

# Glaciers et climat: une relation étroite!

M-A Mélières, (comité scientifique de la FFCAM)

Le bas du glacier Meren, dans le massif du Puncak Jaya, Nouvelle Guinée (mai 2000).  
© M-A Mélières



Le glacier Zongo (Bolivie) en 2005, année avec El Niño modéré. Le glacier apparaît en glace vive jusque vers 5300 m.  
© IRD- B. Francou

fond... avec un recul moyen d'année en année du front du glacier! En Europe, dans les Alpes: encore une histoire semblable avec un recul quasi permanent des glaciers! Même histoire pour trois régions, à trois latitudes différentes, qui, avec trois climats très différents, n'ont guère de point commun! Dans les Alpes, hiver avec chutes de neige et été avec chaleur alternent pour accumuler la neige et faire fondre la glace. Dans les Andes tropicales, les alizés qui soufflent du bassin amazonien amènent nuages et neige, et l'ensoleillement par ciel dégagé est tellement intense que la glace se sublime, donnant naissance aux pénitents. Périodiquement, entre deux et sept ans, les alizés faiblissent, engendrant une forte perturbation du climat sur toute la bande tropicale du Pacifique: ce sont les années El Niño. Les glaciers andins ne sont pas épargnés et ces années-là, leur alimentation en neige diminue fortement. Ainsi dans cette région de la planète, les alternances années El Niño/la Niña (le phénomène opposé où les alizés soufflent plus fort) modulent fortement la vie du glacier. A l'équateur, au point culminant de l'île de Nouvelle Guinée, peu ou pas de saisons, la journée voit à la fois des chutes de neige et de la fusion. Pourquoi alors une réponse des glaciers qui semble commune à l'échelle de la planète? Quel est le rôle de l'homme? Que réserve l'avenir? Tout d'abord, arrêtons-nous un instant sur la réponse d'un glacier aux fluctuations du climat.

**M**ai 2000, dans l'île de Nouvelle Guinée: la montée au glacier Meren, en face de la pyramide du Carstensz dans le massif du Puncak Jaya, ce point culminant de l'Indonésie et de l'Océanie. Il faut faire vite car vers 9 heures le brouillard quotidien va assaillir sommets et paysage. Une impression fabuleuse: les traces toutes fraîches d'un gla-

cier en pleine régression sur des centaines de mètres. Enfin le bas du glacier apparaît, avec ses formes de croupes arrondies: la glace s'égoutte littéralement (photo 1)! Novembre 2007, dans les Andes tropicales, la montée au glacier du Zongo (Cordillère Royale - Bolivie): spectacle majestueux, royal (photo 2)! Une neige étincelante, un ciel bleu pro-

Celle-ci, qui est loin d'être simple, est détaillée dans l'encart ci-contre: c'est l'évolution de la masse du glacier qui est le plus à même d'indiquer l'évolution du climat, et non le mouvement de son front. L'altitude à laquelle le glacier est en équilibre (ou LEA, Ligne d'Equilibre en Altitude, voir l'encadré) sépare donc la zone d'accumulation du glacier de la zone d'ablation. Elle est fortement dépendante du climat. Quelle est actuellement la valeur de la LEA? Elle varie selon les différentes régions de la Terre, étant particulièrement élevée dans les régions chaudes (équateur, tropiques) et s'abaissant progressivement vers les pôles.

## La même histoire

A l'équateur, en Nouvelle Guinée, elle est située vers 5000 m. Le sommet du plus haut massif de l'île, le Carstensz, culmine à 4884 m. Tous les glaciers se trouvent donc en zone d'ablation et les glaciers de cette région, qui au début du siècle occupaient des massifs convoités par les alpinistes, ont régressé à une allure impressionnante dans les dernières décennies: ils sont tous condamnés à disparaître très prochainement, et avec eux les archives enfouies dans la texture de la glace! Dans les Andes tropicales, en Bolivie, la LEA s'établit en moyenne aux alentours de 5200m et les hauts sommets qui s'élèvent à plus de 6000m permettent encore à une zone d'accumulation de subsister. Dans les Alpes et les Pyrénées, elle est située en moyenne autour de 2900 - 3000 m. Ceci laisse disponible une zone d'accumulation dans les Alpes où les hauts sommets culminent à plus de 3000m, mais pas dans les Pyrénées dont les plus hauts sommets avoisinent les 3000m d'altitude. Dans cette chaîne de montagnes les glaciers reculent inexorablement: leur surface de plus de 40 km<sup>2</sup> au début du siècle n'occupe plus que 5 km<sup>2</sup> cent ans plus tard. Dans les Alpes, le bilan de masse de certains glaciers a été établi au cours du XX<sup>e</sup>

## LA RÉPONSE DU GLACIER AU CLIMAT

Il est facile de constater de visu, au cours des années, si un glacier avance ou recule. Mais quels paramètres, précisément, caractérisent son évolution, sa relation avec le climat en cours? La position de son front? L'extension de sa surface? Ces témoignages sont certes précieux, mais ces paramètres-là ne sont pas reliés de façon directe à l'évolution du climat; ils dépendent en particulier de la forme du glacier, et de l'histoire passée du climat.

Contrairement à l'englacement (prise en glace à la surface des lacs) et à l'enneigement, la dynamique des glaciers n'est pas une réponse directe au climat de l'année. Alors que les premiers, chaque année, partent d'une référence immuable (pas de glace, pas de neige) et sont donc tributaires uniquement des conditions climatiques de l'année, la variation de longueur des glaciers, elle, intègre le climat passé.

Un paramètre beaucoup plus significatif, directement relié au climat de l'année, est le bilan annuel de masse d'un glacier, c'est-à-dire la variation de sa masse totale: c'est la différence entre la quantité de neige reçue par le glacier au cours de l'année (neige qui se transforme en glace) et la quantité de glace perdue (par fonte et par sublimation). La mesure de ce bilan est beaucoup plus longue et complexe à réaliser que celle de la position du front; c'est pourquoi c'est une donnée disponible au niveau mondial sur peu de glaciers et sur une période passée relativement courte.

## Ligne d'équilibre en altitude

Un glacier peut être caractérisé par une ligne fictive appelée Ligne d'Equilibre en Altitude (LEA) qui sépare le glacier en deux régions. La zone supérieure appelée zone d'accumulation, située au-dessus de la LEA, est la région où en moyenne sur l'année la neige s'accumule sur le glacier; la zone inférieure, zone d'ablation, est celle où, en moyenne annuelle, la glace disparaît.

La position du front du glacier reste stable lorsque la masse de glace qui s'accumule annuellement est compensée par celle qui disparaît: le bilan de masse est nul. Malgré le mouvement lent et perpétuel de la glace qui s'écoule du haut du glacier vers le bas et qui donne lieu aux chutes de séracs, la quantité totale de glace reste alors constante et le glacier garde le même volume: le front est stationnaire, le glacier est à l'équilibre.

## Bilan de masse

Quand un changement de climat survient, par exemple un réchauffement, le glacier évolue vers un nouvel équilibre. Imaginons que le réchauffement soit immédiat: pas de période de transition durant laquelle le climat se réchauffe progressivement.

L'élévation de température va immédiatement entraîner une remontée de la LEA car l'altitude où la glace fond sera plus élevée (un ordre de grandeur est donné par le gradient de température avec l'altitude qui est de 1°C pour 150 mètres).

La superficie de la zone d'accumulation diminue, alors que celle de la zone d'ablation augmente: le glacier perd plus de glace qu'il n'en gagne (le bilan de masse du glacier devient négatif) et il recule. Au fur et à mesure de la remontée du front, d'année en année, la superficie de la zone d'ablation va progressivement diminuer: la quantité de glace qui disparaît en été va finir à nouveau par équilibrer la quantité de glace accumulée en hiver au-dessus de la nouvelle LEA: le bilan annuel sera à nouveau nul et la position du front du glacier redeviendra stable. Ce réajustement au nouveau climat a pris du temps, de nombreuses années, parfois des décennies. L'évolution du front d'un glacier n'est donc pas la réponse pertinente et immédiate à un changement climatique.

## LES GAZ À EFFET DE SERRE

Les gaz à effet de serre ont la propriété d'absorber fortement le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, sans perturber le rayonnement solaire qui chauffe cette surface. Les deux principaux gaz présents naturellement dans l'atmosphère sont la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Bien qu'ils ne représentent à eux deux que 0,3% de la masse de l'atmosphère, ils jouent un rôle exceptionnel pour le climat de la Terre : ces deux gaz agissent comme une couverture et réchauffent fortement cette surface, élevant sa température de plusieurs dizaines de degrés.

Depuis le début de la révolution industrielle (vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle) la quantité de CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère, ainsi que celle d'autres gaz à effet de serre, augmente régulièrement par suite de l'activité humaine : elle dépasse actuellement de 30% le niveau le plus élevé jamais atteint depuis 800 000 ans (ce que nous raconte l'histoire des bulles d'air incluses dans les glaces de l'Antarctique) et vraisemblablement bien avant. La continuation des émissions (en particulier celle du CO<sub>2</sub> par suite de l'utilisation de combustibles fossiles et de la déforestation) au cours du XXI<sup>e</sup> siècle peut conduire, selon les choix faits par la société, jusqu'à multiplier par plus de 3, vers 2100, la quantité de gaz à effet de serre présente naturellement dans l'atmosphère, élevant la température moyenne de la surface de la Terre dans une fourchette allant de 2 à 6 °C (le réchauffement vers les pôles étant nettement plus accentué). Les archives paléo-climatiques nous enseignent qu'un réchauffement moyen supérieur à 2 °C n'a pas eu lieu depuis des millions d'années.



Le glacier de St Sorlin, massif des Grandes Rousses, Oisans (août 2006)  
© D. Six

res décennies ? Le recul généralisé des glaciers au cours du XX<sup>e</sup> siècle a en fait débuté antérieurement au milieu du XIX<sup>e</sup> dans les Alpes ; dans d'autres régions, telles que les Andes tropicales, le recul se dessine dès le XVIII<sup>e</sup> siècle. Ce recul a marqué la fin du Petit Âge de Glace qui fut une période marquée par une série de « coups de froid » à l'échelle mondiale à partir de la fin du Moyen Âge : le Soleil fluctue légèrement, et, durant certaines époques, il délivre un peu moins de chaleur à la Terre.

### Le réchauffement

Le recul observé depuis le XIX<sup>e</sup> siècle s'inscrit donc dans une évolution naturelle du climat qui a mis fin au Petit Âge de Glace (PAG). Il ne peut être attribué à l'activité humaine, car la quantité de gaz à effet de serre émis par l'homme au cours du XIX<sup>e</sup> siècle (voir encadré - Les gaz à effet de serre) était alors trop faible pour être responsable d'un tel recul. La dynamique des glaciers, qui nécessite un certain laps de temps pour que les glaciers arrivent à un nouvel équilibre après un changement de climat explique cette régression en marche depuis la fin du PAG. Par contre, la forte accélération du recul des glaciers qui se dessine au cours de la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, à partir des années 80 apparaît, elle, comme la signature de l'impact du réchauffement climatique qui s'est manifesté de façon généralisée vers la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Ce réchauffement est parfaitement documenté par le Rapport du GIEC 2007 (voir

encart 3 : le GIEC). Sur les dernières décennies, la température moyenne a augmenté de près de 1 °C, s'élevant entre 1 et 2 °C sur les continents des moyennes latitudes et plus encore vers les terres de l'Arctique. L'ensemble des indicateurs et des analyses convergent pour attribuer ce réchauffement récent à l'augmentation des gaz à effet de serre émis par l'homme car sur cette période, le Soleil délivre la même quantité d'énergie. Qu'advient-il de nos glaciers au cours du XXI<sup>e</sup> siècle ? L'émission continue de gaz à effet de serre par l'homme conduit à une accumulation de ces gaz dans l'atmosphère... avec pour conséquence un réchauffement continu. Les modélisations du climat indiquent un réchauffement à venir plus ou moins important selon les quantités de gaz émises, entraînant, entre autres, un impact sur les glaciers que les glaciologues ont modélisé. Des simulations ont été faites sur le glacier de Saint-Sorlin (photo 3) dans le cadre d'un réchauffement de 2 à 2,5 °C de la température moyenne annuelle en France en 2100 par E. Le Meur et collaborateurs en 2007

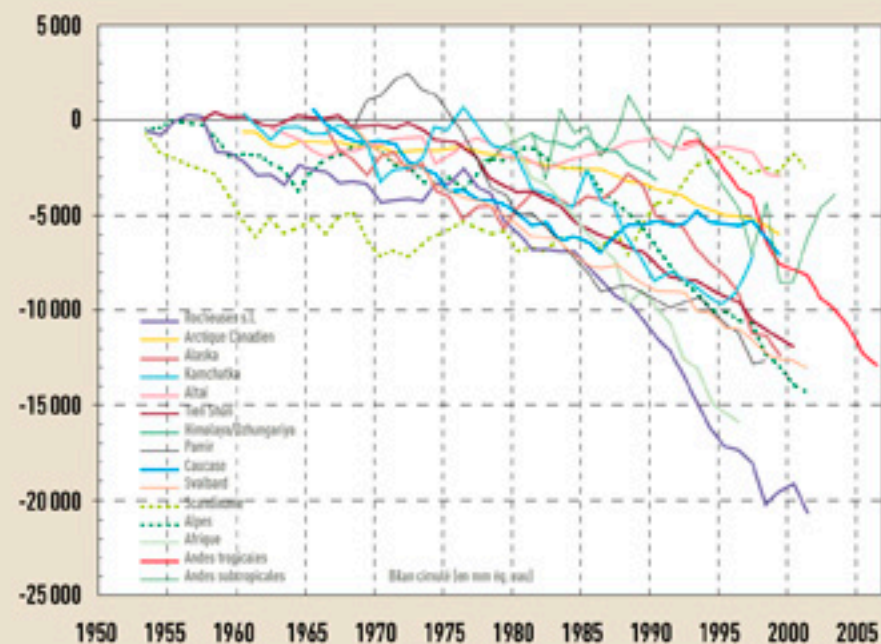


Figure 2 : Bilans de masse cumulés moyens de 75 glaciers de montagne provenant de 15 régions du monde sur lesquelles il existe une information régulière. Malgré la présence de larges fluctuations, une nette tendance du recul des glaciers se dégage, qui s'accroît aux alentours des années 70-80.  
© : B. Francou et C. Vincent, 2007. D'après Ohmura, 2004, modifié.

siècle (voir figure 1-a). L'évolution de ce bilan, cumulé d'année en année, représente grosso modo les variations de l'épaisseur moyenne du glacier. Que constate-t-on ? Tout d'abord une signature commune à la région alpine, traduisant un climat commun sur les Alpes (figure 1-b). Les glaciers reculent depuis 1950,

avec une nette accélération de ce recul depuis les années 80. Un même exercice a été tenté à une toute autre échelle. La figure 2 rassemble sur 15 régions du monde les informations obtenues sur les bilans de masse cumulés sur 75 glaciers depuis 1953. On retrouve la même tendance : la diminution des glaciers est quasi générale et s'accroît depuis les années 80. Quelle relation avec le réchauffement qui touche l'ensemble de la planète depuis les derniè-

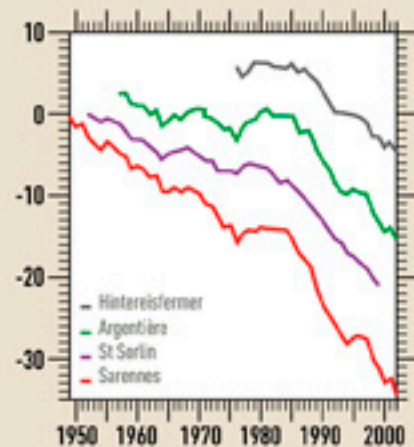


Fig. 1 a - Bilans de masse cumulés de 5 glaciers des Alpes françaises, autrichiennes et suisses depuis 1950 : cette grandeur représente la variation de l'épaisseur moyenne du glacier. Par exemple entre 1985 et 2002, le glacier de St Sorlin a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 15 mètres en moyenne sur l'ensemble de sa surface.

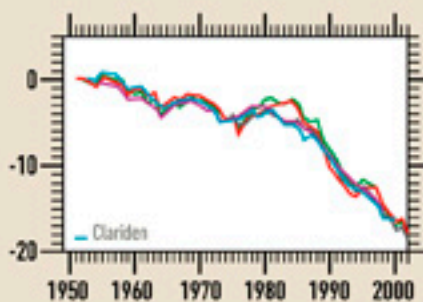


Fig. 1 b - Bilans de masse cumulés, centrés et ajustés sur la tendance de St Sorlin. Le fait que ces courbes se superposent indique un signal climatique commun à l'échelle des Alpes. La régression des glaciers s'accroît aux alentours des années 80. © : Vincent et al., 2004 (dans B. Francou et C. Vincent, 2007)

(EPSL, 261, 367-374). Les résultats montrent que le glacier aura quasiment disparu dans un siècle, le glacier culminant à 3300 m se trouvant alors entièrement situé en zone d'ablation.

### En conclusion

L'évolution des glaciers est le résultat de nombreux mécanismes, qui intègrent les variations récentes du climat, le temps que le glacier atteigne son nouvel équilibre. Elle intègre à la fois l'évolution des chutes de neige et celle de la température.

A l'heure actuelle l'évolution observée montre, du pôle nord au pôle sud, l'effet du réchauffement en cours qui s'est clairement manifesté dans la deuxième partie du XX<sup>e</sup> siècle.

Ce réchauffement, entraînant une diminution de la glace stockée au cours de l'année, l'emporte de façon quasi générale sur une éventuelle augmentation des chutes de neige. Le cours du XXI<sup>e</sup> siècle continuera à voir l'effet de ce réchauffement, plus ou moins prononcé selon la volonté de l'homme de réduire plus ou moins ses émissions de gaz à effet de serre.

Pour en savoir plus : « Les glaciers à l'épreuve du climat » par B. Francou et C. Vincent : IRD Éditions - Belin - Paris 2007

Merci à François Vaila, président du comité scientifique pour sa collaboration

### Le GIEC

Le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, ou IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/>) est une organisation qui a été mise en place en 1988, par l'Organisation Météorologique Mondiale et par le Programme pour l'Environnement des Nations Unies. Ce groupe rassemble des milliers de scientifiques appartenant à des dizaines de disciplines différentes. Il a pour but « d'expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le risque de changement climatique provoqué par l'homme ». Le dernier rapport (2007) documente en particulier le caractère mondial du réchauffement des dernières décennies et analyse ses causes possibles. Il l'attribue avec une très forte probabilité à l'augmentation, entraînée par l'activité humaine, des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La continuation de ces émissions au cours du XXI<sup>e</sup> siècle entraînera inexorablement une augmentation de température. Le GIEC présente les résultats des modélisations sur le réchauffement qui en résulteraient, en fonction des différents scénarios d'émission : ceux-ci dépendent de l'évolution de la consommation et de la démographie. La température, moyennée à la surface de la planète, s'élèverait dans une fourchette de +2°C à +6°C en 2100, l'augmentation étant plus importante quand on se rapproche des pôles. Or, comme nous l'avons signalé dans l'encart 2, la reconstitution des climats passés nous enseigne qu'un réchauffement moyen supérieur à 2°C n'a pas eu lieu depuis plusieurs millions d'années.