Version du 16 février 2018

Rappelons tout d'abord quels sont les différents flux d'eaux glaciaires qui ont été identifiés jusqu'à présent. Nous avons utilisé, dans l'ensemble de notre site, quatre termes pour définir ces différents flux d'eaux, soit, de la surface du glacier jusqu'au fond d'auge, les termes de :

eaux glaciaires de surface,

eaux glaciaires latérales,

eaux glaciaires profondes,

eaux de fond d'auge.

Les eaux de surface

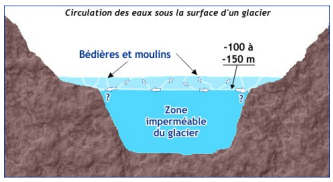
Le premier flux rencontré est celui des « eaux glaciaires de surface », qui circule légèrement sous la surface du glacier, voire à ciel ouvert dans des bédières à la surface même de celui-ci et qui comprend :

les eaux de fonte des couches supérieures du glacier, les plus importantes (jusqu'à 10 m de hauteur d'eau par an, en fonction de l'altitude, dans nos glaciers alpins actuels),

les eaux provenant des versants : sources, eaux de fonte des glaciers affluents non coalescents, fonte des névés,

les eaux météoriques (pluie et neige) tombant sur le glacier et sur les versants.

Nous sommes assez bien renseignés sur le parcours de ces eaux glaciaires de surface :

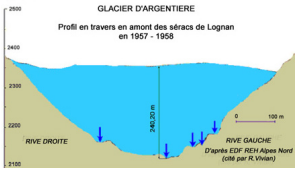


En particulier, les explorations de *Louis Reynaud* à la **Mer de Glace** et au **glacier d'Argentière** ont montré que, par un réseau de bédières et de **moulins**, elles rejoignent les versants.

À l'autre extrémité du parcours suivi par les eaux glaciaires, voyons maintenant comment circulent les eaux de fond d'auge.

Les eaux de fond d'auge

Ce sont les forages et les observations effectuées à partir des galeries de captage des eaux sous-glaciaires qui ont permis de préciser le parcours de celles-ci, tout au moins dans le cas des glaciers actuels. Ils ont été effectués sous une épaisseur de glace ne dépassant par 300 m, c'est-à-dire nettement inférieure à celle des grands appareils de vallée quaternaires.



Au **glacier d'Argentière**, par exemple, on a constaté que les eaux coulent sur le fond d'auge simultanément dans plusieurs chenaux dont la position varie dans le temps au fur et à mesure de l'avancement du glacier.

Cette variabilité a nécessité le forage, à partir de la galerie transversale creusée dans le bedrock, de plus de 20 sorties à la glace, et l'équipement en captage de 6 à 8 d'entre elles.

La même constatation a été faite à la **Mer de Glace**.

Nous soulignerons tout particulièrement que, dans le cas de ces deux glaciers, l'écoulement sous-glaciaire est subdivisé en plusieurs torrents qui empruntent, simultanément ou à tour de rôle, divers tunnels sous la glace. Le flux des eaux glaciaires de fond se répartit ainsi en de nombreux chenaux, dont la position varie sans cesse avec l'avancement du glacier. Ce n'est que, lorsqu'à peu de distance du front du glacier, la couverture de glace se fait moins épaisse, que ces chenaux convergent en un unique canyon sous-glaciaire.

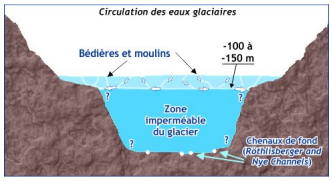
L'examen des formes d'érosion que présente le fond d'auge sur le front de glaciers actuels ainsi que sur celui de glaciers quaternaires disparus corrobore ces observations sous-glaciaires.

Notons au passage que, dans tous les exemples ci-dessus, la pente des chenaux est dirigée dans le même sens que l'écoulement de la glace, c'est-à-dire vers le bas de la vallée. Mais il ne nous semble pas impossible de penser que, plutôt que le sens de circulation de la glace, ce soit la pente locale du fond qui impose celle des chenaux.

En effet, il nous paraît possible que les écoulements, obéissant à leur propre logique, se dirigent vers le bas. Or, si dans le cas général, bien entendu, la pente du fond d'auge est dirigée dans le même sens que le mouvement du glacier, la situation est différente lorsque la vallée glaciaire présente un verrou. En effet, dans ce cas, la pente locale du versant amont de ce verrou est dirigée en sens inverse du mouvement du glacier, c'est-à-dire vers l'amont de la vallée. On peut alors imaginer que les eaux, obéissant à leur propre logique d'écoulement de fluide, se

dirigent localement vers l'amont de la vallée et qu'il en soit de même pour la pente des chenaux.

Nous pouvons donc à présent, tracer le schéma suivant, qui résume les connaissances actuelles sur la circulation des eaux glaciaires en surface et sur le fond d'auge d'un glacier.



Mais que se passe-t-il à l'intérieur du glacier, entre le moment où les eaux superficielles s'engouffrent dans les moulins et celui où elles apparaissent sur le fond, c'est-à-dire entre les points d'interrogation de la figure ?

Pour le savoir, il faut d'abord avoir compris ce que nous entendons par surface d'écoulement intraglaciaire.

Qu'est-ce que la

surface d'écoulement intraglaciaire **?**

Une hypothèse de circulation des eaux à l'intérieur d'un glacier de vallée

Comme indiqué en tête de page, nous avons défini quatre flux d'eaux glaciaires :

> Celui des eaux glaciaires de surface, essentiellement composées des eaux de fonte de la glace de surface, qui circulent à la surface du glacier ou quelques dizaines de mètres sous celle-ci.
>
> Plus bas, les eaux glaciaires latérales. Les eaux de surface, en pénétrant l'intérieur du glacier par les moulins et fractures de la glace qu'elles rencontrent parviennent jusqu'à la surface d'écoulement intraglaciaire qui se situe en moyenne à environ 150 m de profondeur. En deçà, la glace devient imperméable. En suivant la pente de cette surface, sensiblement la même que celle du glacier, les eaux se réunissent alors et s'écoulent vers les versants. Quant elles les ont rejoint, on les nomme eaux glaciaires latérales.
>
> Plus bas encore, les eaux glaciaires profondes qui parviennent jusqu'au fond d'auge.
>
> Enfin, les eaux glaciaires de fond, qui s'écoulent sur celui-ci.

La caractéristique commune à ces divers flux nous paraît être que, dans leur

descente pour rejoindre le fond de l'auge, ils utilisent principalement le point faible dans l'étanchéité du glacier que constitue le contact de la glace avec les versants et qu'ils s'écoulent donc en majeure partie contre ceux-ci.

Ceci nous a conduit à privilégier un mode de circulation que l'on peut décrire schématiquement ainsi qu'il suit :

Les eaux glaciaires de surface, définies plus haut, circulent à l'air libre ou à quelques dizaines de mètres de profondeur. Par des moulins et fractures de la glace qu'elles rencontrent, ces eaux descendent à l'intérieur du glacier, jusqu'au niveau de la surface d'écoulement intraglaciaire, environ 150 m sous la surface glaciaire. L'imperméabilité de la glace en dessous de cette profondeur les contraint alors à rejoindre les versants, contre lesquels elles s'écoulent.

A ce stade, nous les avons nommées eaux glaciaires latérales. C'est dans cette portion de leur trajet que celles-ci effectuent une partie importante de leur action d'érosion, ainsi que nous le verrons un peu plus loin dans le site. Leur débit s'accroît au fur et à mesure de leur parcours, jusqu'à ce qu'elles rencontrent une zone de faiblesse dans l'étanchéité, zone qu'elles utilisent pour descendre dans les profondeurs du glacier, devenant alors nos eaux glaciaires profondes.

Si l'on veut fixer une valeur plus précise de l'altitude de circulation de ces eaux glaciaires latérales, celle-ci dépendra de l'utilisation qui en sera faite :

Si l'on cherche à connaître la profondeur à laquelle se produira l'érosion la plus importante, c'est la valeur 150 m qu'il faut prendre en considération car c'est à cette profondeur que le débit des eaux glaciaires latérales est le plus important. C'est pourquoi nous avons adopté d'une manière générale pour la profondeur de circulation de ces eaux glaciaires latérales cette valeur de 150 m. Dans la suite de nos études, ainsi qu'on pourra le constater en continuant à parcourir notre site, nous avons eu de nombreuses occasions de vérifier que c'est bien cette profondeur qui rendait le mieux compte des actions des eaux sur le relief.

Mais on peut s'intéresser par contre à l'altitude à laquelle, à certains moments, une partie des eaux glaciaires latérales peut, au cours de son trajet, quitter la vallée pour gagner le versant opposé, en empruntant un col. Là, accroissant leur débit de celui produit par la fusion de la glace qui, simultanément, a franchi le col, elles peuvent donner naissance à un ravinement que nous avons appelé ravinement par déversement ponctuel (type G). C'est alors une valeur de l'ordre de quelques dizaines de mètres qu'il faudra utiliser, 50 m pour fixer les idées.

La zone comprise entre une cinquantaine de mètres et 150 m de profondeur est le domaine où circule la majeure partie des eaux glaciaires latérales. Ces eaux,

maintenues contre le versant par la poussée de la glace, circulent tout d'abord gravitairement, dans un réseau globalement subvertical de conduits, crevasses, moulins de rive et cheminements divers qui sont sujets à de constantes migrations dues à la mobilité du glacier.

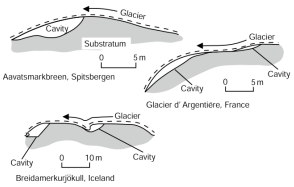
Parvenues au niveau de la surface d'écoulement intraglaciaire, environ 150 m sous la surface du glacier, l'imperméabilité de la glace en dessous de cette profondeur les empêche de descendre plus profondément. Elles circulent alors, maintenues contre la paroi, à une profondeur de l'ordre de 150 m, parallèlement à la surface du glacier.

Dans leur parcours, ellesfinissent par rencontrer une zone de faiblesse dans l'étanchéité de la glace contre la paroi, zone qu'elles utilisent pour continuer leur chemin vers le fond d'auge où elles deviennent alors des eaux glaciaires profondes. Ces zones de faiblesse nous paraissent dues à des décollements de la glace qui, selon nous, se produisent en particulier à l'aval des contreforts descendus des sommets latéraux à la vallée. Il se créerait là des cavités sous-glaciaires communiquantes entre elles, qui formeraient des sortes de conduits subverticaux.

Ces eaux glaciaires profondes présentent, elles aussi, un débit important, mais nous ne connaissons que peu de choses concernant leurs modalités d'écoulement ainsi que leur capacité d'érosion.

Peut-on être assuré de l'existence de tels décollements à ces profondeurs et est-il possible d'en déterminer l'emplacement ? Nous utiliserons dans ce but l'analogie avec les cavités présentes sur le fond de l'auge.

Plusieurs observations sur des glaciers différents, effectuées lors de l'implantation de prises d'eau sous-glaciaires ont montré en effet qu'à l'aval d'une saillie rocheuse du fond d'auge, la glace se décolle du rocher, ménageant ainsi une cavité sous-glaciaire parfois pénétrable.



Schémas de cavités sous-glaciaires dus à

Matthew R. Bennett et Neil F. Glasser [(1)].

La photo ci-contre, extraite de « *Dans le secret des glaciers du Mont-Blanc* » de *Luc Moreau* et *Robert Vivian*, montre un tel décollement de la glace, qui donne naissance à une cavité sous-glaciaire.

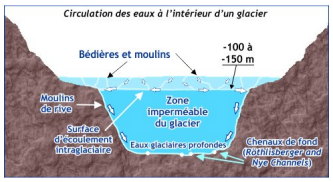
Dominant le groupe de géologues, la « semelle » du glacier laisse, entre elle et le rocher, un espace vide, la cavité glaciaire. Dans une cavité de ce genre, en 1972, sous le glacier d'**Argentière** et sous 100 m de glace, trois « glacionautes » ont procédé à des mesures pendant une semaine.

Nous supposons qu'il en est de même sur les flancs d'auge et que les conduits que les eaux glaciaires latérales puis les eaux glaciaires profondes utilisent pour gagner le fond d'auge, sont dus à de pareils décollements, Ceux-ci se formeraient sur le versant aval de saillies des parois, en particulier donc de contreforts descendus des sommets latéraux de la vallée.

Alors que l'existence des moulins de rive a été constatée de visu lors d'explorations à la surface de glaciers, nous en sommes réduits aux hypothèses concernant l'existence, la géométrie et la localisation de ces conduits à de plus grandes profondeurs. Leur existence nous semble toutefois être avérée par la présence d'une forme très caractéristique du modelé glaciaires, les « ravinements », qui sera étudiée plus loin.

Toutefois, les parois d'auge présentent souvent des zones, parfois assez étendues, où n'existe aucun contrefort. La présence de ravinements dans ces zones nous montre que de tels conduits pouvaient jadis exister même en l'absence de contreforts, utilisant peut-être pour cela de plus petites irrégularités locales de la paroi. Dans ce cas, on assiste souvent à la formation de « reliefs glaciaires sériels » (étude en cours).

On aboutit donc au schéma suivant, dans lequel les eaux glaciaires profondes rejoignent le fond d'auge en empruntant des conduits situés le long des flancs de la vallée. Parvenues sur le fond d'auge, où elles deviennent des « eaux glaciaires de fond », elles circulent alors dans des tunnels sous la glace et dans des chenaux de fond creusés dans le bedrock (R et N channels).



En dernier lieu, près du front du glacier, lorsque l'épaisseur de glace diminue et, avec elle, la pression exercée sur le fond, les eaux peuvent se rassembler en un torrent unique qui coule au fond de l'auge, souvent dans un « canyon sous-glaciaire ».

Les chenaux sous-marins

A partir de quelle épaisseur de glacier les chenaux du bedrock peuvent-ils se former ?

Question importante, à laquelle de récentes observations effectuées en **Antarctique** semblent apporter un début de réponse. On peut lire, en effet, dans le *n°88 du 24 avril 2007 de la revue EOS* qu'une mission océanographique a découvert, dans la **Calving Bay** de la **mer d'Amundsen**, baie dans laquelle ont lieu d'importants vêlage, deux surcreusements glaciaires laissés en mer après recul de la calotte depuis le dernier maximum. L'un d'eux est profond de 1600 m et son fond est sillonné de "*réseaux dendritiques à méandres*" qui témoignent, nous semble-t-il, de la présence d'anciens chenaux sous-glaciaires à cette profondeur. Des eaux glaciaires ont donc atteint autrefois un fond d'auge, à 1600 m, voire plus, sous la surface du glacier !

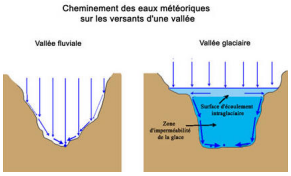
Cette constatation ne saurait, cependant, être généralisée à tous les glaciers, en particulier aux appareils **alpins**. Il convient en effet de tenir compte du fait que ce glacier de l'**Antarctique** qui draine le tiers de la glace de la calotte d'**Antarctique Occidentale**, est soumis à ce que nous avons appelé « *l'effet de flottaison* », qui devait diminuer le poids du glacier sur le fond et donc, peut-être, permettre aux eaux de rejoindre plus facilement celui-ci.

Il nous semble toutefois probable que cet effet n'était pas assez important, à l'endroit où ont été observés ces chenaux sous-glaciaires, pour décoller largement du fond la glace (n'oublions pas que, de plus, le niveau des océans se situait 300 m plus bas que de nos jours). Car on peut penser que ces chenaux sous-glaciaires n'auraient pu se former si la glace avait été séparée du fond par une tranche d'eau assez importante dans laquelle les écoulements sous-glaciaires se seraient dilués. On peut s'interroger également sur l'origine de ces eaux glaciaires : étaient-elles dues à la fusion superficielle, peu importante sans doute ici ou au gradient géothermique, ou bien à une éventuelle activité volcanique sous-glaciaire ? De pareils chenaux sous-glaciaires ont d'ailleurs été également observés à des profondeurs comparables sous d'autres glaciers se déversant dans l'océan.

Ce détour par l'**Antarctique** nous semble donc bien prouver que des chenaux de fond peuvent se former sous une grande épaisseur de glace, ce qui semble bien constituer une confirmation du schéma de circulation des eaux que nous venons d'exposer.

Les eaux météoriques

Soulignons enfin une différence essentielle entre le cheminement des eaux météoriques (pluie et neige) dans une vallée fluviale et dans une vallée glaciaire englacée.



Dans le cas d'une vallée fluviale, une section donnée de la vallée reçoit uniquement l'apport des eaux météoriques tombant sur sa surface, eaux qui exercent donc une érosion répartie sur toute cette surface. Celles tombées plus en amont ont été collectées et courent déjà sur le fond du talweg sous forme d'une rivière.

Dans le cas d'une vallée glaciaire, par contre, les eaux météoriques tombant sur une section donnée de la vallée se joindront tout d'abord aux eaux glaciaires de surface puis rejoindront le fond d'auge en devenant des eaux glaciaires latérales, puis des eaux glaciaires profondes.

Les débits de ces deux flux sont plus concentrés que celui des eaux météoriques tombant sur la même section de la vallée après la fin de la glaciation et ils exerceront une érosion plus concentrée et plus importante au mètre carré.

On ne s'étonnera pas, sans pouvoir rentrer dans les détails ici, que nous estimions que les érosions durant les glaciations ont été des artisans majeurs du relief que nous avons à présent sous les yeux.

Conclusion

Ce schéma de circulation des eaux à l'intérieur d'un glacier, pour hypothétique qu'il soit, nous paraît assez représentatif de la réalité, car il permet, on le verra dans la suite du site, d'expliquer la formation de nombreuses formes de relief glaciaire.

Les diverses formes d'érosions causées par les differents flux d'eaux glaciaires

Les eaux glaciaires causent sur le relief des formes d'érosion qui diffèrent selon leur type de flux, tels que nous les avons décrits ci-dessus et qui sont, rappelons-le, les suivants :

eaux glaciaires de surface,

eaux glaciaires latérales,

eaux glaciaires profondes,

enfin eaux glaciaires de fond.

Pour une section donnée de la surface glaciaire, les eaux glaciaires de surface, formées essentiellement par les eaux de fonte de la glace de cette section, présentent un débit diffus, variable avec l'ensoleillement et peu important. Certaines d'entre elles, créées très près des rives, rejoignent les versants, sur lesquels elles peuvent donner naissance parfois à une légére érosion. Leur action sur ce flanc d'auge est cependant très limitée, voire quasiment nulle sur des roches compétentes. Ce n'est que sur des terrains peu résistants à l'érosion qu'elles peuvent exercer un certain effet, surtout si la pente du flanc d'auge n'est pas très importante, et engendrer alors des micros reliefs. Dans le cas général, ceux-ci disparaîtront rapidement sous l'effet des érosions postglaciaires.

Plus rarement ils peuvent subsister jusqu'à nos jours sous la forme de ravinelles de taille décamètrique, par exemple celles du Mont de Rousse et celles de l'**Espely**.

Les eaux glaciaires latérales possèdent, elles, une capacité d'érosion importante, du fait de leur débit élevé. Cette érosion s'exerce sensiblement parallèlement à la surface du glacier. Par exemple, la formation des seuils et des épaules est principalement due à l'action des eaux glaciaires latérales.

Nous ne connaissons que peu de choses concernant les eaux glaciaires profondes, sinon que leur débit est élevé, de même donc que leur capacité d'érosion qui s'exercera jusqu'au fond d'auge. C'est sur ce fond d'auge que les eaux glaciaires de fond entraineront sur celui-ci la formation d'une érosion très caractéristique, décrite à la page sur le rôle des eaux glaciaires dans la formation des vallées en auge.

Les ravinements, forme très importante du relief glaciaire, quoiqu'en général non identifiés comme tels, sont décrits à la page sur le rôle des eaux glaciaires dans la formation des ravinements.

Continuer de suivre le Fil des Eaux.

Notes

(1) Cité dans "Les glaciers des Alpes occidentales", Robert Vivian, 1975