

Ouvrage coordonné par
Yves Peysson

LES GLACIERS ALPINS

UNE HISTOIRE EN MOUVEMENT

INTRODUCTION

Les glaciers alpins constituent un élément essentiel du paysage montagnard à travers tous les massifs du monde. Qu'ils soient perchés sur les plus hauts sommets ou nichés au fond de vallées encaissées, ils constituent un véritable joyau, objet de fascination pour l'homme. Si par le passé, cet univers étrange tant par sa couleur que sa forme était source d'effroi – les craquements sourds venant des profondeurs faisant croire à l'existence d'esprits mystérieux – il n'en est rien aujourd'hui, à voir les cohortes humaines qui se précipitent sur les balcons de la Mer de Glace ou au sommet de l'Aiguille du Midi pour admirer la puissance des éléments que symbolisent ces gigantesques cascades d'un blanc parfois immaculé, torrents figés par le froid. Ce spectacle naturel, mis en scène quotidiennement par la magie des éclairages et les caprices de la météorologie est devenu au fil du temps un patrimoine inestimable, dont on mesure peu à peu la fragilité. Mis en scène dès la fin du XVIII^e siècle par les peintres romantiques, les glaciers alpins ont progressivement dévoilé leurs secrets aux scientifiques. Sculpteurs de paysages, mais aussi archivistes de temps immémoriaux, ceux-ci ont révélé leurs exceptionnelles richesses à l'instar des immenses calottes glaciaires qui couvrent les pôles. Mais par leurs latitudes, ces objets sont bien plus proches des hommes, et de ce fait interagissent avec eux dans un quotidien qui est pour le meilleur mais parfois le pire. Réserves d'eau douce hautement stratégiques, congélateurs naturels indispensables à la chaîne alimentaire du froid, lieux de loisirs – ski et alpinisme – le rôle économique des glaciers alpins, source de richesses, est souvent bien plus important qu'on ne l'imagine de prime abord. Mais les glaciers alpins sont aussi à l'origine de terribles catastrophes. Si les rares poussées glaciaires observées au cours des temps historiques récents ont parfois produit des éboulements de glace ravageant quelques surfaces agricoles, c'est la fonte qui est à l'origine des drames les plus spectaculaires. Rupture de poches d'eau, torrents de boue, en quelques secondes le paysage peut être métamorphosé par des événements cataclysmiques, et la vie des hommes en être bouleversée parfois durablement. Connaître ce milieu est donc un pas pour mieux l'appivoiser et se prémunir de ses fureurs. Sur le terrain, les spécialistes ont dû développer des techniques originales pour mesurer les volumes glaciaires en jeu, estimer les épaisseurs et les flux, et comprendre des phénomènes physiques spécifiques du milieu glaciaire. Des observations de terrain et des essais de laboratoire ont permis de mieux comprendre aussi la métamorphose de la neige en glace, et le rôle complexe de l'air et de l'eau mais aussi de la nature de la roche environnante dans la construction de ces édifices gelés. L'accumulation des mesures aux quatre coins du globe a permis de cerner peu à peu la fragilité de cet univers, sujet par nature à de multiples variations. Avec la convergence des différentes sciences mises en jeu, on a pu remonter le temps, identifier l'existence de grands mais aussi de petits cycles, alternances successives de refroidissements et réchauffements de l'atmosphère. La dimension apparemment

intemporelle des glaciers alpins s'est ainsi profondément transformée, laissant place à une vision évolutive, au même titre que la grande histoire des êtres vivants. Alors, de manière logique, la question se pose du devenir des glaciers, l'homme ayant cette faculté et ce besoin uniques de vouloir perpétuellement interroger le présent pour mieux se projeter dans l'avenir ? C'est ainsi que la climatologie a pris le relais de la météorologie pour tracer les perspectives des glaciers alpins, dans le contexte particulièrement préoccupant du réchauffement global de la planète, que son origine soit naturelle ou anthropique. On découvre ainsi de nouvelles facettes de ce milieu hors du commun, et les glaciers ne cessent de nous fasciner un peu plus, chaque fois que la connaissance progresse. Quels glaciers pour nos petits-enfants ? On en arrive à se poser cette question d'apparence incongrue, alors que voici cinquante ans encore, cet univers semblait faire partie de manière immuable de notre décor. Peut-on imaginer le Mont-Blanc sans sa calotte immaculée ? Que vont devenir les fleuves de l'Himalaya sans les puissants glaciers qui les alimentent ? Autant d'interrogations qui nous amènent à lever le voile sur ce monde féérique, afin de mieux en apprécier la richesse.

Yves Peysson,
Président du Comité Scientifique de la FFCAM,
ancien Président du G.H.M.



Nevado Sajama, point culminant de la Bolivie. Cliché Y. Peysson

L'EAU, LA NEIGE ET LA GLACE : HISTOIRE D'UNE MÉTAMORPHOSE

La transformation de la neige en glace est un processus qui prend son origine avec l'accumulation progressive de la neige sur les montagnes de haute altitude, d'une année sur l'autre. Au cours du temps, la fine neige froide d'hiver se transforme en neige de printemps à gros grains. Sur les glaciers, la ligne de névé, la mythique ligne des « neiges éternelles », s'établit vers 3000 mètres dans les Alpes, en fin d'été¹.



Vue aérienne du site du refuge et de l'observatoire Vallot entre le col du Dôme et le sommet du Mont-Blanc : zones de névé et glacier froids, conditions requises pour un bon archivage des couches de neige successives. Cliché L. Reynaud

Au-dessus d'une altitude voisine de 4000 mètres, le processus de fonte est en revanche exceptionnel, car il est rare que l'isotherme zéro puisse remonter durablement à de telles altitudes, mis à part quelques étés atypiques comme celui de 2003. À titre indicatif, la température moyenne annuelle au sommet du Mont-Blanc, qui culmine à 4807 mètres, est de l'ordre de -15°C à 10 mètres de profondeur dans le névé. Mais à plus basse altitude, sous le refuge et l'observatoire Vallot au col du Dôme, la température remonte déjà à -11°C tandis que l'accumulation de neige est également répartie entre hiver et été, celle-ci pouvant correspondre à une hauteur de précipitation annuelle de l'ordre de 4 mètres d'eau de précipitations pour les endroits les plus favorisés, en comptant les précipitations directes mais aussi les effets du transport éolien.

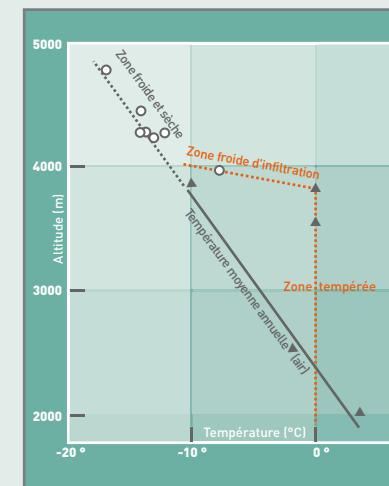
Dans ces conditions où la neige est entièrement froide et sèche, le passage de la neige à la glace ne se fait que vers 60 mètres de profondeur, les cristaux s'agglomérant alors par frittage. Ce processus est analogue à celui utilisé par l'industrie pour fabriquer des objets métalliques solides à partir de poudres sous pression. Les conditions dans lesquelles la glace prend naissance sur les flancs du Mont-Blanc

sont donc très voisines de celles qui règnent au centre des calottes froides du Groenland et de l'Antarctique, la principale différence provenant cependant de l'ampleur des précipitations.

Vers 3500 mètres d'altitude, au niveau correspondant aux zones d'accumulation, la précipitation neigeuse est très importante, comme dans l'ensemble des Alpes, puisqu'elle atteint en moyenne 2,5 mètres d'eau/an. À titre comparatif, l'accumulation est déjà dix fois moindre au centre du Groenland dont la calotte s'étend sur une surface voisine de quatre fois la France et elle n'est plus que de 3 cm/an, soit 100 fois moins, sur le vaste plateau antarctique qui occupe un espace grand comme vingt-sept fois celui de notre hexagone.

Étant bien plus arrosé, le temps de renouvellement de la glace est donc beaucoup plus rapide pour un glacier alpin que pour un glacier de calotte polaire. Ainsi, au col du Dôme, les récents carottages qui ont permis d'explorer une épaisseur de glace de l'ordre de 140 à 160 mètres ne permettent-ils de remonter qu'à des archives du climat datant d'un peu plus d'un siècle. Ce chiffre est à comparer aux 800 000 ans d'archives obtenues grâce au carottage EPICA effectué par une équipe franco-italienne en 2005 au Dôme Concordia dans la région Est de l'Antarctique, où une épaisseur de glace de 3270 mètres a été explorée. Outre le faible niveau des précipitations, la température moyenne dépasse -54°C ! Il y fait donc bien plus froid. Même si les archives climatiques obtenues

avec les carottages effectués sur les glaciers alpins ne permettent de remonter qu'une brève période de l'histoire du climat, elles sont néanmoins d'une grande richesse, ouvrant à la connaissance le détail de la composition de l'atmosphère sur la période cruciale du développement industriel depuis le milieu du XIX^e siècle. C'est la raison pour laquelle plusieurs programmes internationaux de carottage se déroulent régulièrement sur le toit de l'Europe, tout comme au Col Gniffetti au Mont Rose, entre la Suisse et l'Italie, ce secteur étant la seconde zone la plus favorable pour un échantillonnage d'altitude.



Alors qu'au-dessus de 4000 mètres d'altitude, la température moyenne dans le névé décroît en fonction de l'épaisseur atteinte à raison de $0,6^{\circ}\text{C}$ tous les 100 mètres, l'apparition d'une fusion en surface du névé fait disparaître rapidement le froid stocké en hiver. Ainsi, au-dessous de 3800 mètres d'altitude, la glace ne se forme plus qu'à 0°C . (D'après M. Pourchet, 1983, La Houille Blanche 5/6)

Au col du Midi, à l'extrémité du plateau du Géant, les conditions de formation de la glace sont totalement différentes. En effet, vers 3500 mètres d'altitude, bien que le glacier se compose d'une couche de névé d'une trentaine de mètres surmontant 150 mètres de glace (étude géophysique et forage du Laboratoire de Glaciologie de 1971), la fusion de surface, qui débute dès le mois de juin, produit suffisamment d'eau pour percoler dans la totalité du névé et faire disparaître le froid stocké durant tout l'hiver. La température de l'ensemble est alors ramenée à 0°C. La transformation du névé en glace par recristallisation, toujours sous la pression des couches supérieures, s'opère ici en présence d'eau, car l'eau de fonte en excès s'accumule à l'interface entre la neige et la glace imperméable, vers 30 mètres de profondeur. Ce processus concerne la plupart des glaciers alpins, qui appartiennent donc à la catégorie des glaciers dits « tempérés ». Mis à part quelques glaciers situés dans des zones froides de haute altitude ou latitude, ce type de glacier est également très répandu sur toutes les montagnes du globe.

Il n'y a dans les Alpes que les glaciers suspendus, en exposition favorable Nord, pour être froids jusqu'à leur base et rester collés au rocher. Ces glaciers seront certainement les premières victimes du réchauffement de l'atmosphère qui est en cours, une fois leur lit tempéré par la percolation de l'eau de fonte. On peut donc s'attendre à des modifications spectaculaires

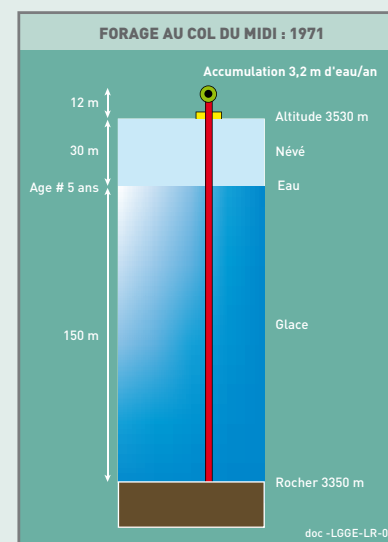


L'Aiguille et le Col du Midi vus depuis l'observatoire Vallot, avec une partie du plateau d'accumulation du Glacier du Géant. Cliché L. Reynaud

de la haute montagne dans un avenir assez proche. Quelques glaciers prenant leurs sources au-dessus de 4000 mètres d'altitude peuvent être également assimilés à des glaciers froids, ceux-ci conservant encore certaines traces de froid dans la masse de leurs langues terminales, comme le glacier Bossons descendant du Mont-Blanc (à - 0,1°C) et le Gorner provenant du Mont-Rose (à - 1°C). La connaissance de la profondeur du passage du névé dense à la glace imperméable est une donnée indispensable pour tous ceux qui étudient la composition de l'atmosphère des temps passés à partir des gaz contenus dans les bulles incluses dans la glace, ainsi que du laps de temps nécessaire à la fermeture de ces bulles, c'est-à-dire la mise en conserve définitive de l'air ainsi piégé.

Au col du Midi, ce processus prend environ cinq années, tandis qu'au col du Dôme, quelques dizaines d'années sont nécessaires. À titre comparatif, la fermeture des bulles d'air n'intervient qu'au bout de 1500 ans au pôle Sud ! Par la suite, la glace « tempérée » produite dans la zone d'accumulation

au-dessus de la « ligne de névé » va voyager au sein du glacier sous l'effet de la gravité. Il faut ainsi deux à trois siècles pour que la glace produite en amont ait parcouru la dizaine de kilomètres de la mer de Glace, tout en restant à la température du point de fusion de l'eau, c'est-à-dire 0°C. Cette résistance à la fusion, même à 0°C, est une propriété essentielle de l'eau. Il faut en effet fournir beaucoup plus d'énergie par gramme de glace (80 calories) pour passer de l'état solide à l'état liquide que pour augmenter cette même quantité de matière d'un seul degré (une calorie). C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la glace est si efficace pour rafraîchir nos boissons !



Coupe verticale du glacier du Géant, au col du Midi et principales caractéristiques physiques tirées du forage LGGE de 1971.

Au cours de temps, la glace évolue profondément dans sa structure microscopique. En examinant une fine lame de glace, prélevée à 50 mètres de profondeur lors d'un forage effectué en 1971 au col du Midi, on découvre de très petits cristaux encore très semblables aux cristaux de névé qui lui ont donné naissance. Il s'agit donc d'une glace « jeune ».

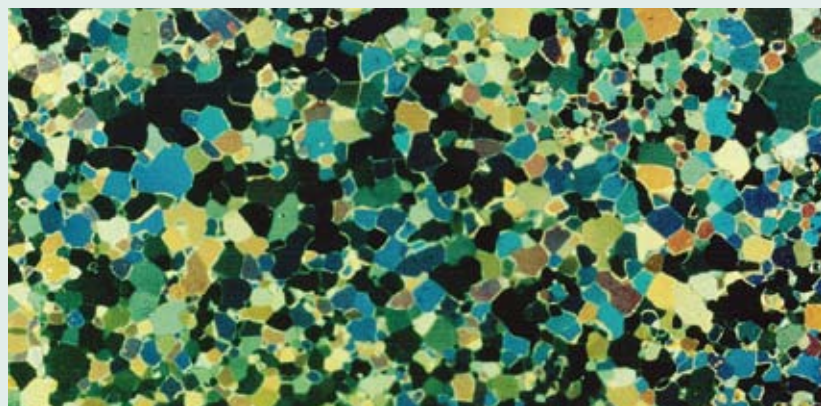
La diversité des couleurs obtenues témoigne d'un arrangement cristallin uniformément réparti, les cristaux de base prenant toutes les orientations possibles. La glace possède donc globalement une structure polycristalline, chaque grain élémentaire étant un monocristal dans lequel les atomes sont rangés avec précision dans un réseau hexagonal. Un second échantillon prélevé à 80 mètres de profondeur montre l'apparition de gros cristaux qui se développent au détriment des plus petits, moins stables physiquement.

Finalement, la glace « ancienne » prélevée à 110 mètres de profondeur dans le glacier d'Argentière, juste au-dessus de la Chute de glace de Lognan (l'épaisseur totale de glace en ce lieu est de 250 mètres), présente des cristaux bien plus gros qui ont tendance à s'allonger dans le sens de la déformation. La glace intègre donc au niveau microscopique la déformation plastique du glacier au cours de son évolution. Les cristaux situés dans la glace du corps central du glacier, là où le déplacement se fait plutôt en bloc, ont tendance à croître significativement. Ainsi, au voisinage du front glaciaire, il est possible d'ob-

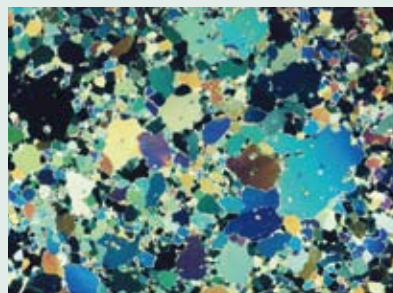
server au cours de l'été de très gros monocristaux ayant plusieurs centimètres de longueur et 2 à 3 centimètres de diamètre. Leur mise en évidence est facilitée naturellement par le nettoyage des joints inter-granulaires sous l'effet de l'eau de fonte.

Toutefois, près des bords, là où la glace subit une importante déformation due

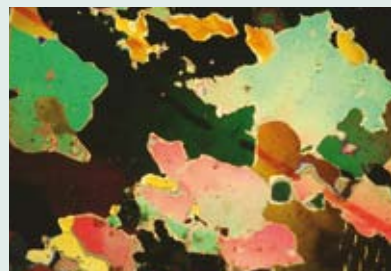
à l'effort de cisaillement, la tendance à la croissance de gros monocristaux n'est plus observée et l'on retrouve une glace formée d'un arrangement de petits cristaux gros comme l'ongle de l'index. Cette réduction de la taille des cristaux couplée à un arrangement préférentiel, favorise en effet les mouvements inter-grains.



Micrographie d'une glace « jeune » à l'échelle 1 (la largeur réelle de la lame de glace est de 36 mm). Il s'agit de fausses couleurs dues au pouvoir polarisant de la glace sur la lumière. La technique d'observation dite de « polaroïds croisés » qui est courante en minéralogie permet de déterminer la taille et l'orientation des cristaux.



Micrographie d'une glace prélevée à 80 mètres de profondeur à l'échelle 1 (la largeur réelle de la lame de glace est de 36 millimètres). Les trois clichés ci-dessus : M. Vallon-LGGE-CNRS.



Micrographie d'une lame mince de glace ancienne, prélevée à 125 m, au glacier d'Argentière, d'une largeur réelle de 100 millimètres, mêmes conditions d'observation. Le cliché montre un allongement dans le sens de la déformation, selon la diagonale repérée par un pointillé rouge.

Cette structure particulière de la glace est visible à l'œil nu en observation rasante sur les parois verticales à l'entrée de la grotte de la mer de Glace, au Montanvers. Les limites de ces cristaux sont bien visibles, ces derniers ayant une taille assez régulière, conséquence du réarrangement cristallin provoqué par la déformation mécanique de la glace. De plus, en épongeant le film d'eau superficiel, on peut pénétrer un peu plus dans l'intimité du matériau et découvrir les « stries de Forel », correspondant vraisemblablement aux plans de base des cristaux que l'éclairage tangent permet de mettre en évidence, au même titre que les stries sur les facettes des cristaux de roche, soulignant localement l'interruption de la belle ordonnance

des couches successives de quartz.

On peut également trouver sur les glaciers ou dans leurs proches voisinages certaines cristallisations organisées intéressantes, ayant parfois une direction de croissance très privilégiée : il s'agit notamment de glace formée à partir de l'eau s'écoulant dans les crevasses ou stagnant dans les petits lacs sur le glacier lui-même. Le cas de la glace de lac est exemplaire, car il se forme des colonnettes très nettes à axes verticaux, à l'image du froid se propageant de haut en bas. Cette structure favorise l'évacuation de la chaleur et prend donc naturellement le pas sur la diversité des possibles premières orientations.

Ainsi, au dégel de printemps, de tels blocs de glace, qui commencent à fondre sous l'effet la chaleur ambiante



Limites de gros cristaux observables sur la langue terminale des glaciers, près de leurs fronts. Les stries parallèles ou bien moirées comme des empreintes digitales portent le nom de « Stries de Forel ». Cliché Luc Moreau, 2005, Glacier d'Argentière

produite par un éclairage solaire plus intense ou de l'air plus chaud, sont particulièrement visibles, car la structure colonnaire est pleinement mise à jour. On peut aussi rencontrer des zones à très gros cristaux, formant des lames quasi verticales de glace bleue, dense, presque sans bulles, témoins du regel de l'eau dans une crevasse.

Parmi les métamorphoses du névé, il en est une plus rare, qui fait passer directement du névé emprisonné dans les crevasses à la glace, lorsque celles-ci se referment en quelques mois seu-



Reste de glace de lac à cristallisation en colonnes, fins monocristaux de 20 centimètres de long. Cliché L. Reynaud, Groenland.



Iceberg montrant des cristaux de regel de l'eau de fonte dans une glace plus froide. À noter : la croissance des cristaux, des bords vers le centre. Cliché A. Desbrosses, Groenland.

lement. Le résultat est une glace blanche, très riche en bulles, car la rapidité de la compression n'a pas permis leur évacuation. Ce phénomène intervient préférentiellement dans les chutes de séracs d'altitude et est à l'origine des ogives blanches dénommées « Bandes de Forbes² ». Les alpinistes « glaciéristes » les repèrent facilement à la qualité du cramponnage : cette glace bulleuse est fragile et éclate facilement sous la pression des pointes de crampons ou au planté du piolet, comme sur la langue terminale des Bossons.

La métamorphose de la neige en glace, dans laquelle la présence d'eau sous forme liquide peut jouer un rôle majeur, est donc un processus complexe, fonction de la température et de la pluviométrie moyennes environnantes. L'altitude et la latitude ont une influence certaine, la formation des glaciers en zones alpines au-delà de 4000 mètres ayant une grande parenté avec celle concernant les calottes polaires très froides. Mais pour la plupart des glaciers, qu'ils soient dans les Alpes ou dans d'autres massifs montagneux, la fabrication de la glace en présence d'eau reste le mécanisme prépondérant. De la structure microscopique de la glace, et de l'orientation des cristaux, on peut en déduire l'état des contraintes mécaniques et tester les modèles de déformation, notamment dans le cas des datations des carottes de glaces prélevées dans les forages alpins ou polaires.

Louis Reynaud



Lambeaux de glace blanche faisant saillie sur la mer de Glace, à l'aplomb du refuge de l'Envers des Aiguilles, constituant la partie claire d'une bande de Forbes. Leur blancheur les protège du soleil, à la différence de la glace environnante saupoudrée de fines poussières. Cliché L. Reynaud



Mesure de l'accumulation annuelle sur le glacier de la Girose à 3200 mètres d'altitude dans le massif des Ecrins, en profitant d'une grande crevasse : les couches annuelles de névé sont mises en évidence par la fine épaisseur de poussières qui « bave » dans la paroi. On constate que le bilan automnal d'accumulation, résultat des précipitations annuelles et de la fonte estivale, est très variable d'une année sur l'autre. Quelques couches correspondant à des étés très chauds, comme en 1976 ou 2003, ont totalement disparu. Cliché L. Reynaud.



Mesure de l'accumulation hivernale, vers fin mai, sur le glacier de Sarennes près de l'Alpe d'Huez (suivi du Cemagref, Grenoble). À cette altitude, voisine de 3000 mètres, le passage d'une couche de névé à la suivante se repère sans ambiguïté grâce à la fine couche de poussière estivale. Une telle identification n'est cependant pas toujours systématiquement évidente et, dans ce cas, l'opérateur doit détecter ce passage à la taille des grains du névé plus ancien correspondant à l'année précédente. Cliché L. Reynaud.

LES GLACIERS, SCULPTEURS DE PAYSAGE

Avec une extension passée ayant atteint jusqu'à 20% de la surface des continents, les glaciers ont fortement conditionné les formes de relief actuelles mais aussi la stabilité et le potentiel agronomique des sols des latitudes moyennes. Aujourd'hui, cette extension n'excède plus 10% des terres émergées, tandis que leur répartition est très inégale selon les continents. Si les inlandsis et calottes glaciaires des hautes latitudes représentent 97% de la surface englacée et 99% du volume total des glaces, les glaciers de montagne des zones tempérées et tropicales, avec 1% du volume d'eau seulement, n'en jouent pas moins un rôle majeur dans l'économie des pays concernés. Supports des activités touristiques et sportives, ils libèrent aussi une ressource en eau indispensable pour la production d'électricité et, dans les montagnes sèches d'Asie ou d'Amérique Latine, pour l'agriculture irriguée³.

Les glaciers se distinguent tout d'abord par leur morphologie. Dans les hauts massifs montagneux (Alpes, Himalaya, Rocheuses, Nouvelle-Zélande...), les glaciers de cirque alimentent des langues glaciaires puissantes qui s'étalent parfois en lobes de piémont au sortir de la montagne (Alaska, Norvège). Les

glaciers de vallée sont enserrés entre des versants souvent raides et, à l'instar des rivières, reçoivent des glaciers affluents mais qui, contrairement aux eaux fluviales, se juxtaposent sans se mélanger, en conservant leurs caractéristiques propres (débit, teneur en débris). Les calottes de glace qui coiffent la plupart des cônes volcaniques des plus hauts sommets tropicaux (Kilimandjaro, Cordillère Andine, Iryan Jaya...) ont une nature assez différente: de volume très variable, la présence de ces calottes est étroitement dépendante de l'activité volcanique et de l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire.

D'une façon plus générale, les observations récentes ont montré que les glaciers des moyennes et basses latitudes ont tendance à diminuer de volume. Leur disparition complète devient possible lorsque la ligne d'équilibre glaciaire est égale ou dépasse l'altitude des sommets (ou lignes de crêtes) ; ceci est déjà le cas pour la plupart des massifs pyrénéens, alors qu'un grand nombre de glaciers alpins apparaissent d'ores et déjà en sursis.

Les glaciers sont de puissants agents d'érosion et de transport des matériaux, mais la façon dont ils agissent reste encore mal connue sur bien des aspects,

dans la mesure où il est très rare de pouvoir accéder à la base des glaciers et à leur lit rocheux. Le laboratoire souterrain mis en place dans les années 60 par EDF sous le glacier d'Argentière est à cet égard une exception. En dépit de ces limites, le passage des glaciers laisse en général une empreinte morphologique claire, univoque le plus souvent, bien que « relique » puisque seulement visible une fois les glaces disparues. Les théories de l'érosion glaciaire reposent donc à la fois sur des hypothèses élaborées à partir d'observations faites sur le terrain, immédiatement après le retrait des glaciers, et sur ce que l'on sait des mouvements de la glace. La glace se comporte comme un corps visco-plastique, qui à la fois se déforme (c'est le « fluage ») et glisse sur son lit.



Gorge sous-glaciaire et vallée en auge, caractéristiques de l'érosion glaciaire. Vallée de Grindelwald (Suisse). Cliché M. Fort.

Le fluage est possible car la glace qui se forme dans la zone d'accumulation est composée d'une multitude de cristaux, qui grossissent, qui se déplacent les uns par rapport aux autres et qui se déforment sous l'influence des contraintes imposées à la glace. Cette déformation interne est fonction à la fois de l'épaisseur du glacier en un endroit donné et de la température de la glace. Ce dernier paramètre est par ailleurs déterminant pour expliquer le glissement du glacier au fond de son lit. Comme il a été discuté dans la partie précédente, on peut opposer de ce point de vue les glaciers « froids », qui ont une température inférieure au point de fusion de la glace, lequel varie selon la pression et la qualité de la glace, et les glaciers « tempérés », dont la température est très proche du point de fusion et permet la coexistence, dans le glacier, de glace et d'eau liquide, en particulier au contact avec le lit du glacier. C'est dans ce deuxième cas que le glissement basal devient une composante importante du mouvement du glacier, car la formation en profondeur d'un film d'eau ou de poches d'eau localisées permet, par augmentation de la pression hydrostatique, une moindre adhérence du glacier à son plancher et l'accélération de son mouvement vers l'aval.

Les glaciers alpins se déplacent en moyenne à des vitesses de l'ordre de quelques dizaines de mètres par an. Certains glaciers peuvent néanmoins connaître des accélérations

brutales : ces « surges » glaciaires sont en général liés à la formation rapide de poches d'eau sous-glaciaires qui entraînent le décollement brutal du glacier sur une distance conséquente. Ce décollement se traduit à la fois par une avancée soudaine et rapide du front glaciaire mais aussi par un amincissement marqué en amont, dans la zone de décollement. Ce type de comportement est bien connu en Alaska, au Spitzberg, et dans les montagnes du Karakorum et du Pamir, avec des avancées de plusieurs mètres par jour sur plusieurs semaines, totalisant plusieurs centaines de mètres au final.

Le glacier agit sur le relief selon différentes modalités : il érode son lit mais également transporte des débris et les accumule au fond de son lit ou sur ses marges, façonnant avec le temps des modèles très complexes dans le détail. Parmi les formes d'érosion glaciaire les plus typiques, on trouve les roches polies et « moutonnées » qui sont la signature indubitable du passage des



Roches comportant des stries caractéristiques de l'érosion glaciaire. Le glacier, armé à sa base par des débris arrachés au fond de son lit, racle et polit les roches comme du papier de verre. 4700 m, Himalaya du Lahul (Inde) Cliché M. Fort.

glaces en un lieu donné. Des indices localisés complémentaires, tels que les stries, les cannelures ou les traces d'écrasement, aident à reconstituer les directions du mouvement des glaces et leur épaisseur éventuelle. Le poli glaciaire est le résultat de l'abrasion exercée par la glace « sertie » de débris qui, comme du papier de verre, use son plancher rocheux en produisant de la « farine glaciaire », celle là même qui donne aux torrents glaciaires leur aspect laiteux si typique. Les roches moutonnées se développent particulièrement bien sur des roches résistantes comme les gneiss et granites Pyrénéens (Portillon d'Oo, Néouvielle, Balaïtous), ou sur les grès massifs (Vallée de la Clarée en Briançonnais) ; en revanche sur les schistes, trop fragiles, ou sur les calcaires, trop solubles, les traces du passage des glaces restent fugaces, et sont vite dégradées par le gel et/ou les eaux de ruissellement.

À l'échelle de toute une vallée, le passage des glaciers se marque par un profil transversal caractéristique, mais non systématique en auge, avec des versants rocheux polis et raides et un fond de vallée plat. Quant au profil longitudinal, il se présente en marches d'escalier, où se succèdent verrous - secteurs en relief et resserrés - et ombilics - secteurs élargis surcreusés par le glacier. La vallée de la Romanche est, de Vizille à La Grave, exemplaire à cet égard. Très souvent d'ailleurs, ces alternances traduisent l'inégale résistance des roches, l'aptitude de la glace à déloger des blocs

rocheux de toute taille et surtout à s'écouler à contre-pente, à remonter les obstacles, voire même à passer d'une vallée à l'autre par des cols de « transfluence ». Les glaciers sont ainsi des agents d'érosion particulièrement puissants, et leur efficacité est d'autant plus importante qu'ils sont épais et que leur écoulement est rapide. Bien souvent d'ailleurs, les contrastes de volume des anciens glaciers se traduisent de nos jours par des différences de niveau, les vallées des glaciers tributaires moins épais se trouvant désormais perchées par rapport au niveau de la vallée principale ; les cascades, si fréquentes dans nos montagnes, sont la preuve que le réajustement du profil d'équilibre des rivières actuelles reste encore très imparfait.



Système morainique du glacier de Samdo, Manaslu Himal, Népal. Le glacier recule depuis plus d'un siècle. Cliché M. Fort.

Les glaciers transportent aussi d'importantes quantités de débris : tombés des parois dominantes sous forme d'éboulement, d'éboulis ou d'avalanches, arrachés au fond du lit par la traction exercée par la glace en mouvement, plus rarement apportés par le vent sous forme de poussières, ces débris

viennent nourrir les « moraines », formes d'accumulation par excellence des glaciers. Les moraines se distinguent généralement selon la position qu'elles occupent par rapport au glacier : médianes dans les zones de confluence, latérales de part et d'autre de la langue glaciaire, ou frontales, plus ou moins arquées, en avant du glacier.

Cordons rectilignes ou festonnés, amas informes ou collinaires, les moraines sont en fait des constructions complexes qui reflètent la dynamique des glaciers et leur relation avec les parois voisines, qui traduisent aussi les modalités de mise en place des débris, abandonnés sur place par la fusion de la glace ou repris et façonnés par les eaux de fonte. Dans la plupart des cas, les moraines ne sont vraiment nettes dans le paysage que lorsque le glacier a reculé : elles constituent alors d'excellents indices de l'extension passée des glaciers, et jalonnent souvent le retrait progressif des glaces par une série de cordons emboîtés, de plus en plus anciens lorsque l'on s'éloigne du glacier actuel.

Les formes de relief héritées du passage des glaciers laissent des traces durables sur les paysages et notamment sur l'hydrographie. L'existence de constructions morainiques en marge des glaciers peut, lorsque le barrage est suffisamment stable et étanche, aboutir à la formation d'un lac qui, s'il n'est pas drainé par un torrent émissaire, peut devenir une menace pour les populations situées en aval. Les moraines constituent également des

stocks de débris disponibles pour les torrents « pro-glaciaires » (eaux de fonte issues des marges des glaciers), qui les prennent en charge et les étalent en aval, constituant ainsi de vastes plaines d'épandage comme le Pré de Madame Carle en Oisans. Les dépôts morainiques restent parfois plaqués sur les versants ; leur instabilité potentielle et leur perte de cohésion peuvent venir nourrir des coulées de débris voire des glissements de terrain en contrebas, surtout en cas de forte humectation, lors de pluie estivale intense ou à la faveur d'un redoux important provoquant une fonte abondante du couvert neigeux. Plus rarement mais avec des conséquences plus sérieuses encore, les parois d'auges glaciaires subissent, après la fonte des glaces qui leur servaient de contrefort, des phénomènes de décompression qui localement peuvent se traduire par des écroulements de versants et des accumulations de blocs de plusieurs milliers d'hectomètres cubes, pouvant aller jusqu'à barrer entièrement des vallées. C'est ainsi que dans les Alpes Suisses, il y a près de dix mille ans, l'éboulement de Flims, de plus de 12 kilomètres-cube, a entièrement obstrué l'amont de la vallée du Rhin antérieur.

Les formes d'érosion glaciaires sont aussi à l'origine de nombreux lacs naturels : lacs de cirques en chapelet, creusés à la faveur de zones de faiblesse du bâti rocheux (terrains moins résistants, densité plus grande et recoupement de plusieurs réseaux de diaclases), qui se comptent par

centaines dans des massifs comme le Néouvielle dans les Pyrénées, lacs « en doigts de gant » résultant à la fois de surcreusements par la glace et de barrages morainiques, comme les lacs Léman, de Côme ou de Garde... Parmi les lacs qui occupaient l'emplacement d'anciens ombilics glaciaires, certains sont aujourd'hui entièrement colmatés : ainsi en est-il de la plaine du Grésivaudan au nord de Grenoble, où sont accumulés plus de 500 mètres de sédiments lacustres et fluviaux, ou de la plaine de Bourg d'Oisans (plus de 300 mètres de sédiments).



Au Khumbu Himal, les glaciers qui avancent et reculent conditionnent l'apparition d'un lac plus ou moins étendu en amont. Au Khumbu Himal (Népal). Cliché M. Fort.

La morphologie en marches d'escalier des anciennes vallées glaciaires présente un certain intérêt pour la production d'énergie hydro-électrique. En altitude, les torrents glaciaires sont captés par des prises d'eau, dérivés par gravité ou dirigés, par pompage ou par conduites forcées, vers les retenues. Les anciens verrous glaciaires sont les sites privilégiés de construction des barrages de retenue : sections de vallée rétrécie, ces emplacements

au substrat stable offrent, par leur dénivellation naturelle importante, une énergie potentielle non négligeable exploitée par les turbines situées en aval du système. Les capacités de stockage, notamment en été, des eaux glaciaires dans les anciens cirques ou ombilics glaciaires sont ainsi considérables, ces réserves permettant de compenser en hiver, lors de la période de consommation maximale, le déficit chronique du débit des rivières.

Les eaux de fonte glaciaire représentent dans certaines montagnes une ressource d'appoint, voire la source unique d'eau, tant pour la consommation domestique que pour les usages agricoles. Dans les montagnes alpines, la pratique de l'irrigation estivale des champs et des prés de fauche était encore vivace au début du XX^e siècle, avec des canaux aux noms divers : bis-ses du Valais, rus du Val d'Aoste, béals des Hautes-Alpes.

Dans les montagnes sèches des latitudes tropicales et subtropicales, les eaux de fonte glaciaires sont indispensables à la vie. Les villageois des vallées des montagnes centre-asiatiques ont dû déployer des trésors d'ingéniosité au prix parfois de grandes prises de risque, pour acheminer des eaux de fonte glaciaire jusqu'aux terroirs cultivés, comme en vallée de Hunza (Pakistan) où il a fallu creuser des canaux au travers de parois rocheuses très raides. Là où les limites des glaciers sont très dynamiques et toujours mouvantes, il y a nécessité d'adapter, voire de déplacer plusieurs fois par saison, les points



Glacier de Gulmit, Pasu (Pakistan). On distingue nettement l'étage cultivé en aval de la langue glaciaire, grâce au système de captage des eaux de fonte et d'irrigation sans cesse maintenu par les villageois. Vallée de Hunza, (Pakistan). Cliché M. Fort.

de captage des eaux de fonte. Ces eaux, toujours très chargées en minéraux issus du broyage des roches au niveau du plancher glaciaire, assurent aux champs ainsi irrigués une fertilité sans cesse renouvelée. Ces systèmes d'irrigation, qui impliquent une certaine forme d'organisation et de solidarité des sociétés concernées, reposent donc sur une ressource en eau suffisante. Il est à craindre que, dans certaines parties du globe (Amérique Latine, Afrique, Kunlun et Tian Shan), la fusion accélérée des glaciers observée actuellement menace, à moyen terme, la survie même de toutes ces populations.

Monique Fort

CLIMATS ET GLACIERS

A l'aube du XXI^e siècle, l'évolution du climat à l'échelle de la planète constitue une des principales sources de préoccupations. Même si la mémoire collective concernant les phénomènes météorologiques est souvent défaillante, de nombreux signaux très concrets d'un réchauffement de l'atmosphère, de la surface du sol et celle des océans, viennent alimenter de manière diffuse cette inquiétude. En quelques décennies, les glaciers des Alpes, si proches et familiers, ont considérablement régressé. D'une année sur l'autre, la neige semble de plus en plus tarder au rendez-vous entamant parfois cruellement la saison de ski pour certaines stations de basse altitude notamment, tandis que la fréquence de certains éboulements de roche lors de la période estivale semble augmenter significativement. La concomitance de ces indices qui se multiplient d'ailleurs bien au-delà des Alpes et qui touchent quasiment l'ensemble de la planète, vient ainsi renforcer la conviction de chacun que l'empreinte d'un profond changement du climat se dessine sur Terre. Sous l'effet d'une anxiété bien compréhensible qui est amplifiée par des médias parfois alarmistes, les interrogations sur ce phénomène sont donc

légitimement nombreuses. Pour les acteurs économiques de la montagne, elles prennent même un caractère stratégique majeur, l'essor des stations de ski - l'or blanc - ayant pris sa source dans l'abondance de l'enneigement qui régnait alors dans les années 60 ! La multiplication des canons à neige pour combler un déficit chronique est bien un signe de leur préoccupation grandissante, une sorte de fuite en avant dont on ne connaît pas l'issue. De ce point de vue, lire le passé climatique pour mieux tracer des perspectives et s'adapter constitue une démarche essentielle où les glaciers des calottes polaires, mais aussi ceux perchés dans les massifs alpins apportent de précieux éléments de réponse.

LA RÉPONSE DES GLACIERS AU CLIMAT

Pour cela, comprendre la réponse des glaciers aux évolutions du climat est un préalable indispensable permettant au passage de battre en brèche les idées trop simples sur le sujet. En effet, si certains glaciers comme celui de Sarenne près de l'Alpe d'Huez ou celui au sommet du Kilimandjaro semblent agoniser, d'autres au contraire

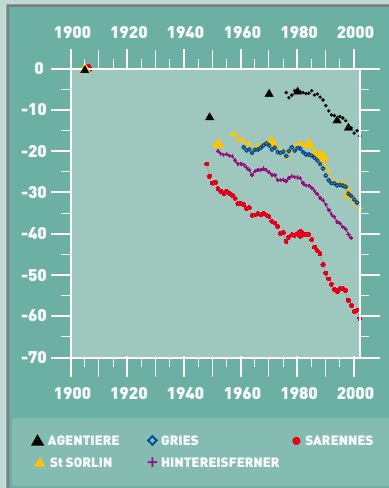
ont pris un certain essor durant les dernières décennies comme sur la façade atlantique de la Norvège. À la lumière de ces disparités apparentes de comportements, peut-on alors en déduire qu'il n'existe pas de climat mondial ? À l'inverse, si l'on considère que le faisceau d'indices sur le réchauffement de l'atmosphère à l'échelle du globe est suffisamment concordant, on peut alors s'interroger sur la pertinence à se servir des glaciers comme des sentinelles du climat.

Pour lever ce paradoxe et dessiner une réponse cohérente des glaciers au climat d'une région à l'autre, il est nécessaire de revenir sur les mécanismes intimes qui régissent leur fonctionnement. Ainsi, si l'avancée ou le recul d'un front glaciaire intègre certainement les effets du climat, il faut aussi prendre en compte la nature du glacier, son orientation, sa forme ainsi que la topologie du terrain sur lequel il se trouve pour décrire correctement le processus d'écoulement de la glace. Deux glaciers voisins peuvent donc avoir un comportement radicalement différent, l'un continuant à avancer pendant que l'autre régresse notablement. Le paramètre le plus pertinent pour caractériser la réponse au climat est certainement le bilan de masse annuel qui représente la différence entre la quantité de glace gagnée au cours d'une année moins celle qui est perdue. Cette quantité, malheureusement très fastidieuse et très coûteuse à évaluer, permet de prendre en compte notamment certaines spécificités du

glacier, comme la présence d'une couverture de pierres qui bloque les échanges avec l'atmosphère et le rend insensible de ce fait au climat. Le contraste est ainsi saisissant entre le glacier Noir en Oisans dont l'évolution est très lente grâce à sa couverture de pierres, alors que son voisin, le glacier Blanc, totalement dénudé, recule très rapidement.

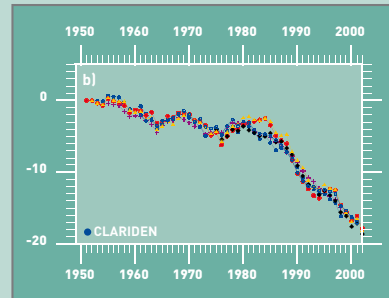
Lorsqu'ils sont nichés en face Nord, bien à l'abri du rayonnement solaire, le bilan de masse est souvent très favorable. Malgré la présence de ces disparités, il est possible d'établir avec le bilan de masse une échelle de comparaison commune entre glaciers. Ainsi sur l'ensemble des Alpes, le bilan est globalement négatif, et cette tendance s'accroît à partir des années 80. Cette réponse est remarquablement cohérente lorsque l'évolution du bilan de masse est normalisée par rapport à un glacier de référence, en l'occurrence le glacier de Saint-Sorlin. Les glaciers ont donc bien une réponse universelle au climat, et celui-ci a bien une signature commune à l'échelle des Alpes, confirmant la tendance au réchauffement.

Cette conclusion tirée de l'étude des glaciers de l'Arc alpin est analogue pour d'autres régions du monde comme les glaciers des Andes tropicales particulièrement bien documentés par les équipes françaises et sud-américaines. On y observe non seulement la tendance globale à la régression des glaciers, mais également l'accélération de ce processus

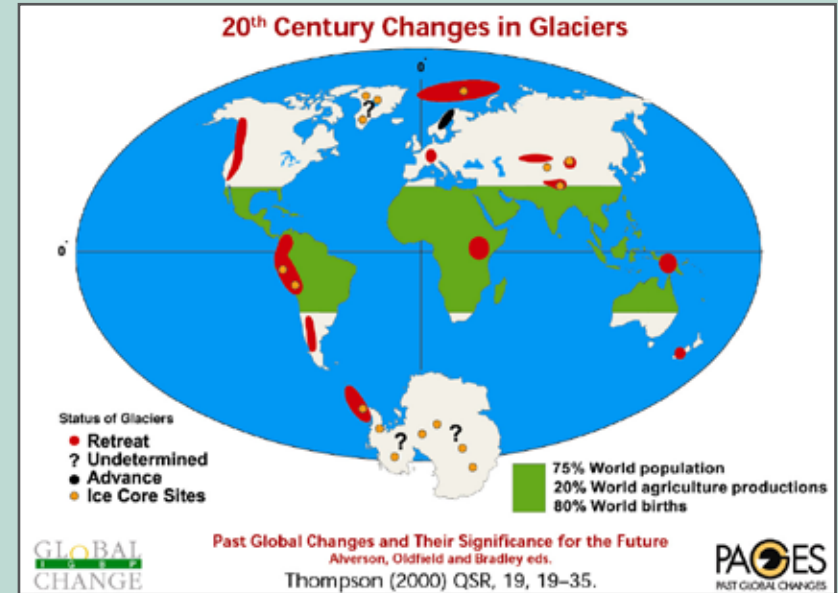
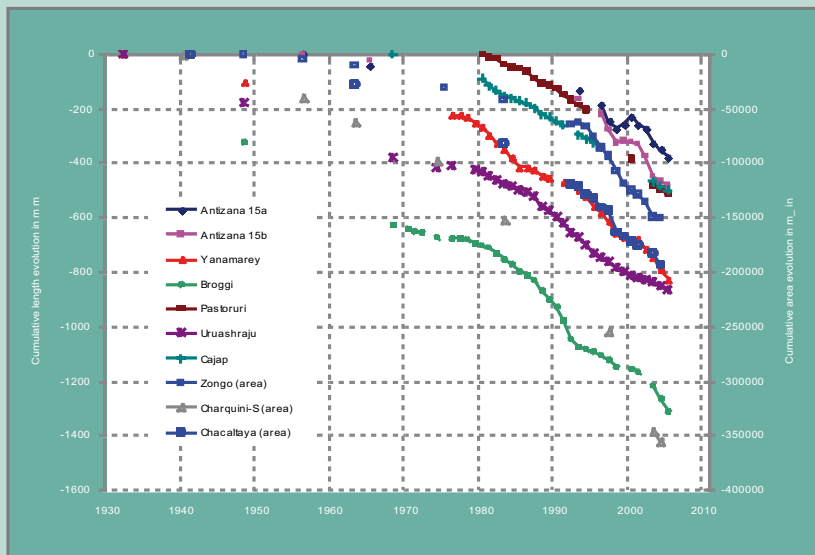


Evolution du bilan de masse cumulé au cours des années de cinq glaciers dans les Alpes. Les premières mesures remontent au début du XX^e siècle. Ainsi, depuis les années 80, le glacier de Sarenne a perdu une vingtaine de mètres d'épaisseur, alors que celui d'Argentière n'en a perdu que dix. D'après la publication de C. Vincent et al. (Journal of Geophysical Research, 2004).

Mêmes données que précédemment mais la tendance de chaque glacier est normalisée sur celle de Saint-Sorlin. Les points bleus correspondent au glacier de Clariden dont les données ont été rajoutées. On constate une réponse identique des différents glaciers à l'évolution du climat. D'après la publication de C. Vincent et al. (Journal of Geophysical Research, 2004).



Recul des glaciers dans les Andes. Évolution de la longueur (en mètre) et de la surface (m²) de dix glaciers situés dans la cordillère des Andes intertropicales. D'après Francou, B., & Vincent, C., 2007 (Les glaciers à l'épreuve du climat, IRD Editions, Editions Belin)



Évolution des glaciers à l'échelle mondiale en 2000. (Document PAGES)

à partir des années 80. Enfin sur l'ensemble de la planète la régression est quasi-généralisée. Quant aux régions telle la façade atlantique de la Norvège où les glaciers ont momentanément réavancé après le grand recul généralisé de la sortie du Petit Age de Glace (actuellement les glaciers recommencent de nouveau à régresser) c'était le résultat, non pas d'une absence de réchauffement, mais d'un excès d'enneigement lié à l'évolution climatique récente.

LE PETIT ÂGE GLACIAIRE

Établie sur des critères objectifs indiscutables, la régression des glaciers alpins au cours du XX^e siècle est un phénomène récent, puisque sous le règne de Louis XIV et jusqu'au début du XIX^e siècle, on observa une forte avancée de l'ensemble des glaciers associée à un important refroidissement du climat, en attestent les archives historiques d'une exceptionnelle richesse concernant les Alpes.



Illustration du Petit Age de Glace dans les Andes tropicales, Glacier du Charquini (16°S, 5392 m). Les différentes moraines datées par lichénométrie (précision de l'ordre d'une vingtaine d'années) montrent l'avancée maximale du glacier, puis son retrait progressif depuis la fin du XVII^e siècle. D'après la publication de A. Rabatel et al., CRAS, 2005. Photo V. Jomelli.

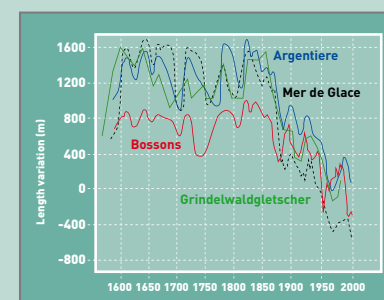
Ainsi, en 1644, la langue terminale de la mer de Glace dépassait le hameau des Tines près de Chamonix, causant la disparition de l'habitat rural environnant et traumatisant les populations locales. La datation des moraines a permis de reconstituer l'histoire de cette progression glaciaire parfois spectaculaire, qui fut un thème porteur pour les peintres du XVIII^e siècle, complétant ainsi les analyses scientifiques effectuées sur le terrain par leurs œuvres picturales. Dans les Andes tropicales, cette avancée glaciaire a été également observée et documentée, ses différentes étapes ayant été datées récemment à l'aide

des diamètres des lichens présents sur les différents cordons morainiques. La concordance des observations dans de nombreuses régions de la planète permet de conclure que ce phénomène global, dénommé le « Petit Age de Glace », débuta vers le XIII^e siècle pour prendre fin au milieu du XIX^e.

Cette cohérence planétaire de la réponse des glaciers suggère évidemment qu'il existe une cause commune au refroidissement du climat mondial de cette époque, celui-ci, bien que modeste – on l'estime actuellement de l'ordre de un degré « moyen », c'est à dire une baisse de la tempéra-

ture une fois moyennée sur l'ensemble de la surface de la Terre - ayant eu un impact néanmoins significatif sur la masse englacée à l'échelle du globe.

Il est maintenant communément admis que ce refroidissement peut être attribué à une réduction du rayonnement solaire, le Soleil, comme toute étoile, émettant une énergie qui fluctue autour d'une certaine quantité moyenne au cours des siècles. Actuellement, celui-ci est dans une phase active qui a entraîné la fin du Petit Age de Glace. Par le passé, d'autres fluctuations de l'intensité du rayonnement solaire eurent certainement lieu, et le climat particulièrement tempéré qui régnait pendant la période romaine ou au Moyen-Age, comparable à certains égards à celui du XX^e siècle, trouve probablement son origine dans ce mécanisme, même si cette question fait toujours l'objet de nombreuses études.



Recul des fronts des glaciers dans les Alpes depuis la fin du Petit Age de Glace. D'après la publication de C. Vincent et al. (Journal of Geophysical Research, 2004).

LES GRANDES GLACIATIONS

Les grandes glaciations correspondent à un englacement d'une ampleur toute autre que celui observé pendant le Petit Age de Glace. Avec une température moyenne à l'échelle du globe inférieure de 5° C à celle d'aujourd'hui, l'écart pouvant atteindre - 10°C dans les Alpes et même - 20°C au Groenland, la rudesse du climat avait totalement bouleversé l'environnement en Europe. A cette époque, les forêts avaient complètement disparu et celles-ci étaient remplacées par des steppes arides parcourues par des mammouths, des rennes, des rhinocéros laineux ou des ours.

Partout dans le monde, de la Nouvelle-Zélande à l'Alaska en passant par la Patagonie, sans oublier l'Asie centrale, les Andes tropicales, l'Afrique centrale avec le Kilimandjaro et le mont Kenya, ainsi qu'en Irian Jaya avec le massif du Karsten, les glaciers prospéraient, dévalant les pentes, souvent de plus d'un kilomètre par rapport à aujourd'hui.

La calotte glaciaire, formée principalement à partir de l'eau des océans, s'étendait largement sur le nord de l'Amérique et de l'Eurasie, atteignant jusqu'à trois kilomètres d'épaisseur par endroits et provoquant une baisse spectaculaire du niveau des mers, de l'ordre de 120 mètres. Dans les Alpes, les glaciers avaient une taille gigantesque, allant jusqu'à atteindre parfois Lyon et ses environs, comme l'atteste la présence de nombreux blocs erratiques témoins de cette époque reculée. Dans la cuvette grenobloise, les glaciers pou-

vaient atteindre plus d'un kilomètre d'épaisseur tandis que le Vercors lui-même disposait de ses petits glaciers au même titre que les Vosges et le Jura. Depuis deux millions d'années, les épisodes de glaciations et de déglaciations se sont succédés une vingtaine de fois environ, le réchauffement du climat étant en général un processus relativement rapide. La dernière glaciation a ainsi débuté il y a environ 16 000 ans, par un réchauffement progressif, entraînant il y a 14 000 ans le début d'une nette remontée du niveau des mers. Celle-ci s'est étendue sur environ 5000 ans, pouvant atteindre jusqu'à 3 mètres par siècle lors de la phase de fusion la plus rapide. Actuellement, le niveau des océans est stabilisé depuis 6000 ans.

C'est encore le Soleil qui orchestre ce grand ballet des glaciations mais, cette fois-ci de manière indirecte. Ces cycles trouvent leurs origines dans le mouvement périodique de la Terre autour du Soleil qui entraîne des étés plus ou moins frais, ce qui permet aux grandes calottes glaciaires de se former aux hautes latitudes de l'hémisphère nord, ou de fondre. Cela permet aussi aux glaciers des Alpes de s'étendre sur des centaines de kilomètres puis de regagner le cœur des Alpes. Trois paramètres sont en jeu : la précession des équinoxes (l'axe de rotation de la Terre précède, tout comme celui d'une toupie lancée sur une table, avec une période proche de 21 000 ans), l'obliquité (ce même axe, qui est actuellement incliné de 23,5°, oscille entre 21° et 24° avec une période de 41 000 ans) et la variation de l'orbite terrestre (la forme

de l'ellipse change périodiquement devenant plus ou moins proche d'un cercle, avec une périodicité proche de 100 000 ans). La conjonction de ces trois phénomènes dont la périodicité spécifique est connue avec une précision d'horloger, permet d'expliquer non seulement la successions des grandes glaciations du passé entrecoupées de périodes chaudes mais aussi de prévoir celles à venir. Ainsi, la période chaude qui s'est installée depuis 10 000 ans environ doit encore naturellement durer plusieurs dizaines de milliers d'années.

FONTE DES GLACIERS ET ACTIVITÉS HUMAINES

Au cours du XX^e siècle, en particulier au cours des dernières décennies, la régression quasi générale des glaciers sur Terre répond à l'évolution de la température moyenne mondiale. Celle-ci augmente nettement par deux fois, dans la première moitié du siècle d'abord, puis lors des quatre dernières décennies. En fait le réchauffement qui a lieu autour des années 40 ne présente pas un caractère universel et reste principalement centré sur les régions Atlantique nord. Par contre au cours des quatre dernières décennies le réchauffement touche bien l'ensemble de la planète, qu'il soit retracé à partir des nombreuses mesures de terrains ou à partir de mesures satellitaires. Une tendance générale du climat se dessine ainsi sur le XX^e siècle entrecoupée de perturbations régionales. Si des causes naturelles peuvent expliquer les fluc-

tuations (variations du flux d'énergie envoyé par le Soleil, volcanisme,...) un lourd faisceau de présomptions suggère que le réchauffement des dernières décennies est la conséquence des activités humaines, celles-ci générant une importante quantité de gaz à effet de serre. Si la présence naturelle de ces gaz est en effet favorable et permet à la Terre de bénéficier d'un climat exceptionnellement tempéré dans la cohorte des planètes, (la température moyenne qui règne à la surface de la Terre est de l'ordre de 15°C depuis plusieurs millions d'années, baissant d'environ 5°C chaque fois qu'une glaciation s'installe), leur accumulation excessive peut conduire à des évolutions climatiques encore inconnues. En effet, la concentration des gaz à effet de serre atteint un niveau sans précédent depuis des centaines de milliers d'années, ce qui expliquerait le réchauffement actuel des dernières décennies.

De la quantité de gaz à effet de serre stockée dans l'atmosphère dépendra l'avenir du climat, sachant que celle-ci garde en mémoire pour de nombreux siècles la trace des activités humaines (ce qui fait que nous constituons aujourd'hui l'atmosphère dont hériteront nos enfants et petits-enfants). Dans ce contexte, la modélisation du climat constitue un enjeu majeur à la fois pour connaître l'évolution future des glaciers et pour connaître l'avenir de la société humaine elle-même. Même si les capacités de prédiction sont entachées d'une incertitude non-négligeable, (ces dernières dépendent

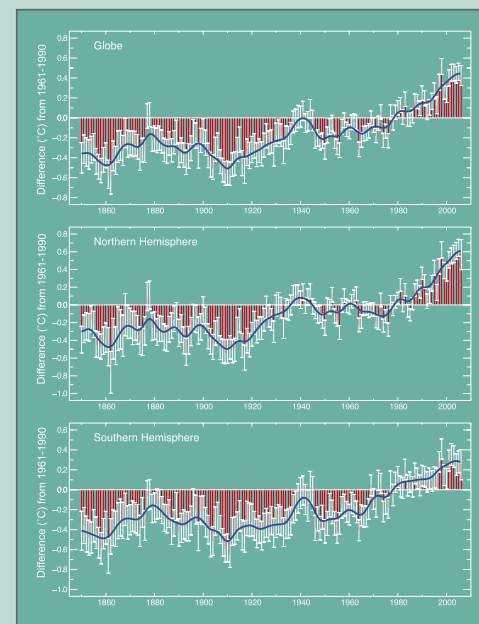
en premier lieu des choix faits par l'homme), on estime que l'augmentation de la température moyenne du globe serait comprise entre +2°C et +6°C à la fin du XXI^e siècle, le réchauffement moyen pouvant atteindre +3°C à +4°C sur la France et même la dizaine de degrés aux hautes latitudes. Ce processus serait accompagné d'un renforcement des précipitations là où celles-ci sont les plus importantes actuellement, tandis qu'aux tropiques et dans les régions méditerranéennes, les précipitations iraient en se raréfiant.

D'une manière très schématique, un réchauffement de 1°C sur une région provoque une migration des différentes espèces de l'ordre de 150 mètres en altitude et, à nos latitudes, de l'ordre d'une centaine de kilomètres vers le Nord (cette estimation variant entre 50 et 200 km). En France, le réchauffement des trois dernières décennies s'est traduit par un net déplacement de la flore et de la faune (insectes, poissons, oiseaux, etc...) vers le Nord. De la même manière, le rythme saisonnier a évolué, la floraison et les récoltes de nombreux arbres fruitiers étant en avance de près d'un mois environ par rapport aux décennies antérieures. Un fort réchauffement envisagé sur une échelle de temps aussi rapide que le siècle perturberait donc les mécanismes des écosystèmes très profondément. Au-delà d'une augmentation moyenne de +2°C de la température moyenne à la surface de la Terre, les spécialistes du climat avec ceux des écosystèmes estiment donc

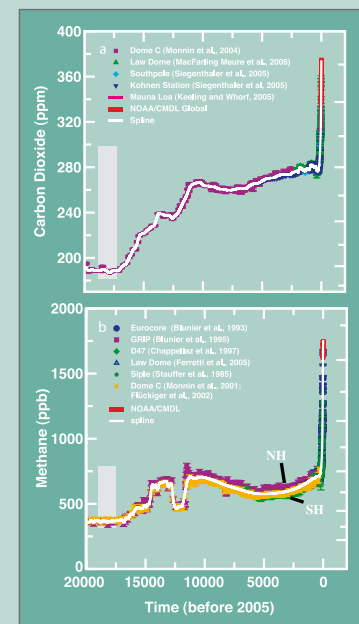
que les dégâts occasionnés seraient considérables. Afin d'éviter qu'un tel scénario ne se réalise, l'Europe propose de stabiliser le réchauffement futur à +2°C, ce qui implique de réduire par deux les émissions mondiales actuelles. Dans la même optique, la France explicite les contraintes que cela impose en proposant d'arriver, en 2050, à diviser par quatre l'émission de gaz à effet de serre des pays développés économiquement, laissant ainsi une marge de croissance aux pays en voie de développement. Dans ce contexte peu favorable à court et moyen terme, les tendances actuellement observées concernant les glaciers vont probablement s'amplifier. On s'attend ainsi à une nette diminution de l'épaisseur de la couche neigeuse déposée lors de la période hivernale ainsi qu'une réduction substantielle de la durée de la saison d'enneigement. Le recul des glaciers, selon toute probabilité continuera. Si la perte moyenne d'épaisseur des glaciers alpins a été de l'ordre de 25 centimètres par an depuis le milieu du XIX^e siècle jusqu'aux années 70-80, celle-ci a atteint 65 centimètres au cours des deux dernières décennies, et même 3 mètres lors de l'été caniculaire de l'année 2003 ! De très nombreux glaciers régressent fortement car leur alimentation en glace grâce à l'enneigement d'hiver est insuffisante pour compenser la fonte estivale. Même si la tendance au réchauffement s'arrêtait brutalement, il faudrait de nombreuses années avant que le processus ne se stabilise et qu'un nouvel

équilibre soit trouvé. La remontée de la ligne d'équilibre des neiges qui délimite la zone des névés permanents est estimée être en moyenne de l'ordre de 150 mètres par degré de réchauffement gagné localement. L'été 2003, exceptionnel en tous points, a permis de valider cette loi empirique avec une variation de la température moyenne au cours de l'été de l'ordre de +2 à +3 °C. La remontée de la zone de transition entre les surfaces dégelées en été et celles constamment gelées dans l'année dénommée « pergélisol » est un fait d'ores et déjà avéré, entraînant notamment une déstabilisation des fondations de nombreux refuges, obligeant les exploitants à modifier leurs emplacements, ou à renforcer ceux-ci lorsque cette solution est envisageable. On s'attend par ailleurs à une augmentation notable de la fréquence des éboulements rocheux, le gel n'assurant plus la cohésion mécanique des parois. Par ailleurs, une fonte précoce des neiges se répercutera sur la date du pic de décharge en eau des rivières et des fleuves. Les estimations actuelles conduisent à une avancée de la crue printanière d'environ un mois sur la base d'un scénario où la quantité de gaz carbonique (CO₂) aurait doublé. Les ressources en eau seront donc profondément modifiées, ce qui permet de s'interroger sur la pertinence des investissements lourds entrepris par les stations de ski avec les canons à neige pour maintenir les activités de loisir à leur niveau actuel.

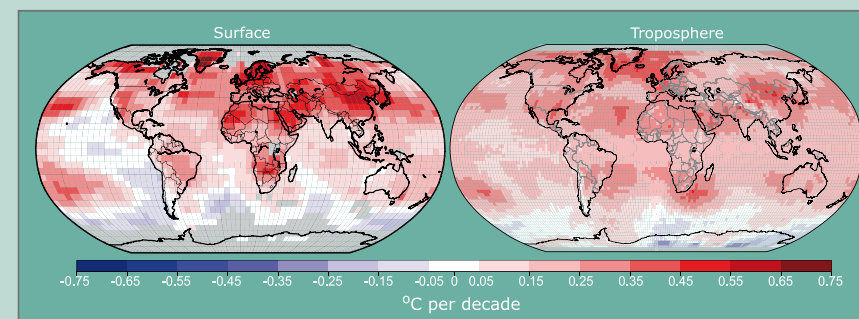
Marie-Antoinette Mélières



Évolution de la température annuelle moyennée, en haut, sur l'ensemble de la surface de la Terre (océans et continents), sur l'hémisphère nord au milieu et sud en bas. Bien que les deux hémisphères diffèrent dans le détail, la tendance au réchauffement est la même. Cette courbe est centrée sur la moyenne des températures entre 1961 et 1990. Elle commence en 1860, date depuis laquelle on dispose suffisamment de mesures fiables pour envisager une estimation qui couvre la planète. On retrouve dans ces variations la signature des événements El Niño (tel le fort réchauffement de 1998), des éruptions volcaniques (tel le refroidissement lié à l'éruption du Pinatubo en 1992), etc. (Rapport GIEC 2007).



Évolution des deux principaux gaz à effet de serre dont la teneur dans l'atmosphère est fortement modifiée par l'homme depuis le début de la révolution industrielle. La barre grisée indique la plage de variations naturelles qui existent lors des alternances climat glaciaire - (basses valeurs d'il y a 20 000 ans) et climat chaud (qui s'est installé depuis 10 000 ans). Les activités humaines ont depuis un siècle complètement bouleversé cette régulation. Les couleurs indiquent les différentes sources de données. (Rapport GIEC 2007).



Ces deux cartes retracent la répartition sur Terre du réchauffement moyen observé à l'aide des satellites entre 1979 et 2005 : à la surface (à gauche) et dans l'atmosphère (à droite). Les zones grises indiquent des données incomplètes. Le réchauffement présente les caractéristiques classiques des changements climatiques : plus fort sur les continents que sur les océans et plus fort sur les hautes latitudes de l'hémisphère nord que sur les tropiques. (Rapport GIEC 2007).

LES RISQUES LIÉS AUX GLACIERS

Les variations des glaciers ont de tout temps généré des risques. À l'époque des grandes débâcles glaciaires, la fonte d'énormes volumes de glace a provoqué d'immenses catastrophes sans conséquences humaines importantes, seuls quelques campements préhistoriques furent vraisemblablement ravagés et quelques chasseurs-cueilleurs emportés par les flots rugissants. Il faut noter qu'à l'époque, les Alpes étaient tellement englacées qu'elles ressemblaient à nos régions polaires, et les périodes interglaciaires libéraient des volumes d'eau considérables, sans aucune mesure avec ceux qui transitent aujourd'hui dans nos vallées alpines.

Les choses ont bien changé : les vallées depuis un demi-siècle sont de plus en plus colonisées, souvent au mépris des éventuels risques naturels inhérents à la montagne et aux glaciers. C'est ainsi qu'aujourd'hui des événements même mineurs engendrent des catastrophes humaines ou économiques jugées intolérables ! Les enjeux socio-économiques des hautes vallées montagnardes ne font qu'augmenter bien que leur importance soit très variable en fonction du degré de développement du pays concerné. Ainsi, la même catastrophe sera jugée bénigne dans les Andes ou en Himalaya et dramatique

dans les Alpes, même si on ne déplore aucune victime !

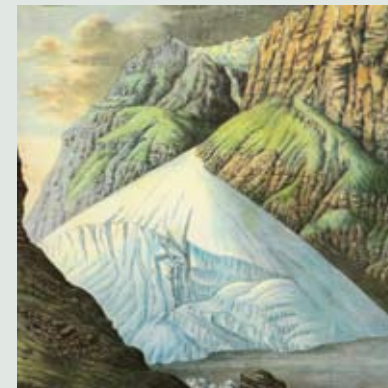
QUELQUES CATASTROPHES HISTORIQUES

La mémoire collective et les archives ont retenu quelques catastrophes importantes qui se sont produites dans les Alpes au cours du dernier millénaire. Elles ont été enregistrées par les chroniques paroissiales pour les plus anciennes. Des catastrophes dans d'autres massifs montagneux ont également été répertoriées.

Les ruptures du barrage de glace du Val de Bagnes

Le registre paroissial de Sion dans la vallée du Rhône relate qu'en l'an 580 une énorme inondation a ravagé Martigny provoquant le déplacement du siège de l'Evêché à Sion. Il est fort probable que cette inondation ait été provoquée par la rupture d'un lac glaciaire relatif au glacier de Giétroz. En effet, ce glacier dont le front surplombe le Val de Bagnes provoque, lors de crues glaciaires importantes, des chutes de séracs si volumineuses qu'elles obstruent la vallée, créant ainsi un lac temporaire. L'eau de fonte qui s'accumule en amont tend à détruire ce barrage de glace qui subit

une poussée d'Archimède importante puisque la glace étant plus légère que l'eau, devrait flotter. C'est ainsi qu'en 1595 les chroniques évoquent l'existence d'une catastrophe ayant causé environ 150 victimes. Plus présente dans les mémoires est la terrible inondation de 1818, année où plusieurs catastrophes se produisirent dans les Alpes (même scénario en France à l'Epénaz en Vanoise). En cette période d'avancée glaciaire, le front surplombant du glacier de Giétroz s'écroule en d'innombrables chutes de séracs. Ceux-ci s'accumulent en un énorme barrage de glace obstruant toute la vallée, celui-ci étant encore renforcé par l'apport des avalanches hivernales provenant des deux côtés de la vallée de la Drance de Bagnes. L'eau s'accumule jusqu'à former au début de l'été un lac estimé à 30 millions de mètres-cube. Devant le danger, les autorités envisagent le percement du barrage et la vidange progressive du lac. Sous la direction de l'Ingénieur du Canton, Ignace Venetz, une équipe de terrassiers creuse un chenal dans la glace qui permet une vidange partielle du lac long de trois kilomètres. Quelques 10 millions de mètres-cube sont alors évacués par ce chenal qui ne cesse de s'élargir par les flots grandissants. Le 16 juin, c'est la catastrophe : le barrage cède et la totalité du contenu restant se vidange, noyant au passage le Val de Bagnes. Le bilan est lourd, une cinquantaine de victimes, 19 ponts emportés, quelques 500 habitations détruites, la commune de Martigny inondée et d'innombrables débris flottant sur le Lac



Aquarelle de Hans Conrad Escher de 1818 montrant le barrage de glace et le lac de 30 millions de m³ (archives suisses Glaciorisk).

Léman quelques heures plus tard. Cette première tentative d'intervention sur un risque glaciaire se solda donc par un semi-échec au bilan humain désastreux.

La vidange de Tête Rousse

Plus catastrophique et imprévisible encore fut la rupture d'une poche d'eau nichée au coeur du Glacier de Tête Rousse qui endeuillât la France en 1892. Dans la nuit du 11 au 12 juillet, des témoins logeant dans une cabane de chantier sur le versant d'en face, furent réveillés par un bruit épouvantable et virent à la lueur du clair de lune un déferlement incroyable d'eau, de boue, de rochers et de glace, provenant de la montagne à 3 000 mètres, sous le Mont Blanc et se déversant dans le Torrent de Bionnassay. Le flot impétueux après avoir ravagé quelques habitations des hameaux bordant le torrent, s'est enrouffré dans la gorge de Saint Gervais et la lave torrentielle (eaux plus ma-



Le front explosé et le plafond effondré du minuscule glacier de Tête Rousse après la catastrophe de 1892. [Archives Cemagref]

tériaux solides arrachés aux berges) a envahi les Thermes engoutissant le rez-de-chaussée de l'établissement avec plus d'une centaine de curistes. En pleine nuit les secours furent très difficiles et de nombreuses victimes furent entraînées jusqu'à l'Arve puis au Rhône. Ce fut la plus grande catastrophe provoquée par un glacier en France avec 175 morts et une vingtaine de disparus. De nombreux curistes étaient des gens connus ou riches et le retentissement de cette terrible catastrophe fut très important dans tout le pays. La « couverture médiatique » fut exceptionnelle pour l'époque et les documents publiés en sont un témoignage frappant.

Dès le lendemain, des guides et des agents des Eaux et Forêts se rendi-

rent sur place pour comprendre ce qui s'était passé car la première hypothèse retenue était celle d'une rupture du grand glacier de Bionnassay. C'est alors qu'on découvrit que le minuscule glacier de Tête Rousse, totalement inconnu du public, était éventré ; la poche d'eau qui s'était lentement constituée sans doute en plusieurs années, avait conduit à la rupture du front glaciaire et le plafond n'étant plus soutenu par l'eau s'était ensuite effondré. Les images rapportées étaient explicites. Le volume d'eau stocké dans les entrailles du glacier fut estimé à 200 000 mètres-cube, le bouchon de glace à 90 000 mètres-cube et la lave torrentielle à environ 600 000 mètres-cube (eaux augmentée des matériaux emportés en route). Elle s'étalât dans la plaine de Saint Gervais et la dévastât.

Afin qu'une telle catastrophe ne puisse se reproduire, un tunnel de vidange fut creusé dans la roche sous le glacier en 1899-1900 à plus de 3000 mètres d'altitude par les Eaux et Forêts. Un second tunnel en 1904 permit l'évacuation d'une poche d'eau de 22 000 mètres-cube. Il est toujours en service et nettoyé périodiquement par le Service de Restauration en Montagne de l'Office National des Forêts (ONF-RTM), héritière de ce glacier dangereux.

L'écroulement de la langue du glacier Allalin

Cette catastrophe a affecté le chantier du barrage de Mattmark, barrage hydroélectrique situé dans la vallée voi-

sine de Zermatt, proche de la frontière italienne qui, au Col du Monte Moro, surplombe de 1500 mètres la station de ski de Macugnaga. Un campement de baraquements fut installé près de la digue pour loger les ouvriers suisses et italiens, situé un peu trop en bordure du capricieux glacier de l'Allalin. En effet, ce glacier était connu comme dangereux, l'avance périodique de sa langue glaciaire barrant la vallée avec la création d'un lac temporaire occasionnant des débâcles désastreuses comme en 1633.



Le glacier suisse Allalin au lendemain de la catastrophe. [Archives Glaciorisk-Cemagref, photo Cornet]

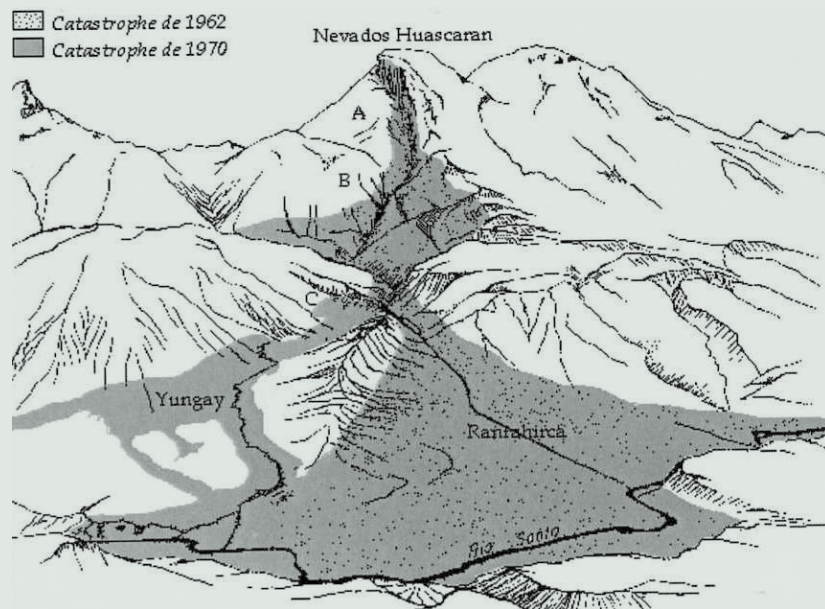
Au XIX^e siècle, quinze vidanges furent répertoriées. Mais on n'imaginait pas que le glacier pût s'effondrer dans la vallée bien que quelques crevasses inquiétantes aient été signalées par des alpinistes. C'est pourtant ce qui est arrivé le 30 août 1965 en fin de journée. La langue du glacier Allalin s'est détaché (environ 500 000 à un million de mètres-cube de glace) et a balayé les bâtiments abritant les ouvriers du barrage revenus du chantier. Au total, 88 victimes furent retirées des décombres.

Le tremblement de terre du Huascarán, Pérou

La Cordillère des Andes est sujette à de nombreux tremblements de terre, et a le triste privilège d'avoir le record du plus violent séisme du XX^e siècle de la planète (22 mai 1960 à Valdivia au Chili, d'une magnitude de 9,5 sur l'échelle ouverte de Richter). En haute montagne, les conséquences de telles secousses telluriques donnent de monstrueuses avalanches de roc et de glace balayant des vallées souvent inhabitées.

Le 31 mai 1970, la Cordillère Blanche fut secouée par un tremblement de terre d'une magnitude 7,7 dont les conséquences furent terribles : 75 000 morts et tous les villages de cette zone dévastés, d'innombrables glissements de terrain dont l'écroulement d'une partie du Huascarán Norte, 6654 mètres d'altitude. C'est environ 3 millions de mètres-cube de rochers et de glace qui se détachèrent du sommet et chutèrent en se pulvérisant tout au long des 3000 mètres de paroi quasi verticale. La chaleur dégagée par ces chocs transforma les blocs de glace en eau puis en vapeur et c'est une colossale coulée de boue dévalant la quebrada (vallée encaissée) de Armapampa sur coussin d'air à près de 300 km/h (8 à 10 mètres par seconde) qui raya en quelques minutes la ville de Yungay et celle de Ranrahirca.

Bien que la catastrophe eût lieu en pleine après-midi et malgré un bruit épouvantable, peu de personnes eurent le temps de s'enfuir. Le bilan ne fut jamais exactement connu et entre



Le sommet Nord du Huascarán 6654 m et l'extension de la coulée de boue de 1962 (4000 victimes) et du 31 mai 1970 (15 000 morts). Archives Glaciorsk extrait de «Rockslides and avalanches» 1978, dessin N Miller.

15 000 et 20 000 morts furent à déplorer. Seules 300 personnes en se réfugiant sur la petite éminence du cimetière précolombien échappèrent à la furie de la coulée de boue et eurent ainsi la vie sauve.

L'importance du drame de 1970 trouva son origine par le fait qu'une petite fraction de la gigantesque coulée de lave torrentielle (ou coulée de boue, en espagnol alluvion) réussit à franchir la moraine haute de plus de 150 mètres bordant le canyon de la quebrada Incayoc et ensevelit ainsi la ville de Yungay. Les précédentes catastrophes, dont la meurtrière de 1962 avec 4000 morts, avait épargné la ville de Yungay protégée par ce rempart morainique jusqu'à ce funeste 31 mai. À

noter aussi que l'alluvion parcourut la vallée du Rio Santa jusqu'à son embouchure et termina sa course meurtrière dans l'océan Pacifique.

Actuellement, du paisible pueblo de Yungay ne subsistent que le sommet des palmiers de la place d'Armes et le sommet de la cathédrale éventrée. Un nouveau Yungay a été construit à l'abri de futurs écroulements du Huascarán un peu plus haut à gauche de l'alluvion de 1970.

Notons encore que comme pour l'accident de l'Allalin en Suisse, des signes avant-coureurs avaient été observés par des alpinistes. En effet, une expédition française ouvrant le pilier Nord-Est du Huascarán Nord par le glacier 511 (nommé depuis glacier Leprince

Ringuet, brillant alpiniste qui disparut au cours de cette ascension) signala la présence dans la crête rocheuse sommitale de fissures inquiétantes d'un mètre de large !

L'éruption du Nevado del Ruiz, Colombie

Les éruptions volcaniques sont souvent très meurtrières, mais quand un glacier coiffe le volcan, la fonte brutale de cette glace engendre des catastrophes encore plus dramatiques. Ce fut le cas lors de l'éruption en Colombie du volcan el Nevado del Ruiz (5400 mètres d'altitude) le 13 novembre

1985, en début de nuit. Les matériaux éjectés à très haute température sont retombés sur le glacier et combinés à la chaleur dégagée par l'éruption ont fait fondre plusieurs kilomètres-cube de glace et de neige qui se sont engouffrés dans les vallées rayonnant depuis le sommet formant rapidement en érodant et incorporant les cendres volcaniques des rives des lahars (ou coulées de boue chargées de cendres). Les vallées parcourues furent dévastées et celle du Rio Lagunillas vit passer un débit estimé à 30 000 mètres-cube par seconde. A plus de 50 kilomètres du volcan et 4000 mètres plus bas dans la vallée du grand fleuve Magdalena, la ville d'Armero aurait pu se croire à l'abri. Les autorités de la ville diffusèrent par radio des communiqués rassurants pour ne pas affoler la population et par ignorance aussi, faute de réseau efficace concernant la présence de lahars.

Vers 23 heures, moins de deux heures après l'éruption, une monstrueuse coulée de boue submergea toute la ville, et même des rescapés qui s'étaient réfugiés au dernier étage d'un hôtel réputé indestructible furent emportés lorsque les coups de butoir répétés entraînèrent l'effondrement de la construction. Ils ne durent leurs saluts qu'à un bidon qui joua le rôle de bouée de sauvetage ! On dénombra au moins 23 000 personnes disparues et il y eut quelques rescapés. Mais tous ceux qui ont vu à la télévision ces images insoutenables d'une petite colombienne coincée dans les décombres se faire lentement noyer



Le volcan Nevado del Ruiz, 5400 m en activité en 1998 et un tunnel créé en 80 par les eaux chaudes provenant de la fonte de la neige et de la glace lors de l'éruption de novembre 1985. (photo F. Valla et rapport IMIP/Cemagref)

par la boue gardent de cette catastrophe un souvenir indélébile.

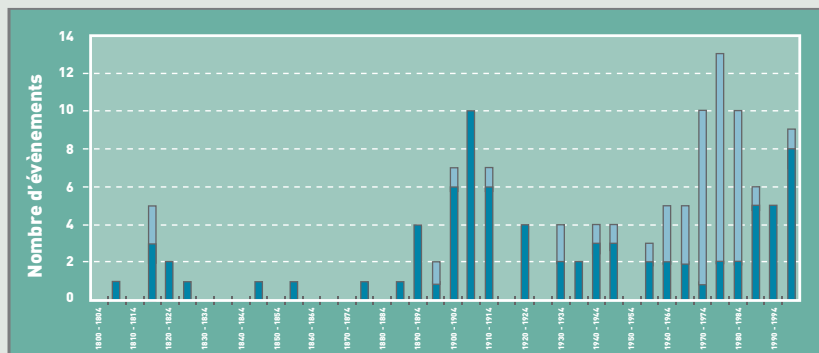
Cet événement, de par son ampleur et le retentissement que lui avaient donné les médias, suscita plusieurs programmes scientifiques nationaux et internationaux. Outre l'étude de l'éruption, une cartographie soignée des risques fut mise en œuvre pour éviter un futur désastre.

LES RISQUES GLACIAIRES

L'histoire a montré que les glaciers sont à l'origine de nombreuses catastrophes, soit en raison de leur dynamique propre (écroulements de séracs ou de la langue glaciaire) soit par leur présence elle-même (lacs morainiques, poches sous-glaciaires, glaciers coiffant des volcans actifs). S'il n'y avait que la glace en jeu, les catastrophes seraient certainement rarement dramatiques. Mais dès que l'eau sous son état liquide entre en jeu, la propagation du phénomène prend une échelle bien supérieure et les conséquences sont alors infiniment plus graves.

Dans le cadre du programme européen Glaciorisk qui fédère onze partenaires membres de six pays (Italie, Suisse, Autriche, Norvège, Islande et France, coordination CEMAGREF), une étude historique des catastrophes glaciaires en Europe a été réalisée. Sur deux siècles, 127 événements ont été comptabilisés grâce aux archives, témoignages et écrits divers. Il faut cependant interpréter cette statistique avec prudence car au XIX^e siècle, seules les grandes catastrophes ont été retenues par les diverses sources, même si en France la période 1890-1914 est extrêmement bien documentée grâce aux « Etudes Glaciologiques » des Eaux et Forêts. Depuis 1960, la montagne étant très fréquentée, peu d'événements passent inaperçus, même s'ils sont mineurs. Il serait donc erroné de croire que la fréquence des événements tend à augmenter au cours des dernières dizaines d'années.

Événements provoqués par les glaciers recensés au cours de la période 1800 – 2000 en Europe. En sombre : France. En clair : Europe hors France (source Cemagref/Glaciorisk) (Buisson-Guirado)



Typologie des risques

On peut classer les risques glaciaires en trois grandes catégories, les chutes de glaces, les vidanges de lac et les ruptures de poches d'eau intra-glaciaire.

Les chutes de glace comprennent les *chutes de séracs* (nombreux accidents d'alpinistes, avalanches hivernales dont le détonateur est une chute de sérac comme au glacier de Taconnaz à Chamonix) ainsi que les *ruptures de langue de glacier* (Glacier du Tour en 1949, glacier de l'Allalin en 1965).

Les vidanges de lacs : avec le recul des glaciers, on trouve couramment un *lac proglaciaire* occupant l'emplacement de l'ancienne langue, lac qui est retenu par la moraine frontale plus ou moins solide. Ce barrage morainique contient parfois de la glace ancienne qui, dans une période de réchauffement climatique, va fondre au fil du temps et fragiliser la digue, favorisant les infiltrations d'eau et la création de « renards », chenaux érodés par l'eau sous pression qui rapidement ruinent le barrage. Les exemples sont malheureusement nombreux dans l'Himalaya et les Andes (au Pérou Laguna Paron 1951, Palcacocha détruisant Huaraz 1941), mais aussi dans les Alpes bien que moins dévastateurs (glacier du Tacul 1819, Nantillon 1934). Le lac est parfois situé en *bordure du glacier*, comme celui de Miage sur le versant italien du Mont-Blanc, dont plusieurs vidanges sont connues depuis le Moyen Âge. Mais les lacs débordent aussi sans rupture du barrage, soit

par la chute d'une importante quantité de glace ou de rocher, soit par un glissement de terrain. La vague déferlant sur le barrage peut être énorme et dans certains cas, plus d'un million de mètres-cube ont dévalé et dévasté la région concernée (lac de l'Altar en Equateur après l'effondrement d'une aiguille de rocher de 2 millions de mètres-cube). Le colmatage par la farine glaciaire provenant du frottement du glacier sur son lit rocheux est aussi une cause de lent débordement, car la porosité naturelle du fond et des bords du lac permet normalement l'évacuation du trop plein et la régulation du niveau du lac.

Autre configuration, les lacs qui se forment sur la *surface du glacier*. Le cas du lac du Gorner sur le glacier du même nom, tout près de Zermatt, est bien connu. En été, lorsque la pression hydrostatique est suffisante, le lac se vidange sans dégâts par des canaux dans la glace, canaux qui se pincent et se ferment en hiver mais que la pression de l'eau réactive en été. Le lac qui s'est formé sur le glacier du Bélvédère au pied de la face Est du Mont Rose en Italie a défrayé la chronique et affolé les populations de la vallée de Macugnaga. A grand renfort de technologie on tenta sans grand résultat de vidanger ce lac de plusieurs centaines de milliers de mètres-cube et les autorités italiennes virent avec soulagement le lac se vider naturellement par le fond. De même en France, le lac perché en Vanoise à 3200 mètres sur le glacier de Rochemelon a fait l'objet d'un siphon-

nage et d'un creusement dans la glace d'un profond chenal d'évacuation qui permit la vidange d'un demi-million de mètres-cube.

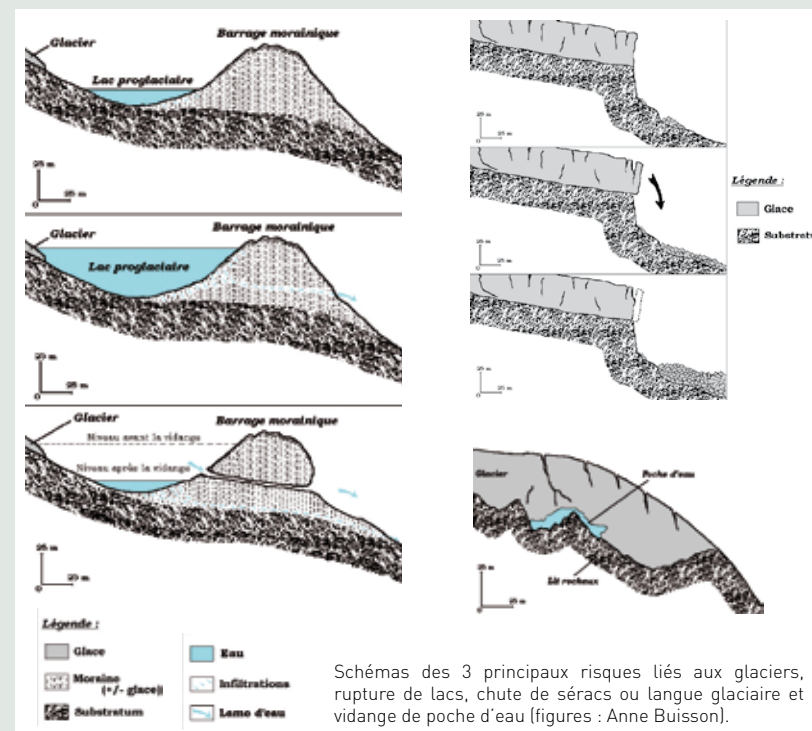
En période d'avancée glaciaire, des lacs barrés par de la glace sont formés, soit par l'accumulation de chutes de séracs barrant la vallée (Giétroz 1818 ou l'Epenaz en Savoie, dont la rupture est aussi en été 1818), soit par le glacier lui-même (Népal, Bouthan, Karakoram). Ces retenues d'eau sont très souvent énormes, atteignant des dizaines de millions de mètres-cube, les conséquences d'une éventuelle rupture du barrage de glace pouvant être alors particulièrement dramatiques (la glace étant plus légère que l'eau subit une poussée d'Archimède qui tend à le soulever et permet ainsi à l'eau de se frayer un passage par-dessous).

La rupture de poches d'eau intra-glaciaire est le risque le plus difficile à déceler, à surveiller et traiter. En effet, les indices de surface sont souvent inexistantes et seul le tarissement d'un torrent issu du glacier peut alerter le glaciologue. Les mesures de variation de débit sont illusoire car à raison de 10 litres par seconde, un volume de 100 000 mètres-cube se constituera en 115 jours, soit en une saison. Et quel hydrologue pourrait prétendre mesurer un débit de torrent à quelques litres par seconde près ?

C'est bien pourquoi les vidanges de poches intra-glaciaires sont inattendues et prennent de court les spécialistes ainsi que les responsables en charge des risques naturels. Le cas de la catastrophe

de Tête Rousse est très significatif à cet égard, et la réponse des pouvoirs publics à cet événement fut le creusement d'un premier tunnel sous le glacier, puis d'un second mieux positionné. Certaines poches d'eau ont le bon goût de se vidanger périodiquement et lentement, comme celle du glacier du Trient dans le massif du Mont Blanc, n'occasionnant ainsi aucun désordre notable. Dans les Alpes du Sud, près de Barcelonnette, le glacier du Fond de Chauvet est le lieu de vidanges périodiques de faible ampleur (50 000 mètres-cube) qui ne perturbent que les bords de la rivière Ubaye dans laquelle se jette le torrent du glacier.

Parmi les événements cataclysmiques les plus marquants, on peut citer la colossale poche d'eau générée sous le glacier Vatnajökull en Islande par l'éruption du volcan sous-glaciaire Grimsvötn en 1996. Celle-ci a été estimée à 4 kilomètres-cube (4 milliards de mètres-cube) et lorsque la vidange intervint les 5 et 6 novembre, c'est un débit de 45 000 mètres-cube par seconde (le fleuve Congo !) qui s'est frayé, sous la calotte glaciaire de plus de 500 mètres d'épaisseur, un chenal de 50 kilomètres jusqu'à la mer. Pas de victimes furent à déplorer dans cette région peu habitée, seules quelques infrastructures routières furent détruites dont un pont de 380 mètres de long. L'Islande a l'habitude de ces phénomènes qui portent le nom de « jokhullhaup », et celui du Grimsvötn s'est produit plusieurs fois au cours du XX^e siècle, mais jamais aussi violemment.



Schémas des 3 principaux risques liés aux glaciers, rupture de lacs, chute de séracs ou langue glaciaire et vidange de poche d'eau (figures : Anne Buisson).

Prévention et mitigation des risques glaciaires

La prévention consiste à surveiller les sites glaciaires susceptibles de créer un événement dommageable alors que la mitigation a la prétention de limiter, voire supprimer les conséquences du risque. Dans le cadre du programme européen Glaciorisk déjà cité, les six pays partenaires ont réalisé un atlas des catastrophes d'origine glaciaire concernant leurs pays respectifs. Ce long travail a débouché sur une base de données appelée GRIDABASE où tous les glaciers à risque sont répertoriés, avec leurs caractéristiques et

l'historique des événements connus. Ainsi, plus de deux cents glaciers sont répertoriés en Europe avec des procédures de surveillance.

Dans chaque pays, les autorités essaient de juguler certains aléas cruciaux comme des lacs pouvant se vidanger sur des villages de montagne ou des stations de ski. Des engins de génie civil transportés en pièces par hélicoptère ont été ainsi utilisés pour creuser un chenal dans la moraine et réguler le niveau d'un lac d'altitude (lacs de Gruben dans le Valais, Arsine en Oisans avec la montée d'une pelle mécanique dans des conditions épi-

ques). En Italie les moyens mis en place pour vidanger le Lac éphémère du Bélvédère ont atteint des sommets avec des dizaines de tonnes transportées à près de 3000 mètres d'altitude et une mobilisation sans précédent. Les colossales pompes mises sur radeaux sur le lac n'ont pas tenu leurs promesses et la nature a été d'une grande mansuétude, le lac se vidangeant progressivement par des fissures du fond alors qu'on pouvait s'attendre à la rupture du front de glace rive gauche.

En France, le lac de Rochemelon a été récemment vidangé en creusant dans la glace un profond chenal évacuant les eaux dans le vallon du Ribon en Haute Maurienne. Au Pérou, depuis

plusieurs décennies, des abaissements de niveau de lacs ont été réalisés avec des moyens très rudimentaires mais efficaces (creusement journalier du chenal à la pioche pendant que l'eau était retenue par un barrage de sacs de sable...).

Outre ces travaux d'envergure, la mitigation comporte la localisation des risques avec délimitation des zones exposées à divers degrés en fonction de l'ampleur du phénomène attendu. Ces cartes sont essentielles pour les plans d'évacuation en cas de sinistre et sont à prendre en compte pour de futurs aménagements.

Les risques liés aux glaciers, même s'ils sont d'une occurrence faible mais

d'une gravité souvent extrême, doivent de plus en plus être pris en compte en raison de l'occupation croissante des zones de montagne surtout dans un contexte de réchauffement climatique avéré. Le recul des glaciers favorise l'apparition de lacs dans les zones frontales laissées libres, zones récemment déglacées et donc relativement instables. Les nouveaux fronts glaciaires se retrouvent parfois perchés en position instable générant des chutes

de séracs ou même de langues glaciaires. C'est pourquoi un programme comme Glaciorisk permet aux membres de la communauté scientifique européenne de mettre en commun leurs acquis et de partager leurs expériences au bénéfice de la sécurité des habitants des hautes vallées et des installations économiques qui sont leurs outils de travail.

François Valla



Le lac glaciaire de Rochemelon situé à 3200 mètres d'altitude à la frontière franco-italienne avant travaux en 2003 (cliché François Valla). Photo : Daniele Cat Berro



Lac Effimero au glacier du Belvedere. Photo : Gianni Mortara



D'importants travaux (Société Hydrokarst et RTM 73) ont permis le creusement d'un chenal dans la glace et la vidange du lac à la fin de l'été 2005. Photos RTM Savoie

LES GLACIERS DANS L'ART

La rencontre entre l'art et les glaciers est une affaire tardive sur le plan historique. Mis à part le géographe grec Strabon qui évoqua les difficultés rencontrées par l'empereur Auguste pour élargir les routes de l'époque, en donnant au passage une ébauche d'explication sur la formation des glaciers, aucun écrit ni aucune peinture ne furent consacrés à ce milieu hors du commun à tous égards jusqu'à la fin du Moyen-âge.

Cette absence est d'autant plus surprenante que l'Homme a parcouru les Alpes depuis toujours, en atteste la découverte de la momie des glaces Ötzi dans les Dolomites italiennes, les nombreuses voies romaines, ainsi que le commerce très actif entre les deux versants des Alpes au Moyen-âge. Les glaciers étaient peut-être trop éloignés du regard des hommes en ces temps où le climat était particulièrement chaud d'après les études des micro-cycles glaciaires, où plus simplement, cet univers était-il frappé du sceau de la terreur, et ne pouvait à ce titre servir de source d'inspiration pour l'art.

C'est avec la Renaissance que l'éveil aux glaciers pris corps, avec notamment la maîtrise de la xylographie, technique créant à la fois le livre et l'image. A une époque où l'attrait pour

la Nature émergeait, l'intérêt pour la Montagne et les glaciers pris réellement beaucoup d'ampleur pour cette période de l'histoire, sous la forme essentiellement de récits, comme celui de l'abbé Hamon, curé de Saint-Sulpice, relatant une tournée pastorale de l'évêque de Genève dans le Faucigny. Il est ainsi fait mention des chutes d'énormes blocs de glace accompagnées de grands fracas dans les grandes chaleurs d'été, et certainement la première évocation des crampons : « ... souvent même il s'attachait des crampons de fer aux pieds pour ne pas glisser sur les glaces et rouler dans les abîmes. »

Même si de nombreux ouvrages de l'époque décrivent le monde, les diverses Cosmographies, Topographies et autres Théâtres du Monde sont encore loin d'être fidèles aux réalités du terrain, le Mont-Blanc et ses sommets satellites englacés n'ayant aucune existence, alors que le village de Chamonix est déjà régulièrement mentionné. Mais l'engouement pour les glaciers est bien réel, et l'on se presse même pour les admirer mais de façon encore très lointaine depuis certaines grandes cités alpines comme Lugano ou Lucerne.



Peinture de Jean-Antoine Linck vers 1800 montrant les avancées spectaculaires de la mer de Glace et du glacier des Bossons. Tiré de l'ouvrage « Histoire & Histoires, mer de Glace et Vallée Blanche » de Christian Mollier édité à compte d'auteur, 2004.

Le XVII^e siècle verra la Montagne tomber dans une véritable disgrâce et l'intérêt pour les glaciers aussi. C'est l'époque où l'esthétique nouvelle bannira « ces murailles gênantes » les contrées montagneuses et a fortiori hautes alpines étant considérées comme ennuyeuses, tristes et détestables ! Une véritable rupture entre l'univers montagnard et la société s'est amorcée, attisée par le développement de l'urbanité. De manière concomitante, c'est la période des grandes misères résultant des hivers terriblement froids et des étés pluvieux, ne permettant pas de reconstituer des réserves alimentaires suffisantes.

Les mauvaises conditions climatiques

favorisent évidemment la poussée glaciaire, comme l'attestent les archives de l'époque à Chamonix. En 1644, l'avancée de la mer de Glace est à son maximum, et les villages de Bonnanay et de Chatellard sont totalement détruits par les chutes de blocs de glace. Malgré tout, dans ce contexte très défavorable, il reste des esprits passionnés par les glaciers, comme ces écrivains suisses qui poursuivent le travail entamé au siècle précédent et définissent toujours plus précisément les « glacières », en les faisant figurer sur les cartes de l'époque et en les nommant. De son côté, le poète Marc Lescaillot, avocat au Parlement, et auteur du *Tableau de la Suisse et*

autres alliez de la France ès Allemagne, publié à Paris en 1618 par Adrien Perier combat la théorie que le cristal soit de la glace fortement gelée, mais aussi fait rentrer par la grande porte du récit poétique le monde des glaciers.

Mais c'est au XVIII^e siècle que l'intérêt pour les glaciers va prendre toute son ampleur, ce siècle des Lumières en contrepoint à celui qui l'a précédé. On assiste à un véritable réveil, où la Montagne est glorifiée, entrant dans l'intellect de la Société. Les superlatifs sont innombrables pour exprimer le sentiment humain face à la Montagne, vue comme une « sublime inspiratrice ». Ce siècle particulièrement fécond correspond aussi à une pause dans la petite glaciation, offrant un répit tout relatif aux populations de montagne si martyrisées, comme l'attestent les rares écrits de l'époque dans la vallée de Chamonix.



Gravure aquarellée de M.-T. Bourrit, vers 1780, représentant la vue classique de la vallée glaciaire de Chamouni prise depuis le Monteverve. Tiré de l'ouvrage « Histoire & Histoires, mer de Glace et Vallée Blanche » de Christian Mollier édité à compte d'auteur, 2004

L'Amour et la Nature, ces deux grandes forces de ce siècle, seront les moteurs de la renaissance de l'attrait pour la Montagne, dans laquelle la place des glaciers sera prépondérante. Méditations poétiques d'une côté, « à la Albrecht Haller », préfigurant un sentimentalisme exacerbé teinté de religiosité à l'origine du romantisme, et réflexions scientifiques méthodiques comme elles furent menées par Jean-Jacques Scheuchzer, où approches physiques et géographiques commencent à converger pour donner une description cohérente de cet univers. Ce fut l'époque de la découverte de la Nature pour elle-même, et quelle place mieux que le lac Léman pouvait donner le sentiment de s'y fondre avec plus de plénitude et d'harmonie ? Même si Jean-Jacques Rousseau dans *La Nouvelle Héloïse* s'inscrit dans cette tendance avec un style enchanteur, jamais dans son œuvre il ne fait néanmoins mention aux glaciers qui ne l'intéressent pas réellement, comme Voltaire d'ailleurs.

En 1751, c'est Georges Altmann qui publie un *Essai de description historique et physique des Montagnes de glace de la Suisse*, ouvrage doté d'une petite carte, puis David Herrliberger lui succède en 1754 avec son œuvre célèbre *Topographie*, et enfin Gottlieb Sigmund Gruner tente d'écrire toute une histoire des glaciers de la Suisse, venant compléter d'autres descriptions antérieures mais plus partielles. Des planches dessinées d'après nature représentant des amas de glace souli-



Illustration mélangeant héliogravure et dessin au trait, tiré du livre « l'Amateur d'Abîmes » de Samivel, Editions Stock, 1951.

gnent que le dessin vient enrichir la littérature pour décrire ces contrées extraordinaires. Puisque le texte est complété pleinement par l'image réaliste grâce aux talents croisés de peintres comme S-H. Grim, G. Walser ou F. Meyer et de graveurs tel A. Zingg, il n'est pas étonnant que les glaciers deviennent rapidement l'objet de toutes les attentions dans le contexte particulièrement porteur du XVIII^e siècle. Et ce que les savants suisses font par la propagande du livre, William Windham, qui en 1741 fut le premier « touriste étranger en compagnie » de Richard Pococke dans la vallée de Chamonix, M-T. Bourrit et H-B. de Saussure, le feront par la propagande personnelle, sous la forme notamment d'ascensions répétées.

Dans l'effervescence intellectuelle

générale qui règne alors, on s'interroge ainsi sur la notion de mer de Glace ! Alors que certains imaginent « une mer parfaitement horizontale » pour expliquer l'existence des glaciers, d'autres donnent une interprétation encore plus fantaisiste, évoquant « une évaporation continue des montagnes. » C'est H-B. de Saussure, professeur de philosophie à Genève, et minéralogiste reconnu qui mit fin à ces errements intellectuels en scientifique averti, suggérant les premières notions de dynamique glaciaire, et fixant la terminologie dans ce domaine, toujours valable aujourd'hui, tels les termes de « moraine » et de « sérac » utilisés dans le langage savoyard.

Même si M-T. Bourrit n'a pas son envergure, son rôle dans la valorisation artistique des glaciers est incontestable, ne serait-ce que par la multitude de ses peintures parfois très exagérées dans la représentation, notamment celles montrant la mer de Glace depuis l'hospice de Blair, haut-lieu de l'époque. Cet endroit a été source d'inspiration maintes fois répétées, pour Albanis de Beaumont, Hackert et Grudman à la fin du XVIII^e, puis Samuel Birman, Terry, Hugard de la Tour au XIX^e et plus tard Flemwell, Wibault, Coppier au XX^e siècle, certains photographes prenant le relais des peintres, ou d'autres artistes comme Samivel n'hésitant pas à mélanger photographies et dessins dans un genre artistique nouveau, sorte d'intermédiaire entre la peinture, la photographie et la bande dessinée.



Dessin humoristique tiré de l'ouvrage « Sous l'œil des Choucas » de Samivel, Editions Delagrave, 1981.

Comme quoi, la source d'inspiration peut avoir des racines anciennes, et il est à se demander si une telle propension à peindre toujours le même angle de vue relève de la fascination de ce lieu, certes exceptionnel avec les Grandes-Jorasses en toile de fond, ou de la simple émulation artistique, chacun cherchant à affirmer son regard personnel sur ce panorama devenu classique au fil des ans. Une forme de défi artistique, ou peut-être l'expression d'une oeuvre quasi-initiatique pour tout paysagiste de ces hauts lieux ?

A défaut d'originalité, cette constance aura deux grands mérites : elle permettra de comparer l'évolution des styles, du classicisme le plus absolu, au pointillisme, mais elle viendra aussi apporter de précieuses informations sur l'ampleur de la fonte des glaciers en deux siècles. Les artistes au service des scientifiques, a leur insu !

C'est dans le sillage de ces grandes personnalités que naquit le siècle des Romantiques. Attirés par la renommée des montagnes glaciaires, les plus grands artistes de l'époque sont venus laisser leur trace, comme les poètes Georges Byron, Victor Hugo, John Ruskin, mais aussi les romanciers Alexandre Dumas, Georges Sand, Charles Dickens et tant d'autres. Seul ou presque, François-René de Chateaubriand ne fit pas l'éloge de ces lieux devenus quasi-mystiques, assimilant même à de la simple cendre les neiges du bas glacier des Bois près de Chamonix, mêlées à de la poussière de granit.

L'effet de masse aidant, les formes populaires de l'expression artistique se multiplient sur des supports matériels différents, grâce notamment à la photographie, bien qu'on ne puisse parler d'un nouveau souffle dans l'inspiration. À la faveur de ce mouvement de vulgarisation, les portraits cocasses deviennent l'expression affichée de la fierté populaire à s'exhiber au milieu de terribles crevasses, en costume du dimanche, en famille, ou dans tout autre accoutrement ! On célèbre le retour d'une course avec ses guides, on fait la promotion d'une profession ou même d'un ordre religieux, tout est bon dans cette cacophonie sociale pour marquer son adhésion à ce grand mouvement collectif dont on ne comprend pas forcément le sens. Mais peu importe. Le monstre de glace qui faisait peur par le passé est maintenant vaincu, et on

lui marche volontiers sur le ventre !... De même pour la carte postale, art populaire par excellence.

La caricature émergea ainsi naturellement en réaction à toute cette cacophonie visuelle. Bien avant les oeuvres admirables et visionnaires de Samivel sur le devenir des glaciers, cet art explosa dès le début du XIX^e. De la caricature, on trace assez naturellement la filiation vers la bande dessinée qui vit le jour un siècle après, où le glacier devient alors la toile de fond, plus qu'objet d'adoration en lui-même. On pense à Hergé et Tintin au Tibet...

Et c'est avec un humour décapant qu'un siècle plus tard, le photographe Guy Martin-Revel illustrera les



Ascension osée de la mer de Glace tiré de l'ouvrage « Fragile » de Guy Martin-Revel, Edition Michel Guérin, 2005.

exploits de ces mêmes touristes équipés de sandales et de talons aiguilles, gravissant à quatre pattes la mer Glace, avec des clichés noir et blanc de toute beauté.

Bien que le XIX^e siècle fut certainement celui de l'art glaciaire de masse, aucun mouvement artistique nouveau qui ne fut déjà considéré du temps des Lumières n'émergea, de même pour le XX^e. Un bon exemple à ce sujet est la fameuse « table des glaciers », pseudo-cheminée des fées aux formes trapues. L'évocation répétitive de ce thème assez singulier transcende totalement les différentes époques sur presque deux siècles, à croire que les artistes des glaciers manque singulièrement d'imagination ! De ce point de vue, le XVIII^e est réellement le siècle pendant lequel l'art des glaciers a atteint son apogée, même si de remarquables talents ont toujours existé à diverses époques pour décrire ou dépeindre admirablement cette matière si étrange qu'est la glace. On pense à Gabriel Loppé, et ses fresques de sérac d'un réalisme quasi-dramatique.

Publicité et 7^e art se sont parfois emparés des glaciers, comme les potages Liebig, mais ce ne sont que de modestes incursions. Tout au plus peut-on être sensible à l'art photographique abstrait des glaciers tel qu'il est exprimé très récemment par le japonais Doki Mitsuo présenté dans le magnifique ouvrage *La Montagne des photographes*. Au XX^e, on peut affirmer sans risque que l'intérêt artistique pour les glaciers a significativement décliné,

même si la photographie couleur a apporté sa contribution à la mise en valeur de cette univers, mais aussi à sa banalisation. Depuis de nombreuses années, les glaciers ne représentent plus un thème porteur en lui-même, bien que l'on puisse presque chaque année les redécouvrir, à Noël, dans de très jolis livres de collection, dont le titre est invariablement les Alpes, les Pyrénées, la Vanoise, l'Himalaya ou les Andes... vues du ciel ! Le glacier passe au second plan, retourne à

l'état de simple décor, ce qui est peut-être mieux ainsi, alors que son agonie semble désormais probable, par les facéties du climat. Ainsi, l'apogée de l'art glaciaire coïncide-t-elle avec le pic du petit âge glaciaire, et son déclin suit invariablement le réchauffement de l'atmosphère. Cruelle ironie des circonstances, à moins que cette coïncidence ne soit finalement pas si fortuite que cela !

Yves Peysson



L'Homme à l'assaut du monstre de glace, thème porteur au XVIII^e siècle repris deux siècles plus tard sous l'angle de la pratique sportive... Tiré de l'ouvrage « Les Grands Jours » de W. Bonatti, Editions Arthaud, 1973.



Table des glaciers sur le glacier de l'Aar en Suisse par le peintre G. Lory fils, tiré de l'ouvrage « Montagne Paradis ou le rêve romantique » de Samivel et Pierre Norande, Editions Arthaud, 1988.



Evocation originale du thème de la table des glaciers pour les boites de conserve Liebig, tiré de l'ouvrage « Histoire & Histoires, mer de Glace et Vallée Blanche » de Christian Molliet, Editions Arthaud, 2004.



Le thème de la crevasse ouvrant sur un autre monde inquiétant par le photographe japonais Doki Mitsuo, Tiré de l'ouvrage « Montagne des Photographes » d'Elisabeth Foch, Editions Bordas, 1989.

NOTES

1 - À proximité des pôles, l'eau de mer gèle en surface pour former la banquise : les glaciers peuvent alors se former à l'altitude du niveau de la mer, et doivent « vèler » les fameux icebergs pour dissiper le trop plein de glace. Vers l'équateur, cette limite de formation des glaciers remonte jusqu'à 5900 - 6000 mètres.

Actuellement, les fameuses « neiges du Kilimandjaro » tendent à disparaître, car l'isotherme 0°C se situe au-dessus de son sommet.

2 - Bandes de Forbes : suite d'ogives alternativement claires et sombres qui naissent quelquefois au pied d'une chute de séracs, lorsque toutes les conditions sont réunies pour produire annuellement un couple .

3 - Les glaciers représentent la plus grande réserve d'eau douce de la planète, et de ce fait ont une importance stratégique majeure.

RÉFÉRENCES

Amateurs d'Abîmes par Samivel, Éditions Stock, 1951.

Traité de Glaciologie par Louis Llibourty, Éditions Masson, 2 tomes, 1965.

Neige, Glace & Roc par G. Rébuffat, Éditions Hachette, 1970.

Les Grands Jours par W. Bonatti, Éditions Arthaud, 1973.

Glaciers des Alpes par Robert Bachmann, Éditions Bibliothèque des Arts, 1979.

La Suisse et ses glaciers, Éditions Kümmerly and Frey, 1980.

Sous l'œil des Choucas par Samivel, Éditions Delagrave, 1981.

Montagne des Photographes par Elizabeth Foch, Éditions Bordas, 1989.

Montagne Paradis par Samivel & S. Norande, Éditions Arthaud, 1991.

Histoire du climat depuis l'an mil par Emmanuel Le Roy Ladurie, Éditions Flammarion, 1993.

Fragile par G. Martin-Revel, Editions Michel Guérin, 2002.

Mont Blanc, Conquêtes de l'imaginaire, collection Paul Payot, Éditions La Fontaine de Siloé, 2002.

Histoires & Histoires, Mer de Glace & Vallée Blanche par C. Mollier, Éditions à compte d'auteur, 2004.

Andes par Marcela Garcia et Bernard Francou, Éditions Georges Naef, 2005.

Les glaciers à l'épreuve du climat par Bernard Francou et Christian Vincent, IRD Éditions et Belin, 2007.

Glaciers, forces et fragilités par P. Wagnon, B. Francou, C. Vincent et D. Six, Glénat, 2007.

Consulter également sur Internet en recherchant les mots-clés *Glaciorisk*, *PAGES* ou *GIEC* dans les moteurs de recherche.