

de la mer, elle fond ou se détache sous forme d'icebergs. En fonction de l'équilibre entre les flux de sortie et d'entrée, la calotte est stable, elle augmente de volume ou fond au contraire, ce qu'évaluent certains climatologues quand ils modélisent les conséquences du réchauffement climatique.

Les calottes ne fondent pas !

Comment les calottes glaciaires réagissent-elles au changement climatique ? Les modèles annoncent un réchauffement dont les effets varieront d'une région à l'autre, mais tous prédisent

une augmentation de la température aux pôles. Déjà, des mesures de plus en plus nombreuses montrent que l'étendue et l'épaisseur des glaces sur les mers qui entourent l'Arctique diminuent. Elles indiquent aussi que le niveau des océans s'est élevé de 15 centimètres depuis le début du XX^e siècle. Un tiers de cette hausse est dû à la dilatation thermique des eaux. Un autre tiers proviendrait de la fonte des glaciers tempérés. On ignore l'origine du dernier tiers. Proviendrait-il des calottes polaires ?

L'élévation de température de 0,6 °C observée en Antarctique depuis

le début du XX^e siècle a provoqué une augmentation des précipitations de trois à cinq pour cent. Comme il fait froid, la glace ne fond pas, et la quantité de glace déposée fait baisser le niveau de la mer de -0,2 millimètre par an. Au centre du Groenland, le phénomène serait identique ; en revanche, la glace fond sur les côtes. Donc, le réchauffement actuel augmenterait les masses de glace au centre et diminuerait celles sur les côtes. Globalement, le Groenland se déformerait sans pour autant apporter une contribution notable à la variation du niveau des océans.

Les satellites mesurent en direct le déplacement des glaciers

Le glacier Lambert est l'un des plus grands glaciers du monde. Sur la côte, il se jette dans l'Amery, une plate-forme de glace flottante. Ses affluents, Fischer et Mellor, sont aussi d'importants glaciers émissaires, c'est-à-dire des voies rapides d'écoulement de la glace, et leur largeur atteint parfois 80 kilomètres. Ces glaciers s'écoulent le plus souvent dans les vallées présentes dans le socle rocheux. Le radar imageur du satellite européen ERS a fourni des images de ces glaciers.

Le radar embarqué à bord du satellite envoie une onde de fréquence très élevée et mesure le temps qu'elle met pour revenir au satellite après s'être réfléchi sur la surface de la glace. Cette

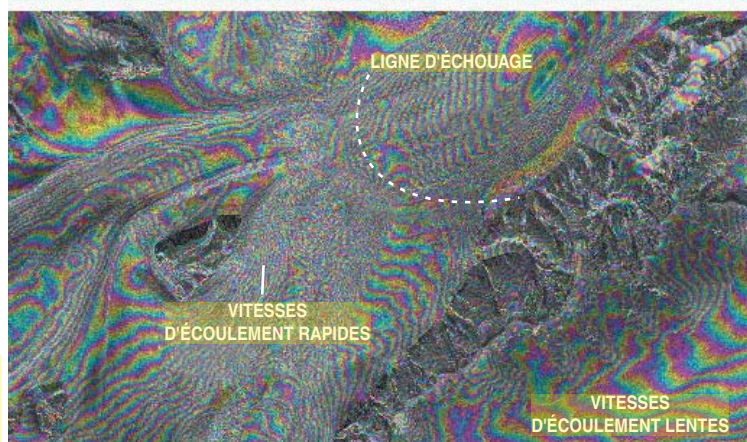
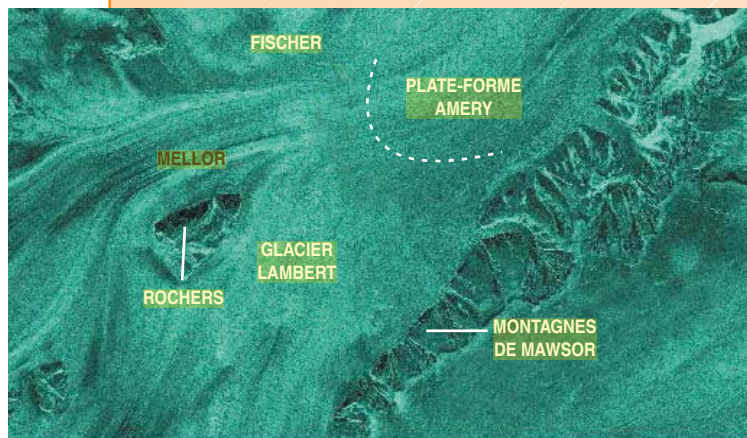
onde balaie la surface du glacier étudié, et la durée du retour varie d'un point à un autre en fonction de l'attitude du point considéré. On obtient ainsi une image (*en haut*) de l'intensité du signal réfléchi et de la phase liée au relief local.

Le radar fournit aussi les vitesses d'écoulement grâce à l'interféromètre, qui mesure le déplacement relatif du glacier vu à deux moments différents. Une première image est prise, puis une seconde, 24 heures plus tard. Si la surface de la glace n'était pas modifiée, alors les deux images seraient identiques. En réalité, la glace s'écoule, et sa surface change. Les durées que l'onde met à rallier le satellite sont différentes d'un jour à l'autre pour tous les points sauf les rochers. On combine les deux images de phases prises à 24 heures d'intervalle pour former un interférogramme (*en bas*). On attribue des couleurs aux valeurs des différences mesurées pour chacun des points, et des franges apparaissent sur l'image. Le déplacement d'un point entre les deux prises de vue se mesure en comptant les franges. Chaque frange correspond à un déplacement relatif de 28 millimètres. Plus elles sont rapprochées, plus le déplacement relatif est important. On voit les glaciers émissaires apparaître et l'on mesure leurs vitesses d'écoulement.

Le radar permet aussi de repérer facilement la ligne d'échouage (*en pointillés*), à partir de laquelle la glace ne repose plus sur le socle terrestre, mais se met à flotter sur l'océan. Cette plate-forme de glace flottante (Amery), d'une épaisseur de plusieurs centaines de mètres, est en effet soumise à la marée. Elle monte et descend avec une amplitude atteignant 1,5 mètre. La ligne d'échouage définit la frontière de la calotte polaire (la glace flottante ne fait plus partie de la calotte). Elle constitue un bon indicateur des variations climatiques : dès que le niveau moyen des océans monte, la ligne recule vers le continent, et la masse de la calotte glaciaire diminue. Les glaciologues suivent les fluctuations de cette ligne, excellent marqueur de la dynamique des calottes.

Benoît LEGRESY, Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales à Toulouse (CNRS-CNES).

Le glacier Lambert vu par le radiomètre du satellite ERS. Une seule image (*en haut*) montre le relief. Deux images prises à un jour d'intervalle forment un interférogramme (*en bas*). Le nombre de franges est proportionnel à la vitesse d'écoulement du glacier. Les franges entre le glacier Lambert et les glaciers voisins sont très rapprochées, ainsi que les zones entre le glacier et les escarpements rocheux : le glacier Lambert s'écoule à plus de 600 mètres par an. En revanche, la glace à côté du glacier s'écoule de façon lente et régulière (quelques mètres par an).



Comme nous l'avons déjà dit, la glace s'écoule plus vite quand la température augmente, mais les effets d'une variation de température se répercutent plusieurs dizaines de milliers d'années après. Les calottes subissent encore les effets du dernier réchauffement du climat qui a commencé il y a 10 000 ans. Ainsi, l'accumulation de la neige au centre dépend des températures «chaudes» actuelles et la neige a tendance à s'accumuler de façon importante. En revanche, les vitesses d'écoulement liées aux couches plus profondes ont encore la température de la dernière période glaciaire : l'écoulement est plutôt lent. La neige s'accumule donc plus vite qu'elle ne s'écoule, et le centre continue toujours à s'épaissir.

Le mystère de l'eau manquante

Enfin, le dernier intervenant dans le réchauffement climatique est l'océan. Lorsque la glace arrive du continent sur la côte, soit elle est suffisamment épaisse pour reposer sur le socle, soit elle se met à flotter. Quand l'océan est peu profond, la glace «avance», sinon elle flotte et forme des plates-formes de glace flottantes (les «ice-shelves»). Ainsi, en Antarctique, les trois principales baies sont occupées par des plates-formes de glace (Ross, Fichner-Ronne et Amery). Ces plates-formes sont importantes dans le fonctionnement des calottes, car elles limitent l'écoulement de la glace en amont de la calotte. Quand une baisse du niveau des mers survient, elles se posent sur le fond. L'écoulement de la glace posée étant plus lent que celui de la glace flottante, la calotte de glace s'épaissit. Inversement, quand le niveau de la mer monte, les glaces posées sur le socle se décollent du fond,

et les plates-formes de glace s'étendent davantage. Cela a des répercussions jusqu'à l'intérieur de la calotte, car, d'une part, les glaces flottantes influent sur l'écoulement de la glace du continent, mais d'autre part, l'eau qui s'infiltre sous les plates-formes les réchauffe probablement et accélère la fonte. Aujourd'hui, les glaciologues s'accordent pour reconnaître que les variations du niveau des mers gouvernent le volume de l'Antarctique à l'échelle de plusieurs milliers d'années.

Toutes les mesures par satellite confirment ces scénarios. Au Groenland, le centre s'élève de 10 centimètres par an (il neige plus) et les bords diminuent du même ordre de grandeur (ils fondent). Le réchauffement climatique actuel domine la dynamique du Groenland, mais ne contribue pas à l'élévation du niveau des mers. Quant à l'Antarctique, l'accélération des vitesses des glaciers émissaires se ferait ressentir à l'heure actuelle à l'intérieur du continent, mais resterait modérée. Elle proviendrait du dernier réchauffement climatique, et non de celui que nous vivons aujourd'hui.

Actuellement, ni les modèles ni les observations satellites n'indiquent que les calottes polaires contribuent à l'élévation du niveau de la mer. Toutefois, cette constatation, partiellement rassurante, n'est pas satisfaisante, puisque l'on ignore toujours l'origine du tiers du volume d'eau qui est venu gonfler les océans. D'où vient cette eau ? Cette question préoccupe les climatologues, les océanographes et les glaciologues. Grâce aux observations récentes, on a découvert que les calottes polaires étaient dynamiques, mais sans apporter la preuve qu'elles fondent : l'origine de «l'eau manquante» reste à élucider.

Frédérique RÉMY est directeur de recherches au Laboratoire d'études en géophysique et en océanographie spatiale (LEGOS) (CNRS-CNES), à Toulouse. Catherine RITZ est chargée de recherches au Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'Environnement (LGGE) (CNRS) à Grenoble.

Karl THOMAS, *Modifions-nous le climat ?*, in *Pour la Science* n° 267, janvier 2000.

C. RITZ, A. FABRE et A. LETRÉGUILLY, *Sensitivity of a Greenland ice sheet model to ice flow and ablation parameters : consequences on the evolution through the last climatic cycle*, in *Climate Dynamics*, vol. 13, pp.11-24, 1997.

J.R. PETIT et al., *Climate and Atmospheric History of the past 420 000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica*, in *Nature*, vol. 399, pp. 429-436, 1999.

F. RÉMY, L. TESTUT, B. LEGRESY, *Topographie des calottes polaires par altimétrie satellite*, in *comptes rendus de l'Académie des Sciences*, n° 333, pp. 457-467, 2000.

Alley RICHARD, *Le climat dans les glaces*, in *Pour la Science*, n° 246, avril 1998.

Les hallucinations

ERICH KASTEN

Des hallucinations surviennent lors de certaines psychoses, mais aussi lors de diverses pathologies, voire en l'absence de maladie. Elles semblent résulter d'une hyperactivation de certaines zones cérébrales qui ne reçoivent plus assez d'informations de l'extérieur.

Quelque temps après son accident vasculaire cérébral, Peter N., 56 ans, s'inquiéta, car il voyait sans cesse danser devant ses yeux des points lumineux colorés et des images abstraites. Après avoir longuement hésité, il osa en parler à ses proches et à ses médecins.

Les médecins et les psychologues diagnostiquent souvent trop hâtivement une forme de folie, notamment une schizophrénie, face à la description de telles perceptions imaginaires. Toutefois, nombreuses sont les circonstances où le cerveau peut produire des illusions visuelles ou auditives : les migraines, les crises d'épilepsie, la maladie d'Alzheimer ou d'autres maladies neurodégénératives, l'abus de certains médicaments, ainsi que certaines lésions cérébrales. N'importe qui peut même percevoir de telles visions irréelles sombres ou lumineuses en regardant pendant quelques minutes un point fixe. Après de longues périodes d'isolement, certains spéléologues ou explorateurs des immensités glacées des régions polaires finissent par «voir» des gens ou par «entendre» des voix.

Que se passe-t-il alors dans le cerveau? Comment engendre-t-il des images qui n'existent pas? Les mécanismes neuropsychologiques des hallucinations ne sont pas encore tous élucidés, mais un modèle global du phénomène commence à se dessiner.

Ce n'est qu'après avoir soigné des personnes victimes de lésions, de tumeurs ou d'accidents vasculaires cérébraux que j'ai réalisé que les hallucinations ne sont pas nécessairement le signe d'une maladie mentale. Ces personnes souffrent de troubles de la vision, mais ne présentent aucun signe d'une maladie psychique ; beaucoup racontent des jeux de lumière ou de couleurs, d'autres des images qui bougent, ce qui les gêne pour se concentrer sur autre chose.

L'un de ces patients, que j'appelle ici Peter N., est devenu partiellement aveugle après son accident vasculaire cérébral : le quart supérieur droit de son champ visuel droit et gauche était devenu aveugle. À l'intérieur de ce champ de vision aveugle, il «voyait», toujours au même endroit, des hallucinations qu'il décrivait comme des «tableaux de Picasso»,

des images tantôt concrètes, tantôt abstraites. Sur ce fond apparaissaient des objets que Peter N. avait récemment aperçus dans la partie centrale, intacte, de son champ visuel. C'était surtout les objets aux couleurs très vives qui réapparaissaient dans le champ visuel aveugle, et les images bougeaient et se modifiaient en permanence.

Plusieurs causes pour les mêmes visions

Je me suis d'abord demandé si les visions qui accompagnent les lésions cérébrales et les psychoses résultent des mêmes mécanismes neuronaux. Les hallucinations apparaissent dans des circonstances variées et sous des formes diverses. Elles peuvent toucher tous les sens : elles ne se manifestent pas seulement sous forme visuelle ou sonore, mais peuvent aussi toucher l'odorat, le goût ou les sensations tactiles.

Pour pouvoir identifier d'éventuels points communs dans tous ces phénomènes, j'utiliserai le mot *hallucination* dans un sens large. J'y inclus des objets imaginaires, des jeux de lumière et des structures irréelles. De surcroît, je me limiterai aux phénomènes visuels. Notons que l'on devra éviter de confondre les hallucinations et les illusions optiques qui sont des tromperies des sens où des signaux visuels sont effectivement enregistrés par l'œil, mais mal interprétés par le cerveau.

La schizophrénie se prête particulièrement bien à la description des hallucinations, puisque les «fausses perceptions» en constituent l'un des principaux symptômes. Toutefois, alors que les personnes qui ont une lésion cérébrale savent généralement que leurs visions sont sans fondement, ce n'est pas le cas des schizophrènes, pour qui ces visions correspondent à la cruelle réalité. Elles provoquent souvent des crises d'angoisse, car les personnes schizophrènes ne peuvent se les expliquer.

On trouve souvent la description de telles visions dans les scènes d'horreur de nombreux romans, mais la réalité est souvent plus terrifiante

