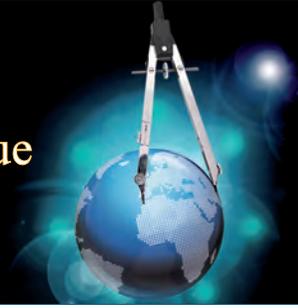


# Prédire l'évolution des glaciers alpins par la simulation numérique

Guillaume Jovet  
Université libre de Berlin



Depuis plus d'un siècle, les glaciers alpins reculent. Cette tendance s'amplifiera inévitablement si le climat se réchauffe davantage. Pour prédire l'évolution future des glaciers, il nous faut construire un modèle mathématique qui combine hydrologie, climatologie et mécanique.

En effet, le mouvement des glaciers résulte de la combinaison de plusieurs phénomènes comme l'indique la Figure 1. D'un côté, les précipitations neigeuses et la fonte cumulées ajoutent de la glace sur les parties élevées, *zones d'accumulation* et enlèvent sur les parties basses, *zones d'ablation*. D'un autre côté, la glace se déforme comme un fluide sous l'effet de la gravité. De plus, les vitesses des particules de glace sont amplifiées par le glissement de la glace contre le lit rocheux. Le mouvement de la glace est ainsi régi par les lois de la mécanique des fluides et des solides.

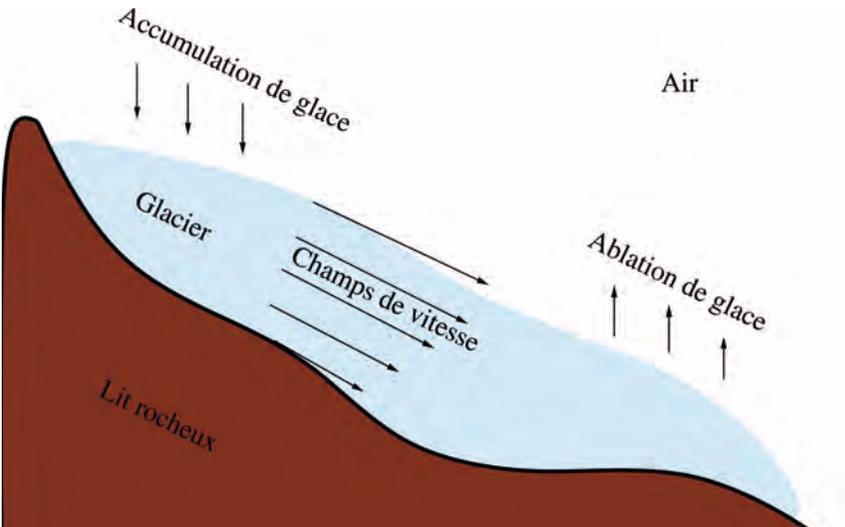
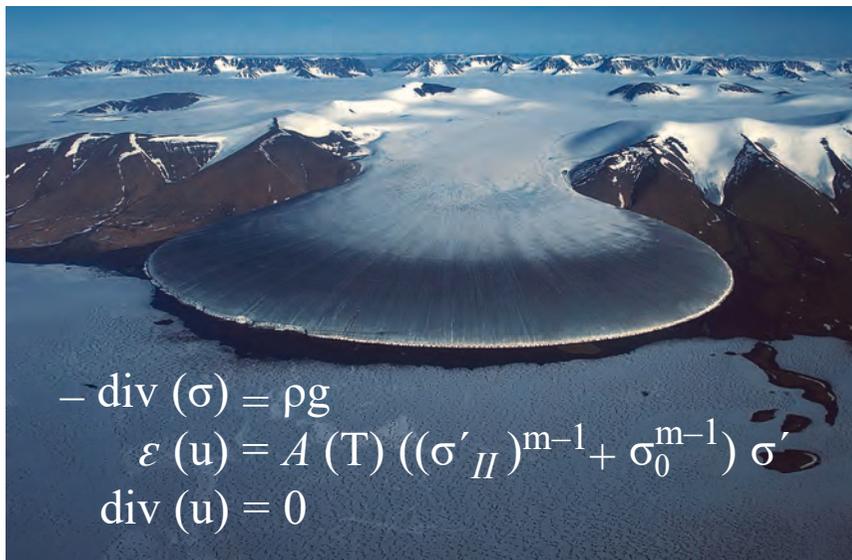


Figure 1 :  
Schéma des mécanismes qui régissent le mouvement des glaciers.

## La glace est un fluide qui coule

Bien que le mouvement des glaciers soit connu depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle, l'écoulement de la glace, tel un fluide visqueux, n'a été admise qu'au XX<sup>e</sup> siècle. Dans les années 1950, le glaciologue J.W. Glen procéda à des expériences sur des blocs de glace afin de déterminer sa déformation sous l'effet de contraintes appliquées en traction, compression et cisaillement. Le verdict tomba : la relation entre déformation et contrainte (appelée plus tard loi de Glen) est non linéaire, ce qui fait de la glace un fluide dit *non newtonien*, contrairement à l'eau. En tant que fluide, la glace et l'eau se différencient aussi par leur viscosité. En effet la viscosité de la glace est telle que les effets d'accélération sont négligeables (environ  $10^{16}$  fois celle de l'eau). Ainsi, contrairement à l'eau, les vitesses des particules de glace à un instant donné ne dépendent que de la géométrie du glacier (épaisseur et pente du terrain) et pas des vitesses aux instants précédents. Pour compléter la loi de Glen, une relation entre viscosité et température de la glace est établie. En effet, une glace froide se déforme moins facilement qu'une glace proche du point de fusion. Les équations de la mécanique de la glace se résument à un problème de Stokes :



$$\begin{aligned} -\operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}) &= \rho \mathbf{g} \\ \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) &= A(T) \left( (\boldsymbol{\sigma}'_{II})^{m-1} + \sigma_0^{m-1} \right) \boldsymbol{\sigma}' \\ \operatorname{div}(\mathbf{u}) &= 0 \end{aligned}$$

Figure 2 :

Les équations ci-dessus expriment respectivement la conservation de la quantité de mouvement, la loi de Glen et l'incompressibilité de la glace.  
Le glacier de la patte d'éléphant au Groënland - © Guardian UK

Pour être complet, ce problème nécessite une condition au bord du domaine de glace, qui est décrite par le glissement entre glace et roche.

## La glace est un solide qui glisse

La déformation visqueuse de la glace n'explique pas à elle seule le mouvement des glaciers. En effet, la glace peut aussi glisser sur le lit rocheux en présence d'eau de fonte qui joue le rôle de lubrifiant. Cela se produit en particulier à la langue du glacier où les températures de la glace sont les plus proches de zéro, alors qu'aux parties plus élevées les températures sont suffisamment froides pour que la glace accroche au lit rocheux. Contrairement à la déformation de la glace, le glissement est mal connu et donc plus difficile à modéliser. En effet, le glissement est directement relié au niveau d'eau (un glacier stocke de l'eau comme une éponge) lequel peut varier fortement dans la journée. Par ailleurs, le glissement dépend aussi de la rugosité du terrain qui est souvent inconnue. De plus, il est très difficile d'accéder à la base du glacier pour y effectuer des mesures. En dépit de ces incertitudes, il existe aujourd'hui des modèles de glissements empiriques qui reproduisent bien la réalité.

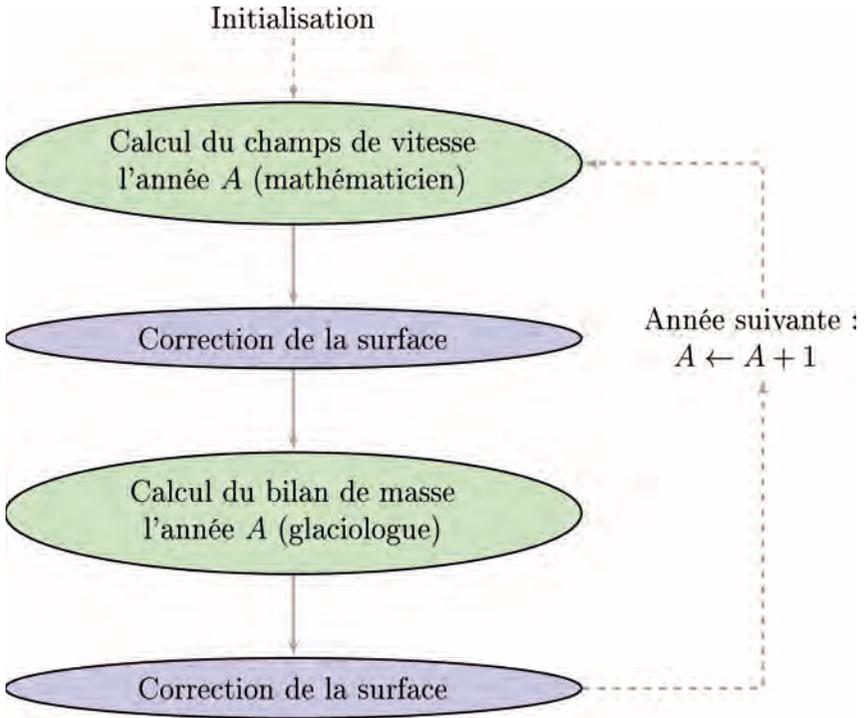
## Le rôle des mathématiciens

Il est malheureusement impossible de résoudre exactement le problème de Stokes du fait des complexités des équations et des géométries. C'est pourquoi dans la pratique on procède à une approximation du problème en *discrétisant* l'espace et le temps, ce qui signifie que l'on cherche à approcher la solution en certains points et à certains instants. Finalement, résoudre le problème de Stokes discrétisé revient à résoudre une suite de systèmes linéaires, ce que nombre d'algorithmes bien connus peuvent faire. Pour simuler un glacier, il faut être capable de résoudre de nombreux systèmes d'équations dont la taille atteint facilement le million d'inconnues, ce qui peut prendre des jours de calcul même pour les ordinateurs les plus récents. Les mathématiciens ont recours à plusieurs stratégies pour réduire les temps de calculs. L'une d'elle consiste à paralléliser leurs algorithmes de résolution, c'est-à-dire à diviser efficacement le problème principal en sous-problèmes traités individuellement sur des processeurs différents. Un autre rôle essentiel des mathématiciens est de s'assurer de la convergence théorique et pratique de la solution approchée vers la solution exacte lorsque le nombre de points de discrétisation (ou d'inconnues) augmente.

## Combiner les calculs des mathématiciens et des glaciologues

Si le calcul du mouvement de la glace revient aux mathématiciens, évaluer l'impact des précipitations neigeuses et de la fonte sur le glacier est le travail des glaciologues. Ces deux communautés doivent donc combiner leurs calculs pour simuler l'évolution des glaciers sur une période de temps. Supposons que la surface d'un glacier soit connue une certaine année A. Tout d'abord, les mathématiciens calculent le champ

de vitesse de la glace l'année A en résolvant les équations de Stokes puis modifient la surface du glacier en conséquence. Ensuite, les glaciologues calculent la différence cumulée entre l'accumulation et la fonte de glace pendant l'année A et corrigent la surface du glacier en conséquence. Finalement, il en résulte une approximation de la surface du glacier l'année suivante A+1. Ce processus est répété autant de fois qu'il y a d'années à simuler, comme le résume le schéma suivant :



La méthode permet de simuler aussi bien un glacier sur une période passée que future.

### Simuler le passé pour valider le modèle

En utilisant des données de températures et de précipitations, le glacier du Rhône (Suisse) a été simulé de 1874 à 2008. Nous pouvons comparer sur la Figure 4 le résultat de la simulation à des images d'archives.

Nous constatons que la simulation est fidèle à la réalité, ce qui valide le modèle.



1874



1900



1932



1960

Figure 4 :  
Photographies du glacier du Rhône (à gauche) et simulation (à droite).

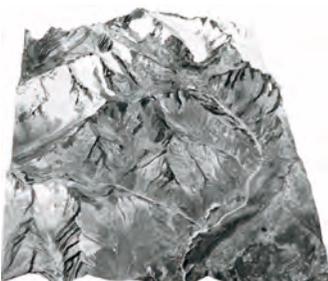
## Simuler le futur selon des scénarios climatiques

Bien entendu, aucune donnée météorologique n'est disponible pour le futur. Par conséquent, nous considérons plusieurs scénarios climatiques pour le 21<sup>e</sup> siècle.

Figure 5 :  
Glacier  
d'Aletsch en  
1999 et 2100  
selon les scénarios  
climatiques  
1, 2 et 3.



1999



2100 scénario 1

La Figure 5 montre le résultat de la simulation du glacier d'Aletsch (Suisse) en 2100 pour trois scénarios choisis.

Le *scénario 1* est basé sur une augmentation des températures d'environ de 4 degrés Celsius en 2100. Il s'agit à l'heure actuelle du scénario le plus réaliste. Selon ce scénario, le glacier aurait quasiment disparu avant la fin du siècle.



2100 scénario 2

Le *scénario 2* est basé sur le climat des 20 dernières années, lequel a été marqué par une augmentation des températures d'environ 0.5 degrés Celsius. Selon ce scénario, le glacier accuserait un retrait de plus de 5 kilomètres. Il s'agit du retrait auquel on devrait s'attendre si le climat se figeait (sans augmentation additionnelle des températures).



2100 scénario 3

Enfin, le *scénario 3* considère un improbable nouvel âge glaciaire à venir. Selon ce scénario, la langue glaciaire croîtrait considérablement jusqu'à atteindre un état comparable à celui observé durant le petit âge glaciaire (1350-1850).

**G.J.**

### Pour en savoir plus :

Voir le film de 5 minutes réalisé par l'auteur (version française) sur <http://page.mi.fu-berlin.de/jouvet/>

Amédée Zryd, *Les glaciers en mouvement, La population des Alpes face aux changements climatiques*, Presses Polytechniques Romandes, Savoie Suisse, 2008.