'un comportement instable, en lien plus ou moins direct avec le climat, reste une éventualité (MacAyeal, 1992). La calotte de l'Antarctique de l'Est serait par contre, moins sensible aux changements climatiques en raison de sa nature terrestre (Huybrechts, 1993). En effet, elle occupe actuellement la presque totalité des terres émergées et est limitée par une forte pente continentale.

Une autre conséquence du climat très froid qui règne actuellement en Antarctique est qu'une augmentation modérée de la température aurait pour conséquence d'augmenter le bilan de masse. Ceci s'explique par le fait que dans un climat si froid, les précipitations sont davantage limitées par la température de l'air que par la vitesse de transport de vapeur d'eau. Comme un air plus chaud peut transporter plus d'humidité, les précipitations augmenteraient, avec en parallèle des températures toujours suffisamment basses pour prévenir toute augmentation significative de la fusion. En se restreignant à ces seuls effets, une calotte Antarctique plus épaisse serait probablement associée à un climat plus chaud et non plus froid que le climat actuel.

Le Groenland représente la seconde plus grande calotte sur Terre, mais aussi la plus importante de l'hémisphère Nord avec un volume de 3 millions de km³ et une épaisseur moyenne de glace d'à peu près 1650 mètres. Cela représente une épaisseur d'eau de 7 mètres répartie sur l'ensemble des océans. Le climat du Groenland, quant à lui, est très différent de celui de l'Antarctique avec des moyennes annuelles supérieures de 10 à 15°C. En outre, à la différence de l'Antarctique, la calotte glaciaire du Groenland est située dans une région où les températures sont suffisamment élevées pour provoquer d'importantes fontes estivales. En conséquence, pour les régions du Nord en dessous de 1000 mètres d'altitude et pour celles du Sud Est en dessous de 1600-1800 mètres, le taux annuel de fonte excède le taux de précipitation neigeuse entraînant un bilan de masse négatif. Des estimations suggèrent que la perte de glace due à la fusion de surface représente à peu près l'équivalent de celle due au vèlage.

Dans l'hypothèse d'un climat plus chaud au Groenland, il est fort probable que l'augmentation de la fonte serait plus importante que celle de la précipitation neigeuse, ce qui aurait pour conséquence un bilan de masse encore plus négatif. C'est la raison pour laquelle on admet généralement que la calotte glaciaire du Groenland

serait plus vulnérable face à un climat plus chaud et que sa persistance dans ces conditions pourrait même devenir précaire. Des températures plus élevées, risquent d'augmenter l'étendue des zones d'ablation, rendant la calotte plus petite. Dans ce cas, une forte rétroaction positive pourrait naître par le fait qu'une calotte plus réduite implique des altitudes moindres, ce qui provoquerait encore plus de fusion.

La différence entre les situations climatiques et topographiques de ces deux calottes glaciaires fait qu'il est difficile de déterminer, a priori, quelles pourraient être leurs réactions respectives face à un régime climatique différent. Pour ce qui est des variations du niveau marin, il faut savoir que si la calotte glaciaire de l'Antarctique représente un volume 8 fois supérieur à celle du Groenland, en revanche son taux de renouvellement de la glace, un facteur important dans les vitesses d'évolution, n'est que trois fois supérieur (ce qui ramené à sa taille, représente un temps de renouvellement supérieur).

Un modèle tridimensionnel de calotte glaciaire polaire de haute résolution

Les modèles numériques sont un excellent outil pour mieux comprendre les interactions complexes entre les calottes glaciaires, le climat, la lithosphère et les océans. Ils rendent possible l'étude quantitative des calottes glaciaires face aux changements climatiques, tant pour le passé que pour le futur.

Le modèle développé au Département de Géographie de la Vrije Universiteit Brussel calcule simultanément sur une grille tridimensionnelle le champ de température et de vitesse de déplacement dans la calotte glaciaire. Le modèle subdivise la calotte en un nombre fini de couches verticales allant du substratum rocheux jusqu'à la limite avec l'atmosphère, chacune de ces couches étant ensuite subdivisée selon une grille horizontale bidimensionnelle comprenant plusieurs milliers de points. Sur la grille ainsi déterminée, le modèle traite essentiellement les lois physiques de la conservation de la matière et de la chaleur. La principale équation du modèle consiste en la loi dite de fluage pour la glace poly-cristalline, une relation empirique qui décrit comment l'écoulement dépend des contraintes occasionnées par les forces de gravité. Cette relation a été établie dans les années cinquante à partir de test en laboratoire et par analogie avec le comportement des métaux proches de leur point de fusion. Il apparaît que la déformation de la glace est en fait correctement reproduite par celle d'un liquide hautement visqueux qui flue sous l'effet de la gravité (Paterson, 1994).

La résolution horizontale caractéristique du modèle de calotte se situe entre 20 et 40 km, avec entre 10 et 30

couches verticales, ce qui amène rapidement à plusieurs centaines de milliers de points de grille. De tels modèles supposent alors l'accès aux ordinateurs les plus puissants pour pouvoir être utilisés. Ces modèles fonctionnent actuellement sur des super calculateurs comme le CRAY du Deutsche Klimarechenzentrum de Hambourg et celui du Centre de calcul de la VUB-ULB. Grâce aux facilités qu'offre aujourd'hui un réseau comme Internet en matière de transfert de données et de codes informatiques, de tels modèles peuvent être gérés à distance et leurs résultats ensuite visualisés localement sur de simples stations de travail.

Les paramètres en entrée les plus importants pour ces modèles sont le profil topographique du socle rocheux, les températures de surface, le bilan de masse et le niveau moyen des mers. Dans les simulations évolutives, il est nécessaire de prescrire les variations de température et de niveau marin généralement à partir de données de mesures, ou en interaction avec d'autres modèles. Les résultats que sort le modèle consistent essentiellement en la géométrie tri-dimensionnelle de la calotte qui est ici entièrement auto-générée, ainsi qu'en une série de caractéristiques physiques liées aux champs de température et de vitesse définis sur l'ensemble des points de grille. La figure 1 représente l'organigramme du modèle utilisé ici.

Les champs mentionnés ci-dessus peuvent alors être utilisés pour la validation et le contrôle du bon fonctionnement du modèle. La figure 1 représente un exemple de résultat pour les conditions actuelles. Pour autant que l'on puisse en juger sur la base des données disponibles, le champ de vitesse semble être très raisonnable. Les températures basales, quant à elles, n'ont pu être vérifiées que dans un nombre très limité de trous de forage profonds. Cependant, certaines données satellitaires indicatrices de la fusion basale (au contact du lit rocheux), se corrélaient très bien avec la configuration de la figure 2.

La calotte glaciaire du Groenland durant les deux derniers cycles climatiques

La possibilité d'une déglaciation totale du Groenland durant des périodes interglaciaires plus chaudes a nourri de nombreuses discussions ces quarante dernières années et continue encore aujourd'hui. Cette incertitude est en partie due aux difficultés rencontrées dans l'interprétation de la partie basale des carottes de glace extraites lors des campagnes de forages profonds de ces dernières dizaines d'années à Camp Century et Dye 3. En outre, le dernier stade interglaciaire (l'Eémien) se caractérisait par des températures de quelques degrés supérieures aux actuelles, et la disparition partielle voire totale de la calotte a dû contribuer sinon totalement, au moins dans une large mesure, au niveau marin de l'époque, soit 6 mètres au dessus de l'actuel. Il ressort des résultats du

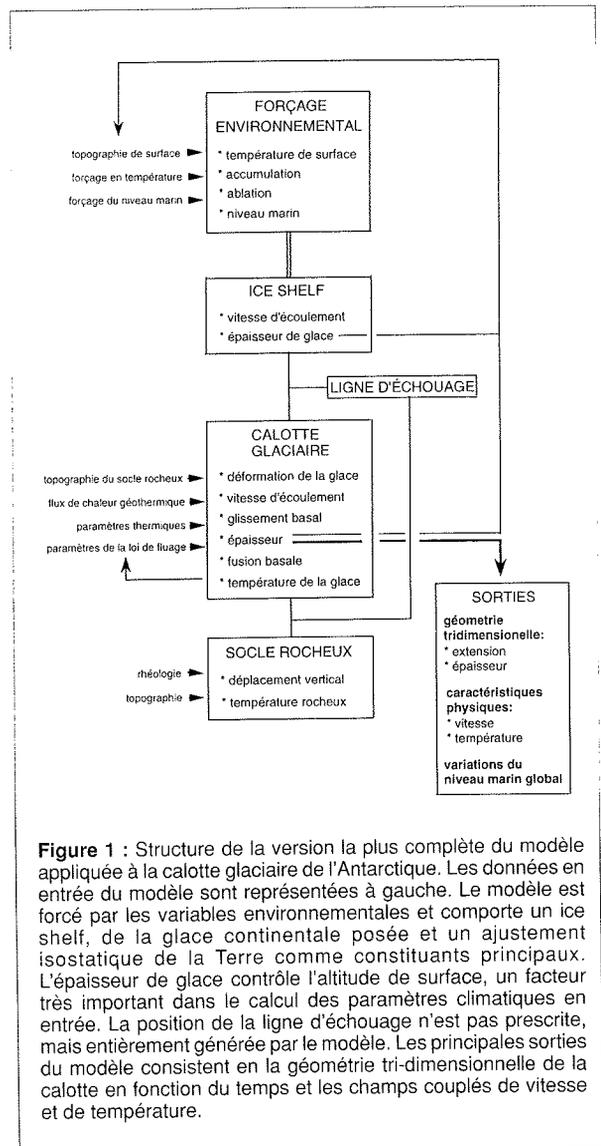


Figure 1 : Structure de la version la plus complète du modèle appliquée à la calotte glaciaire de l'Antarctique. Les données en entrée du modèle sont représentées à gauche. Le modèle est forcé par les variables environnementales et comporte un ice shelf, de la glace continentale posée et un ajustement isostatique de la Terre comme constituants principaux. L'épaisseur de glace contrôle l'altitude de surface, un facteur très important dans le calcul des paramètres climatiques en entrée. La position de la ligne d'échouage n'est pas prescrite, mais entièrement générée par le modèle. Les principales sorties du modèle consistent en la géométrie tri-dimensionnelle de la calotte en fonction du temps et les champs couplés de vitesse et de température.

forage profond GRIP au Groenland central que la calotte glaciaire est restée constamment en place à cet endroit pendant au moins les deux derniers cycles glaciaires. Toutefois, les informations concernant les changements d'épaisseur ainsi que les configurations d'écoulement de la glace sont indispensables à une bonne interprétation des données issues des carottages profonds, et de telles informations ne peuvent être fournies que par l'utilisation de modèles comme celui-ci.

Les figures 3 et 4 montrent les résultats d'une simulation de la calotte glaciaire durant les deux derniers cycles glaciaire-interglaciaire. Dans cette expérience, la distribution du bilan de masse au dessus du Groenland a été forcée par les variations climatiques déduites du profil de fractionnement isotopique de l'oxygène 18 le long de la carotte de GRIP (Dansgaard et autres, 1993).

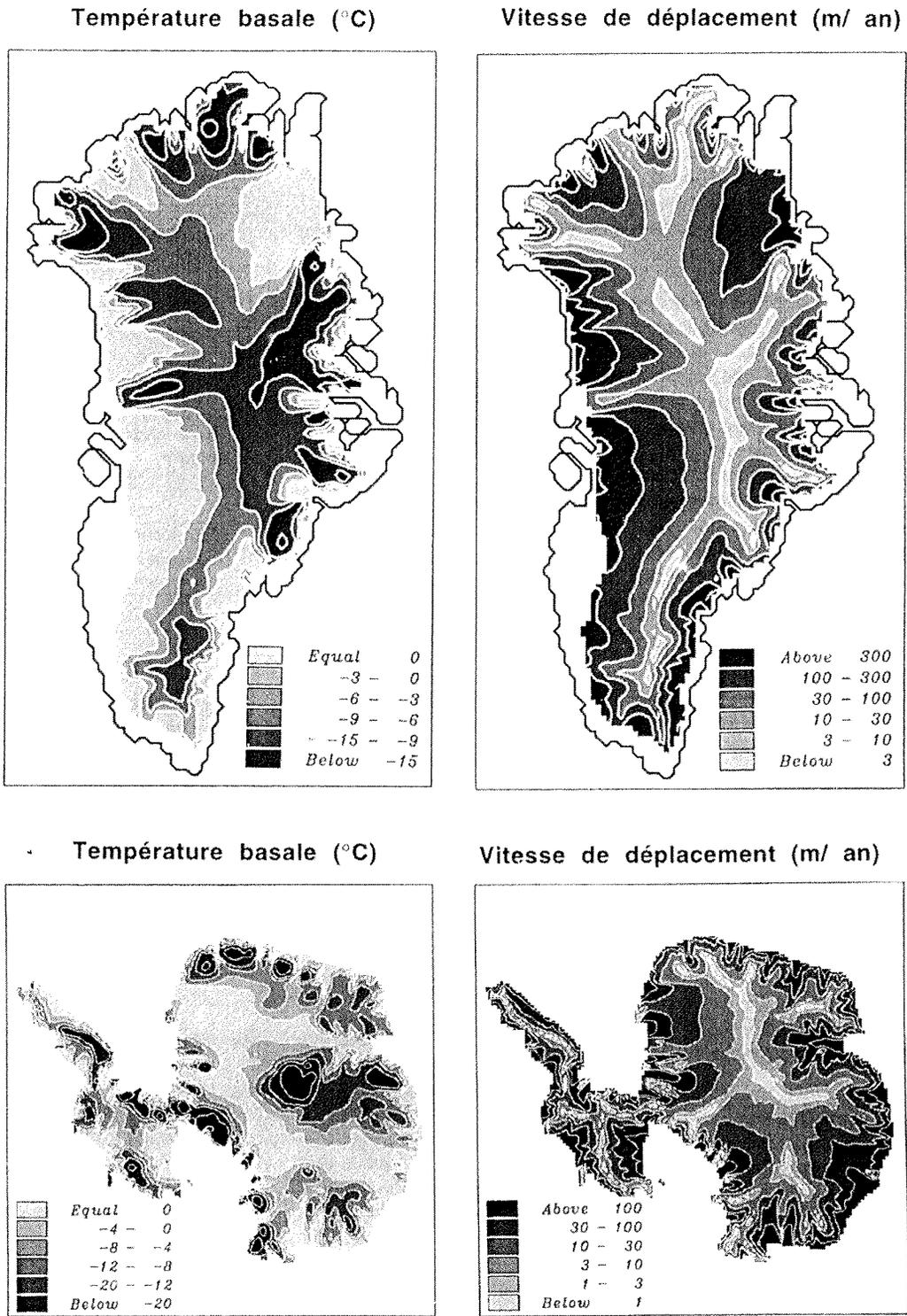


Figure 2 : Vitesse horizontale moyennée et champ de température basale simulés par les deux modèles en tenant compte des conditions climatiques actuelles. Les dessins du haut concernent la calotte glaciaire du Groenland et ceux du bas réfèrent à celle de l'Antarctique. Les zones claires sur le dessin de gauche correspondent aux endroits où la glace basale est au point de fusion entraînant un glissement basal. En dépit de ce que pourrait suggérer la figure, la calotte glaciaire Antarctique est environ 8 fois plus vaste que celle du Groenland.

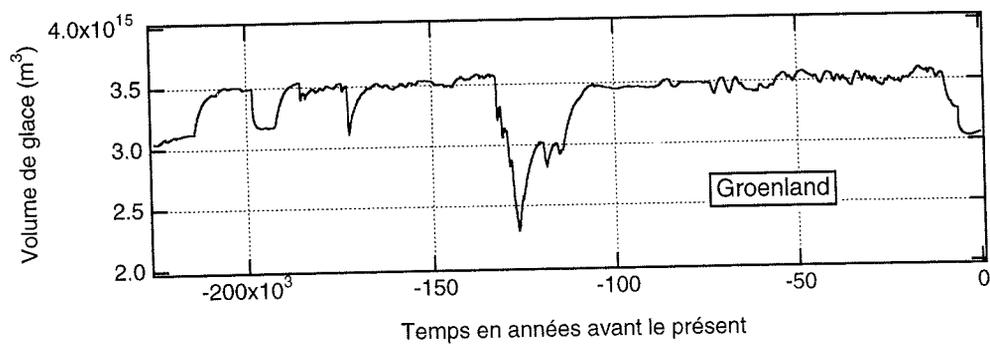
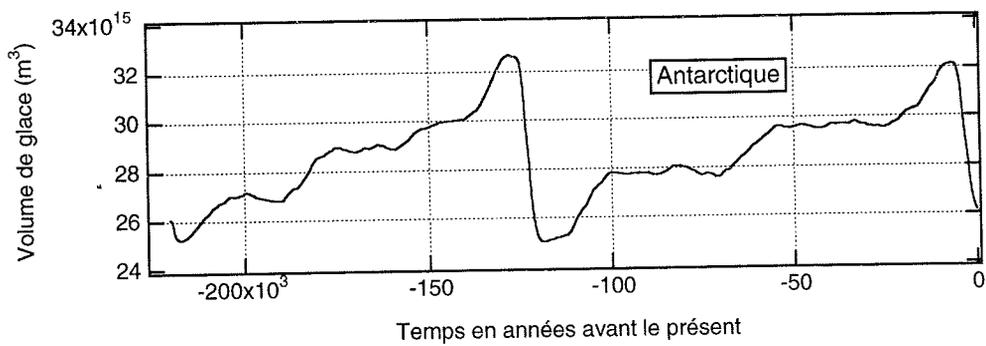
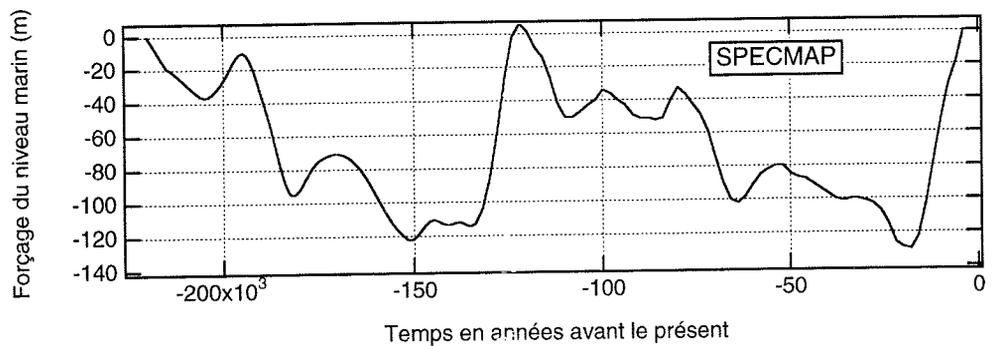
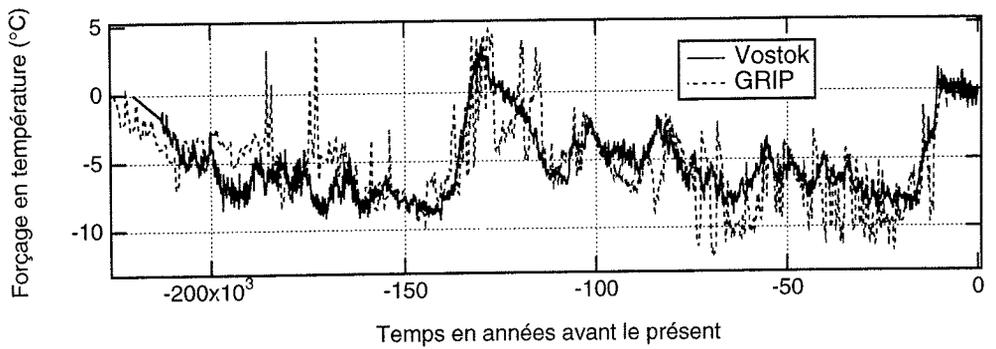


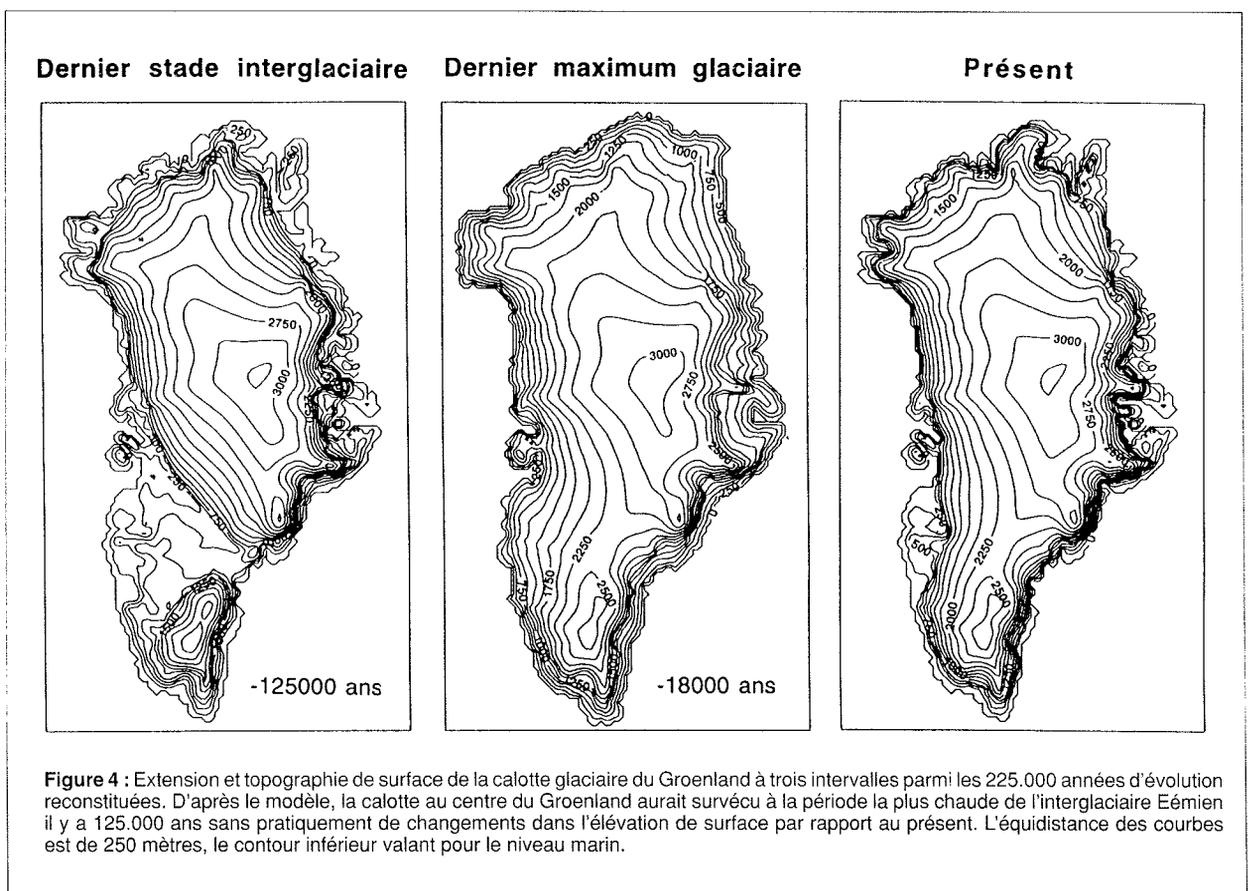
Figure 3 : Forçage (panneaux du haut) et évolution des volumes de glace (panneaux du bas) en Antarctique et au Groenland pendant les deux derniers cycles glaciaires. Ces résultats montrent comment les modèles reproduisent deux cycles complets de croissance et de retrait. A titre de comparaison, un volume de 10^{15} m³ de glace correspond à un changement du niveau marin global d'environ 2.5 m.

Selon cette simulation, la calotte glaciaire aurait sérieusement réduit de volume lors des phases plus chaudes du stade isotopique 5 (le dernier interglaciaire). Bien que la calotte glaciaire semble avoir subi un amincissement considérable, entraînant au moins une fois sa séparation en une partie Nord centrale et une seconde partie Sud, ces résultats révèlent également que cette calotte n'a jamais complètement disparu. L'explication se trouve probablement dans le phénomène de remontée isostatique lorsque la glace vient à disparaître. En effet, lorsque la marge recule, cette remontée suffit à la replacer dans une position plus élevée, là où l'ablation est moindre.

En revanche, en conditions glaciaires froides, lorsque la fonte devient négligeable, l'extension vers la mer de la calotte est limitée par la côte et par la forte pente du plateau continental. Ceci ne permet alors qu'une expansion limitée associée à l'amincissement du plateau central. En conséquence, les effets résultants sur les variations du niveau moyen des mers par rapport à l'actuel consistent en une augmentation ou une diminution de l'ordre de 1,5 m suivant que l'on ait affaire à une phase glaciaire minimale (chaude) ou à un maximum glaciaire (Letréguilly et autres, 1991).

La calotte glaciaire Antarctique durant les deux derniers cycles climatiques

La forme et l'étendue de la calotte glaciaire durant les derniers cycles glaciaires n'est que peu contrôlée par les données de terrain. Ceci s'explique par le fait que la calotte glaciaire rend le fond rocheux inaccessible à l'observation et que les marqueurs des glaciations passées sur le fond marin ont été constamment effacés par le jeu de la mobilité de la ligne d'échouage. Des dépôts morainiques dans les zones montagneuses libres de glace, ainsi que dans les océans alentours ont été analysés, mais ne peuvent généralement pas être datés et n'enregistrent en fait que l'extension maximale de la calotte. Bien qu'il soit clairement établi que des variations majeures au quaternaire ont eu lieu en Antarctique de l'Ouest, la configuration de la calotte glaciaire, en particulier durant le dernier interglaciaire et le dernier maximum glaciaire reste incertaine. Les déductions de l'épaisseur de glace et de l'altitude de la calotte glaciaire en l'Antarctique de l'Est à partir des mesures de concentration totale en gaz dans les carottes de glace sont également l'objet de controverses. Du fait qu'elle permette une meilleure prescription de la baisse globale du



niveau des mers, la connaissance des variations du volume glaciaire Antarctique s'avère très importante dans la modélisation des calottes glaciaires continentales de l'hémisphère Nord pendant les périodes glaciaires.

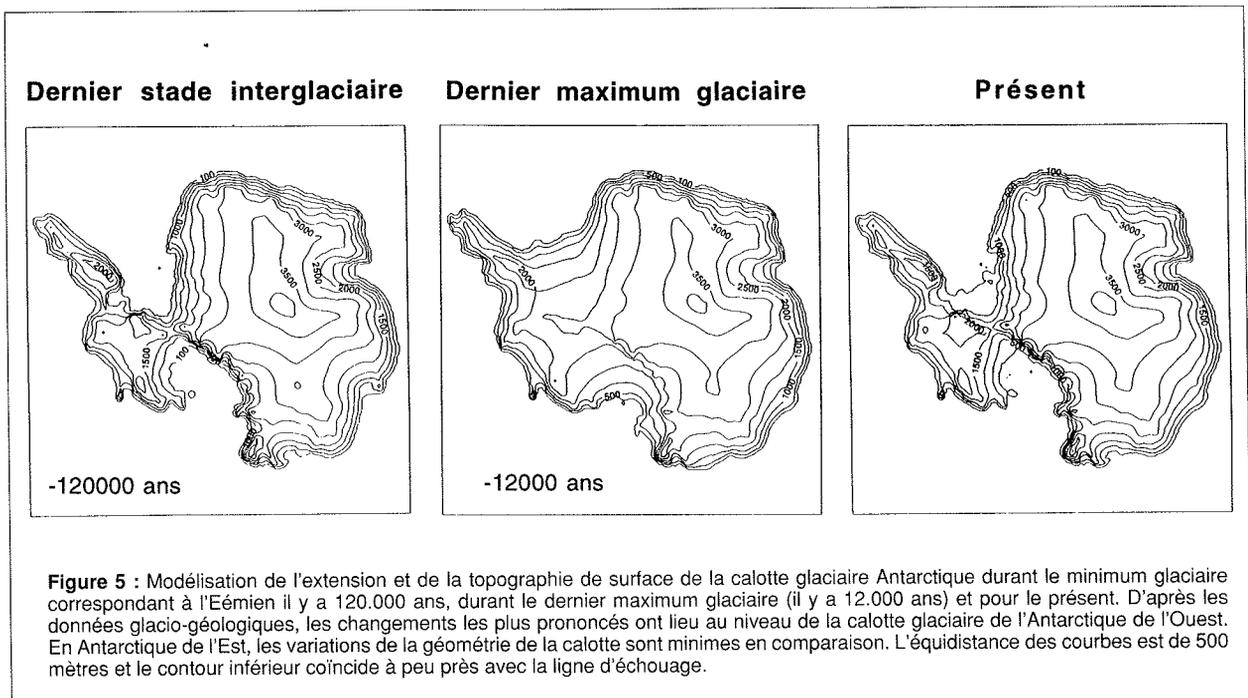
Les résultats d'une simulation sur les 225.000 dernières années forcée par le signal climatique issu des données de Vostok (Jouzel et autres, 1993) et de Specmap sont représentés sur les figures 3 et 5. En accord avec ce qui est généralement admis, la plupart des changements importants se sont produits au niveau de l'Antarctique de l'Ouest. Ces fluctuations sont principalement contrôlées par les changements du niveau marin global et sont en plus modulées par les variations en surface du climat. Ceci conforte l'hypothèse selon laquelle la calotte glaciaire Antarctique subirait à distance les épisodes glaciaires de l'hémisphère Nord par l'intermédiaire du niveau marin mondial. Il a même été établi que, du fait de la longueur du temps de réponse du processus de migration de la ligne d'échouage et du couplage thermomécanique, la calotte glaciaire n'a probablement jamais été en équilibre avec ses conditions environnementales. Ces simulations ont aussi montré que l'augmentation totale du volume de glace au dernier maximum glaciaire (correspondant à une baisse globale du niveau des mers d'à peu près 15 m), ne représente probablement que la moitié de ce qui fut déduit de reconstructions glacio-géologiques antérieures. Elle montre aussi que la calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest n'a pas complètement disparu pendant la période la plus chaude du dernier interglaciaire il y a quelque 120.000 ans (Huybrechts, 1990).

Réponse des calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland à un réchauffement futur du climat

En faisant évoluer les modèles en fonction du temps, il est possible de les utiliser à des fins de prédiction. Dans cette optique, des simulations du Groenland et de l'Antarctique au cours des cycles glaciaires sont une étape nécessaire à la validation du modèle. Les résultats présentés ici sont en accord avec les observations actuelles et ne contredisent pas les informations fournies par les travaux glacio-géologiques. Ils contribuent ainsi à la crédibilité des modèles.

Selon le plus récent des rapports de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climatic Change, Houghton et autres, 1996), il y a de plus en plus de raisons de croire que les concentrations croissantes de gaz traces radiativement actifs (dioxydes de carbone, méthane, oxyde d'azote, etc.) provoqueront un réchauffement futur du climat. Bien que les prédictions que fournissent les différents modèles diffèrent dans une large mesure, un consensus se développe quant à l'évolution de la température moyenne globale d'ici l'an 2100 et selon lequel, à cette époque, la température serait entre 1°C et 3.5°C plus élevée qu'actuellement avec probablement des variations encore plus fortes pour les latitudes polaires.

Lorsque l'on considère les variations futures du volume des calottes glaciaires, il est important de faire la distinction entre les effets anthropogéniques et les fluctuations



naturelles. Du fait de leur long temps de réaction (de l'ordre de 10^3 à 10^4 ans), il est peu probable que ces calottes glaciaires se soient complètement ajustées à leur environnement passé. Les données qui sont actuellement disponibles ne permettent pas de dire si le volume des calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland augmente ou diminue ou s'il a atteint un état stationnaire. Cependant, là aussi, la modélisation peut fournir des indications.

Une autre façon de régler le problème de l'équilibre consiste à simuler l'évolution des calottes glaciaires durant au moins un cycle glaciaire (pour s'affranchir des effets transitoires), et d'analyser alors le déséquilibre obtenu par rapport à la configuration présente. A partir des résultats présentés sur la figure 3, on peut dire que le volume de la calotte Antarctique diminuerait aujourd'hui encore à une vitesse équivalente à une hausse du niveau marin de 0.5 mm par an. La principale raison viendrait du retrait de la ligne d'échouage en Antarctique de l'Ouest, retrait qui n'aurait pas eu le temps de s'effectuer complètement en réponse aux changements environnementaux lors de la dernière transition glaciaire-interglaciaire il y a 10.000 ans. Inversement, d'après ces simulations, la calotte glaciaire Groenlandaise serait quant à elle stable ou ne grandirait que très peu (Huybrechts, 1994). Il est intéressant de noter que la calotte glaciaire de l'Antarctique pourrait, à elle seule, rendre compte de la part inexpliquée de la hausse du niveau marin estimée à 1.8 mm par an au cours du dernier siècle (Tushingham et Peltier, 1991).

La figure 6 montre les réponses des calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland à une série de scénarios de réchauffements liés à l'effet de serre, basés sur des concentrations de gaz traces et sur des prédictions de forçage radiatif à partir de travaux de l'IPCC96 (Houghton et autres, 1996). Ces données ont été utilisées en entrée pour un modèle bidimensionnel à moyenne zonale basé sur l'équilibration énergétique (Warrick et autres, 1996). La première série de scénarios part du principe que la concentration des aérosols (aérosols sulfatés, suies de combustion des énergies fossiles et aérosols issus de la combustion de la biomasse) garde le niveau de 1990 alors que la deuxième série prend en considération les changements de concentration survenus après 1990. Les aérosols réfléchissent davantage la radiation solaire entrante, ce qui tend à amoindrir le forçage radiatif par rapport à celui que l'on obtiendrait en ne tenant compte que des seuls gaz à effet de serre. En ce qui concerne le Groenland, les estimations des variations du niveau des mers d'ici 2100 varient de +4.5 à +7.3 cm lorsque les variations des aérosols sont prises en considération et de +5.2 à +18 cm lorsque ces aérosols sont maintenus à leur niveau de 1990. Pour ce qui est de l'Antarctique par contre, on observe une légère croissance quel que soit le scénario testé, essentiellement parce que l'augmentation de précipitation dominerait celle de la fusion et parce que les effets dynamiques en Antarctique de

l'Ouest restent minimes. Les variations correspondantes du niveau des mers sont entre -5.3 cm (concentrations variables d'aérosols) et -13.7 cm (aérosols supposés constants depuis 1990). Le comportement exactement opposé de ces deux calottes pour les valeurs moyennes de ces prédictions est tout à fait remarquable, ce qui voudrait dire que, à l'échelle du siècle, l'Antarctique et le Groenland pourraient très bien s'équilibrer mutuellement.

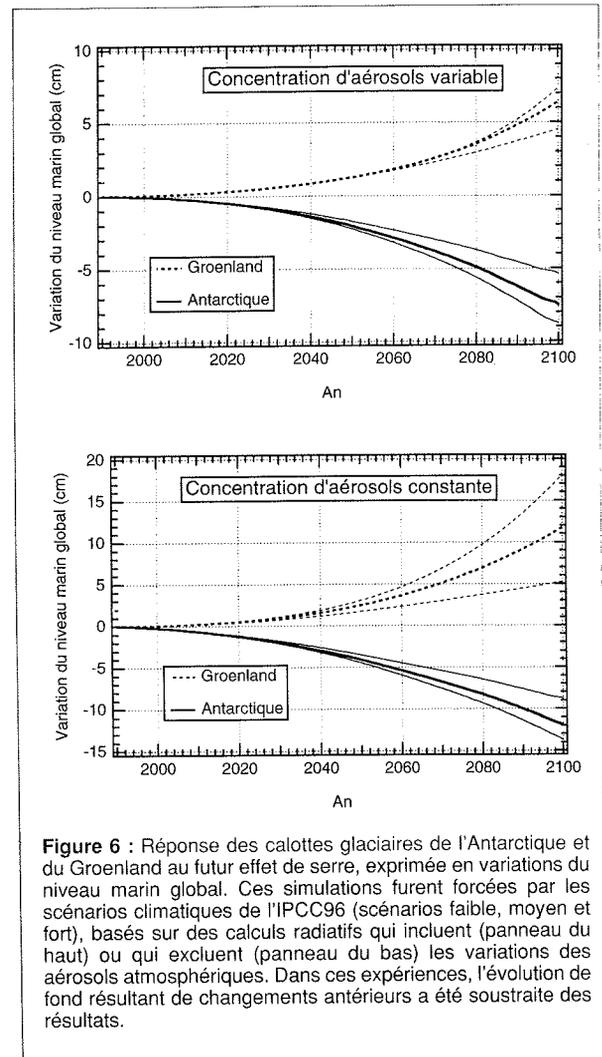


Figure 6 : Réponse des calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland au futur effet de serre, exprimée en variations du niveau marin global. Ces simulations furent forcées par les scénarios climatiques de l'IPCC96 (scénarios faible, moyen et fort), basés sur des calculs radiatifs qui incluent (panneau du haut) ou qui excluent (panneau du bas) les variations des aérosols atmosphériques. Dans ces expériences, l'évolution de fond résultant de changements antérieurs a été soustraite des résultats.

Ces résultats ne s'appliquent qu'à la réponse des calottes polaires. Cependant, même en ajoutant la contribution des glaciers, des petites calottes et celle de la dilatation thermique des océans, il est très peu probable que la montée du niveau marin mondial excède le mètre d'ici la fin du siècle et une estimation entre 27 et 49 cm semble la plus vraisemblable (Warrick et autres, 1996). Cela reviendrait à une accélération d'un facteur d'au plus 5 pour la hausse du niveau des mers observée durant le

siècle passé. Les conséquences sur les régions côtières basses en Belgique pourraient être maîtrisées si des mesures suffisantes en matière de rehaussement de digues sont prises à temps. Toutefois, de grandes incertitudes pèsent toujours sur l'évolution future du climat, ainsi que sur les évolutions résultantes du bilan de masse, l'état actuel des calottes glaciaires ou encore certains aspects de la dynamique glaciaire à des échelles inférieures à la résolution du modèle.

Cependant, si les conditions de réchauffement lié à l'effet de serre devaient persister au delà de l'an 2100, la situation pourrait évoluer dramatiquement. Le retrait de la ligne d'échouage deviendrait alors le mécanisme principal en Antarctique, et en l'an 2500, la calotte glaciaire Groenlandaise pourrait avoir diminué de moitié, entraînant une hausse du niveau marin mondial de plus de 5 mètres (Huybrechts et Oerlemans, 1990; Huybrechts et autres, 1991).

Conclusion et perspective

Le modèle détaillé d'écoulement que nous avons développé ici a été conçu pour simuler les effets de changements climatiques. Cette approche tient compte des processus majeurs de dynamique glaciaire et de thermodynamique dans la description du fluage à grande échelle au sein des calottes glaciaires. De ce fait, ce modèle peut être considéré comme un outil précieux dans la simulation des calottes polaires sous une grande diversité de conditions environnementales, et permet une meilleure compréhension de leur comportement général.

Outre leur simple valeur scientifique, les résultats de telles simulations présentent un intérêt encore plus général. En effet, les reconstitutions des calottes passées sont à la base d'une partie des conditions aux limites nécessaires dans la modélisation atmosphérique des périodes glaciaires. Une bonne connaissance de la distribution en temps et en espace des épaisseurs de glace sont aussi nécessaires à l'interprétation du signal climatique extrait des carottes de glace. De plus, les variations de volume des calottes modifient la charge en surface pour le manteau terrestre et sont alors à prendre en considération dans l'interprétation des niveaux marins mesurés sur l'ensemble du globe. Enfin, en océanographie, la distribution à la fois en temps et en espace de l'eau de fonte dans les océans a des implications importantes sur la circulation océanique. Le modèle présenté ici est capable de prescrire toutes ces conditions aux limites.

Par ailleurs, ces modèles sont utiles dans l'élaboration d'une stratégie à adopter en matière de campagnes de mesures en pointant les données les plus importantes dans le comportement des calottes et en indiquant les

endroits les plus appropriés pour les mesurer. Dans une optique "Sciences de la Terre", les résultats du modèle peuvent aussi servir les géologues en proposant des arguments physiques dans la résolution d'énigmes issues de données géomorphologiques.

En parallèle, un souci constant d'amélioration et de raffinement du modèle est désormais possible grâce à de meilleures données de terrain et à des techniques numériques plus performantes associées à des calculateurs de plus en plus puissants. Une meilleure résolution du modèle ainsi qu'une meilleure connaissance de la loi de fluage déduite de l'étude des carottes seront d'un intérêt tout particulier pour ces travaux.

A plus long terme, il est envisagé d'incorporer ce modèle dans un modèle géophysique complet intégrant simultanément l'atmosphère, l'océan, la lithosphère, la cryosphère et la biosphère. Un tel couplage permettra de rendre compte des interactions complexes entre les différentes parties du système. D'un point de vue glaciologique, cela permettra une meilleure compréhension du bilan de masse et de la fusion des calottes glaciaires.

Remerciements

Je tiens à remercier Anja De Schutter et Emmanuel Le Meur pour la traduction de la version anglaise en français. La plupart de ces recherches ont été conduites alors que l'auteur travaillait en relation avec l'Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung à Bremerhaven, ainsi que dans le cadre du Programme 'Global Change' des Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles (Services du premier Ministre). L'auteur travaille actuellement comme chercheur financé par le Fonds National de la Recherche Scientifique (NFWO).

Références bibliographiques

- DANSGAARD W. et 10 autres (1993), Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record, *Nature* 364, 218-220.
- HOUGHTON J.T. et 5 autres (eds) (1996), *Climate Change 1995*, Cambridge University Press (Cambridge), 572 p.
- HUYBRECHTS Ph. (1990), The Antarctic ice sheet during the last glacial/interglacial cycle : a 3-D model experiment, *Annals of Glaciology*, 14, 115-119.
- HUYBRECHTS Ph., OERLEMANS J. (1990), Response of the Antarctic ice sheet to future greenhouse warming, *Climate Dynamics*, 5, 93-102.
- HUYBRECHTS Ph., LETRÉGUILLY A., REEH N. (1991), *The Greenland ice sheet and greenhouse warming, Palaeogeography Palaeoclimatology and Palaeoecology* (Global and Planetary Change section), 89, 399-412.

HUYBRECHTS Ph. (1993), Glaciological modelling of the late Cenozoic East Antarctic ice sheet : stability or dynamism ? *Geografiska Annaler*, 75A, 4, 221-238.

HUYBRECHTS Ph. (1994), The present evolution of the Greenland ice sheet : an assessment by modeling, *Global and Planetary Change*, 9, 39-51.

JOUZEL J., et 8 autres (1993), Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period, *Nature*, 364, 6436, 407-411.

LETRÉGUILLY A., REEH N., HUYBRECHTS Ph. (1991), The Greenland ice sheet through the last glacial-interglacial cycle, *Palaeogeog. Palaeoecol. Palaeoclim.* (Global and Planetary Change section), 90, 385-394.

MacAYEAL D.R. (1992), Irregular oscillations of the West Antarctic ice sheet, *Nature*, 359, 6390, 29-32.

MERCER J.H. (1978), West Antarctic ice sheet and CO₂ greenhouse effect : a threat of disaster, *Nature*, 271, 321-325.

PATERSON W.S.B. (1994), *The physics of glaciers*, Third edition, Pergamon Press (Oxford), 480 p.

TUSHINGHAM A.M., PELTIER W.R. (1991), Ice-3G : A new global model of Late Pleistocene deglaciation based upon geophysical predictions of post-glacial sea level change, *J. Geophys. Res.*, 96 (B3), 4497-4523.

WARRICK R.A., et 23 autres (1996), Changes in Sea-Level, in : Houghton J.T. et al (eds), *Climate Change 1995*, Cambridge University Press (Cambridge), 359-405.