

Réflexions sur la formation des bandes de Forbes : l'instabilité de la fusion de la glace sale

Bernard Guy*, Martin Daigneault, Gérard Thomas

Centre SPIN (« Sciences des processus industriels et naturels »), École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne, 158, cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne cedex 2, France

Reçu le 3 décembre 2001 ; accepté le 15 octobre 2002

Présenté par Jean-Paul Poirier

Abstract – Reflections on the formation of Forbes ogives: the instability of fusion of dirty ice. Forbes ogives show alternations of dark (ice + mineral dust) and light bands at the surface of certain glaciers. We propose to understand their origin by the influence of the content of mineral matter on the lowering of the temperature and pressure of ice fusion and upon the increase of fusion velocity. We are then in an unstable situation: a local increase in the mineral content being induced by the fusion process, which in turn increases; this creates a dark band. The movement of the glacier cannot keep up with the fusion: pressure is lowered again below the fusion point, and a white band is formed. *To cite this article: B. Guy et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 1061–1070.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Forbes ogives / surface melting / velocity of fusion / glacial dynamics / instability

Résumé – Les glaciers de type alpin montrent parfois, à la surface de leur partie moyenne et basse, des alternances de matière grise (glace contenant des poussières) et blanche : ce sont les bandes de Forbes. Nous proposons de voir leur origine dans l'influence de la teneur en éléments minéraux sur l'abaissement de la température et de la pression de fusion de la glace et sur l'augmentation de la vitesse de fusion. Le système se trouve dans une situation d'instabilité, une augmentation locale de la teneur en poussières étant accentuée par le processus de fusion et l'augmentant à son tour, ce qui crée une bande grise. L'apport de matière dû au mouvement du glacier n'étant plus suffisant, la pression rebaisse en dessous du seuil de fusion et une bande blanche se forme ensuite. *Pour citer cet article : B. Guy et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 1061–1070.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

bandes de Forbes / fusion de surface / vitesse de fusion / dynamique glaciaire / instabilité

Abridged version

1. Introduction

The Forbes bands or ogives, described for the first time by the British glaciologist Forbes on the 'Mer de Glace' in the Mont-Blanc massif (1845) are constituted of grey strips, of plurimetric to decametric width, visible at the surface of certain glaciers [2]. They are marked by the presence of mineral dust in the dark bands, as opposed to the clear bands where the ice is purer. The grey bands are visible in the intermediate and lower part of the glacier. They are curved as chevrons in the direction of the movement of the glacier, due to a higher speed at the centre than at the sides (Fig. 1). The grey bands have at the centre

of the glacier a width of a some 15 m that reduces on the flanks to about 10 m. The clear bands are wider; they have about 100 m in their maximum extension, which reduces to about 30 m at the sides. Their formation, which is linked in the literature to the alternation of seasons, remains poorly understood. In this paper, we want to reconsider the conceptions presented, and to propose a new hypothesis.

Many authors have examined the question, such as in [1, 12–15, 18]. Basically, the proposed explanations rest on the hypothesis that the dark bands correspond to snow, contaminated during summer by dust, and the debris released by erosion, and the clear bands to winter snow. There are two main variants. In the first, the contamination is precocious: the snow is soiled as early as it is deposited in the upper part of the glacier; it forms overlying beds that

* Correspondance et tirés à part.
Adresse e-mail : guy@emse.fr (B. Guy).

transform into ice in the depths on the upper part. In the intermediate part, after changes in the slope of the glacier, the ice bedding verticalises and reveals the observed bands. In the second variant, there is no primary structuring of the mass of the glacier according to two types of snow; the incorporation of dust is posterior and happens lower in the course of the progressing glacier; it is guided by deformations and fracturing of the glacier caused by its movement. It can be more or less superficial, guided by the light variations of relief presented by the alternation of clear bands (supposed in relief) and dark (in hollows) at the surface of the glacier, dust accumulating in the hollows. The alternation of reliefs (or 'waves') is provoked by a change of slope upstream to the bands.

2. Questions

All this raises many questions. For what concerns the first group of hypotheses, one can be surprised by the conspicuous regularity of band sizes on cycles of several tens of units. The abundance of snow, the supply of dust and solid matter, are very variable, depending on the years, and they do also evolve progressively during the same year. The perfect consistency in the dimensions of the bands in a same sector and the neatness of the transition is thus very surprising. Furthermore, one must suppose a constant proportion from one year to the next between the quantities of snow falling in winter and summer, this proportion being variable from one glacier to another, although neighbouring! In reality, if the authors prefer to study the bands or chevrons corresponding to annual cycles (a clear band and a dark band per year), they also speak of completely similar bands with cycles of several units per year, such as 5 to 12 cycles per year. This leads one to doubt the annual adjustment of the phenomenon. Finally, the verticalisation of the bands is problematic. For the second group of hypotheses, one can cite a number of interrogations already noted. One can add the question why the undulations or mechanical fracturing should always have an annual rhythm. One also encounters such bands on glaciers that have a neither major slope change, nor the formation of waves, nor important fracturing. One can put the question of the incorporation of dust in superficial snow into the intermediate part of the glacier; could it produce true ice, as one observes, whereas ice ordinary has formed in the upper part of the glacier?

One could continue the list of questions. It seems, and this agrees with the opinion of scientists who discuss Forbes ogives, the often-admitted explanations remain hardly convincing [1], to say nothing of the anomalies that one can find among them. If the various ideas expressed are not to be rejected as a whole, their association is not satisfactory. It seems to us necessary to change the manner of approaching the problem and to renounce looking for conditions external to the system or upstream to it (for example, the alternation of seasons), that would oscillate and be recorded passively by the ice in the chevrons (even if they may intervene for a specific role). We must rather adopt the 'philosophy' of self-organisation. Starting from a position without bands, what are the phenomena the competition

and self-adjustment of which could generate the regularity of bands, and in which special conditions? For different reasons, the ice of a glacier a priori contains dust in variable quantities, but not showing any oscillations. The result of the phenomena, which we try to identify, is that this dust will be able to concentrate locally.

3. Surface fusion and increase of the fusion velocity of dirty ice

One knows, in particular in the intermediate part of the glacier (abrasion zone), that the temperature is close to the fusion temperature in the superficial layers of many temperate glaciers. What can facilitate or accelerate there the fusion of the dirty ice? One thinks first of a thermodynamic effect: the intervention of interfacial energies modifies the fusion temperature, or, what is equivalent (due to the slope of $p(T)$ curve in the (p, T) space), modifies the melting pressure of dirty ice, in the same direction for a given temperature, compared to that of clean ice. Various theoretical and experimental works [3, 11, 19] show such effects: the lowering of the melting point of ice in cylindrical micropores. The sign of the curvature of the interface is important and, in the inverse case of ice containing spherical impurities, one will have the opposite: an increase in the fusion temperature. However, in the case of rough interfaces, which is the case of natural dust, the curvature of the interface does not play a role, and one observes a film of liquid water around the grains in the ice. This film is very thin; it is of some tenths of a micron for micronic ruggedness, and corresponds to a local lowering of the fusion temperature of magnitude of 1 °C or slightly more. One speaks of surface fusion. A kinetic effect can add to this thermodynamic effect, both intervening at the surface: one knows that the melting kinetic rate of a solid is proportional to its surface area, all other things being equal (e.g., [9]). At the neighbourhood of the fusion point, due to the larger limiting surface created by the presence of dust, dirty ice thus melts faster than clean ice. The conjugated effect of pressure adds to the preceding effects: first, one knows that the presence of inclusions within a matrix leads to a local increase of stress [4]. The increase of stress around a dust grain within the ice will lower the melting temperature of ice; then the water film that surrounds the solid grains in the dirty ice during the process of melting cannot transmit the pressure in the same manner as the adjacent solid ice. The dirty ice can deform more easily, as water migrates laterally. One also can have a light increase of pressure bearing on the ice crystals within the dirty ice, which are comparatively a little less abundant than in the case of clean ice to bear the same total pressure; this renders melting easier. The action of solar radiance works in the same direction, and is limited to the surface: the dirty ice zones are less reflecting and absorb more heat; this can drive them to melt in a preferential manner in comparison with clean ice, and induces the same type of instability. Semi-quantitative preliminary experiments of our own seem to show that dirty ice, under pressure, effectively melts slightly faster than clean ice.

4. Dynamics of the glacier and formation of alternating bands

How does this phenomenon conjugate itself with the movement of the glacier to form bands? In the course of the descent of the ice, one can attain the conditions of incipient fusion, which may be approached more quickly by a local change of slope and a correlative increase of pressure. Imagine thus a localised fusion of ice, which may occur for an internal reason (slightly more dust), or simply for an external one (localised pressure). The fusion goes quicker because of the increase in mineral content it provokes. There is the creation of a dark band. This acceleration will provoke a lowering of the pressure in the neighbourhood of the fusion zone, due to the loss of matter by fusion and the lateral expulsion of water. The glacier movement may not follow. Depending on the speed of arrival of new ice in the fusion zone, compared to the kinetics of fusion, a decrease of pressure upstream of the melting zone may be more or less fast. Melting may be stopped and one white ice band will form after the dark one; this band will crossundamage the zone where the pressure should have had to increase. It is necessary to await for the glacier movement to compress the ice again, so that the pressure increases again after the clear band, and one attains again the fusion point, with a new acceleration, and so on. This can form alternations. The result of a linear approach is presented in Fig. 2.

5. Discussion

In this framework, one understands that there are pressure and temperature conditions bearing on the system, linked to the topographic conditions, which will give birth

to the existence of the phenomenon. Depending on the speed of the glacier and the associated pressure variations, the wavelengths of the bands will be variable. It is possible that the pressure variations remain coupled with the annual cycles (glacier movement and preferential fusion during summer). The thickness of the structured ice can also be variable depending on the conditions of flow and ice melting associated with the temperature/pressure parameters. However, it is certainly plurimetric: if it were only at the scale of some centimetres, one would not see the bands with the neatness they have over several kilometres of glacier, revealing an internal structure of the ice. It is important to note on this point, that, in addition to the dust concentration in the direction of the movement of the glacier, there is a second concentration, alongside the vertical direction. This is due to the superficial fusion of the ice. This can increase, at the surface of the glacier, the contrast between the dark bands and the clear bands and gives the impression that the zone concerned by dust accumulation is only on a centimetre scale. However, by looking at crevasses, one sees that the bedding marked by dust extends to a depth of several metres, but with less dust.

In conclusion, Forbes ogives appear as a beautiful example of self-organisation (or dissipative structure, Prigogine) showing the apparition of an order in a system dissipating energy: dissipation here lies in the pressure forces, added to the thermal energy, that induce the fusion and the movement of the glacier. Other examples are already known in different domains of geology [5–9]. Our approach has remained semi-quantitative; in the future, new observations, experimental work, and more complete quantitative modelling will be needed.

1. Introduction

Les bandes de Forbes, décrites en 1845 par le glaciologue britannique Forbes dans le massif du Mont-Blanc [2] présentent des zébrures régulières grises, de largeur plurimétrique à décimétrique, visibles à la surface de certains glaciers. Elles sont marquées par la présence de poussières minérales accumulées dans les bandes sombres, par opposition aux bandes intercalaires claires, où la glace est plus pure. Leur formation, que l'on relie dans la littérature à l'alternance des saisons, reste mal comprise. Nous voulons dans cet article réexaminer les conceptions présentées, et proposer une nouvelle hypothèse.

L'exemple, très connu, de la mer de Glace nous fournit un point de départ. Les bandes grises sont visibles dans la partie moyenne et basse du glacier, sous les séracs du Géant, sur le glacier du Tacul. Elles sont arquées comme des chevrons dans le sens du mouvement du glacier, à cause de la vitesse plus importante au centre que sur les côtés (Fig. 1). De

ce fait, les épaisseurs comptées perpendiculairement aux contours des bandes sont variables, alors qu'elles sont presque constantes dans le sens du mouvement du glacier. Les bandes grises ont, au centre du glacier, une largeur d'une quinzaine de mètres, qui se réduit sur les flancs à seulement une dizaine. Les bandes intercalaires claires sont plus larges; elles ont une centaine de mètres dans leur extension maximale, qui se réduit à une trentaine sur les côtés. Sur la mer de Glace, on observe près d'une cinquantaine de telles bandes, jusque sous les échelles du Montenvers. Leur régularité et la constance de leur taille sont remarquables. Dans d'autres glaciers du voisinage, on en observe aussi, avec des tailles différentes. Dans les divers cas, les bandes sombres contiennent des poussières minérales de taille inframillimétrique, ainsi que, plus rarement, de petits éléments de roches de taille millimétrique, parfois davantage; de près, on observe que les poussières sont engagées dans le plan de schistosité ou le litage de la glace et dessinent de fins lits. La quantité de ces lits donne à la glace sa



Fig. 1. Bandes de Forbes sur la mer de Glace, vue depuis la rive droite. La longueur du glacier exposé est d'un peu plus de 2 km.

Fig. 1. Forbes ogives on the 'Mer de Glace', as seen from the right bank. The length of exposed glacier is a little more than 2 km.

couleur grise, lorsqu'on la voit de loin. Le passage aux bandes claires, qui contiennent notablement moins de lits de poussières, se fait de façon relativement nette sur une distance de quelques dizaines de centimètres. Nous pourrions appeler «glace sale» la glace qui contient les poussières et les éléments rocheux, par opposition à la «glace propre», qui n'en contient pas ou en contient moins par rapport à la première, et «cycle» l'association d'une bande claire et d'une bande sombre adjacente.

2. Résumé des hypothèses explicatives proposées dans la littérature et questions

De nombreux auteurs se sont penchés sur la question (voir, par exemple, [1, 12–15, 18] et les travaux qui y sont appelés). Fondamentalement, les explications proposées reposent sur l'hypothèse que *les bandes sombres correspondent à de la neige d'été contaminée par les poussières éoliennes* et les débris dégagés par l'érosion estivale, et les bandes claires à la neige d'hiver. Avec deux grandes variantes. Dans la première, la contamination est précoce : la neige est salie dès son dépôt dans la partie supérieure du glacier ; elle forme des couches qui se superposent et se transforment en glace dans les profondeurs de la partie supérieure. Dans la partie moyenne, après des changements dans la pente du glacier, les couches de glace se verticalisent et apparaissent sous leur tranche, ce qui révèle les bandes observées ; les arches sont alors des structures profondes et leurs dimensions re-

flètent les abondances relatives des neiges d'été et d'hiver.

Dans la seconde variante, il n'y a pas structuration primaire de la masse du glacier selon deux types de neige ; l'incorporation des poussières d'été est postérieure et se fait plus bas dans le cours du glacier qui progresse ; elle est guidée par des déformations et fracturations du glacier causées par son mouvement. Elle peut être plus ou moins superficielle, guidée par les légères variations de relief présentées par l'alternance des bandes claires (supposées en saillie) et sombres (en creux) à la surface du glacier, les poussières s'accumulant dans les creux. L'alternance de reliefs (les «vagues») est provoquée par une rupture de pente en amont des bandes, dans un secteur où l'on doit supposer un amincissement du glacier. Il y a alors augmentation corrélative de sa surface exposée, en relation avec une vitesse de déplacement supérieure (pour la mer de Glace, c'est au passage des séracs du Géant) : la zone élargie reçoit davantage de neige l'hiver (bandes en relief) et est davantage soumise à l'ablation l'été (bandes en creux). Pour certains auteurs, c'est plutôt l'ouverture de crevasses remplies par de la neige sale l'été, et sur une profondeur plus importante, qui est responsable des alternances. Dans ce second groupe d'hypothèses, les dimensions des différentes bandes sont imposées par la dynamique glaciaire.

Tout ce qui vient d'être dit soulève de nombreuses questions. Pour ce qui concerne le premier groupe d'hypothèses, on peut être surpris par la très grande

régularité des tailles des bandes sur des cycles de plusieurs dizaines d'unités. L'abondance des chutes de neige et les températures (d'où les taux de fusion), l'apport de poussières et matières solides, sont très variables suivant les années, et peuvent d'ailleurs évoluer de façon progressive au cours d'une même année : la constance parfaite des dimensions des bandes dans un même secteur et la netteté des transitions est alors très étonnante. On doit supposer, de plus, une proportion constante d'une année à l'autre entre les quantités de neige tombées l'hiver et l'été, cette proportion étant variable d'un glacier à un autre, pourtant voisin ! En réalité, si les auteurs préfèrent étudier les bandes ou chevrons correspondant à des cycles annuels (une bande claire et une bande sombre par an), ils signalent aussi des bandes tout à fait semblables, avec des cycles de plusieurs unités par an, comme 5 à 12 cycles par an, ce qui conduit à discuter le réglage annuel du phénomène. Le caractère non ubiquiste des bandes est aussi intrigant : les glaciers d'un secteur sont alimentés en neige de façon assez semblable et connaissent les mêmes alternances d'étés et d'hivers : cependant, tous ne présentent pas les bandes. Il est aussi rare de voir celles-ci dans la partie supérieure du manteau glacio-neigeux, pourtant visible localement sous sa tranche dans des zones de séracs, les rimayes d'altitude ou les corniches sous les sommets. On peut, plus généralement, se poser la question de la conservation de la netteté des bandes, malgré toutes les déformations que subit le glacier, les zones de sérac, etc. Lorsque des glaciers résultent du confluent de plusieurs glaciers, il faudrait que les apports des différents glaciers s'ajustent de façon que la glace d'hiver des uns se retrouve avec la glace d'hiver de l'autre et ainsi de suite pour les différentes bandes, pour ne pas perdre la netteté des alternances. Enfin, la notion de verticalisation des bandes est problématique.

Pour ce qui concerne le second groupe d'hypothèses, on peut reprendre un certain nombre d'interrogations déjà posées. On peut rajouter la question de savoir pourquoi les ondulations ou fracturations mécaniques se feraient toujours selon un rythme annuel. On rencontre aussi les bandes sur des glaciers où il n'y a eu ni rupture de pente majeure, ni formation de vagues, ni fracturation importante. On peut encore se poser la question de l'incorporation superficielle non précoce des poussières dans de la neige. Celle-ci pourrait-elle former de la glace véritable, comme on l'observe pourtant emballant les poussières, glace qui se forme plutôt dans les parties hautes du glacier ? Enfin, on notera que de nombreuses zones de crevasses recoupent les chevrons sans les modifier ; les crevasses ne sont donc pas toujours responsables des chevrons.

3. Position du problème

On pourrait continuer la liste des questions. Comme on le voit, et de l'avis même des scientifiques qui présentent les bandes de Forbes, les explications couramment admises restent peu convaincantes [1], sans parler des antinomies que l'on peut trouver entre elles. Si les divers ingrédients présents ne sont pas à rejeter en bloc, leur association n'est pas satisfaisante. Dans la situation où nous nous trouvons, il nous semble qu'il faut changer la façon d'aborder le problème et renoncer à chercher des conditions extérieures au système ou en amont de lui (par exemple, l'alternance des saisons), qui oscilleraient et qui seraient enregistrées passivement par la glace dans les chevrons (même si cela peut intervenir pour une part à préciser). C'est alors à l'intérieur de la dynamique glaciaire elle-même qu'il faut chercher, c'est-à-dire adopter la « philosophie » de l'*auto-organisation*. À partir d'une situation sans bandes, quels peuvent être les phénomènes dont la compétition et l'autorégulation pourraient engendrer la régularité des bandes, et dans quelles conditions particulières ? Pour différentes raisons, la glace d'un glacier contient a priori des poussières en quantités variables, mais ne montrant pas d'oscillations. Le résultat des phénomènes que nous essayons de cerner est que ces poussières vont pouvoir se concentrer localement. Il est simple de penser que ce ne peut être que par différence, c'est-à-dire par fusion différentielle de la glace, ce qui va concentrer localement les poussières. Nous arrivons au problème de l'instabilité, vis-à-vis de ce processus de fusion, d'un mélange homogène de glace contenant des poussières minérales. Faisons l'hypothèse que, dans une région où il y a un peu plus de poussières, la glace va avoir tendance à fondre un peu plus facilement, ou un peu plus rapidement, que dans les autres régions. Le phénomène va donc s'accélérer, l'augmentation de la teneur en poussière corrélative à la fusion rendant la zone encore plus fusible : une concentration de glace sale va ainsi pouvoir se former. Un second phénomène, couplé au premier, devra empêcher que celui-ci ne diverge, l'arrêtera, et permettra la sélection d'une longueur d'onde.

4. Paramètres jouant sur la fusion de la glace : fusion facilitée à l'interface glace/poussière et augmentation de la vitesse de fusion de la glace sale

On sait que, en particulier l'été, la température superficielle de la partie moyenne (zone d'ablation) du glacier est proche de la température de fusion pour de nombreux glaciers tempérés. Qu'est ce qui peut faciliter ou accélérer la fusion de la glace sale dans

cette zone ? On pense d'abord à un effet thermodynamique : l'intervention des énergies interfaciales modifie la température de fusion T de la glace sale par rapport à celle de la glace propre, ou ce qui est équivalent (à cause de la pente de la courbe $p(T)$ dans le plan (p, T)), modifie dans le même sens la pression de fusion de la glace sale par rapport à celle de la glace propre. Divers travaux théoriques et expérimentaux montrent de tels effets [3, 10, 11, 19] : abaissement du point de fusion de la glace dans des micropores cylindriques. S'il s'agit d'une courbure d'interface de signe inverse, comme dans le cas d'un bloc de glace contenant des impuretés sphériques, on observera, au contraire, une augmentation de la température de fusion. Dans les deux cas, la diminution du rayon de courbure augmente les effets. Dans le cas d'impuretés dans la glace avec des interfaces rugueuses, ce qui est le cas des poussières naturelles, on observe un film d'eau liquide autour des grains englobés dans la glace. Ce film est très mince ; il est de quelques dixièmes de micromètres pour des rugosités microniques, et correspond à un abaissement local de la température de fusion de l'ordre du degré Celsius ou un peu plus ; l'effet se comprend par la coexistence d'un rayon de courbure (compté dans la glace) négatif et grand (enveloppe du grain minéral) et de rayons de courbure positifs et petits pour les rugosités et microfissures du grain, remplies de glace. L'effet global est celui qu'on appelle fusion de surface. En restant dans les effets thermodynamiques, l'effet d'une solubilité des poussières irait dans le sens d'un abaissement de la température de fusion de la glace sale.

Un effet cinétique peut se rajouter aux effets thermodynamiques : on sait que la vitesse de fusion d'un corps est proportionnelle à l'aire de sa surface externe solide, toutes choses égales par ailleurs (voir, par exemple, [9]). Au voisinage du point de fusion, à cause de la plus grande surface externe créée par la présence de poussières, la glace sale fond ainsi plus vite que la glace propre.

L'effet conjugué de la pression se rajoute aux effets précédents ; on sait d'abord que la présence d'inclusions au sein d'une matrice conduit à une concentration de contraintes [4]. L'augmentation localisée de la pression autour d'un grain de poussière va abaisser la température de fusion de la glace (effet de variation de T avec p régi par la relation de Clapeyron). Ensuite, le film d'eau qui entoure les grains solides de la glace sale en train de fondre ne peut transmettre la pression de la même façon que la glace solide adjacente. L'ensemble peut se déformer plus facilement, en admettant que l'eau puisse migrer latéralement, même de façon limitée (la migration est observée dans les zones de surpression sous les séracs, où l'on observe des filets d'eau formant des bédrières ; la présence d'inclusions peut favoriser l'ouverture des

jointes de grains de la glace). Cet effet de perméation sous contrainte se traduit par un abaissement du point de fusion apparent du matériau global. On peut aussi avoir une légère augmentation de la pression sur la glace solide sale, qui est relativement un peu moins abondante que dans le cas de la glace propre, pour supporter une même pression totale, ce qui va dans le sens d'une facilitation de sa fusion. L'effet thermique du rayonnement solaire est favorable à la fusion, limitée à la surface : les zones de glace sale sont moins réfléchissantes et absorbent davantage de chaleur : ce qui peut faire fondre ces zones de façon préférentielle par rapport à la glace propre (fusion autour des grains de poussière) et entraîner le même type d'instabilité.

Ces divers phénomènes sont résumés dans le Tableau 1. On remarquera que tous, excepté un (qui ne s'applique pas à notre cas), vont dans le même sens, celui d'une facilitation de la fusion de la glace sale ; en particulier, l'effet thermodynamique et l'effet de concentration des contraintes, induisant une fusion à la surface des poussières, ainsi que l'effet cinétique, voyant l'augmentation de la vitesse de fusion pour une augmentation de la teneur en éléments minéraux, tous effets accompagnés d'une perméation de l'eau, doivent être pris en compte de façon essentielle ; ils n'ont jamais été mentionnés dans ce contexte. Des expériences préliminaires semi-quantitatives menées par nos soins montrent que la glace sale soumise à une pression fond un peu plus vite que la glace propre.

5. Dynamique du glacier et formation des bandes alternantes

Comment ce phénomène (fusion préférentielle de la glace sale) va-t-il se conjuguer avec le mouvement du glacier pour former des bandes ? Au cours de la descente de la glace, on peut atteindre les conditions de début de fusion, qui peuvent être approchées plus rapidement encore par un changement local de pente. Imaginons ainsi une fusion localisée de la glace, que ce soit pour une raison interne (plus de poussière), ou tout simplement externe (pression localisée). La fusion va s'accélérer du fait de l'augmentation de teneur en matière minérale qu'elle provoque. La concentration dans la glace restante va augmenter : il y a création d'une bande sombre. Cet emballement va provoquer un abaissement de la pression au voisinage de la zone de fusion, à cause de la perte de matière par fusion et l'expulsion latérale de l'eau, l'apport de matière dû au mouvement du glacier n'étant plus suffisant pour maintenir la pression. Selon la vitesse d'arrivée de la glace nouvelle dans la zone de fusion, comparée à la vitesse de fusion, la pression est susceptible de redescendre plus ou moins vite en

Tableau 1. Inventaire des différents facteurs qui interviennent dans la fusion de la glace, soit pour abaisser la température de fusion, soit pour accélérer le phénomène. Le rayon de courbure de l'interface glace–élément de poussière minérale est compté positivement dans la glace.

Table 1. Inventory of the factors that come into play in ice fusion, either by lowering fusion temperature, or by increasing the speed of the phenomenon. The curvature radius of the interface between the ice and the dust grain is counted positive in the ice.

Phénomène	Effet thermodynamique	Effet cinétique
	Facilite ou non la fusion de la glace sale par rapport à la glace propre (= abaissement de T_{fusion})	Augmente ou non la vitesse de fusion de la glace sale par rapport à celle de la glace propre
Présence de solutés	Facilite	Sans effet
Effet de la concentration en soluté	Facilite	Augmente ?
Rayonnement solaire (effet albédo)	Sans effet	Augmente
Pression et localisation des contraintes	Facilite	Indifférent (ou augmente ?)
Effet interfacial R_{courbure} (glace) > 0 (glace dans pores)	Facilite	Augmente
Effet de la diminution de R	Facilite	Augmente
Effet interfacial R_{courbure} (glace) < 0 (grains solides dans glace)	<i>Rend plus difficile</i>	Augmente
Effet de la diminution de R	<i>Rend plus difficile</i>	Augmente
Effet interfacial, interface rugueuse	Facilite	Augmente
Perméation de l'eau vers l'extérieur	Indifférent (ou facilite ?)	Augmente

amont de la zone de fusion. La fusion peut être bloquée et l'on va fabriquer alors (garder) une bande de glace blanche juste après la glace sombre ; cette bande va franchir indemne la zone où la pression aurait dû monter. Il faut attendre que le mouvement du glacier comprime la glace et fasse remonter la pression après la bande claire pour que l'on atteigne à nouveau le point de fusion, avec nouvel emballement, et ainsi de suite. C'est ainsi que peuvent se former les alternances. La zone où se structure le phénomène se situe à l'origine amont de la formation des bandes, qui ensuite se propagent vers l'aval, en se courbant et en dessinant des chevrons. Ce phénomène ne pourrait pas se produire, si le point de fusion de la glace n'était pas abaissé par la matière minérale : il n'y aurait pas l'accélération du phénomène permettant la formation d'une bande blanche en amont ; tout serait uniformément légèrement gris. L'augmentation de la fusion par le mécanisme lui-même (instabilité) permet au phénomène de se manifester avec netteté de façon alternante. Elle permet d'explorer une variation finie de pression qui seule conjuguée au mouvement du glacier permet de fabriquer des arches d'amplitude macroscopique. On est dans une situation analogue au cycle nucléation–croissance–déplétion–diffusion [16].

6. Discussion

Dans ce cadre, ce sont des conditions sur les pressions et températures, liées à la topographie, qui vont

jouer sur l'existence du phénomène. Il faut une certaine pente et variation de pente, dans des conditions thermiques permettant la fusion. Suivant la vitesse des déplacements du glacier et les variations de pression associées, les longueurs d'onde peuvent être plus ou moins petites. Les variations de pression peuvent rester couplées aux cycles annuels (déplacement du glacier et fusion préférentielle pendant l'été), soit qu'il y ait un cycle par an, soit que l'on rencontre périodiquement une arche un peu plus longue. Mais ce n'est sans doute pas général, les cycles de Forbes n'étant pas forcément couplés aux rythmes annuels. Dans la suite du transport vers l'aval, les bandes sombres ne se modifient plus, ou peut-être de façon très limitée : elles demeurent des zones de plus facile fusion, qui peuvent continuer à devenir plus nettes ou changer de morphologie. L'épaisseur verticale concernée par la structuration peut, elle aussi, être variable suivant les conditions d'écoulement du glacier en relation avec le couple température/pression. Mais elle est certainement plurimétrique : si elle n'était qu'à l'échelle de quelques centimètres, on ne verrait pas les bandes avec la netteté qu'elles ont, parfois sur plusieurs kilomètres, sur un glacier, et qui révèle une structure interne de la glace. En plus de la concentration des poussières dans le sens du mouvement longitudinal du glacier, il y a une deuxième concentration, le long de la direction verticale perpendiculaire à la surface. Celle-ci n'est plus due à une augmentation de pression affectant l'ensemble de la masse de glace, mais simplement à la fusion superficielle de la glace, en particulier l'été. Elle provoque une accumulation mécanique des poussières qui restent coincées dans les

irrégularités de la surface de la glace. Cela peut augmenter, à la surface du glacier, le contraste entre les bandes sombres et les bandes claires et donner l'impression que la zone concernée par les accumulations est centimétrique. Mais à la faveur de crevasses, on voit que le litage marqué par les poussières se prolonge en profondeur sur plusieurs mètres, mais avec moins de poussières. Il subsiste dans la masse du glacier un contraste entre les zones définissant les arches de Forbes sombres et claires, même s'il n'est pas aussi net.

7. Première modélisation (analyse linéaire)

Le problème étudié peut se ramener à celui du couplage entre la fonte de la glace sale, caractérisée par sa fraction massique en poussière p (la valeur actuelle de p , comparée à la valeur initiale, permet de remonter à la fraction volumique de glace fondue), et un régime de pression π variable. La température est située juste au-dessous de celle de la fusion, de sorte qu'une surpression localisée ou une augmentation de la teneur en poussière est susceptible d'induire la fonte de la glace. En retour, ce dernier phénomène fait baisser la pression, dans la mesure où l'eau produite peut s'échapper du système et faire diminuer le volume total. Considérons qu'il existe un état stationnaire de descente régulière du glacier chargé en poussière sans fonte importante. Plaçons-nous à un endroit du glacier où des phénomènes de fonte peuvent se produire, du fait de conditions topographiques particulières, que nous traiterons comme une perturbation. Nous ne prendrons en compte que la variable temporelle en considérant là un petit réacteur (zone de quelques mètres ou dizaines de mètres de longueur) alimenté par un flux de glace venant de l'amont, et d'où sort un flux de glace vers l'aval, après fonte éventuelle à l'intérieur. La vitesse moyenne de descente de la glace permettra de relier les distances caractéristiques du phénomène étudié aux temps caractéristiques dans le réacteur. Le volume élémentaire représentatif est un cube de glace de 10 cm de côté. Étudions comment les perturbations δp et $\delta \pi$ par rapport à l'état stationnaire, notées p et π , peuvent évoluer ; nous écrivons pour cela les liens de leurs dérivées temporelles avec les valeurs de chacune des deux variables. Pour p , le bilan matière fait apparaître des termes de flux (transport) et de source (fonte). En linéarisant par rapport à l'état stationnaire, il vient, tous calculs faits, une expression du type :

$$dp/dt = a p + b \pi$$

où les facteurs a et b rassemblent les informations sur ce qui se passe à l'intérieur du réacteur et sur ce qui

concerne le flux à travers lui. Pour π , on écrit une relation du même type :

$$d\pi/dt = c p + d \pi$$

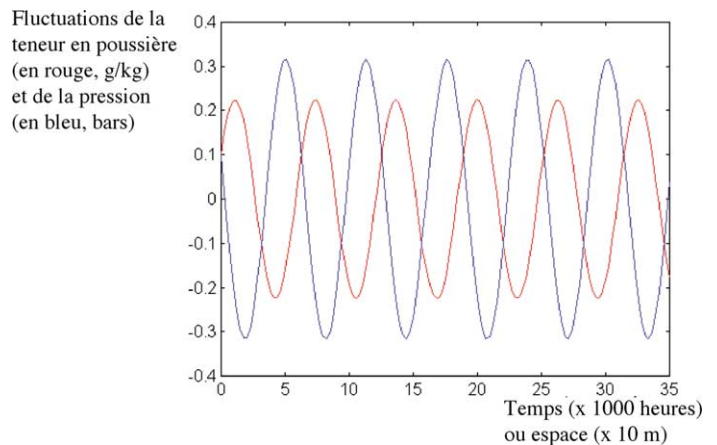
exprimant une loi de comportement faisant intervenir les divers phénomènes en jeu (fusion, fluage de la glace et vitesse à laquelle l'eau formée par la fonte peut s'expulser et faire tomber la pression). Dans l'approche préliminaire que nous proposons, nous ne cherchons pas à établir la valeur des paramètres a , b , c et d par une analyse physique complète, mais cherchons seulement à en donner les signes et les ordres de grandeur.

Nous prendrons comme unité de temps l'heure. Un ordre de grandeur de vitesse de descente du glacier est le centimètre par heure (équivalent à 100 m par an) et nous exprimerons ce paramètre en cm h^{-1} . Nous exprimerons la teneur p et ses écarts en g par kg de glace (valeur typique : 1 g kg^{-1}). La valeur moyenne de la pression est plus difficile à estimer : quelques bars à quelques dizaines de bars ; nous exprimerons les écarts en bars. En régime stationnaire, le front bas du glacier ne bouge pas, ce qui signifie que sur l'ensemble du glacier, la vitesse linéaire de fusion de la glace s'équilibre avec la vitesse de descente. Le volume élémentaire de 10 cm de côté est traversé par de la glace, à une vitesse de 1 cm h^{-1} et le flux remplace un dixième de volume par heure. Si l'on prend comme ordre de grandeur de vitesse de fusion localisée dans le réacteur, une proportion de 10^{-2} de la vitesse du glacier, on voit que les dp/dt sont à compter en $10^{-3} \text{ g kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ pour les valeurs standard de $p = 1 \text{ g kg}^{-1}$ et $\pi = 1 \text{ bar}$, et nous prendrons $a = 10^{-3} \text{ h}^{-1}$, $b = 10^{-3} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$. Nous nous plaçons d'emblée dans des conditions où les oscillations pourront apparaître : les deux paramètres a et b sont positifs, c'est-à-dire que les perturbations positives de p et π conduisent à une augmentation de p (effets déstabilisants : a est positif pour les raisons d'accélération évoquées plus haut, et b l'est aussi : l'eau de fonte induite par la pression est évacuée et laisse sur place les grains de poussière se concentrant au sein de la glace qui flue autour d'eux). Pour le régime des pressions (deuxième équation), les augmentations de p et de π vont faire baisser π : les paramètres c et d seront négatifs et traduisent des effets régularisants. Nous prendrons les mêmes ordres de grandeur que pour a et b , en considérant, pour fixer les idées, que l'effet de π sur la fonte, et indirectement sur la baisse de π , est un peu plus faible que l'effet des poussières sur la fonte. Nous prendrons $c = -2 \times 10^{-3} \text{ bar h}^{-1}$ et $d = -10^{-3} \text{ h}^{-1}$.

Réolvons le système pour des perturbations initiales de $0,1 \text{ g/kg}$ pour p et de $0,1 \text{ bar}$ pour π . La Fig. 2 donne le résultat. Il apparaît des oscillations avec une période de l'ordre de $5 \times 10^3 \text{ h}$. Au cours

Fig. 2. Un exemple de simulation des fluctuations de la quantité de poussière p (en rouge) et de la pression π (en bleu) en fonction du temps ; les écarts par rapport aux valeurs moyennes sont comptés pour p en g kg^{-1} de glace et pour π en bars. L'axe horizontal temporel correspond aussi à l'espace : unité de temps, 10^3 heures, ou de longueur 10 m. Dans cet exemple des bandes grises de Forbes sont formées ; elles correspondent aux valeurs hautes de la teneur en poussières.

Fig. 2. An example of the simulation of fluctuations of dust proportion p (in red) and of pressure π (in blue) as a function of time. The deviation from average value is counted for p in g kg^{-1} of ice and for π in bars. The horizontal axis also corresponds to space (time unit 10^3 h, space unit 10 m). In this example, grey Forbes bands are formed; they correspond to the high values of dust content p .



de la descente, la glace traverse le réacteur à une vitesse comptée en cm h^{-1} . La longueur d'onde spatiale est donc ici d'une cinquantaine de mètres, en bonne correspondance avec l'observation. La teneur p est amplifiée par rapport à la perturbation de départ, et son amplitude de variation est de l'ordre de 50% ; les largeurs des bandes de Forbes seront donc deux fois plus minces que les bandes blanches, ce qui respecte l'ordre de grandeur observé. La variation de p est déphasée par rapport à celle de π : la pression augmente, p suit avec un peu de retard, puis la pression chute, alors que p augmente encore un peu. Ce qui est important ici, c'est de voir que, compte tenu des signes des coefficients et des ordres de grandeur relatifs, des oscillations sont possibles. Mais suivant les valeurs des coefficients, elles peuvent ne pas apparaître et de nombreuses évolutions sont possibles (oscillations maintenues, s'amplifiant ou s'atténuant, absence d'oscillations et évolutions montrant des amplifications ou atténuations monotones). Ces divers comportements peuvent être classés en fonction d'un paramètre unique de bifurcation, comme l'un des coefficients du système, ou encore un coefficient traduisant la facilité avec laquelle l'eau est évacuée par rapport à la vitesse de fluage, intervenant en facteur de c et de d . Par exemple, si ce coefficient est grand, la pression descend très vite et le phénomène s'arrête.

8. Conclusion

Les bandes de Forbes paraissent constituer un bel exemple de structure auto-organisée, montrant l'apparition d'un ordre dans un système dissipant de l'énergie : celle des forces de pression, ajoutées à l'énergie thermique, qui entraînent la fusion et le mouvement du glacier. Dans la modélisation précédente, la production d'entropie, que l'on peut voir proportionnelle à $\pi dp/dt$, présente des bifurcations en fonction de l'apparition des structurations, ce qui est un argument pour parler de structure dissipative (Prigogine). D'autres exemples sont déjà connus dans des domaines différents de la géologie [5–9], où nous avons fait intervenir, dans deux cas, un phénomène du type surfusion de constitution (abaissement du point de solidification du liquide impur), que ce soit pour un magma (formation des orgues basaltiques, [7]), ou pour de l'eau sale (*pipkrakes*, [8]) ; c'est un ingrédient comparable à celui utilisé ici. Comme on le sait [17], une condition nécessaire de l'apparition de telles structures est la présence de boucles d'autocatalyse. C'est le cas ici. Notre approche est restée semi-quantitative : il conviendra dans la suite d'effectuer une modélisation quantitative complète et de nouvelles observations et expérimentations.

Remerciements. Les auteurs remercient les élèves et chercheurs de l'École des mines de Saint-Étienne, MM. Furukawa, Montheillet et Ozouf, ainsi que les guides de la compagnie des Carroz (Haute-Savoie), pour l'accompagnement sur le terrain, l'aide expérimentale et les discussions stimulantes.

Références

[1] J. Debelmas, Découverte géologique des Alpes du Nord, Éditions du BRGM, 1979, 84 p.
 [2] J.D. Forbes, Travels through the Alps of Savoy and other parts of the Pennin chain with observations on the phenomena of Glaciers, 2nd edn., Adam & Charles Black, Edinburgh, 1845, 456 p.

[3] Y. Furukawa, I. Ishikawa, Direct evidence for melting transition at interface between ice crystal and glass substrate, *J. Cryst. Growth* 128 (1993) 1137–1142.
 [4] P. Gilormini, F. Montheillet, Deformation of an inclusion in a viscous matrix and induced stress concentrations, *J. Mech. Phys. Solids* 34 (2) (1986) 97–123.
 [5] B. Guy, Certaines alternances récurrentes rencontrées dans les skarns et les structures dissipatives au sens de Prigogine : un rapprochement, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 292 (1981) 413–416.

- [6] B. Guy, Contribution à l'étude des skarns de Costabonne (Pyrénées-Orientales, France) et à la théorie de la zonation métasomatique, thèse d'État, université Paris-6, Mémoire des sciences de la Terre de l'université Pierre-et-Marie-Curie, n° 88–29, 3 tomes, 1988, 928 p.
- [7] B. Guy, J. Le Coze, Réflexions sur la prismation des basaltes : l'instabilité du front plan de solidification, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 311 (1990) 943–949.
- [8] B. Guy, Self-organized columnar morphology at millimetre scale of ice crystals frozen from mud: preliminary observations, Sciences et Techniques du Froid, Pergélisol et Actions du Froid naturel et artificiel, Institut international du froid 7 (1998) 65–69.
- [9] J.-J. Gruffat, B. Guy, Un modèle pour les précipitations alternantes de minéraux dans les roches métasomatiques : l'effet autocatalytique des surfaces, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 299 (1984) 961–964.
- [10] P.V. Hobbs, Ice Physics, Clarendon Press, Oxford, 1974, 803 p.
- [11] T. Ishizaki, M. Maruyama, Y. Furukawa, J.G. Dash, Premelting of ice in porous silica glass, J. Cryst. Growth 163 (1996) 455–460.
- [12] L. Lliboutry, Traité de glaciologie, tome 1, Glace, neige, hydrologie nivale, Masson, Paris, 1964, 428 p.
- [13] L. Lliboutry, L. Reynaud, Global dynamics of a temperate valley glacier, Mer de Glace, and past velocities deduced from Forbes bands, J. Glaciol. 27 (1981) 207.
- [14] L. Lliboutry, Glaciers, Encyclopedia Universalis, édition DVD, Paris, 2001.
- [15] L. Moreau, R. Vivian, Dans le secret des glaciers du Mont-Blanc, Glénat, Grenoble, 2000, 96 p.
- [16] P. Ortoleva, The self-organization of Liesegang bands and other precipitate patterns, in: G. Nicolis, F. Baras (Eds.), Chemical instabilities, D. Reidel, Dordrecht, The Netherlands, 1984, pp. 329–340.
- [17] G. Nicolis, I. Prigogine, Self-Organization in Non-Equilibrium Systems, Wiley, New York, USA, 1977, 491 p.
- [18] M. Vallon, Contribution à l'étude de la mer de Glace, thèse, faculté des sciences de Grenoble, 1967, 62 p.
- [19] J.S. Wettlaufer, M.G. Worster, Dynamics of premelted films: frost heave in a capillary, Phys. Rev. E 51 (5) (1995) 4679–4689.