



FUITES DE CHALEUR DANS LA BANQUISE.

50 % des échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère se font au niveau des fractures qui déchirent la banquise.

PH. BOURSEILLER/ARH EDITORIAL

Pourquoi l'Arctique se réchauffe si vite

Petite tectonique des plaques de banquise

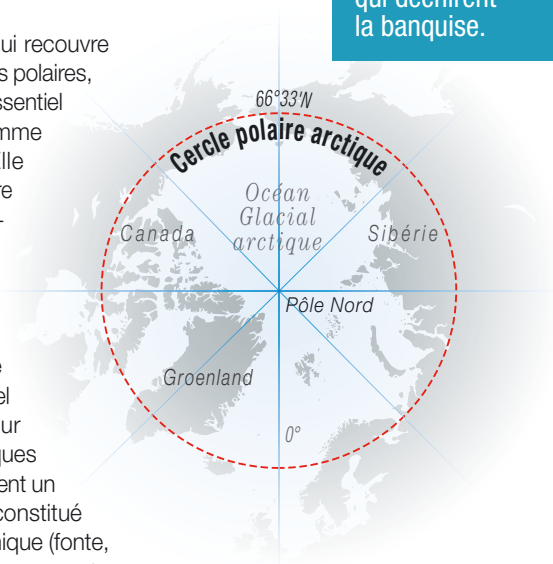
VÉRITABLE BOUCLIER ENTRE L'OCÉAN ET L'ATMOSPHÈRE,
la banquise est un assemblage de plaques en perpétuel mouvement qui conditionne la fonte des glaces de mer.
Comment modéliser cet élément crucial du climat arctique ?



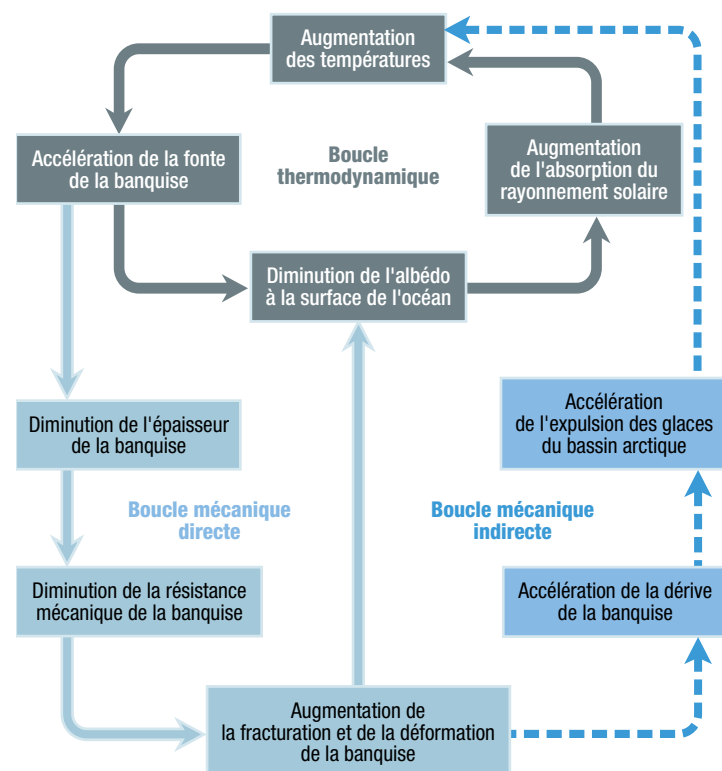
JÉRÔME WEISS

Spécialiste de la physique des glaces, ce directeur de recherche au CNRS étudie la dynamique et l'évolution de la banquise arctique, à partir de données recueillies au Svalbard ou dans l'océan Arctique. Il est membre du comité d'experts du Cercle Polaire.

La fine pellicule de glace qui recouvre les océans dans les régions polaires, la banquise, joue un rôle essentiel dans le climat de ces régions comme de notre planète en général. Elle constitue un isolant très efficace entre l'océan et l'atmosphère : son extension spatiale, son épaisseur ou la présence de chenaux libres de glace en son sein contrôlent en effet les échanges d'énergie, essentiellement thermiques, entre ces deux milieux fluides en perpétuel mouvement. C'est la raison pour laquelle les modélisations climatiques globales intègrent systématiquement un modèle de banquise, lui-même constitué d'une composante thermodynamique (fonte, regel, bilan d'énergie) et d'une composante



mécanique (mouvements, fracturation...). Cette dernière est essentielle, en particulier dans le contexte de mer semi-fermée qui est celui de l'océan Glacial arctique, car c'est elle qui détermine la dynamique de la banquise. Elle influence d'une part le bilan de masse des glaces par



DEUX BOUCLES D'AMPLIFICATION

accélèrent la fonte de la banquise : à la boucle thermodynamique (en gris) qui résulte des variations de température sur le bassin arctique s'ajoutent les effets liés à la perte de résistance mécanique (bleu clair) d'une glace amincie dont la dislocation abaisse l'albédo et accélère l'expulsion de la glace de mer par le détroit de Fram (bleu foncé).

son action sur la vitesse d'évacuation de la glace vers des latitudes plus tempérées, qui se fait principalement dans l'Arctique par le détroit de Fram – qui sépare le Groenland de l'archipel du Svalbard – et, d'autre part, la quantité de chenaux libres de glace ouverts au cœur de la banquise. Les modèles utilisés actuellement considèrent la banquise, du point de vue du comportement mécanique, comme une couche fluide, visqueuse et continue mais d'épaisseur variable. Cette approche est, de prime abord, assez contradictoire avec l'impression de l'explorateur polaire voyageant sur une plaque de glace fracturée. Elle est également remise en cause par l'analyse récente de données satellitaires et de terrain qui indiquent que la banquise se comporte comme une plaque de glace rigide se fracturant sans cesse. La mécanique et la dynamique de la banquise subissent des modifications radicales depuis une trentaine d'années. Quel en est

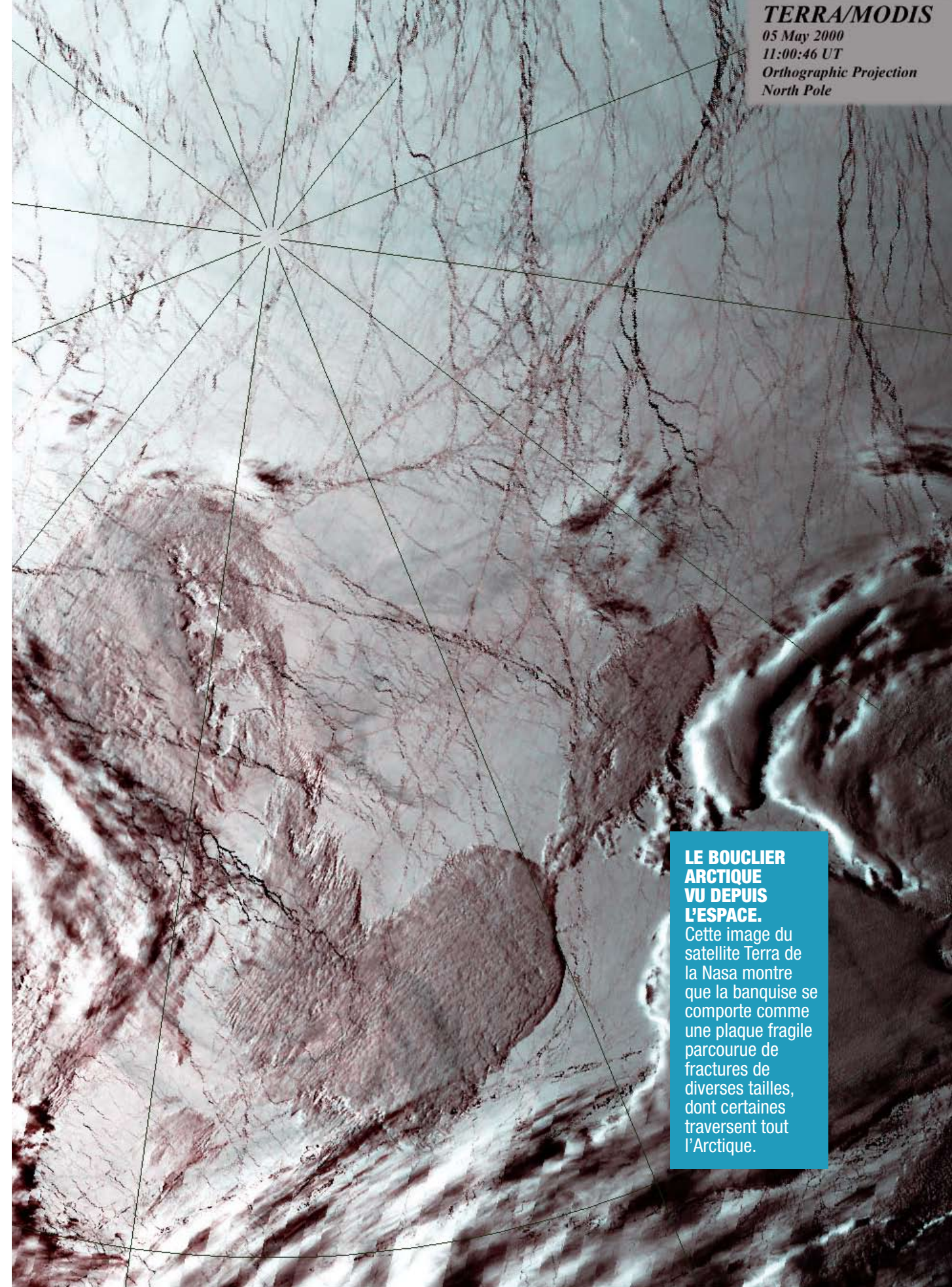
l'impact sur notre façon de modéliser la banquise, et quelles peuvent être les conséquences de ce comportement mécanique sur les échanges entre océan et atmosphère, et donc sur le climat de notre planète ?

Alors que l'épopée de la découverte du pôle Sud en 1911, la rivalité entre Amundsen et Scott et son issue fatale pour l'explorateur anglais font partie de l'imaginaire collectif, l'exploration du pôle Nord est bizarrement moins connue. Inspiré par l'expérience du navire la *Jeanette* écrasé par la banquise au nord de la Sibérie en 1881, et dont des débris seront retrouvés trois ans plus tard à l'extrémité sud-ouest du Groenland, l'explorateur norvégien Fridtjof Nansen conçoit vers la fin du XIX^e siècle un projet visionnaire de dérive transpolaire devant lui permettre, en partant des îles de la Nouvelle-Sibérie, de dériver vers le nord-ouest pour s'approcher du pôle. Son navire, le *Fram*, qui donnera plus tard son nom au fameux détroit entre le Groenland et le Svalbard, est pris par les glaces en septembre 1893 et commence sa dérive. Après deux hivernages, et malgré une progression tortueuse et intermittente, le *Fram* s'est approché du pôle et se trouve à 84° 4' de latitude nord. Nansen et un compagnon quittent alors le navire en mars 1895 pour tenter de rejoindre le pôle à pied et en traîneau à chiens. Mais leur progression est ralentie par les crêtes de compression à franchir et les chenaux libres de glace à contour-

En bref, plus ça fond et plus ça va fondre !

ner. Début avril, le résultat est décevant : les explorateurs sont emportés vers le sud par la banquise dérivante plus vite qu'ils ne peuvent avancer. Nansen abandonne alors son projet et fait marche arrière. Lui, son équipage et son navire arriveront sains et saufs en Norvège après trois ans d'expédition. Cette épopée de la fin du XIX^e siècle nous apprend déjà beaucoup sur la nature et le comportement de la banquise. Cette mince couche de glace, mise en mouvement sous l'effet des vents et des courants marins, est parsemée de fractures en constante évolution selon une dynamique complexe. Les vitesses de dérive de la banquise sont très variables : l'explorateur restant sur son navire enchâssé dans les glaces

ALLEN LUNSFORD, NASA GSFC



TERRA/MODIS
05 May 2000
11:00:46 UT
Orthographic Projection
North Pole

LE BOUCLIER ARCTIQUE VU DEPUIS L'ESPACE. Cette image du satellite Terra de la Nasa montre que la banquise se comporte comme une plaque fragile parcourue de fractures de diverses tailles, dont certaines traversent tout l'Arctique.



JOHN ROSEBUP

COULEURS DE BANQUISE.

Le regel referme cette grande fracture dont la surface se fige en une fine couche de glace presque aussi sombre que le bleu de l'océan. À mesure qu'elle s'épaissit, cette jeune glace s'éclaircit et retrouve toute sa blancheur lorsqu'elle atteint 30 à 40 cm d'épaisseur.

pourra faire du surplace pendant plusieurs jours, avant de se déplacer subitement à des vitesses pouvant atteindre parfois la dizaine de kilomètres par jour. Cette intermittence est une des caractéristiques fondamentales de la dynamique de la banquise. Ces mouvements incessants sont à l'origine d'efforts mécaniques importants pouvant broyer un navire pris dans les glaces comme la *Jeanette*.

Une glace pérenne de 3 à 4 mètres d'épaisseur

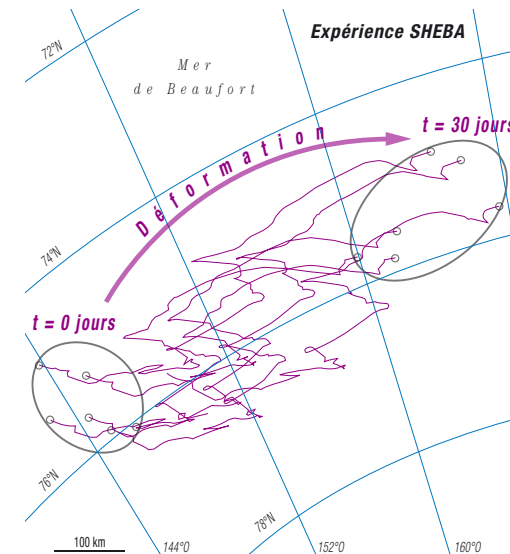
Couvrant de cinq millions de km² en fin d'hiver (mi-février), et jusqu'à 14 millions de km² à la fin de l'été (mi-septembre), la glace de mer affecte largement par sa présence les interactions entre atmosphère et océan dans le bassin arctique. En premier lieu, la banquise est un isolant très

efficace : les échanges d'énergie entre l'océan et l'atmosphère chutent très rapidement dès que l'épaisseur de glace dépasse quelques dizaines de centimètres. Ce phénomène contrôle d'ailleurs la vitesse de croissance de la banquise : plus la glace est épaisse et plus elle se forme lentement. En fait, la couche de glace qui se forme bloque rapidement les flux d'échanges thermiques entre une atmosphère froide (−33°C en moyenne durant l'hiver) et l'eau de mer à l'équilibre thermodynamique avec la glace, soit autour de −1,8°C, et donc plus chaude que l'air. C'est pourquoi une banquise se formant au cours d'un hiver, appelée banquise annuelle, ne dépassera guère 1 mètre d'épaisseur au maximum. Dans des régions limitées le long des côtes de l'Antarctique, ainsi que dans une large part de l'océan Arctique, la banquise ne disparaît pas en été et s'épaissit petit à petit

SOURCE : PIERRE RAMPAL

chaque hiver. On parle alors de glace pluriannuelle, ou pérenne, qui peut atteindre de 3 à 4 mètres d'épaisseur. Le rôle d'isolant de la banquise est essentiel et rend capital la compréhension des mécanismes de formation et d'ouverture de fractures et de chenaux. À titre d'exemple, pour une banquise dont 0,5 % de la surface est occupée par des chenaux d'eau libre ou de glace très fine et transparente, comme au niveau de fractures récemment ouvertes, la moitié des échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère s'effectuent au niveau de ces seules ouvertures. En outre, pour une même concentration moyenne de glace de mer, la répartition spatiale des zones d'eau libre aura son importance, de nombreux chenaux étroits étant bien plus efficaces qu'un seul plus large vis-à-vis des flux de chaleur.

La présence de banquise modifie également



PARCOURS CHAOTIQUE DES PLAQUES.

L'analyse du parcours de six balises fixées sur la banquise montre qu'elles suivent les déplacements de plaques de glace différentes, chacune ayant dérivé pendant 30 jours selon une route sinueuse qui lui est propre, en s'écartant les unes des autres.



**PATCHWORK
DE CRÊTES ET
DE FRACTURES.**

Soumises aux tractions souvent contraires des vents et des courants marins, les plaques de banquise se fragmentent, s'écartent ou se compriment en réponse aux énormes contraintes mécaniques qu'elles subissent, ce qui donne à la banquise cet aspect d'enchevêtrement de lignes irrégulières.

la couleur de l'océan en le rendant beaucoup plus blanc. De ce fait, une part bien plus grande de l'énergie solaire incidente est réfléchiée par la glace, et ne peut donc pas être absorbée par l'océan : on dit que l'albédo, le pouvoir réfléchissant de la surface éclairée par le Soleil, augmente lorsque la mer, dont la surface est sombre, est recouverte par la glace, qui est beaucoup plus claire. Dans un contexte de réchauffement climatique, particulièrement intense dans l'Arctique, des boucles de rétroaction positives, favorisant la fonte de la glace, peuvent se mettre en place. Une diminution de l'épaisseur comme de la concentration de glace de mer, qui dépend de la densité et de la taille des chenaux et fractures qui la parsèment, rend l'océan Arctique plus sombre.

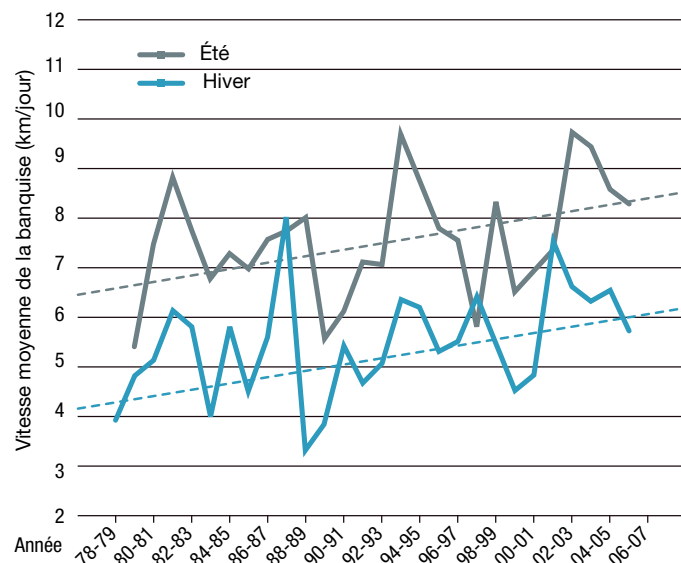
Cette diminution de l'albédo entraînera en été une augmentation de l'absorption d'énergie solaire par l'océan. Ce phénomène, pour la banquise, favorise la fonte estivale et retarde le regel en début d'hiver, ce qui s'accompagne d'une diminution de son épaisseur et de son étendue spatiale.

**La banquise annuelle ne
dépasse pas 1 m d'épaisseur**

Cette boucle de rétroaction thermodynamique (lire, page 70, « Deux boucles d'amplification ») faisant intervenir l'albédo rend la banquise très sensible aux changements climatiques. Elle a aussi un effet amplificateur sur le réchauffement du climat, par la mise en jeu du rôle réfléchissant

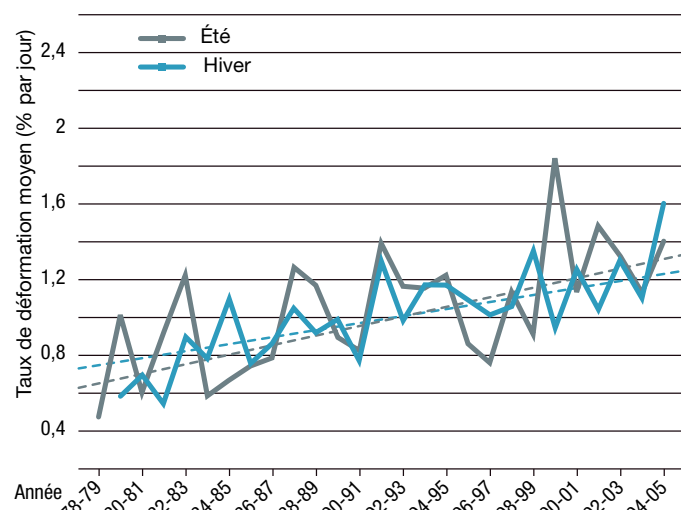
FLORENT DOMINE, LGGE-CNRS

pub



DÉFORMATION ET DÉRIVE DE LA BANQUISE.

Vitesse de dérive (en haut) et taux de déformation (en bas) sont de bons indicateurs des effets du réchauffement sur la banquise. Depuis vingt-cinq ans, sa dynamique s'accélère en été comme en hiver.



autour d'une superposition verticale de couches aux propriétés physiques bien distinctes et censées représenter de la manière la plus fidèle possible les enveloppes superficielles de notre planète (océan, banquise, atmosphère...). Les modèles actuels décomposent bien entendu l'océan comme l'atmosphère en plusieurs couches aux propriétés distinctes. Ces couches sont en interaction dynamique entre elles : la dynamique de la banquise sera dictée de façon significative par la circulation atmosphérique alors que l'océan jouera plutôt le rôle d'amortisseur pour les mouvements de la glace de mer. Les échanges d'énergie entre l'atmosphère et l'océan y sont rendus dépendants de la concentration de la glace de mer, l'épaisseur de la banquise, etc. La difficulté essentielle est bien sûr de modéliser de la façon la plus réaliste possible tous ces mécanismes d'interaction. Les premiers modèles conceptuels du climat étaient unidimensionnels, considérant uniquement les interactions verticales entre couches le long d'une colonne supposée repré-

La banquise n'est pas un fluide visqueux

sentative de la Terre dans son ensemble. Les modélisations climatiques modernes comme celles utilisées dans le cadre du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) pour simuler le futur du climat de la Terre sont tridimensionnelles. Elles découpent la totalité des enveloppes superficielles de la Terre en « boîtes » d'épaisseur variable (celle des couches citées plus haut) et d'extension horizontale à l'échelle de la centaine de kilomètres. Dans ce cas, les interactions entre boîtes sont à la fois verticales et horizontales. L'amélioration des capacités de calcul devrait aboutir dans les prochaines années à une augmentation de la résolution spatiale vers la dizaine de kilomètres. Autre problème, dans les modèles climatiques les plus primitifs, la banquise était considérée comme une couche uniforme, tant en structure qu'en épaisseur, dont l'extension spatiale et l'épaisseur n'évoluaient qu'en fonction de processus thermodynamiques, essentiellement la fonte et le regel, qui dépendent des fluctuations de température de l'air ou des couches supérieures de l'océan. De par leur construction,

ces modèles sont incapables de tenir compte d'un rôle éventuel de la dynamique et de la fracturation de la banquise sur son évolution récente et future. De ce fait, dès les années 1980, les chercheurs ont commencé à proposer des modèles où processus thermodynamiques d'une part, mécaniques et dynamiques d'autre part, sont couplés. À titre d'exemple, la résistance mécanique de la glace dépendra de l'épaisseur de la glace de mer ainsi que de la fraction d'eau libre qu'elle contient (chenaux et fractures), deux paramètres évoluant également en fonction des conditions de température de l'atmosphère. Cette composante glace de mer des modèles climatiques a du point de vue conceptuel relativement peu évolué durant ces trente dernières années, au moins pour la partie mécanique : la banquise est considérée comme une couche continue au comportement visqueux pouvant également s'écouler localement de manière plastique lorsque les efforts internes (les contraintes) dépassent un certain seuil de résistance. Ce cadre conceptuel a l'avantage de permettre un couplage aisé entre la banquise et les autres couches fluides comme l'océan ou l'atmosphère, mais pourra paraître bien étrange à l'explorateur polaire qui doit faire face à une surface de banquise rendue chaotique par les fractures et les crêtes de compression dues aux chevauchements des plaques de glace. En fait, les concepteurs de ces modèles de glace de mer étaient en partie conscients de ce paradoxe et de l'importance des fractures dans la dynamique de la banquise, mais postulaient qu'aux grandes échelles de temps (au-delà de quelques jours) et d'espace (au-delà de 10 km), la banquise se comporte effectivement comme un fluide visqueux. Des analyses récentes de données expérimentales remettent en cause de manière radicale cette hypothèse.

Même si les régions polaires restent pour une bonne part inconnues, des observations satellitaires comme de terrain sont venues, au cours de la dernière décennie, enrichir notre connaissance de la banquise, en particulier dans l'Arctique. Les mouvements et la déformation peuvent être mesurés à partir d'images satellites successives ou de la dérive de bouées enclâsées dans la glace. Les efforts internes ont quant à eux été mesurés sur le terrain à partir de capteurs spécifiques. Récemment, des analyses croisées de ces données démontrent

L'ESPÉRANCE DE VIE DES VIEILLES GLACES DIMINUE.

La part de banquise qui résiste à la fonte estivale se réduisant, l'âge moyen des glaces de mer pérennes diminue. Plus fines et plus fragiles, elles dérivent plus vite vers le détroit de Fram où elles sont évacuées dans l'Atlantique.



POSE DE SISMOGRAPHES AU SVALBARD.

La mise en place de sismographes sur la glace permet d'enregistrer de véritables tremblements de glace dus aux forces de compression, de cisaillement et d'extension des plaques de banquise mises en mouvement par les vents et marées.

FRANK DELBART - PEV

clairement que la banquise ne peut être considérée comme un fluide visqueux, et ceci quelles que soient les échelles de temps et d'espace envisagées. Sa dynamique est caractérisée par une hétérogénéité spatiale remarquable et une forte intermittence : la déformation s'effectue au cours d'épisodes brefs et intenses, très localisés dans l'espace, même si ces lieux de dynamique intense fluctuent fortement au cours du temps. Ces événements correspondent en fait à des épisodes de fracturation qui peuvent aller de l'ouverture d'une fracture locale de quelques mètres jusqu'à l'activation de failles gigantesques parcourant une large part du bassin arctique, clairement visibles sur les animations satellites. À cet égard, la déformation de la banquise ressemble beaucoup plus à celle de la croûte terrestre qu'à celle d'une couche visqueuse. Il est d'ailleurs tout à fait possible d'enregistrer les « tremblements de glace » résultant de tels épisodes, à l'image des séismes terrestres. Dans le cadre du programme européen Damocles, un réseau de sismomètres a ainsi été installé autour de la goélette polaire *Tara* puis a suivi celle-ci au cours de sa dérive transpolaire. L'analyse des séismes enregistrés est en cours et devrait nous permettre de mieux comprendre les processus complexes à l'œuvre. Dans cette tectonique des plaques de glace, se déroulant à des échelles de temps bien plus rapides que dans la croûte terrestre, les crêtes de com-

pression apparaissent ainsi comme des montagnes en miniature. Cette dynamique intermittente et hétérogène entretient certaines analogies avec la turbulence des fluides : on pourrait ainsi se demander si elle ne constitue pas simplement l'héritage direct de la turbulence atmosphérique et/ou océanique, les courants océaniques et surtout les vents

La vitesse de dérive augmente de 10 % en dix ans

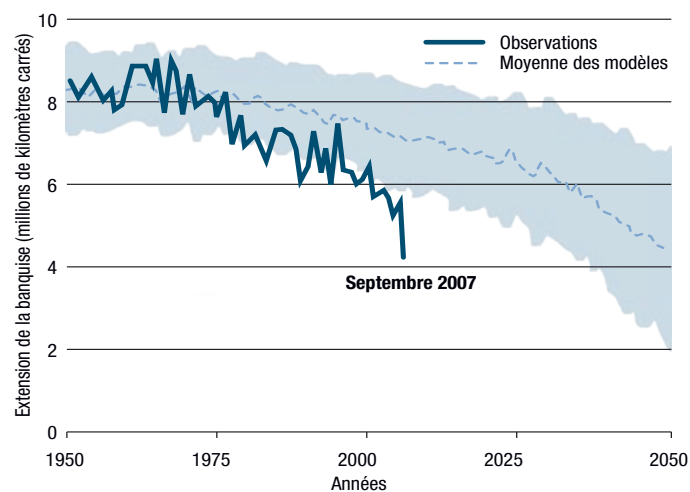
étant les principales forces motrices agissant sur la banquise. Une analyse plus fine des données démontre qu'il n'en est rien : la déformation de la banquise est accommodée en quasi totalité par le jeu de multiples fractures à différentes échelles (du mètre à la centaine de kilomètres), activées lors de brefs épisodes ouvrant des chenaux libres de glace qui pourront se refermer par regel lorsque l'activité aura migré vers d'autres régions. La composante visqueuse de la déformation est négligeable. À cet égard, les mésaventures des occupants de la base russe North-Pole évacués d'urgence en 2006 après qu'une gigantesque faille eut subitement disloqué la banquise aux alentours du camp est significative. Toutefois, pris isolément, de tels événements ne doivent pas être considérés comme alarmants vis-à-vis d'un réchauffement de l'Arctique, mais

plutôt comme des signatures naturelles de la dynamique interne de la banquise. Néanmoins, une diminution de l'épaisseur moyenne des glaces de mer, déjà significative depuis la fin du ^{xx}e siècle, aura pour conséquence de rendre la banquise encore plus fragile, donc plus sensible à la fracturation, entraînant éventuellement ainsi une accélération de la dynamique associée. Le récent voyage du *Tara* est peut-être un signe à cet égard : partie en septembre 2006 sensiblement du même point que le *Fram* cent treize ans plus tôt, la goélette a franchi le détroit de Fram en décembre 2007, soit en avance de plus d'un an et demi par rapport au navire de Nansen, et d'un an par rapport aux prévisions les plus optimistes, fondées sur des trajectoires simulées par les modèles couplés océan-banquise-atmosphère ! Des travaux récents menés au Laboratoire de Glaciologie de Grenoble indiquent que ceci est symptomatique de bouleversements profonds dans l'Arctique. En nous appuyant sur une analyse statistique des trajectoires de bouées dérivantes enregistrées depuis 1979, nous avons montré que sur les trente dernières années, la vitesse de dérive dans le bassin arctique avait augmenté en moyenne de 10 % par décennie, l'évolution étant encore plus spectaculaire pour la vitesse de déformation avec +40 % par décennie ! (*Lire*, page 76, « Banquise fragilisée ».) Partant du désaccord profond constaté entre les hypothèses mécaniques de base des modè-

les de banquise et les processus physiques observés, on peut se poser la question de la performance des modèles climatiques en termes de simulation de l'évolution de la banquise. De fait, l'accélération brutale du recul de la banquise estivale ces trois dernières années, et en particulier le fait que sa surface soit tombée en septembre 2007 bien en-dessous de la barre fatidique des 5 millions de km², est en total désaccord avec les simulations climatiques du dernier rapport du GIEC. Ces modèles actuels simulent de façon satisfaisante l'extension spatiale des glaces de mer et le cycle saisonnier associé, ainsi que les vitesses moyennes de dérive ou les grandes structures caractérisant les mouvements de glace dans l'Arctique comme le gyre de Beaufort, ou encore le courant transpolaire utilisé par Nansen au cours de son épopée et évacuant la glace du bassin arctique vers le sud et le détroit de Fram. Ils sont en revanche incapables de reproduire de manière satisfaisante la déformation de la banquise, et particulièrement l'intermittence temporelle et l'hétérogénéité spatiale associées. Le désaccord s'accroît régulièrement vers les petites échelles de temps et d'espace, devenant ainsi de plus en plus pénalisant avec l'amélioration de la

LA FAILLITE DES MODÈLES.

La dynamique de déformation fluide appliquée à la banquise dans les modèles climatiques actuels néglige les effets de la fracturation sur la fonte de la glace de mer, ce qui explique en grande partie leur incapacité à prévoir la succession de records de fonte observés ces dix dernières années.



résolution de ces modèles. Étant donné les interactions nombreuses et souvent étroites entre banquise et circulation atmosphérique ou océanique, et donc finalement le climat de notre planète, la question de l'importance de ces problèmes vis-à-vis des prévisions climatiques se pose. Les appréciations des différents modèles, bien qu'ils soient fondés sur les mêmes

hypothèses de mécanique fluide pour la banquise, convergent toutes vers la prévision d'une diminution drastique de l'étendue comme de l'épaisseur des glaces de mer dans l'Arctique au cours du XXI^e siècle, au moins en été. En outre, ces prédictions apparaissent comme le prolongement d'une tendance très nette observée depuis une trentaine d'années.

Néanmoins, cette imperfection des modèles n'est probablement pas neutre en ce qui concerne la modification des échanges entre l'océan et l'atmosphère ou la boucle de rétroaction impliquant l'albédo décrite plus haut. On a vu que l'ouverture de fractures, même sur une fraction très faible de la surface englacée, pouvait modifier de manière fondamentale ces échanges. La plupart des modèles climatiques actuels ne prévoient pas de diminution importante de l'étendue de la banquise hivernale au cours de ce siècle, la disparition de la banquise pluriannuelle étant compensée en hiver par un regel accru, ce qui est assez contradictoire avec une diminution déjà significative enregistrée au cours des dernières décennies. Mais une banquise plus jeune, donc moins épaisse,

est certainement plus fragile et donc vraisemblablement caractérisée par une dynamique plus intense favorisant son démantèlement et une accélération de son évacuation vers l'Atlantique Nord même au cœur de l'hiver. C'est d'ailleurs ce que démontre une analyse de l'évolution des vitesses de dérive de la glace au niveau du détroit de Fram et le long des côtes du Groenland au cours des trente dernières années. La fracturation de la banquise renforce donc la boucle de rétroaction positive contrôlant son évolution récente. Ces processus étant mal pris en compte dans les modèles climatiques, cela pourrait expliquer le fait qu'ils sous-estiment systématiquement les bouleversements observés. Tout cela accroît probablement l'incertitude sur la détermination des échéances relatives à la disparition de la banquise pluriannuelle, et suggère une issue beaucoup plus proche que prévue. Il reste bien du travail aux scientifiques auscultant ce fascinant milieu que constitue la banquise, tant au niveau du recueil d'observations de qualité que de la modélisation de son comportement dans la machine climatique.

Mais, de manière assez unique dans le domaine des sciences de la Terre, cet objectif ressemble à une course contre la montre du fait de la quasi-disparition programmée de l'objet étudié, même si quelques « belles » années sont probablement encore devant nous. Quoi qu'il en soit, l'aventure imaginée il y a plus d'un siècle par Fridtjof Nansen de rejoindre à pied ou à ski le pôle Nord, réussie plus récemment par Jean-Louis Étienne, pourrait très bientôt devenir une mission impossible... ■

Écrit avec la collaboration de Pierre Rampal

Pour en savoir plus

- « Recul des banquises et réchauffement climatique », de Jérôme Weiss (*in* « Pour la science » n°54, 26-27, 2007)
- « Arctic Sea Ice Extent Plummets in 2007 », de Julienne Stroeve *et al.* (*in* « EOS », 89 (2), 13-14, 2008)
- « Sea Ice Rheology From In Situ, Satellite and Laboratory Observations: Fracture and Friction », par Jérôme Weiss, Erlend M. Schulson, et Harry L. Stern (*in* « Earth and Planetary Science Letters », 255, 1-8, 2007)

MONTAGNES MINIATURES.
Les crêtes de compression, de quelques mètres de haut, ou hummocks, naissent de l'affrontement de deux plaques de banquise qui se fracturent et se chevauchent comme les plaques de la croûte terrestre.

H. BOURNAUD/TARAEXPEDITIONS.ORG