

Histoire des sciences

Mais comment s'écoule donc un glacier ? Aperçu historique

Frédérique Rémy*, Laurent Testut

Observatoire Midi-Pyrénées, 14, avenue Édouard-Belin, 31400 Toulouse, France

Reçu le 12 avril 2005 ; accepté après révision le 6 février 2006

Disponible sur Internet le 17 avril 2006

Présenté par Michel Durand-Delga

Résumé

Autant l'observation de la neige et de la glace a pu mettre les physiciens sur la voie de nombreuses découvertes scientifiques, autant l'évidence du mouvement des glaciers a été très longue à concevoir et à expliquer. C'est d'ailleurs seulement au début du XIX^e siècle, durant l'ultime phase d'avancée des glaciers alpins, que les naturalistes se sont intéressés aux glaciers. Après avoir admis que ceux-ci s'écoulaient et qu'il ne pouvait en être autrement, il fallait comprendre comment un glacier constitué de glace « solide » puisse se mettre en mouvement. Ce n'est qu'en 1840, l'année de la découverte de l'Antarctique par Dumont d'Urville, que deux mémoires, l'un d'Agassiz sur l'étude des glaciers et les grandes glaciations, l'autre du chanoine Rendu sur la théorie des glaciers de la Savoie, posent les bases de ce qui, un siècle plus tard, allait devenir la glaciologie. Cependant, la théorie défendue par les plus grands naturalistes et physiciens durant le XIX^e siècle était fondée sur des mécanismes de fonte et de regel, et même si le mot « fluide » fut employé pour la première fois en 1773 pour désigner la glace, il faut attendre 130 ans plus tard pour que les lois de la mécanique des fluides visqueux soient appliquées à l'écoulement des glaciers. La paramétrisation de la loi formulée par Glen en 1955 est si peu contrainte que l'on ne peut pas affirmer, encore de nos jours, l'existence d'une loi d'écoulement des glaciers.

Pour citer cet article : F. Rémy, L. Testut, C. R. Geoscience 338 (2006).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

But how a glacier can flow? Historical outlines. Ice and snow have often helped physicists understand the world. On the contrary it has taken them a very long time to understand the flow of the glaciers. Naturalists only began to take an interest in glaciers at the beginning of the 19th century during the last phase of glacier advances. When the glacier flow from the upslope direction became obvious, it was then necessary to understand how it flowed. It was only in 1840, the year of the Antarctica ice sheet discovery by Dumont d'Urville, that two books laid the basis for the future field of glaciology: one by Agassiz on the ice age and glaciers, the other one by canon Rendu on glacier theory. During the 19th century, ice flow theories, adopted by most of the leading scientists, were based on melting/refreezing processes. Even though the word 'fluid' was first used in 1773 to describe ice, more the 130 years would have to go by before the laws of fluid mechanics were applied to ice. Even now, the parameter of Glen's law, which is used by glaciologists to model ice deformation, can take a very wide range of values, so that no unique ice flow law has yet been defined. *To cite this article: F. Rémy, L. Testut, C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : frederique.remy@cnes.fr (F. Rémy), laurent.testut@cnes.fr (L. Testut).

Mots-clés : Fonte ; Écoulement visqueux ; Vitesse d'écoulement ; Comportement quasi-visqueux ; Théorie du regel ; Bandes de Forbes ; Effet Tyndall ; Équation Navier–Stokes ; Loi de Glen ; Rhéologie ; Modélisation de la glace

Keywords : Melting ; Viscous fluid flow ; Flow velocity ; Quasi-viscous behaviour ; Refreezing theory ; Forbes bands ; Tyndall effect ; Navier–Stokes equation ; Glen parameter ; Rheology ; Ice modelization

Abridged English version

For a long time, mountains were considered to be sad and dangerous places and not worth visiting. Then, at the end of the 18th century, trips to the Alps became fashionable among painters, writers, geographers, and naturalists intent on discovering mountains and glaciers (Fig. 2). Due to the last advance of the glaciers at the end of the ice age, naturalists took a particular interest in ice and began to find proof of past glaciation periods.

During the 18th century the presence of ice in a green valley was a source of astonishment. How could ice remain in a warm place without melting? Even though there was evidence of ice flow – for instance the displacements of rocks or crevasses –, the deformation of a solid remained for a long time a non-intuitive concept.

Indeed, how a solid can flow? We now know that depending on the basal temperature, the flow is due to sliding or to ice deformation, but most of the scientists during the 19th century supported a third hypothesis.

Flow of glaciers by sliding was first assumed by Gruner in 1760. Nevertheless, the most famous proponent of sliding was Horace Benedict de Saussure from Geneva. He travelled along the Alps [44] from 1774 to 1787, and made the first scientific observations of ice thickness, air moisture, and the boiling temperature of water... For him, sliding was due to the presence of water coming from ice melting during the summer or underground heat. He used the word 'glacier' to describe these ice fields.

Flow of glaciers by deformation has never been clearly mentioned, but in 1773, André-César Bordier [8] understood for the first time that glaciers move toward the plain, which means that ice comes from the upslope area. He was the first to use the term 'fluid' to describe ice. He compared ice to a slack wax and a glacier to 'a vase with liqueur'. In 1840, canon Rendu noted that this ice filled the valley and neatly followed its boundaries [43]. Even though he was still astonished by the dual properties of ice, which is both fragile and ductile, his book on ice probably laid the basis for ice mechanics.

In parallel, in 1705, Scheuchzer gave a third hypothesis based on the effect of the dilation of water refreezing. This idea was to be forgotten before being strongly

supported by scientists arriving in the Alps at the beginning of the 19th century to investigate past glaciations: Jean de Charpentier, Ignace Venetz and above all the famous Louis Agassiz [5]. The latter aggressively rejected the Saussure's theory of ice sliding. In 1840, he wrote a book reviewing all previous theories on ice displacement and all observations of glaciers, from their colour to their surface features [1]. He carefully demonstrated in his book that the glaciers displacement is due to dilatation due to refreezing, while rejecting all other hypotheses [45]. His ideas prevailed for almost a century.

The first systematic measurements of ice velocity were made in the middle of the 19th century. In 1842, J. Forbes was the first scientist to understand that only *in situ* measurements would allow us to determine how flow affects glaciers [12]. He placed several markers in the ice to follow the displacement but also understood that the alternation of white and dark bands whose shape looks like ogives was due to the changing seasons (see Fig. 5). He had thus discovered an original way of describing ice deformation, which takes place faster in the central part of the glacier and slower near the sides.

However, the dual nature of ice, which is both fragile and ductile, is still a problem for physicists. One of the most famous scientists of the latter half of the 19th century, John Tyndall took a great interest in glacier flow [48]. He wanted to reconcile this duality and used contemporary experiments performed by Faraday and by the two Thomson brothers (one of whom became Lord Kelvin). Indeed, Faraday showed in 1850 that if two pieces of ice are pressed together they will merge into one piece. This experiment, which seems quite obvious today, was not obvious at the time as the question to be answered was: how melting ice could find sufficient coldness to refreeze? Tyndall was inspired by these experiments and built a theory based on melting/refreezing processes.

The first precise measurements of glacier speeds were taken at the beginning of the 20th century with quantity and quality gradually increasing over time. During the same period, experiments on the mechanical properties of ice were performed on a laboratory scale, following which fieldwork and laboratory experiments confirmed the first theoretical interpretations of the flow.

Finsterwalder was the first to propose a complete theory, partly descriptive, of the flow of ice. A little later, in 1906, Weinberg applied the Navier–Stokes equations of fluid mechanics to ice, considered as a Newtonian fluid [49,50]. In 1920 with Somoglianà, he also developed the mathematical theory of ice creep with uniform viscosity. It was also at that time that great scientific expeditions were organized to explore Polar Regions. A logical consequence was that the now famous British Glaciological Society was created in 1936 in response to the increasing work that was being done on ice and the interest it aroused.

Even though the Second World War reduced field-work it did not undermine glaciologists' determination to understand glaciers movement. Indeed, just after the war a Glacier Physics Committee was created and the first issue of the *Journal of Glaciology* was published in January 1947. A turning point was reached when Dr. Seligman, former president of the Institute of Iron and Metals at Cambridge decided, in response to his brother's urging (his brother was an eminent Glaciologist), to organise a conference of glaciologists together with metallurgists. On the 29th April 1948, during the meeting, E. Orowan and M.F. Perutz demonstrated how the theory of plastic flow could be applied to glaciers. Thus the first foundation stone for a flow law for glacier, linking strain to basal shear stress was laid by two scientists who were not glaciologists. After that, for ten years or so, intensive field work, laboratory experiments and theoretical works were done to finally define the flow law for ice. As was recommended by the Glacier Physics Committee:

“Experimental research on the fundamental physical and mechanical properties of ice is urgently required before a quantitative theory of glacier flow, based upon modern concept of plasticity in crystalline solids, can be formulated. For testing such theories in the field, novel methods of research will be needed for measuring flow rates and stresses in the interior of glaciers at considerable depth.”

It was J.F. Glen, a young student at the Cavendish laboratory at Cambridge University that proposed the now famous glaciers flow law based on his experimental work on ice creep. The behaviour proposed by J.F. Glen for the ice is the one of a quasi-viscous fluid, in between a Newtonian fluid and a plastic solid [16]. This is unfortunately not the end of the story because, even though this law has been widely used by glaciologists up to now, the behaviour of glaciers and ice sheets is known to be much more complex. Ice modelling is still improv-

ing with a better knowledge of anisotropy, ice dislocation or evolution with time of the Glen parameter [51] while glacier modelling rarely takes into account these improvements. Indeed, external forcing and boundary conditions are found to play a very important role [47]. New techniques, such as remote sensing now enable a global estimation of the surface topography and of the velocity for both ice sheets and glaciers [6,41,46]. This new information confirms the idea of complex ice behaviour. The controversial issue, still to be answered is whether a single flow law can correctly represent observed glacier movement.

1. Introduction

Descartes passait des heures à contempler ce qu'il appelait si joliment des pelotons de glace, qu'il décrit dans *Les Météores* en 1635 [10] comme l'une des rares merveilles du monde. Il s'étonnait que la glace puisse, à l'été, retenir sa dureté – sans s'amollir peu à peu comme la cire – et que la chaleur ne la pénètre qu'à mesure que le dessus devient liquide : la glace évolue de l'état solide à l'état liquide sans passer, comme les autres corps, par l'état pâteux. En 1612, Kepler découvre les cristaux de glace et interprète leur forme hexagonale comme un empilement régulier de sphères. La même année, Galilée remet la classification aristotélicienne léger/lourd en question, s'intéresse à la densité de la matière et au vide, en essayant de comprendre pourquoi la glace flotte [15]. Son discours sur les corps flottants lui vaut alors les foudres des aristotéliens et le met définitivement en conflit avec les dominicains.

Plus tard, en regardant cette même glace fondre (ou plus exactement, ne pas fondre au printemps...), le chimiste et physicien écossais Joseph Black, en 1762, comprit la chaleur latente [32].

En effet, la transformation de l'eau en glace est doublement compliquée, et doublement inspiratrice pour les physiciens. Comment, en effet, une substance peut-elle changer d'état sans modification de son essence et surtout comment, une fois solide, cette substance peut-elle s'être allégée? Ce sont les particularités souvent uniques de ce solide, ne serait-ce que flotter sur son liquide ou fondre plus facilement sous la pression, qui ont fait réfléchir les savants, des philosophes grecs aux physiciens contemporains et imaginer des théories nouvelles.

En revanche, il n'est pas sûr, que ce soit en observant les glaciers, que les physiciens se soient convaincus de l'écoulement de ce corps apparemment solide. Bien au contraire, car, même si le mot « fluide » fut employé pour désigner la glace dès 1773 par André-César Bor-

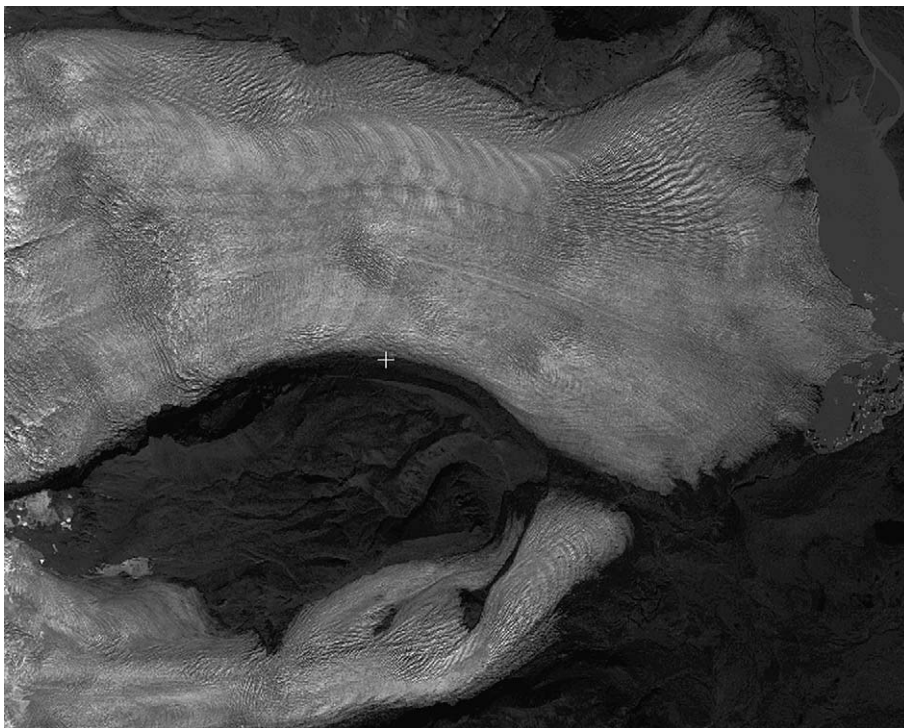


Fig. 1. Glacier de Fjallsjökull, l'un des glaciers émissaires de la calotte Vatnajökull au sud de l'Islande, vu par SPOT5. Cette vision suggère clairement l'écoulement de la calotte et sa viscosité : la glace remplit la vallée et s'adapte à son environnement. Cependant, la présence des crevasses nettement visibles sur sa surface rappelle que la glace est un corps solide. Pendant longtemps, la déformation d'un corps solide est restée une énigme, et les scientifiques invoquèrent le glissement, le déplacement par dilatation à la suite du regel de l'eau, ou différents mécanismes liés au processus de fonte–regel pour faire avancer un glacier. C'est près d'un siècle après l'énoncé de la loi de la mécanique des fluides de Navier–Stokes, que celle-ci fut appliquée à la glace.

Fig. 1. The Fjallsjökull glacier shown here, as seen by the SPOT5 satellite, is one of the outlet glaciers of the Vatnajökull ice cap, in the southern part of Iceland. The scene suggests the flow of a viscous body; the ice fills the valley and fits the boundary conditions very well. However the crevasses which are clearly visible on the surface remind us that ice is a solid. For a long time, the deformation of a solid remained an enigma and physicists invoked sliding, expansion due to water refreezing or different processes involving melting/refreezing to explain glacier flow. A near century went by after the statement of the fluid mechanics law by Navier and Stokes, before this law was applied to the flow of ice.

dier [8], il faut attendre 1906 pour que Weinberg [49, 50] applique aux glaciers les lois de la mécanique des fluides visqueux, dites de Navier–Stokes, formulées par Navier en 1822, soit près d'un siècle auparavant. Très longtemps, il fut inconcevable de concilier la ductilité et la fragilité de la glace et d'admettre l'écoulement d'un corps solide, notion pourtant fortement illustrée par l'image même d'un glacier (Fig. 1). Les savants qui ont marqué ces siècles, d'Agassiz [1] à Tyndall [48], ont même eu de fâcheuses intuitions sur l'écoulement des glaciers et il fallut l'aide des métallurgistes en 1948 pour que leur soit appliquée la théorie mathématique du corps plastique parfait des métaux.

En effet, il faut reconnaître que le comportement de la glace est relativement peu intuitif. Un coup de marteau sur un glaçon n'a manifestement pas le même effet qu'une faible pression appliquée pendant des années, et cela traduit la transition ductile/fragile des matériaux,

lorsque la vitesse de déformation augmente. Cet acquis ne nous étonne plus guère aujourd'hui, quoique l'on puisse citer de nombreux exemples récents de mauvaises intuitions. Citons par exemple les déboires de la « Patrouille des pics à glace », patrouille qui depuis le naufrage du Titanic en 1913 sillonne les mers du Nord pour éliminer les icebergs : tirs au canon, mines, bombardements aériens, etc. ne viennent pas à bout de ce solide, et c'est avec un profond dépit que la brigade voit les boulets de canon s'enfoncer dans l'iceberg [3].

Pourtant la modélisation de la dynamique de la glace est primordiale, à la fois pour comprendre et anticiper la réaction des glaciers continentaux face aux modifications du climat, mais aussi pour dater les carottages profonds extraits des glaciers et des calottes polaires, qui révèlent l'évolution passée du climat terrestre. Cet article retrace l'histoire de la compréhension de l'écoulement des glaciers, depuis la prise de conscience de la

nécessité d'un écoulement jusqu'à la première formulation d'une loi physique de la déformation acceptable, en 1957 par Glen [16], loi encore utilisée de nos jours par les modélisateurs des glaciers et des calottes polaires.

Mais y a-t-il une loi pour décrire l'écoulement des glaciers ?

Intéressons-nous donc à ces glaciers car « Il y a là sans doute de quoi intéresser tous les esprits sérieux... [1] ».

2. Pourquoi s'intéresser subitement aux glaciers ?

Pendant longtemps, la montagne n'attire guère, c'est un monde triste, difficile d'accès et dangereux, voire terrifiant et effroyable pour certains qui, comme Gottlieb Sigmund Gruner, naturaliste de renom, y voit en 1760 « une énorme vallée de glace, une contrée sauvage, horrible et effroyable... ». La montagne est synonyme de malédiction, comme en témoigne le premier nom donné au mont Blanc : « la montagne maudite », mont qui ne figure même pas sur les cartes de Savoie jusqu'au

XVII^e siècle. Ni le terme « glacier », ni même celui de « glacière », plus usité à l'époque, ne figurent dans le *Furetière*, *Le Dictionnaire universel de tous les mots français* paru en 1690. L'envie d'explorer les montagnes et de les étudier n'apparaît qu'au milieu du XVIII^e siècle et, peu à peu, l'attraction vers ces régions se substitue au rejet. Mais c'est surtout le sentiment envers ce qu'on appelait, à l'époque, « les glacières » qui se modifie profondément, passant de la crainte à la fascination. Fascination devant la beauté de ce « cristal couvert d'aiguilles de glace », mais aussi devant sa capacité à sans cesse se déplacer et changer de forme.

C'est probablement une phase ultime d'avancée des glaciers dans les Alpes à la fin du XVIII^e siècle – soit quelques décennies avant la fin de la période de froid, dénommée « le petit âge de glace », qui sévit durant plusieurs siècles sur l'Europe –, qui pousse les naturalistes à s'intéresser de près au fonctionnement des glaciers. Cette nouvelle avancée menace sérieusement les habitations et les autorités suisses s'en inquiètent. C'est alors

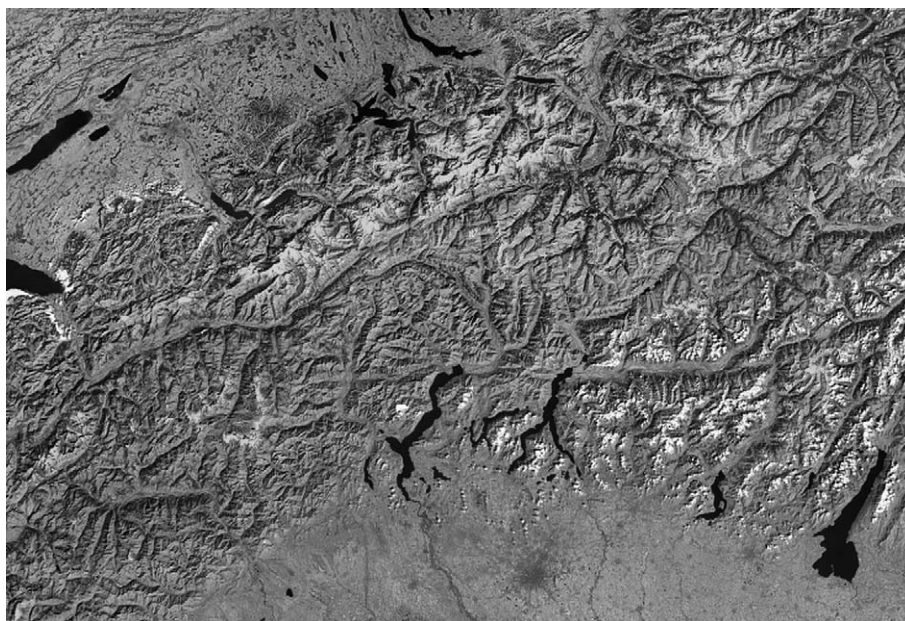


Fig. 2. Mosaique d'images Landsat des Alpes suisses et françaises. « Si un observateur pouvait être transporté à une assez grande hauteur au-dessus des Alpes, pour embrasser d'un coup d'œil celles de la Suisse, de la Savoie et du Dauphiné, il verrait cette chaîne de montagnes, sillonnée par de nombreuses vallées, et composée de plusieurs chaînes parallèles, la plus haute au milieu, et les autres décroissant graduellement, à mesure qu'elles s'en éloignent », écrivait Horace Benedict de Saussure en 1803 dans son célèbre livre *Premières ascensions au mont Blanc*, qui relate ses expériences durant les années 1774 et 1787. Ce précurseur des mesures et observations *in situ* avait peut-être déjà deviné l'immense intérêt de la télédétection dans l'étude des glaciers.

Fig. 2. Landsat image of the Alps. "If an observer could be carried over the Alps, at a sufficient altitude to embrace at a glance the Alps from Swiss, Savoy and Dauphine, he would look at these mountains furrowed by many valleys and composed of several parallel chains, the highest in the middle and the others decreasing as their move away", wrote Horace Benedict de Saussure in 1803 in his famous book *Premières ascensions au mont Blanc* (the first ascensions of Mont Blanc) in which he described his experiences from 1774 to 1787. This precursor for *in situ* measurements and careful observation probably also guessed the future role of remote sensing in glacier studies.

que, cherchant à comprendre la présence de ces blocs erratiques, trouvés çà et là au pied des vallées alpines, certains osent l'attribuer à une phase d'avance considérable des glaciers (voir [5] pour une revue de l'histoire de la compréhension des grandes périodes glaciaires). Les glaciers des Alpes suisses et françaises (Fig. 2) deviennent alors un haut lieu culturel et scientifique, où se croisent non seulement peintres et écrivains, mais aussi naturalistes et physiciens.

C'est un peu avant 1840 que le Suisse Louis Agassiz, spécialiste de renommée mondiale de paléontologie et de zoologie, alors à peine âgé de 33 ans, se laisse convaincre – avec force réticence – par les nouvelles théories glaciaires [1,5]. Il devient clair pour lui que non seulement les blocs erratiques et les roches striées, mais aussi les blocs « perchés » et les lapiz – ces surfaces de roches comme creusées par l'érosion fluviale mais situées à des endroits où l'on n'imagine pas l'eau pouvant couler – étaient la preuve du passage des glaciers. Il fait aussi le lien avec les blocs erratiques observés dans les Vosges, notamment ceux de Giromagny. Il se rend au pied des glaciers, y effectue les premiers relevés extrêmement précis et interroge les montagnards, relevant avec méticulosité tous les détails. Mais, surtout, le paléontologue a travaillé avec Cuvier et s'est installé à Neuchâtel après la mort de celui-ci. Il fait le lien (erroné) entre les mammouths qui commençaient à être retrouvés et les blocs erratiques : ces mammifères, croit-il, ont été pris dans les glaces à une époque où une grosse masse recouvrait entièrement le Nord de l'Europe. Il imagine alors que cette énorme calotte glaciaire a recouvert une partie de l'Europe jusqu'à la Méditerranée, tout le Nord de l'Asie et de l'Amérique. Dans les Alpes, la glaciation a largement débordé de la chaîne de montagne, comme en témoigne le bloc erratique le plus connu, celui de la Croix-Rousse dans Lyon, qui marque la limite occidentale de la grande glaciation. En 1840, il publie le premier livre de géomorphologie glaciaire qui assoit définitivement la théorie des glaciations.

Ainsi, la découverte des glaciations alpines, ponctuée par la publication de ce premier livre, amorce l'un des tournants les plus radicaux de notre perception et conception du monde et modifie profondément notre connaissance de la géologie et du climat de la Terre. C'est aussi le 1^{er} janvier de cette année 1840, que commence une aventure qui allait être d'une importance capitale pour la glaciologie et l'étude du climat terrestre puisque Jules-Sébastien-César Dumont d'Urville quitte Hobart pour accoster pour la première fois en Antarctique et découvrir la terre Adélie.

3. XVIII^e siècle : comment se forme un glacier ?

« La question de la formation des glaciers est, avec celle de leur mouvement, la plus difficile que nous ayons à traiter », explique Agassiz en 1840.

On sait aujourd'hui qu'un glacier se forme par l'accumulation successive de neige en altitude, laquelle s'enfouit en profondeur en se densifiant jusqu'à devenir glace, tout en s'écoulant vers l'aval (Fig. 3). À l'époque, les questions de la formation et du mouvement sont déjà associées, mais, pour un temps, la question du mouvement est éludée et seule celle de la formation est posée.

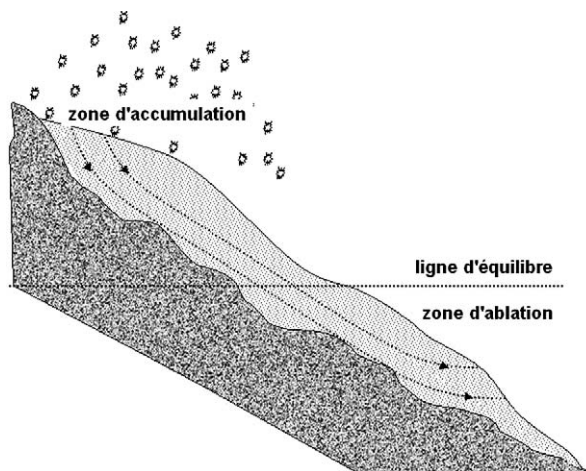


Fig. 3. Représentation schématique d'un glacier. À haute altitude, la température est telle, que la quantité de neige accumulée est supérieure à la quantité de neige sublimée ou fondue, c'est la zone d'accumulation. En revanche, en deçà d'une certaine altitude, la quantité de neige accumulée est inférieure à celle fondue ou sublimée, c'est la zone d'ablation. La perte de masse dans cette zone est compensée par l'écoulement de la glace de l'amont. Sans faire appel à l'écoulement de la glace de l'amont, il était donc difficile, encore au début du XVIII^e siècle, de comprendre la présence des glaciers dans les vallées. La ligne d'équilibre, limite entre les deux zones, où le bilan de surface est nul, est à une altitude de l'ordre de 3000 m dans les Alpes. Elle varie de 5000 voire 6000 m sous les tropiques, à quelques centaines de mètres dans le Grand Nord. Dans certains cas, comme en Antarctique ou au Groenland, la ligne d'équilibre est sous le niveau de la mer et le glacier finit en langue flottante ou en plate-forme glaciaire.

Fig. 3. Glaciers outline. At a high elevation due to the temperature the snow accumulation rate is greater than the sublimation or the melting rate; this is known as the accumulation area. At a low elevation, the temperature yields to a melting rate greater than the accumulation rate, this is known as the ablation area. In this area, the loss of surface mass is compensated by ice flow. Without knowledge of ice flow, it was still difficult in the early 18th century to understand why there were glaciers in green valleys. The equilibrium line, separating both areas is at an elevation of 3000 m in the Alps. It varies from 5000 or 6000 m above the tropics to a few hundred meters high in the north. In some case, like in Antarctica or Greenland, the equilibrium line is above sea level and then the glacier has floating ice.

Nous allons voir, en effet, que pendant quelques décennies, même si les preuves de l'écoulement des glaciers sont manifestes, le lien entre l'écoulement de la glace depuis l'amont et la présence de la glace en aval alors qu'il y fait chaud, n'est pas fait (Fig. 3). En effet, ce qui étonne le plus, c'est voir de la glace dans les vertes vallées, comme en témoigne Albert de Haller, patricien de Berne, en 1732 : « Une vache en broutant a quelquefois un pied sur la glace pendant qu'elle se repaît des meilleures herbes. Il suit de là, que ce n'est pas la froideur du climat qui entretient ces glaces, mais qu'il faut qu'il y ait quelque autre cause inconnue jusqu'à présent. » Dans son poème, *Les Alpes*, écrit en 1729 [22] et considéré comme le début de la littérature helvétique, donnant une vision positive des glaciers, il s'étonne de cette herbe printanière qui pousse à travers la glace. En examinant ces immenses torrents de glace traversant les forêts et les pâturages, Alexandre-Charles Besson en 1786 est lui aussi intrigué par ce contraste « si frappant qui embarrasse l'imagination et paraît un problème insoluble ou une contradiction dans les lois de la nature ».

Une des premières théories de la formation des glaciers (nommés glacières encore à cette époque-là) est due à William Burnet qui, en 1708, pense que le glacier croît de bas en haut car la neige des sommets fond au printemps, s'écoule au fond des vallées où elle gèle et donne naissance, au fur et à mesure des années, au glacier. De cette théorie découle que plus il fait chaud, plus la neige fond et plus le glacier croît (!).

Pourtant au tout début du XVIII^e siècle, les frères Scheuchzer, des protestants suisses, physiciens de Munich ont déjà une bonne intuition. L'aîné, Jean-Jacques (1672–1733), publie de nombreux ouvrages où il s'attache à décrire la géographie physique de la Suisse, mais aussi ses glaciers et ses fossiles, pendant que son frère cadet (1684–1738) étudie la tectonique des Alpes en observant et décrivant les contorsions des couches des versants du lac des Quatre-Cantons. Jean-Jacques s'intéresse aussi à la pluie, à la constitution de l'air, à la pression atmosphérique ou aux effets de la dilation de l'air dans les Alpes. Ces observations sont confrontées à celles de Paris et permettent alors de nombreuses études comparées publiées dans les Mémoires de l'Académie des Sciences en ce début de XVIII^e siècle [23]. En 1705, il attribue la formation des glaciers à l'accumulation des neiges dans les Hautes-Alpes.

Devant les multiples preuves du déplacement des glaciers, entre autres le déplacement des crevasses, le transport de blocs de pierre, l'érosion des roches..., le monde scientifique se rend peu à peu à l'évidence et admet que le glacier provient des sommets de la montagne. En 1773, André-César Bordier [8] comprend que

« comme les glaciers avancent toujours dans la plaine et ne disparaissent jamais, il est absolument nécessaire que de la glace nouvelle remplace perpétuellement celle qui a fondu ; cette glace doit donc descendre en vertu de la pression des couches supérieures ».

Mais le glacier est toujours formé, croit-on, par le gel de l'eau de fonte. Ainsi, encore en 1760, pour certains naturalistes, comme Gruner qui pourtant a compris que la glace glisse, l'apport de glace aux glaciers est encore dû aux eaux, qui ne pouvant s'écouler pendant l'hiver, se congèlent à leur surface et remplissent les crevasses [17]. On imagine donc à cette époque un immense réservoir en altitude qui se déverse, sous forme liquide, dans les différentes vallées, pour y former ou accroître les glaciers. Ainsi, en 1742, Pierre Martel, ingénieur et géographe, le premier à visiter les glacières de Chamonix avec baromètre, boussole, demi-cercle et thermomètre, les décrit comme « un lac qui ayant été furieusement agité par une grande bise se serait gelé tout d'un coup dans cet état » et y voit de grands exutoires d'une « vallée de glaces » en amont [30].

Mais l'ascension des pics montre rapidement que les différents glaciers ne communiquent pas entre eux et sont séparés par des barrières rocheuses.

La formation et le mécanisme de base d'un glacier et la nécessité d'un écoulement de celui-ci expliquant la présence de glace dans la vallée commencent à être compris et admis. Mais comment arrive-t-elle dans les vallées et comment peut-elle y subsister ? Le mouvement de la glace, une fois admis, restera longtemps difficilement concevable.

4. Début du XVIII^e–moitié du XIX^e : comment avance un glacier ?

On sait aujourd'hui qu'en fonction du régime du glacier (froid, lorsque la température à la base du glacier est négative, ou tempéré, lorsque, hormis en surface, la température est proche de zéro), il se déforme ou il glisse. Un glacier peut être en permanence froid (comme ceux de l'Antarctique), tempéré (comme ceux des tropiques), ou arborer les deux régimes en fonction de l'altitude ou de la saison (comme ceux des Alpes qui ont tant servi de modèles).

Le glissement a été conçu relativement tôt, dès la moitié du XVIII^e siècle ; en effet, il a le mérite de concilier la rigidité apparente de la glace et l'écoulement exigé des glaciers, celui pouvant glisser d'un seul bloc. En revanche, la déformation de la glace, bien que mentionnée courant XIX^e, voire XVIII^e ne s'est imposée qu'au XX^e siècle. La « fluidité » de la glace explique les sinuosités du glacier le long de son cours, mais la

présence de crevasse et l'aspect « solide » de la glace restent un obstacle important à l'idée de viscosité. En fait, vont s'affronter durant deux siècles deux théories : celle du glissement d'un seul bloc et celle fondée sur la dilatation de l'eau qui gèle, ou sa variante basée sur les différents phénomènes de fonte–regel, qui a le mérite de concilier ductilité et solidité. À la suite de différents arguments souvent erronés et fréquemment avancés par les plus grands, c'est cette dernière théorie et l'une de ces variantes qui s'imposent à la fin du XIX^e siècle.

4.1. Un mouvement par glissement ?

En 1760, von Gruner [17] est le premier qui attribue le mouvement des glaciers à un glissement sur leur base, contrôlé par leur poids et la fonte de leurs flancs. En revanche, sa fausse hypothèse sur l'accroissement des glaciers par le gel des eaux qui s'écoulent à leur surface fit rejeter globalement sa théorie, notamment par Agassiz [1]. Cette idée sera reprise par le célèbre Suisse Horace Benedict de Saussure. Né en 1740 à Genève, où il enseignera la philosophie naturelle, Saussure, infatigable, passionné des Alpes, a probablement examiné tous les glaciers de la Suisse, arpenté de nombreuses mers de glace et malgré une santé fragile, gravi le mont Blanc en 1787, un an seulement après la toute première ascension qu'il aurait tant aimé réaliser lui-même. Ce grand scientifique est passionné de botanique, de météorologie, de minéralogie et surtout de géologie, dont il est l'un des fondateurs. Il est ainsi le premier à faire des mesures d'épaisseur de glace, de couleur du ciel, d'humidité de l'air, de température d'ébullition de l'eau, de pression atmosphérique ou de pulsations cardiaques. Pour lui, c'est la pesanteur des glaciers qui les entraîne plus ou moins vite vers le bas, où la chaleur de l'été est suffisante pour les faire fondre. À celle-ci, il rajoute l'effet de la pluie, des vents chauds, mais aussi de la chaleur souterraine qui, pour lui, est l'agent le plus efficace dans la fonte [44]. À la fin du siècle, il impose l'idée que la glace glisse le long des pentes en un seul bloc. Le lubrifiant étant la fonte de la glace chauffée par la chaleur intérieure de la Terre. C'est enfin lui qui impose le terme « glacier » – « champ de glace éternelle » (1757) – longtemps en concurrence avec « glacière ».

4.2. Un écoulement « visqueux » de la glace

Le terme « fluide » est employé, en 1773, pour la première fois pour qualifier la glace par André-César Bordier [8], un Genevois, qui la considère non pas comme une masse entière et immobile, mais comme un « amas de matière coagulée ou comme de la cire molle flexible

et ductile jusqu'à un certain point ». Il imagine la glace accumulée entre les montagnes à la hauteur de 2000 pieds, comme une « liqueur contenue dans un vase ». Il lui est attribué la paternité de la notion d'écoulement par le poids et la pression exercée par la glace en amont, avec près de soixante-dix ans d'avance. Il écrit, en effet, dans le récit de son voyage pittoresque aux glacières de Savoie fait en 1772 [8] : « C'est que la masse entière des glaces est liée ensemble et pèse l'une sur l'autre de haut en bas à la manière des fluides ». L'idée ne sera pas retenue.

En 1840, Rendu, à l'époque chanoine avant de devenir évêque d'Annecy, constate que le glacier remplit la vallée et s'adapte aux variations de largeur de la vallée, comme « une pâte molle » [43]. Il remarque aussi que le centre du glacier se déplace plus rapidement que les bords, ceux-ci frottant sur les parois. Le chanoine, en revanche, ne comprend pas les propriétés mécaniques de ce solide qui semble visqueux, mais son mémoire, paru en 1841, est le premier qui pose les bases de la mécanique des glaciers.

Cependant, la majorité des scientifiques ne croyait pas encore à la déformation de la glace. En effet, les expériences faites sur la glace révèlent un corps cassant, ce que confirme la présence de crevasses sur un glacier. Ceci va à l'encontre de la notion de déformation et de viscosité. Le Chanoine Rendu, lui-même, reconnaissait : « Cependant quand on agit sur un morceau de glace, qu'on le frappe, on lui trouve une rigidité qui est en opposition directe avec les apparences dont nous venons de parler. Peut-être que les expériences faites sur de plus grandes masses donneraient d'autres résultats ? ».

4.3. Un mouvement par la dilatation de l'eau gelée

Dès 1705, Scheuchzer attribue le mouvement du glacier à la poussée de l'eau qui regèle entre la glace et le rocher en augmentant de volume. En gelant, l'eau soulève le glacier et provoque son déplacement. Il explique la formation des crevasses par les changements de température qui dilatent les bulles d'air que la glace renferme. Cette idée sera reprise, bien des années plus tard, par Jean de Charpentier (1786–1855) qui, vers les années 1830, s'intéresse aux glaciers et porte un coup fatal à la théorie de Saussure. Cela grâce à Ignace Venetz (1788–1859), ingénieur peu connu qui vient de comprendre que les blocs erratiques étaient la preuve que les glaciers avaient, dans le passé, connu des phases importantes d'avancée [5], et qui demande à son ami Jean de Charpentier, scientifique réputé et directeur des mines de sel à Bex, de le suivre sur le terrain. La pe-

tite histoire raconte que celui-ci ne le suit que pour lui démontrer l'incohérence de sa théorie et remettre son ami dans le droit chemin. Mais c'est Charpentier qui se laisse convaincre par Venetz et essaie de comprendre comment un glacier fonctionne. Il se penche sur la théorie de Saussure et y voit d'énormes contradictions : si les glaciers glissent d'un seul tenant, comment ne dévalent-ils pas les pentes lorsque celles-ci sont fortes ? Pourquoi les vitesses diminuent-elles pendant l'hiver, alors que l'apport de glace y est le plus important ? Comment se déplacent-ils sur les rochers ? Comment se meuvent-ils sur de faibles pentes ? Jean de Charpentier reprend alors la théorie du regel de l'eau de fonte qui permet, elle, d'expliquer certaines observations [9]. Selon lui, l'eau absorbée le jour pendant l'été pénètre dans le glacier, se congèle à l'intérieur la nuit, tout en augmentant de volume. Le glacier gonfle donc dans le sens où il rencontre le moins de résistance, c'est-à-dire vers la vallée. Cette explication a aussi le mérite d'expliquer la lenteur relative du glacier pendant l'hiver.

Le Suisse Louis Agassiz défend alors ardemment les théories de Jean de Charpentier sur les glaciations passées et va sur le terrain étudier de près des glaciers. Car même si ses recherches ont comme but principal la « liaison des phénomènes qui accompagnent les glaciers actuels avec les phénomènes analogues qui annoncent une plus grande extension des glaciers à une époque antérieure à la nôtre », il lui faut d'abord comprendre l'état des glaciers actuels et leur relation avec les forçages extérieurs, température, taux d'accumulation. Il compile alors toutes les idées et connaissances de l'époque et, si les deux derniers chapitres de son livre traitent de « l'ancienne extension des glaciers dans les Alpes », les seize premiers traitent de l'aspect des glaciers, de leur couleur ou température interne, des crevasses, des cônes, aiguilles et tables glaciaires... Agassiz rejette avec virulence les théories de Saussure sur le glissement des glaciers et reprend celles de Jean de Charpentier. Il affiche un profond mépris pour ces théories faisant appel à de « prétendues » masses d'eau circulant sous les glaciers. Il compare ce que seraient ces glaciers aux blocs de glaces flottantes qui « cheminent sur nos grands fleuves ». Il démonte méthodiquement toute idée de glissement. Par exemple, il note que l'argument principal pour le glissement repose sur ces chutes de glaciers dont les conséquences peuvent être dramatiques. Or, ces chutes n'ont lieu que pour des glaciers très pentus et dont l'adhérence peut à un moment donné ne pas suffire à freiner la poussée causée par le poids des masses de glace. À l'argument de l'adhérence à la masse de glace en amont qui régulerait le glissement, il

objecte que la présence de crevasses rompt cette adhérence.

Sa théorie repose sur les observations de l'état de la glace, qui ne ressemble pas à de la glace ordinaire et qui présente, des vallées aux sommets, une texture différente. C'est une masse spongieuse à haute altitude et une masse de fragments angulaires de toutes tailles à plus basse altitude. Selon lui, la glace la plus compacte est toujours fissurée. L'eau s'infiltré dans les fissures, y gèle et se dilate. C'est donc les zones crevassées qui se déplacent le plus rapidement. Il argumente lui-même tous les points qui pourraient contredire sa théorie, à commencer par la force colossale qu'il faut pour pousser un glacier. Sa théorie, en revanche, explique que les couches superficielles se déplacent plus vite que les couches inférieures, comme l'avait remarqué le professeur Suisse F.J. Hugi. Agassiz explique, en effet, que s'il y avait du glissement, celui-ci n'ayant lieu qu'à la base du glacier, c'est la base qui devrait aller plus vite. Il remarque, à tort, que le bord du glacier avance plus vite que le centre ; ceci confirme sa théorie puisque le bord est plus crevassé. Enfin, la comparaison des vitesses au confluent de deux glaciers par triangulation lui confirme que le glacier le plus crevassé avance plus vite (C.Q.F.D.) ! En dépit de l'impartialité de certains de ces arguments, son charisme et sa réputation scientifique ont fait de son livre un véritable manifeste de la théorie glaciaire, théorie dont il fut en effet un extraordinaire défenseur [45].

5. Milieu du XVIII^e siècle : premières observations de vitesse, par accident, hasard ou nécessité

Par son accès facile au mont Blanc et la présence de glaciers accessibles régulièrement visités, Chamonix, au début du XIX^e siècle, devenait le siège des premières observations scientifiques (Fig. 4). C'est là que James Forbes (1809–1868) découvre, très jeune, les Alpes. Il est le premier à comprendre l'intérêt des mesures de vitesses d'écoulement, vitesses qui varient d'environ 200 m/an en altitude à 80 m/an dans la vallée [6]. Il notera, en 1842, qu'elles devraient permettre de trancher entre la théorie du glissement de Saussure et celle de la dilatation de Charpentier : en effet, dans ce dernier cas, la distance entre deux points du glacier doit augmenter, ce qui n'est pas le cas lorsque le glacier glisse en bloc. Peut-être, d'ailleurs, son intuition fut-elle excitée par un curieux hasard. En effet, en 1832, il avait retrouvé des morceaux de la célèbre échelle en bois que Saussure avait perdu en 1788 lorsque, accompagné de son fils et d'une caravane de porteurs, il s'était installé sur le col du Géant. La distance parcourue en quarante-

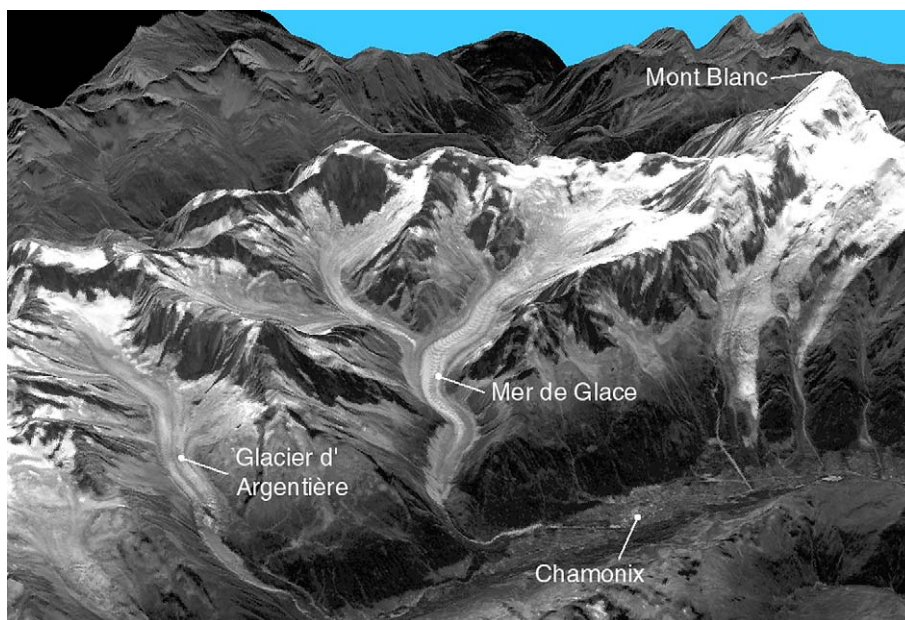


Fig. 4. Le massif du mont Blanc vu par SPOT-5 en août 2003. Une image du satellite SPOT5 de résolution 2,5 m, acquise le 23 août 2003, soit quelques jours après la forte période de canicule, a été drapée sur un modèle numérique de terrain. On peut ainsi apprécier la position de Chamonix par rapport au mont Blanc et à la Mer de Glacier, parmi les premiers glaciers à avoir été étudiés scientifiquement.

Fig. 4. The mountain mass of mont Blanc as seen by the SPOT5 satellite in August 2003. A SPOT5 image (pixel of 2.5 m), taken on the 23th of August, 2003, just after a heat wave has been draped over a digital elevation model. One can appreciate the central position of the city of Chamonix with respect to Mont Blanc and the 'Mer de Glacier', among the first glaciers to have been scientifically observed.

quatre ans lui indiquait une vitesse moyenne de 75 m/an à cet endroit. Des débris de cette échelle furent retrouvés plus tard et plus bas par C. Martin, suggérant une vitesse moindre de 28 m/an à plus basse altitude, estimation relativement exacte [18].

C'est essentiellement par hasard, ou hélas à la suite d'accidents, que les premières mesures de vitesse sont, en effet, effectuées. La liste des faits accidentels qui ont donné une première idée de la vitesse d'écoulement de la glace est très longue. Par exemple, en 1820, année de la découverte du continent antarctique par Bellinghausen, trois guides en route pour le mont Blanc seront précipités par une avalanche dans une crevasse au Grand Plateau ; leurs restes sont retrouvés au front du glacier des Bossons, 3500 m plus bas, en 1861 (soit une vitesse moyenne de 180 m/an).

F.J. Hugi, voyageur intrépide qui a surtout étudié les glaciers de la chaîne centrale des Alpes suisses, s'intéresse fort à la structure et aux variations de glace sur toute la longueur du glacier. Notamment il attribue la structure particulière des hauts névés à la sécheresse de l'air dans ces hautes régions. Il est le premier à mentionner l'existence d'une limite entre le glacier proprement dit et les hauts névés. Selon lui, il y a deux sortes de crevasses, celles de jour ou d'été, qui se forment de haut en bas, et celles de nuit ou d'hiver, qui se forment au

fond du glacier du bas en haut. Entre 1827 et 1836, il mesure pour la première fois des vitesses annuelles en surveillant le déplacement de blocs sur la moraine centrale d'un glacier. Il participe aussi indirectement aux premières mesures de vitesses de surface. Il avait fait construire une cabane sur le glacier inférieur de l'Aar en 1827. Il y revint en 1830 et 1836 et en mesura le déplacement. Louis Agassiz s'y rendit plusieurs fois dans les années 40 et en estima non seulement la vitesse, mais aussi l'accélération nette.

C'est encore en 1840 que Louis Agassiz et des collègues construisent un abri sous une table glaciaire, toujours afin de mieux comprendre l'écoulement de la glace. Comme ils étaient venus de Neuchâtel, l'abri devenu célèbre dans le monde scientifique fut appelé « hôtel des Neuchâtelois » [52]. Dès 1841 et jusqu'à son départ aux États-Unis en 1846, Agassiz y fait apporter des instruments de forage et ancre profondément des poteaux afin qu'ils puissent tenir au moins un an. Les forages de glace atteignent 65 m, et révèlent que la température y reste constante et proche de 0 °C [2,45]. Cela, à l'époque, conforte bien l'hypothèse de fonte-regel comme mécanisme d'avancée et sera même encore donné comme preuve dans les manuels de la fin de ce siècle [18,52]. Puis entre 1842 et 1845, Forbes installe pour la première fois des balises sur la mer de

Glace et mesure précisément les vitesses d'écoulement horizontal, personne ne voyant l'intérêt à l'époque de mesurer des vitesses verticales.

James Forbes travaille avec Auguste Balmat sur le mouvement des glaciers, note leur régularité et, surtout, a la chance de s'intéresser aux bandes alternativement claires et foncées régulièrement réparties sur la mer de Glace, bandes qui portent aujourd'hui son nom [12]. Ces bandes, 55 au total sur 7 km, sont générées, pense-t-il, lors du passage dans une zone de forte pente qui entraîne des crevasses. Les bandes blanches correspondent aux passages hivernaux : la crevasse se remplit de neige, les bandes plus foncées aux passages estivaux, les poussières noircissant la glace. Ces bandes, marquées dans le sens de l'écoulement du glacier et nettement discernables sur les images satellites, offrent une visualisation exceptionnelle de l'écoulement : lent sur les bords à cause du frottement, plus vite au centre du glacier (Fig. 5). D'ailleurs, différents travaux ont été effectués sur ces bandes, notamment pour déduire les vitesses d'écoulement de la mer de Glace [29]. Toutes ces expériences firent qualifier, à Forbes, la glace de fluide imparfait.



Fig. 5. Les bandes de Forbes, ici vues par le satellite SPOT, ont été expliquées en 1845 par l'Anglais J. Forbes [12]. Ce sont des bandes alternativement blanches et noires ; 55 de ces bandes se répartissent sur 7 km du glacier. Les parties blanches renferment moins de particules minérales que les bandes noires. Elles sont incurvées dans la direction de l'écoulement, les parties centrales du glacier s'écoulant plus vite que les parties latérales, de telle sorte qu'elles matérialisent très joliment l'écoulement. L'explication de ces bandes, couramment admise jusqu'à récemment, est maintenant remise en question [21].

Fig. 5. The Forbes bands or ogives as seen by the SPOT satellite. They were described for the first time by the British glaciologist Forbes on the 'Mer de Glace' in the Mont Blanc massif [12]. They consist of grey strips; about 55 of these bands can be seen distributed along 7 km of glaciers. The dark bands reveal an important presence of mineral dust whereas white bands get less mineral dust. They are curved in the flow direction, due to a higher speed in the middle of the glacier than at the sides, so that they reveal the ice flow. We now have a new hypothesis for the presence of such bands [21].

Quelques décennies plus tard, à la toute fin du XIX^e siècle, Joseph Vallot, le fondateur de l'observatoire Vallot, mesure entre 1891 et 1899 les déplacements de pierres peintes disposées en travers de la mer de Glace. Il en estime aussi la vitesse verticale qu'il attribue uniquement à l'ablation (voir Fig. 3), puisque, à l'époque, la remontée de la glace de la base vers la surface n'est un fait reconnu que lors de crues sporadiques. Il détecte aussi, pour la première fois, le passage d'une onde cinématique (une vague, disait-on à l'époque, c'est-à-dire d'une anomalie de topographie qui se propage de l'amont vers l'aval à plusieurs fois la vitesse moyenne de l'écoulement de glace). Ces mesures ont été reprises près de 60 ans plus tard par Louis Llibouty, glaciologue de l'université de Grenoble, pour confirmer sa théorie des vagues et du frottement de la glace sur un lit rocheux [26].

6. Fin du XIX^e : vers un consensus conciliant fragilité de la glace et fluidité des glaciers

Ces premières observations sur les glaciers, loin d'appuyer une théorie quelconque, conduisent à des réflexions paradoxales sur la nature de l'écoulement d'un glacier. En revanche, des observations issues d'expériences menées sur le matériau « glace » par les physiciens permettent à J. Tyndall d'extrapoler, du matériau aux glaciers, une théorie qui resta consensuelle quelques décennies.

6.1. Variations sur le thème du gel–regel

Après cette échappée en plein air, revenons au laboratoire...

« Je vais maintenant vous parler d'une tentative que l'on a faite, il y a quelques années, pour concilier la fragilité de la glace avec son mouvement dans les glaciers » écrit, en 1873, John Tyndall [48] dans son ouvrage sur les glaciers et la transformation de l'eau. Ce physicien irlandais (1820–1893) étudie la transparence des gaz et des vapeurs à la chaleur, mesure la valeur de l'absorption de la vapeur d'eau, donne une explication de la couleur bleue du ciel et découvre l'effet qui porte son nom, c'est-à-dire l'élargissement d'un faisceau lumineux dans un milieu opalescent. Mais ce précurseur de l'effet de serre [5] s'intéresse aussi aux glaciers.

La théorie qu'il va défendre et qui sera la seule reconnue durant plusieurs décennies repose, en effet, sur différents faits expérimentaux très concrets.

En 1850, Faraday (1791–1867) montre que deux morceaux de glace fondante, mis en contact, se soudent ensemble. Ce phénomène, banal de nos jours, engendre pourtant, à l'époque, des questions sérieuses :

où et comment dans la glace fondante se trouve le froid nécessaire à la congélation ? Les termes « regel » et « regélation » sont employés à cette époque pour exprimer ce curieux phénomène. Tyndall, très pédagogue, nous propose dans son livre une série d'expérimentations simples : « sciez deux blocs de glace, ils se recongèleront, appuyez-vous sur une paroi de glace et constatez l'adhérence [...] ». Il va plus loin : « broyez des morceaux de glace, compressez-les dans un cylindre et vous reformez de la glace ». L'explication physique est trouvée grâce à la découverte à la même époque par James Thomson, le frère de William, futur Lord Kelvin, de la diminution du point de fusion de la glace avec la pression, propriété peu fréquente pour un solide. Il est d'ailleurs intéressant de souligner que cette découverte a été faite par Thomson (indépendamment et en même temps que Clausius) pour démentir son célèbre frère, qui imaginait une machine contredisant le principe de Carnot fondée sur l'eau qui gèle toujours à 0 °C en gagnant du volume [32].

De cette époque date la célèbre expérience du « fil à couper la glace » : on met un poids suspendu à un fil de fer qui entoure un morceau de glace. La pression fait fondre la glace, le fil s'enfoncé, l'eau libérée au-dessus du fil se regèle, si bien que celui-ci traverse le bloc sans le couper. Faraday et Tyndall expliquent ainsi le regel : la glace fond par pression, mais l'eau dégagée regèle, car son point de fusion s'est élevé. Ce scénario a eu longtemps pour mérite de concilier la solidité du matériau glace et l'apparente ductilité de l'ensemble glacier et fait autorité dans les différents manuels ou encyclopédies de la fin du XIX^e [18,52].

À cela les frères Thomson rajoutent l'effet de la chaleur latente, découverte un siècle auparavant par Joseph Black (1728–1799). Ce dernier, en étudiant la fusion de la neige, observe qu'une certaine quantité de chaleur est absorbée dans chacune de ces transformations : la neige ou la glace en fondant absorbe de la chaleur. L'eau dégagée par la pression se refroidit, à cause de la chaleur latente, et regèle donc d'autant plus que le point de fusion a augmenté.

Les plus grands physiciens de l'époque s'intéressent alors à la regélation qui semble être à la fois la cause de la ductilité de la glace et celle du mouvement des glaciers. Ainsi, le grand physicien Herman Ludwig Ferdinand von Helmholtz, dont le nom reste attaché à la formulation du principe de la conservation d'énergie, Tyndall, Faraday ou William Thomson s'attachent à démontrer la ductilité de la glace par compression. Diverses expériences sont bâties sur le même principe : à l'aide d'un piston, on comprime dans un cylindre de la neige, des fragments ou des blocs complets de glace,

avec ou sans eau. Herman von Helmholtz se montre alors sûrement le plus ingénieux et le plus patient de tous ces expérimentateurs, notamment avec l'emploi de moules de toutes formes pour convaincre son auditoire [24]. William Thomson, lui, a l'idée de faire un trou dans le cylindre : une tige de glace homogène sort alors de l'orifice et semble être la preuve flagrante du phénomène. Cependant, tous ces physiciens doivent faire preuve d'imagination pour arriver à être en accord avec les observations des glaciers sur le terrain.

Et en 1882, lorsque F.-A. Forel s'intéresse à la nature cristalline de la glace, il invoque même le regel de l'eau qui entoure les grains de glace pour expliquer le grossissement du grain.

6.2. La glace et les glaciers rentrent dans le monde profane

À partir de 1873, date du livre de Tyndall à la fin du siècle, de très nombreux recueils ou encyclopédies de vulgarisation sur le thème de la glace et des glaciers paraissent [[11,18,52], rien que pour la littérature en langue française], ainsi que de très nombreux articles dans des revues génériques [[31,40], rien que pour *La Revue des Deux Mondes*]. Les théories du glissement [44], de l'écoulement visqueux [43] ou de la dilatation [17] sont définitivement balayées avec force au profit de la théorie du regel. Le rejet de ces théories s'appuie sur les connaissances nouvelles. Maintenant qu'on connaît l'existence d'une période glaciaire, comment, par exemple, un glacier peut-il glisser des Alpes au Jura [40] ? La fragilité de la glace ne permet pas de l'assimiler aux corps visqueux ; même si, à la température de 0 °C, celle-ci semble flexible, elle se brise sous l'effet d'un effort prolongé au contraire de la cire ou de la mélasse [11]. Même si elle paraît « docile » à la pression, la glace est « rebelle » à la traction.

C'est probablement Rambert [40], dans un article publié dans *La Revue des Deux Mondes*, qui résume le mieux le caractère non intuitif de ce matériau. « La glace n'est pas un corps dur comparable à un caillou » écrit-il car, même si elle se casse comme le caillou, à l'inverse la poussière ne devient pas caillou, la glace n'est pas « non plus un corps plastique ordinaire comme la résine » car pour passer d'une forme à l'autre, il faut d'abord qu'elle se brise... Et de conclure : « elle joue dans la nature un rôle intermédiaire... ».

La difficulté à concevoir la déformation de la glace semble liée, à cette époque, à la distinction effective entre un corps solide et un corps fluide. Si cette distinction se fait intuitivement sur la base de considérations mécaniques et donc de comportements face à la traction

ou au cisaillement sur nos échelles de temps (celle du laboratoire), alors clairement la glace est un corps solide. Il faut en effet s'affranchir de l'échelle de temps et accepter des échelles très longues pour admettre qu'un corps tel que la glace puisse avoir un comportement fluide. Nous ne sommes plus alors obligés de passer par un état intermédiaire qui certes existe bien, mais ne représente pas la règle générale des processus naturels. Comme le note B. Guy [20], ces questions qui sous-tendent les surprises et les interrogations des anciens, voire des modernes, touchent clairement notre compréhension même de l'espace, qui est appuyée sur des solides et du temps, lequel est forcément associé au mouvement, vu par opposition au comportement des solides [20].

7. Vers une loi pour l'écoulement des glaciers

En 1888, McConnell découvre les plans de glissement de la glace et, en 1901, les travaux de Hess sur l'Hinterferner montrent le rôle conjoint de la déformation et du glissement dans l'écoulement d'un glacier [33]. Au début du vingtième siècle, sont effectuées les premières mesures directes de vitesses dans les glaciers alpins avec, au fil du temps, une augmentation croissante des mesures et de leurs qualités. C'est aussi de cette époque que datent les premières études des propriétés mécaniques de la glace à l'échelle microscopique. Parallèlement à ces observations, s'effectuaient les premiers essais d'interprétation théorique.

Finsterwalder, au début du XX^e siècle, est l'un des premiers à proposer une théorie (en partie descriptive) de l'écoulement des glaciers. En 1906, Weinberg applique aux glaciers les lois de la mécanique des fluides visqueux, dites de Navier et Stokes, formulées par Navier près d'un siècle auparavant [49,50]. Cette célèbre loi, qui est à la base de la météorologie et de l'océanographie depuis cette époque, relie, pour la première fois, l'accélération d'un fluide dit newtonien (c'est-à-dire dont la viscosité est décrite par un coefficient qui dépend de leur nature et de leur température, mais non de leur vitesse ou de la contrainte qui leur est appliquée), aux forces extérieures appliquées, ainsi qu'à celle de frottement visqueux [35].

À l'époque donc, Navier, Saint-Venant et Stokes reprennent l'idée de viscosité introduite par Newton et la formalisent par une relation entre contraintes $\bar{\sigma}$ (tenseur d'ordre 2 exprimant les contraintes appliquées sur les faces d'un cube imaginaire) et taux de déformation $\bar{\varepsilon}$ (tenseur d'ordre 2 qui rend compte de la vitesse à laquelle le matériau se déforme et qui se définit à partir du gradient de la vitesse (u, v, w) entre deux

points très proches). Navier s'intéresse au déviateur des contraintes $\bar{\sigma}'$, qui correspond à l'écart de la contrainte par rapport à la pression isotrope, puisque dans une déformation viscoplastique, la glace étant considérée comme incompressible, seul le déviateur des contraintes entraîne des déformations. Il admet que celui-ci est une fonction linéaire des taux de déformation, ce qui s'écrit sous la forme générale d'une relation entre deux tenseurs d'ordre deux, c'est-à-dire une série de 81 coefficients qui sont fonction du matériau, de la densité et de la température. Dans le cas d'un fluide visqueux isotrope (qui présente les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions) et incompressible, ces 81 coefficients se réduisent à un coefficient η appelé viscosité, qui relie alors simplement le déviateur des contraintes aux taux de déformation selon la loi :

$$\sigma'_{ij} = 2\eta\dot{\varepsilon}_{ij}$$

Dans l'expression de la contrainte, le premier indice i correspond au plan sur lequel est appliqué le vecteur force élémentaire, et le deuxième indice j est la direction de projection du vecteur (x, y ou z).

En 1920, Weinberg et Somigliana se fondant sur cette loi développent la théorie mathématique du fluage avec viscosité uniforme – « le fluage est la déformation, au cours du temps, d'un matériau soumis à une charge fixe ». La glace y est considérée comme un fluide newtonien très visqueux, c'est-à-dire qu'il y a une relation de proportionnalité entre le taux de déformation de la glace (lié au gradient vertical de la vitesse) et la contrainte qui lui est appliquée. C'est de cette période que date l'exercice désormais classique (chez les glaciologues) de la plaque de glace reposant sur un socle incliné et soumise à son propre poids. En 1930, Lagally étend cette théorie et propose une loi qui relie l'épaisseur d'un glacier à la vitesse de surface, la viscosité de la glace et l'angle de la pente du socle.

Cette formule permet à Lagally de prédire l'épaisseur du glacier autrichien Pasterze qui, par chance, rassemblait les conditions idéales à la vérification de sa formule.

Ce remarquable succès aurait pu influencer durablement la communauté naissante des glaciologues, si des observations n'avaient pas mis en évidence que le schéma simple proposé par Lagally pour l'écoulement de la glace n'était qu'un aspect d'un comportement beaucoup plus complexe. En effet, des mesures de vitesses superficielles de glaciers, effectuées sur plusieurs périodes de l'année, indiquaient des vitesses plus rapides l'hiver (malgré une température plus basse), alors que la couche de neige supplémentaire entre ces deux périodes ne représente que quelques pour cent du

pois du glacier. Cela semblait indiquer que l'écoulement pouvait être sensible à une faible variation de la contrainte appliquée. De même, des variations rapides de vitesse à l'échelle de la journée, de l'ordre de 20%, étaient mises en évidence sur une langue glaciaire du Nanga-Parbat (Himalaya) et cette vague semblait se propager le long du glacier. Ces anomalies de comportement soulevaient de nombreuses questions qui intriguaient les glaciologues.

Le nombre croissant de données concernant la neige et la glace, la mise en place d'expéditions importantes à caractère scientifique dans les régions polaires, et la collaboration de scientifiques de multiples horizons (physique, cristallographie, mécanique appliquée, géographie, géophysique...) sur des sujets ayant rapport avec la neige ou la glace fait, peu ou prou, naître une communauté scientifique servant le domaine de la glaciologie. La naissance en 1936 de la British Glaciological Society est un témoin de la volonté de faire de la glaciologie une science à part entière.

7.1. Une collaboration fructueuse

La Seconde Guerre mondiale, si elle suspend les réunions de la British Glaciological Society et ralentit les observations sur le terrain, n'entame pas la volonté des glaciologues anglais qui, au sortir de la guerre, créent un comité de recherche fondamentale sur les propriétés physiques de la glace et l'un des premiers journaux scientifiques consacré à la glaciologie : le *Journal of Glaciology* dont le premier numéro paraît en janvier 1947. Le 8 novembre 1946 se tient à Cambridge la première réunion du Glacier Physics Committee dont le but est clairement affiché :

« Experimental research on the fundamental physical and mechanical properties of ice is urgently required before a quantitative theory of glacier flow, based upon modern concept of plasticity in crystalline solids, can be formulated. For testing such theories in the field, novel methods of research will be needed for measuring flow rates and stresses in the interior of glaciers at considerable depth. »

Pour faciliter les réunions, la majorité des membres de ce comité fut composée de résidents de la ville de Cambridge (!). C'est donc tout naturellement que les premières études d'estimation des propriétés mécaniques de la glace, qui auront une retombée appréciable dans le milieu des glaciologues, se sont déroulées au fameux Cavendish Laboratory de Cambridge.

Ironie de l'histoire, un tournant décisif allait être donné à la glaciologie par deux « non-glaciologues ».

Le premier, E. Orowan, spécialiste de la plasticité des matériaux, laissera son nom au bas de nombreux articles de glaciologie et sera l'un des premiers à avoir étudié l'écoulement de la glace à partir de ses propriétés plastiques [37]. Il est aussi le premier auteur expliquant de manière théorique le profil presque parabolique des calottes glaciaires, c'est-à-dire présentant des pentes relativement fortes à basse altitude et faibles au centre. Le second, M.F. Perutz, jeune spécialiste à l'époque de physique des solides et de cristallographie et fêré d'alpinisme, en dépit de ses travaux précurseurs [38,39], ne consacra qu'une courte période de sa carrière à l'étude des propriétés mécaniques de la glace. Il marquera plus profondément le domaine de la biophysique, puisqu'il sera prix Nobel de chimie en 1962 pour ses travaux sur la structure de l'hémoglobine.

C'est en partie grâce à ces deux scientifiques, Orowan et Perutz, mais aussi grâce au contact fécond de deux sciences indépendantes, la physique des solides et la glaciologie, que va commencer, dans les premières années de l'après-guerre, l'étude théorique poussée des propriétés mécaniques de la glace, et que vont être menées en laboratoire de nombreuses études sur des échantillons de glace.

7.2. Vers une loi de comportement de la glace

Le 29 avril 1948 se tient une assemblée historique à l'Institut du métal de Cambridge, où se retrouvent des membres de la Société britannique de glaciologie, du Club de rhéologie et de l'Institut des métaux et de l'acier. Le Dr. G. Seligman y montre, en début d'après-midi, un film sur les travaux effectués par son équipe sur les glaciers. Lors de la session du soir, le Dr. Richard Seligman, son frère, ancien président de l'Institut du métal et *chairman* de cette session, prend la parole pour expliquer la tenue de ce meeting :

« I ought perhaps to explain the reason for my presence in this position. A great many years ago my brother was explaining some of his work to me and the complete analogy between what he was telling me and some of the work of Dr. Pearson had done and exhibited at the Institute of Metals during my Presidency seemed to me to call for a joint effort on the part of the glaciologists and metallurgists. »

Ainsi, à la demande du Dr. R. Seligman, Orowan exposa, ce jour-là, la théorie mathématique du corps plastique parfait. L'application sommaire, par Orowan et Perutz, de cette théorie aux glaciers dut être une révélation pour les glaciologues présents (Fig. 6). Les notes

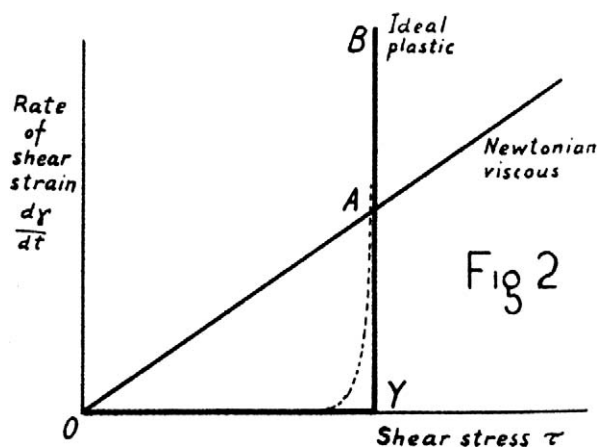


Fig. 6. Le schéma ci-dessus est celui présenté par M.F. Perutz et E. Orowan lors de la réunion du 29 avril 1948 [37]. C'est un diagramme classique en physique des solides, il représente le taux de déformation de la glace en fonction de la contrainte qu'elle subit. Dans le cas d'un fluide visqueux newtonien, cette relation est linéaire, c'est-à-dire que la vitesse de déformation augmente avec la contrainte (A). C'est ainsi qu'on a commencé à modéliser la déformation de la glace, c'est-à-dire son écoulement sous l'effet de son propre poids. Puis E. Orowan, au début des années 1950, introduit en glaciologie la notion, classique pour les métallurgistes, de plasticité. Celle-ci nous dit que le corps ne se déforme qu'à partir d'une certaine contrainte : avant que celle-ci ne soit atteinte, le corps est considéré comme un solide (ceci explique son caractère cassant) ; au-delà de cette contrainte seuil, le corps réagit comme un fluide parfait (B). Enfin J.W. Glen établit la « loi » la plus proche du comportement réel de la glace, qui relie le taux de déformation à une certaine puissance de la contrainte, et implique un comportement de la glace intermédiaire entre les deux cas extrêmes précédemment évoqués.

Fig. 6. This diagram was presented by M.F. Perutz and E. Orowan in April 1948 during the joint meeting [37]. It is a classic diagram on in solid physics. It shows the relation of the strain rate to the stress. For a viscous Newtonian fluid, this relation is linear, i.e. the strain rate increases with the stress (A). The ice flow was first modelled in this way. Later E. Orowan, in the early nineteen fifties, introduced plasticity, a classical notion for metallurgists into the field of glaciology. In the plastic case, the behaviour of the body depends on the stress: below a given threshold, the body is assumed to be solid; above the threshold, the body behaves as a perfect fluid (B). Finally, J.W. Glen established the 'law', linking strain rate to the stress to a given power and suggesting ice behaviour between the previous extremes.

de M.F. Perutz et E. Orowan, parues peu de temps après dans les premiers numéros du *Journal of Glaciology*, ne laisseront pas indifférents les glaciologues de l'époque. À commencer par R. Finsterwalder, un spécialiste des glaciers de l'Institut de cartographie de Munich (homonyme du précédent), qui apportera, quelques mois après la publication de Orowan, de grandes réserves à sa théorie, non pas dans l'idée de traiter la glace comme un matériau plastique – ce qu'il considère comme tout à fait novateur –, mais dans le fait de réduire le comportement de la glace à la seule déformation plastique. Finsterwal-

der a, en effet, étudié de nombreux glaciers dans les Alpes, en Asie centrale et au Spitzberg, et a pu constater qu'il existait deux types d'écoulement de glaciers, fondamentalement différents. Les premiers s'écoulent de manière lente avec un comportement très proche d'un fluide visqueux, et les seconds s'écoulent de manière plus rapide et comportent des phénomènes inhabituels.

Selon Finsterwalder, le premier type de glacier est majoritaire en Europe et concerne les glaciers larges s'écoulant sur un socle peu pentu. Soumis à de nombreuses études (pour certains depuis plus de quarante ans), ils sont en accord avec la théorie de Somaglia et Lagally, fondée sur les équations de Navier–Stokes, pour l'écoulement d'un fluide visqueux. En ce qui concerne le second type de glacier et les calottes polaires, Finsterwalder accorde un grand intérêt à la théorie de Orowan et propose que la glace puisse, selon certaines conditions, avoir un comportement visqueux ou bien plastique.

Le débat n'allait pas tarder à être tranché par un jeune membre du Cavendish Laboratory en charge d'étudier la déformation d'échantillons de glace soumis à différentes contraintes. Les essais en laboratoire sur des échantillons avaient déjà eu lieu auparavant, mais ce fut probablement l'une des premières fois où ils étaient menés de manière rigoureuse sur des échantillons de glace du type de celle qu'on rencontre dans les glaciers. En effet, J.W. Glen a mis au point une machine et utilisé un protocole opératoire rigoureux (compression avec contrainte uniforme, bonne maîtrise de la température, taille des grains, orientation des cristaux connus...). Comme en mécanique des solides, il s'agissait, dans ce type d'étude, de souligner le comportement de la glace en étudiant de quelle manière elle se déforme quand elle est soumise à une contrainte. C'est l'objet principal de la rhéologie (étymologiquement étude des corps qui coulent) d'étudier le comportement des corps quasi-visqueux, à la frontière entre solide et liquide. Grâce à cette étude, Glen allait, sans le savoir, laisser son nom à la loi qui relie, pour la glace, les contraintes aux taux de déformation. Il a, en effet, grâce à la grande rigueur de son travail expérimental, pu quantifier le comportement de déformation de la glace et montrer qu'elle avait un comportement intermédiaire entre le fluide visqueux au sens propre du terme (hypothèse de Lagally, 1930), et le solide plastique (hypothèse de Orowan, 1949). Dans son fameux article « Creep of polycrystalline ice » [16] daté de 1955, Glen montre que la vitesse due à la déformation de la glace est fonction de la température, mais aussi qu'elle dépend d'une puissance de la contrainte :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = B(T)\sigma_e^{n-1}\sigma'_{ij}$$

On reconnaîtra la viscosité de la formule précédente qui prend la forme $\eta = B(T)\sigma_e^{n-1}/2$. La glace peut donc être vue comme un fluide visqueux dont la viscosité dépend de la température (sous la forme d'une loi $B(T)$ de type Arrhenius) et d'une puissance de la scission efficace. La scission efficace σ_e est un invariant du tenseur des contraintes qui est une sorte de « norme » du tenseur et s'écrit comme la somme des carrés de ses composantes.

Les travaux de Glen ne sont pas encore publiés, mais sont connus de Nye, ce qui n'empêche pas ce dernier, lui aussi du Cavendish Laboratory, de publier en 1951, « The flow of glaciers and ice-sheets as a problem in plasticity » [36], qui développe une théorie complète du comportement plastique de la glace. Par facilité, de nombreux auteurs continueront d'utiliser la loi plastique pour des études théoriques. En 1957, Nye publie cependant un mémoire fondamental sur l'écoulement d'une nappe de glace dans l'hypothèse non plus de plasticité idéale, mais d'une loi de déformation conforme aux résultats expérimentaux de Glen et Perutz. Depuis 1955, la loi de Glen n'a jamais été fondamentalement remise en cause, même si on s'est aperçu assez rapidement du caractère très complexe de la glace et que d'autres lois ont été proposées. De nombreuses études sont actuellement menées en laboratoire pour comprendre les divers aspects de la rhéologie des glaces.

8. Bifurcation entre modélisation de la glace et celle des glaciers

La date symbolique de l'énoncé de la loi de comportement de la glace par Glen marque la fin de notre revue historique de l'écoulement des glaciers. Mais elle ouvre surtout la voie à l'étude poussée de la compréhension des propriétés mécaniques de la glace, à l'échelle du polycristal, qui a fait ses progrès les plus importants à partir de cette date (voir [51] pour un état des lieux des connaissances actuelles). On sait maintenant, par exemple, que la forme, la taille et l'orientation des grains (l'anisotropie des cristaux et de la texture) modifient la viscosité de la glace [34], or on sait que ces paramètres évoluent au cours du temps (les carottages profonds du Groenland et de l'Antarctique nous ont montré qu'il pouvait y avoir des variations importantes de ces paramètres). Aucun modèle d'évolution des glaciers ne prend en compte, à ce jour, l'évolution des propriétés rhéologiques de la glace avec le temps et très rares sont ceux qui tiennent compte de l'anisotropie [14]. Ainsi, la modélisation de la glace a probablement fait des progrès beaucoup plus marquants que celle des glaciers. En effet, la loi « unique » que nous utilisons pour l'ins-

tant en modélisation devrait, en toute rigueur, permettre des variations spatio-temporelles de ces paramètres. La question fondamentale est donc : comment passe-t-on du modèle de déformation du polycristal de glace aux modèles d'écoulement d'une calotte glaciaire ou d'un glacier ? C'est probablement l'un des plus grands défis qu'il reste à relever, pour améliorer sensiblement notre compréhension de l'écoulement à l'échelle macroscopique.

Maintenant, il est clair que le changement d'échelle entre glace et glacier modifie profondément la question ; des propriétés nouvelles apparaissent. Pour paraphraser B. Guy [19] qui note que, pour faire de la géologie, il faut d'avantage d'hypothèses que pour faire de la physique, nous pouvons dire que la modélisation des glaciers est éminemment plus contraignante et complexe que celle de la glace. Les conditions limites et initiales sont différentes et beaucoup plus nombreuses dans le cas d'un glacier, où on doit tenir compte de tout l'environnement géographique qui joue un rôle capital [47], de tous les forçages climatiques et de toute son histoire. Le nombre d'informations à connaître et à manipuler est énorme et demande une approche statistique nouvelle. Il faut aussi pouvoir définir de nombreux paramètres cohérents avec le changement d'échelle (la pente du glacier, son épaisseur, sa température...).

Pour illustrer cela, revenons aux fameuses bandes de Forbes. L'explication simple de la formation des bandes de Forbes, découvertes et expliquées en 1840, a fait jusqu'à très récemment l'unanimité. Une autre hypothèse très astucieuse vient d'être offerte par Guy [21] d'après lequel, les bandes de Forbes sont un très bel exemple naturel de structures auto-organisées, au sens de Prigogine. Les relations complexes entre poussières et pression-fonte entraîneraient cette structure. On sait que, plus il y a de poussière, plus le taux de fonte augmente (car la glace plus foncée a un albédo plus faible et s'ajoutent des interactions mécanique, thermodynamique et cinétique avec les poussières) et ce d'autant plus que la pression baisse le point de congélation autour de la poussière (notamment en augmentant la surface de fonte). En revanche, l'eau de fonte éjectée fait diminuer la pression. Ce système fondé sur des relations de rétroaction positive et négative fonte–pression est en équilibre, jusqu'au moment où un déséquilibre se fait au niveau de la pression et le système oscille. Cet exemple de fluctuations locales illustre bien la complexité à changer d'échelle et à tenir compte des conditions limites dans la modélisation des glaciers.

Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'avènement des techniques spatiales ont permis des progrès significatifs concernant la connaissance et la compré-

hension des glaciers et des calottes polaires. Une fois encore, par le contact fécond avec d'autres communautés scientifiques, la glaciologie a pu s'enrichir et progresser. En effet, l'emprunt à la communauté « Terre solide » des techniques d'interférométrie radar et de corrélation d'images [6], l'emprunt à la communauté océanographique de l'altimétrie satellitaire [41] ont permis pour la première fois d'établir des topographies précises à l'échelle du glacier ou de la calotte polaire et d'en estimer les vitesses d'écoulement [46].

Ces observations servent à tester des modèles d'écoulement, à les contraindre, et leur fournir des paramètres d'entrée ou, plus simplement, à détecter des processus physiques locaux dont la signature est perceptible à la surface. De façon non exhaustive, elles ont permis d'améliorer notre connaissance des processus physiques (rôle des contraintes longitudinales, présence de réseaux hydrologiques sous-glaciaires, présence d'immenses lacs sous-glaciaires en Antarctique...), ou permis de quantifier certains des forçages climatiques (taux d'accumulation de neige, température de surface...). Cependant, il est étonnant de noter que cette masse d'informations supplémentaires, concernant la dynamique et l'écoulement des glaciers, n'a pas modifiée la forme de la loi de Glen ; tout au plus, cela a servi à ajuster certains de ses paramètres de manière empirique [42,47]. Cela pourrait laisser penser que nous avons affaire à une loi d'écoulement « solide » ; nous entendons par-là, fiable et robuste. Il n'en est rien car, depuis sa formulation jusqu'à son utilisation actuelle dans les modèles numériques d'écoulement, une telle gamme de variations de ses paramètres a été utilisée, que l'on peut se demander si cette loi est « La loi d'écoulement » ou « Une loi d'écoulement » [4].

Pour finir, la télédétection fournit certes une image de certains des paramètres pertinents (topographie de surface, pente, vitesse d'écoulement, et depuis peu le bilan de masse... [7]) à l'échelle globale. On peut penser raisonnablement que, dans un proche futur, tous les paramètres visibles en surface seront mesurables par télédétection. En revanche, de nombreux paramètres, tels les forçages climatiques ou les conditions subglaciaires, restent difficiles à mesurer et des mesures *in situ* resteront plus longtemps capitales.

9. Conclusion

Le comportement et l'écoulement des glaciers sont encore loin d'être compris et certaines hypothèses admises depuis plusieurs décennies sont encore régulièrement remises en question.

On sait maintenant que l'écoulement des glaciers se fait à la fois par glissement (lorsque la base est tempé-

rée) et par déformation. En ce qui concerne les glaciers tempérés, ceux qui peuvent donc glisser sur leur base, lorsque la température a atteint le point de fusion, la loi utilisée, dont la formulation est proche de celle décrivant la déformation, est toute aussi peu contrainte. Les phénomènes de fonte–regel sont maintenant reconnus comme n'étant pas déterminants dans l'écoulement d'un glacier. Cependant, il est connu que si l'on modélise le glissement d'un glacier tempéré, il faut introduire un terme de fonte sur les faces amont du relief sous-glaciaire – dû à la suppression de la glace – et, inversement, un terme de regel sur les faces aval – dû à la dépression de la glace [26,27]. À cela aussi se rajoute l'anisotropie de la glace qui modifie son comportement en fonction de sa fabrication, c'est-à-dire en fonction de l'orientation des polycristaux qui constituent la glace [28].

L'hypothèse de la couche mince, qui fait appel au faible rapport entre l'épaisseur du glacier et sa longueur et qui permet de simplifier les équations, commence à être remise en question pour certains glaciers [25]. La modélisation numérique est rendue plus délicate.

On découvre maintenant que l'hydrologie sous-glaciaire est beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît de prime abord [13]. L'écoulement sous-glaciaire est loin d'emprunter des canaux tubulaires comme on le pensait, mais passe de poches d'eau en poches d'eau par des fractures irrégulières. La plomberie des glaciers, dont la compréhension est capitale pour la modélisation de leur bilan de masse, est, elle aussi, encore loin d'être connue.

Les glaciers n'ont décidément pas fini de nous surprendre.

Remerciements

Nous remercions Étienne Berthier du laboratoire d'étude en géophysique et océanographie spatiale (Legos) pour son aide dans les illustrations des Figs. 1, 2 et 4 et Danièle Pouypoudat du Legos pour le schéma de la Fig. 3. Nous remercions chaleureusement Bernard Guy de l'École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne pour ces commentaires ayant fortement enrichi le manuscrit.

Références

- [1] L. Agassiz, Études sur les glaciers, Jent et Gassman, Neuchâtel, Suisse, 1840 (346 p.).
- [2] L. Agassiz, E. Desor, A. Guyot, Système glaciaire ou recherches sur les glaciers, leur mécanisme, leur ancienne extension et rôle qu'ils ont joué dans l'histoire de la terre, V, Masson, Paris ; L. Voss, Leipzig, 1847, p. 598.
- [3] D. Alexander, Des icebergs indestructibles, Météorol. Marit. 195 (2002) 22–24.

- [4] R.B. Alley, Flow-law hypotheses for ice-sheet modeling, *J. Glaciol.* 38 (1992) 245–256.
- [5] E. Bard, Greenhouse effect and ice ages: historical perspective, *C. R. Geoscience* 336 (2004) 603–638.
- [6] E. Berthier, H. Vadon, D. Baratoux, Y. Arnaud, C. Vincent, K. Fiegl, et al., Mountain glacier surface motion derived from satellite optical imagery, *Remote Sens. Environ.* 95 (2005) 14–28.
- [7] E. Berthier, Y. Arnaud, D. Baratoux, C. Vincent, F. Rémy, Recent rapid thinning of the ‘Mer de Glace’ glacier derived from satellite optical imagery, *Geophys. Res. Lett.* 31 (2004) L17401.
- [8] A.C. Bordier, Voyage pittoresque aux glaciers de Savoie fait en 1772, L.A. Caille, Genève, 1773 (303 p., in-12).
- [9] J. de Charpentier, Essai sur les glaciers et sur le terrain erratique du bassin du Rhône, Ducloux, Lausanne, 1841.
- [10] R. Descartes, Les Météores, Discours sixième, 1635.
- [11] A. Falsan, La période glaciaire étudiée principalement en France et en Suisse, Ancienne librairie Germer Baillière, F. Alcan éditeur, Paris, 1889 (350 p.).
- [12] J.D. Forbes, Travels through the Alps of Savoy and other parts of the Pennin chain with observations on the phenomena of Glaciers, second ed., Adam & Charles Black, Edinburgh, 1845 (456 p.).
- [13] A.G. Fountain, R.W. Jacobel, R. Schlichting, P. Jansson, Fractures as the main pathways of water flow in temperature glaciers, *Nature* 433 (2005) 618–621.
- [14] O. Gagliardini, J. Meyssonier, Simulation of anisotropic ice flow and fabric evolution along the GRIP-GISP2 flow line (Central Greenland), *Ann. Glaciol.* 30 (2000) 217–223.
- [15] G. Galilée, Discours sur les corps flottants, 1612.
- [16] J.W. Glen, The creep of polycrystalline ice, *Proc. R. Soc. Lond.* 228 (1955) 519–538.
- [17] G.S. von Gruner, Die Eisgebirge des Schweizerlandes, 3 vols., Bern, 1760, in-8°.
- [18] A. Guillemin, La neige, la glace, les glaciers, Petite Encyclopédie populaire des sciences et de leurs applications, Librairie Hachette, Paris, 1891 (p. 289).
- [19] B. Guy, Réflexions sur les notions de faits et de lois géologiques. Comparaison avec la physique, *Trav. Com. Fr. Hist. Géol. (Cofrhigeo)* 12 (3) (1998) 25–37.
- [20] B. Guy, L’éclair et le tonnerre, promenades entre l’espace et le temps, Publibook, Paris, 2004 (224 p.).
- [21] B. Guy, M. Daigneault, G. Thomas, Réflexions sur la formation des bandes de Forbes : l’instabilité de la fusion de la glace sale, *C. R. Geoscience* 334 (2002) 1061–1070.
- [22] A. de Haller, Les Alpes, Société typographique, Berne, 1795 (1729), p. 11.
- [23] R. Halleux, J. Mc Clellan, D. Beradiu, G. Xhayet, Publications de l’Académie royale des sciences de Paris, tome I, p. 556, tome II, p. 128, 2001.
- [24] H. Helmholtz, Conférence et étude sur la régélation de la glace, in : J. Tyndall, Les glaciers et les transformations de l’eau, Librairie Germer Baillière, Paris, 1873.
- [25] E. Le Meur, O. Gagliardini, T. Zwinger, J. Ruokolainen, Glacier flow modelling: a comparison of the Shallow Ice Approximation and the full-stokes solution, *C. R. Physique* 5 (2004) 709–722.
- [26] L. Lliboutry, La dynamique de la Mer de glace et de la vague de 1891–1895 d’après les mesures de Joseph Vallot, Symposium de Chamonix, Physique du mouvement de la glace, Association internationale d’hydrologie scientifique, Publication n° 47, 1958.
- [27] L. Lliboutry, Traité de glaciologie, tome 1, Glace, neige, hydrologie nivale, Masson, Paris, 1964 (428 p.).
- [28] L. Lliboutry, P. Duval, Various isotropic and anisotropic ices found in glaciers and polar ice caps and their corresponding rheologies, *Ann. Geophys.* 3 (2) (1985) 207–224.
- [29] L. Lliboutry, L. Reynaud, Global dynamics of a temperature valley glacier, Mer de Glace and past velocities deduced from Forbes bands, *J. Glaciol.* 27 (1981) 207.
- [30] P. Martel, Lettre écrite à William Windham, août 1742, in : Lettres de Windham et de Martel, publiées et annotées par Henri Ferrand, correspondant du ministère de l’Instruction publique.
- [31] C. Martins, Recherches récentes sur les glaciers actuels et la période glaciaire, *Revue des Deux Mondes* 11 (1875) 838–861.
- [32] J.-P. Maury, Une histoire de la physique sans les équations, Vuibert, Paris, 2000 (p. 231).
- [33] J.C. McConnel, D.A. Kidd, *Proc. R. Soc. Lond.* 44 (1888) 331.
- [34] M. Montagnat, P. Duval, The viscoplastic behaviour of the ice in polar ice sheets: experimental results and modelling, *C. R. Physique* 5 (2004) 699–708.
- [35] G. De Moor, J.-C. André, Novier, un honnête homme de la mécanique et les équations de Navier–Stokes, *La Météorologie* 50 (2005) 51–59.
- [36] J.F. Nye, The flow of glaciers and ice sheets as a problem in plasticity, *Proc. R. Soc. Lond., Ser. A* 204 (1951) 554–572.
- [37] E. Orowan, Remarks at joint meeting of the British Glaciological Society, the British Rheologists Club and the Institute of Metals, *J. Glaciol.* 1 (1949) 231–236.
- [38] M.F. Perutz, G. Seligman, A crystallographic investigation of glacier structure and the mechanism of the glacier flow, *Proc. R. Soc. Lond., Ser. A* 172 (1939) 335–360.
- [39] M.F. Perutz, Glaciology: the flow of glaciers, *The Observer* 70 (1950) 64–65.
- [40] N.E. Rambert, Le Voyage du glacier, *Revue des Deux Mondes* 72 (1867) 377–410.
- [41] F. Remy, L. Testut, B. Legrésy, Topographie des calottes polaires par altimétrie, « Le point sur », *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 330 (2000) 457–467.
- [42] F. Remy, C. Ritz, L. Brisset, Ice sheet flow features and rheological parameters derived from precise altimetric topography, *Ann. Glaciol.* 23 (1996) 277–283.
- [43] C. Rendu, Théorie des glaciers de la Savoie, *Mém. Soc. R. Acad. Savoie–Chambéry* 1 (X) (1841) 39–158.
- [44] H.B. de Saussure, Voyage dans les Alpes, 4 vols. in 4°, Neuchâtel, 1803, in : J. Boch (Ed.), *Le Voyage dans les Alpes*, 2002, p. 300.
- [45] J.-P. Schaer, Le rôle d’Agassiz en glaciologie ou la réussite d’un entrepreneur scientifique ambitieux, *Trav. Com. Fr. Hist. Géol. (Cofrhigeo)* XV (4) (2001) 77–87.
- [46] L. Testut, Apport de la topographie à l’étude des calottes polaires, thèse, université Paul-Sabatier, Toulouse, 2000, p. 130.
- [47] L. Testut, E. Tabacco, C. Bianci, F. Remy, Influence of geometrical boundary conditions on the estimation of rheological parameters, *Ann. Glaciol.* 30 (2000) 102–106.
- [48] J. Tyndall, Les glaciers et les transformations de l’eau, Librairie Germer Baillière, Paris, 1873.
- [49] B. Weinberg, Über die innere Reibung des Eises, *Ann. Phys.* V 18 (11) (1905) 81–91 (in German).
- [50] B. Weinberg, Über die innere Reibung des Eises, *Ann. Phys.* IV 22 (2) (1907) 321–332 (in German).
- [51] J. Weiss, Ice: From dislocations to icy satellite, *C. R. Physique* 5 (2004) 683–685.
- [52] F. Zürcher, E. Margollé, Les Glaciers, Bibliothèque des merveilles, Librairie Hachette, Paris, 1888, p. 318.