

C8. Expérience du « regel »

I. INTRODUCTION

Un fil métallique chargé d'un poids peut traverser un bloc de glace sans le couper. Ce phénomène est attribué au processus de fusion de la glace à l'avant du fil, dans la zone en surpression, et de regel de l'eau passée derrière le fil, dans la zone en dépression. Bottomley (1872) fut le premier à rendre compte de ce phénomène. Il observa aussi qu'un fil de faible conductivité thermique, pour un diamètre et une charge donnés, passait plus difficilement qu'un fil à forte conductivité thermique. Depuis Bottomley, diverses études ont été réalisées, mais le mécanisme exact est toujours mal compris!

Il est intéressant de noter que ce mécanisme de "regel" est à la base de l'explication du glissement basal des glaciers (voir annexe).

II. THEORIE SIMPLIFIEE DU "REGEL"

Nye (1976) a élaboré une théorie mathématique en supposant le processus de fonte-regel seul responsable de la pénétration du fil. Des mesures ultérieures ont cependant mis en évidence deux modes de pénétration appelés mode de regel rapide et mode de regel lent. La différence de vitesse entre ces deux modes peut atteindre un facteur 10^3 et la transition entre ces deux modes se fait brutalement lorsque la température de la glace augmente et se rapproche de la température de fusion. Essayons de décrire ce phénomène par une théorie très simplifiée:

Equilibre mécanique du fil dans la glace

Soit le modèle simplifié d'un fil rectiligne de section carrée d pris dans un bloc de glace de largeur l et soumis à une charge Mg due à une masse M suspendue au fil (fig. 1).

Il est clair que l'équilibre du segment de fil de longueur l , pris dans la glace, ne peut avoir lieu que si il existe une différence de pression ΔP entre le bas et le haut du fil, de telle sorte que

$$l \cdot d \cdot \Delta P = M \cdot g$$

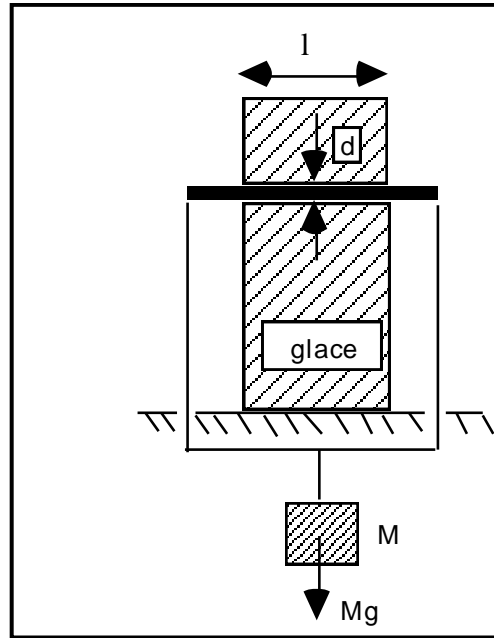


Fig1 : Modèle expérimental.

La différence de pression entre le bas du fil et le haut du fil est donc de

$$\Delta P = \frac{M \cdot g}{l \cdot d} \quad (1)$$

Regel lent et regel rapide

L'équilibre entre la phase liquide et solide de l'eau est régi par l'équation thermodynamique de Clausius-Clapeyron

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{L}{T(V_L - V_S)} \quad (2)$$

dans laquelle:

P = la pression [Pa]

T = la température [K]

L = la chaleur latente de fusion

V_L et V_S = les volumes spécifiques des phases liquides et solides

Or, la glace est l'un des rares corps qui augmente de volume spécifique en se solidifiant, de telle sorte que $V_L - V_S$ est négatif. Il s'ensuit une diminution de la température de fusion sous l'effet de la pression (fig. 2), donnée par

$$\Delta T = -C \cdot \Delta P \quad (3)$$

avec:

$$C = \frac{(V_S - V_L)T}{L} \simeq 7.42 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C/kPa}$$

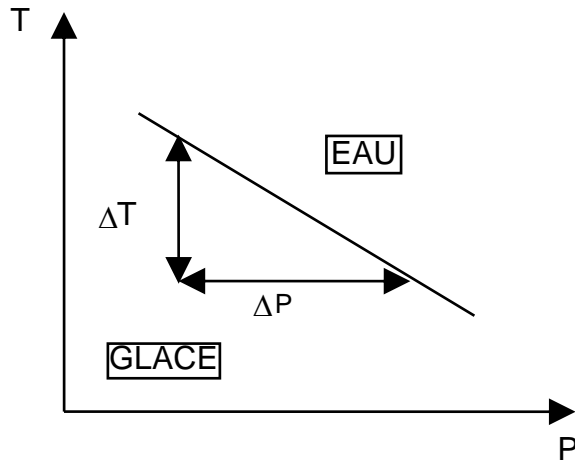


Fig 2 : Diagramme de phase.

Dans l'expérience du fil, ceci signifie que la température de fusion de la glace au-dessous du fil sera abaissée de la valeur ΔT .

ΔT donnée par l'équation (3) par rapport à 0°C de la température de fusion à pression ambiante

$$T_F = -C \cdot \frac{Mg}{l \cdot d} \quad [^\circ\text{C}] \quad (4)$$

Tant que la glace a une température inférieure à cette valeur, nous serons dans le processus de "regel lent". Par contre, dès que la température de la glace passera au-dessus de cette valeur, la glace située au-dessous du fil va fondre. L'eau ainsi formée va passer au-dessus du fil où elle va regeler. C'est le processus de "regel rapide".

Modèle simplifié du "regel rapide"

Lorsque la température de la glace est suffisamment proche de 0°C , il s'établit un régime stationnaire de "regel rapide". La description de ce processus est représentée à la figure 3. L'équilibre mécanique impose toujours une différence de pression ΔP entre le haut et le bas du fil. L'équation de Clausius-Clapeyron impose donc toujours une différence ΔT de température de fusion entre la glace fondant au bas du fil et l'eau regelant en haut du fil. L'eau qui regèle en haut du fil libère une quantité de chaleur (chaleur latente) qui va migrer, par thermoduction sous l'effet de la différence de température ΔT , de la zone "chaude" en haut du fil vers la zone "froide" en bas du fil. Cette chaleur sera ensuite utilisée pour faire fondre la glace au bas du fil. La description mathématique de ce régime stationnaire est simple.

Soit v la vitesse stationnaire de descente du fil. La masse de glace à fondre par unité de temps vaut

$$m_g = \rho \cdot v \cdot l \cdot d \quad (5)$$

et la quantité de chaleur libérée par le regel en haut du fil, par unité de temps, s'écrit

$$Q = L \cdot m_g = L \cdot \rho \cdot v \cdot l \cdot d \quad (6)$$

où L est la chaleur latente de fusion de la glace et ρ la densité de la glace.

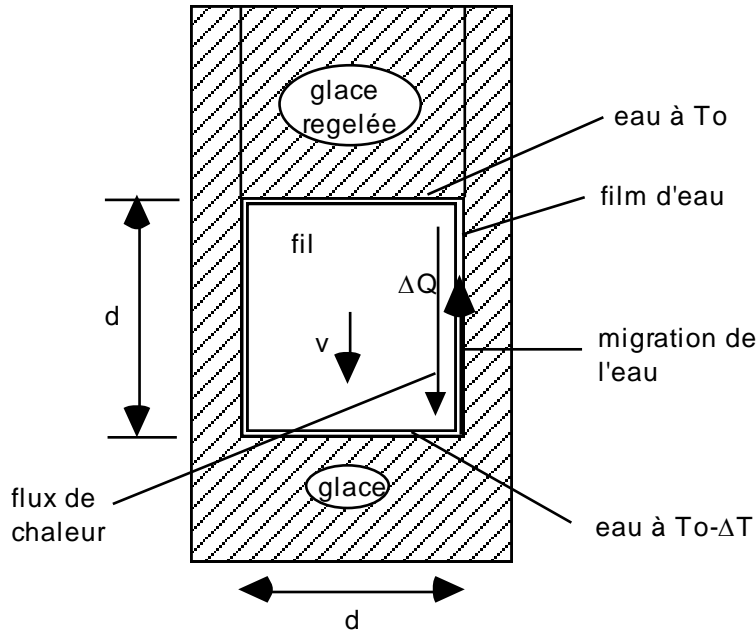


Fig3 : Schema experimental.

La conduction de cette chaleur au travers du fil fournit un flux de chaleur J_Q égal à

$$J_Q = \kappa \frac{l \cdot d}{d} \Delta T = \kappa \cdot l \cdot \Delta T \quad (7)$$

Or ce flux de chaleur J_Q doit être égal à la chaleur produite par unité de temps par le regel de l'eau. Il vient donc l'égalité

$$\kappa \cdot l \cdot \Delta T = L \cdot \rho \cdot v \cdot l \cdot d \quad (8)$$

où κ est le coefficient de conductibilité thermique du fil exprimé en $[\text{J} \cdot \text{m} / \text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}]$.

De cette équation, on déduit la vitesse v d'avance du fil

$$v = \frac{\kappa}{L \cdot \rho \cdot d} \Delta T \quad (9)$$

et à l'aide des relations (3) et (1), il vient

$$v = \frac{\kappa}{L \cdot \rho \cdot d} \cdot C \cdot \frac{M \cdot g}{l \cdot d} = \frac{C \cdot g}{L \cdot \rho} \cdot \frac{\kappa \cdot M}{L \cdot d^2} \quad (10)$$

On constate que la vitesse du fil est proportionnelle au coefficient de conductibilité K du fil et à la masse M de la charge, et inversement proportionnelle à la longueur l de fil actif dans la glace et au carré du diamètre d du fil

$$v \approx \frac{\kappa \cdot M}{l \cdot d^2} \quad (11)$$

III. BUT DE L'EXPERIENCE A REALISER

Cette expérience propose d'étudier la vitesse de pénétration de différents fils, pour différents diamètres et différentes charges. Parallèlement, il serait judicieux de réfléchir aux conditions réelles de température et de pression régnant dans le bloc ainsi que de trouver une géométrie permettant d'éliminer dans la mesure du possible certains problèmes: inhomogénéités de température, conduction de chaleur depuis l'extérieur par le métal et par la glace, pénétration du fil "différenciée" (plus rapide sur les bords qu'au centre) ce qui modifie la pression au cours de la descente.

Parmi les paramètres dont l'étude pourrait être intéressante, suggérons:

- les impuretés de l'eau* : quelle différence y a-t-il entre de l'eau distillée et de l'eau du robinet? observe-t-on une transition avec de l'eau distillée?
- la trace laissée par le passage du fil*: est-elle la même pour tous les fils? de quoi dépend-t-elle? comment se forme-t-elle?
- la forme du fil*: en choisissant une forme appropriée, on pourrait obtenir des informations sur la couche liquide et le flux visqueux de l'eau autour du fil.
- la température près du fil*: la température lors du passage du fil pourrait être enregistrée par une série de thermistors judicieusement placés.

Remarque : L'intérêt de cette étude réside dans sa nouveauté, dans son utilité "hors du laboratoire" (les faits intéressants seront intégrés à un travail de recherche sur le glissement des glaciers), et dans sa pluridisciplinarité: de la thermodynamique (Clausius-Clapeyron) à la chimie (impuretés), en passant par la mécanique, la science des matériaux et l'imagination.

IV. DEMARCHE EXPERIMENTALE

Le matériel à disposition comprend un jeu de fils fixés sur une monture permettant d'y suspendre des masses. Le montage à réaliser est disponible en figure 4. Les mesures seront prises environ toutes les 2 minutes environ, soit à l'aide de la webcam (fig. 5), soit directement pendant l'expérience. L'étude du phénomène du regel sera faite en quatre étapes:

- (i) Mesurer la pénétration au cours du temps en variant certains paramètres, comme le matériau et la section du fil, ou encore la masse suspendue. Ne pas oublier de mesurer l'épaisseur du bloc de glace avant de commencer.
- (ii) Déduire de ces mesures les vitesses stationnaires de pénétration. Discuter et essayer d'interpréter, s'il y a lieu, l'existence de différents régimes stationnaires au cours d'une traversée.
- (iii) Comparer les résultats obtenus à la théorie, suivant la nature du fil et la section du fil. Interpréter les déviations qui pourraient intervenir, en se basant sur l'observation du phénomène.
- (iv) Finalement, cette expérience se voulant évolutive, proposer, au vu des résultats expérimentaux obtenus, des améliorations de la technique expérimentale, qui puissent être réalisées dans le cadre du Laboratoire des Travaux Pratiques.

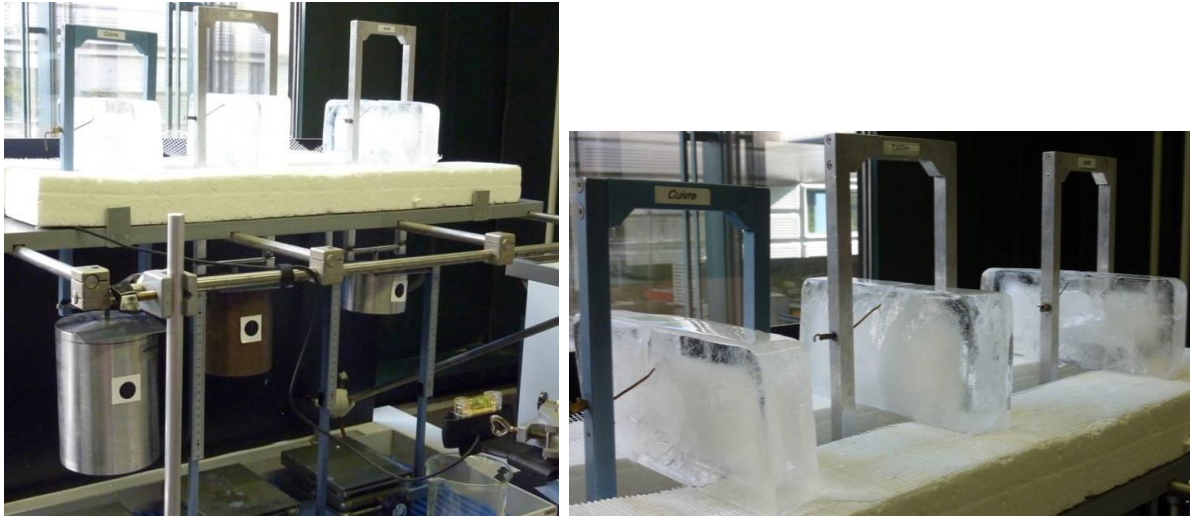


Fig. 4 : Images du montage expérimental

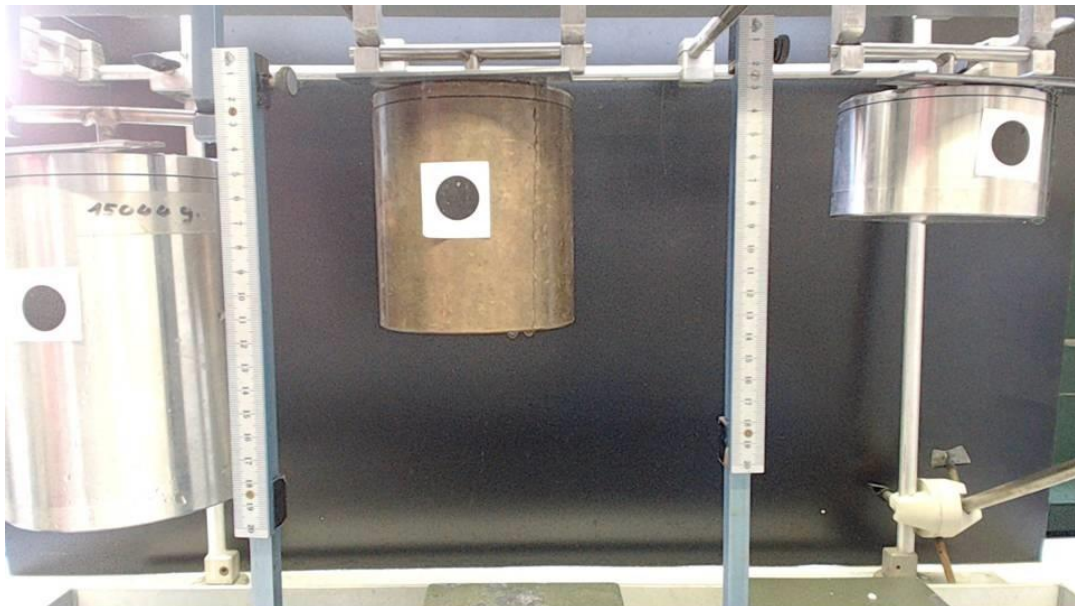


Fig. 5 : Image de mesure en utilisant la webcam

V) ANNEXE: LE MOUVEMENT DES GLACIERS

Les glaciers couvrent actuellement 10% de la surface du globe alors que leur extension, lors des périodes glaciaires, était environ trois fois plus importante. D'autre part, de nombreuses activités humaines se développent dans des régions reculées de la terre (barrages alpins, pipe-lines en Alaska, installations touristiques). Il n'est donc pas étonnant que l'intérêt pour la glaciologie ait beaucoup augmenté ces dernières années.

De plus, la progression généralisée (plus de 50%) des glaciers alpins depuis 1978 offre de nouvelles possibilités d'observation et de mesures. Comprendre et décrire le comportement d'un glacier, en corrélations avec le climat, est un problème extrêmement complexe et loin d'être résolu. Y répondre nécessite en premier lieu une modélisation convenable du mouvement et des conditions aux limites.

Les deux composantes du mouvement d'un glacier

Que le front d'un glacier progresse ou recule au cours de l'année, la masse de glace elle-même est néanmoins toujours animée d'un mouvement vers l'aval, sous l'effet du champ gravitationnel. Ce mouvement dépend donc en premier lieu de la masse du glacier et par là des précipitations atmosphériques. L'avance apparente ou non de la langue glaciaire résulte du bilan annuel entre la fonte et l'écoulement vers le bas.

Un glacier tempéré, par opposition au glacier froid ou polaire, est un glacier dont toute la masse est à sa température de fusion correspondant à la pression, exception faite d'une couche superficielle de quelques mètres. C'est entre autres le cas de la plupart des glaciers alpins. Le mouvement d'un tel glacier est la somme de deux composantes: la déformation de la glace et le glissement basal. Il n'est pas sûr que les glaciers polaires, dont la glace basale est froide, puissent glisser.

La vitesse de déformation dépend en première approximation de la hauteur de la glace, de la pente du lit glaciaire, de la forme de la vallée dans laquelle coule le glacier ainsi que de la loi de fluage de la glace. Il est généralement admis que la glace se comporte comme un corps de Glen, c'est-à-dire qu'elle suit une loi de fluage du type:

$$\varepsilon = A \cdot \tau^n \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} \varepsilon = \text{le taux de déformation effective} \\ \tau = \text{la contrainte de déformation effective} \end{array}$$

Cette loi est à mi-chemin entre celle du plastique parfait et du liquide visqueux newtonien. Les valeurs de A en fonction de la température et de n sont mal connues et varient considérablement suivant les auteurs. On admet cependant $n \approx 3$.

Du fait de la rareté des observations directes au lit glaciaire et de la difficulté de faire des mesures sans perturber le milieu, le problème du glissement est encore mal compris. Le modèle de Weertman permet cependant de rendre compte d'une manière simple de ce phénomène.

Le modèle de Weertman

(i) hypothèse de travail

Le glissement, dans les glaciers tempérés, peut représenter jusqu'à 90% du mouvement total, ce qui en justifie une étude détaillée. Weertman (1957) a élaboré la première théorie. Le problème est d'expliquer comment le glacier parvient à surmonter les obstacles du lit rocheux. Le modèle de Weertman est basé sur cinq hypothèses:

- 1) la glace est entièrement à sa température de fusion (il s'agit d'un glacier tempéré).
- 2) la glace et le rocher sont partout séparés par un mince film d'eau lubrifiant et il n'y a par conséquent aucun frottement.
- 3) la glace ne contient aucune impureté et repose sur un lit rocheux indéformable.
- 4) la glace et le rocher ne sont séparés que par le film d'eau (il n'y a pas de cavités).
- 5) le lit rocheux est représenté comme un plan incliné avec des obstacles cubiques. Chaque obstacle a des cotés de longueur a et est séparé de ses voisins par une distance λ (fig.6).

Selon la taille de l'obstacle, deux mécanismes vont opérer: pour de grands obstacles, les contraintes supplémentaires causées par sa présence vont provoquer une augmentation de la déformation plastique. Pour de petits obstacles, le mécanisme de fonte-regel va être plus efficace.

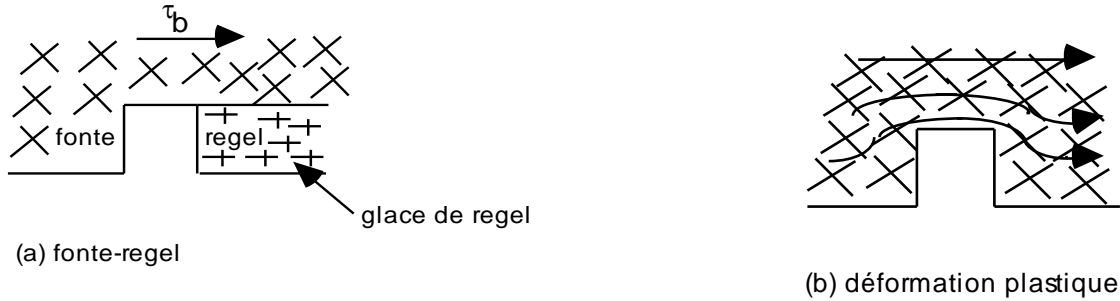


Figure 6: Modèle de Weertman

(ii) *mécanisme de fonte-regel*

L'équilibre entre deux phases est régi par l'équation de Clausius-Clapeyron

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{\Delta V \cdot T}$$

où ΔV est la différence de volume spécifique entre les deux phases.

Or, la glace est l'un des rares corps à augmenter de volume en se solidifiant. Il s'ensuit une diminution de la température de fusion sous l'effet de la pression

$$\Delta T = C \cdot \Delta P$$

avec $C = -7.42 \cdot 10^{-5} \text{ [K/kPa]}$

Dans le modèle de Weertman, en l'absence de frottement, la résistance au glissement est entièrement assurée par les obstacles. Comme il y a un cube par surface λ^2 (fig. 5), chaque cube supporte une force moyenne $\tau_b \cdot \lambda^2$. Il y aura donc, par rapport à la pression hydrostatique, une surpression sur la face amont valant $\tau_b \cdot \lambda^2 / 2a^2$ et une dépression identique sur la face aval, de sorte que la différence de pression est donnée par

$$\Delta P = \tau_b \frac{\lambda^2}{a^2}$$

La température de fusion à l'amont sera donc plus basse qu'à l'aval, permettant ainsi la fusion de la glace à l'amont. D'après l'équation de Clausius-Clapeyron, la différence de température entre amont et aval sera de

$$\Delta T = C \Delta P = C \tau_b \frac{\lambda^2}{a^2}$$

Désignons par v_1 la vitesse de glissement due à ce mécanisme. Par unité de temps, il fond un volume $v_1 \cdot a^2$. L'eau contourne alors l'obstacle et regèle à l'arrière, libérant une quantité de chaleur $v_1 \cdot a^2 \cdot \rho \cdot L$, où ρ et L sont respectivement la densité et la chaleur latente de fusion de la glace. Cette chaleur est transmise à travers l'obstacle dont la conductivité thermique est k . On a donc

$$v_1 \cdot a^2 \cdot \rho \cdot L = k \cdot a \cdot \Delta T$$

d'où, avec la valeur de ΔT précédente, une vitesse v_1 inversement proportionnelle à a^3 :

$$v_1 = \frac{C \cdot k}{L \cdot \rho \cdot a} \tau_b \frac{\lambda^2}{a^2}$$

(iii) *mécanisme de déformation plastique*

La présence de l'obstacle provoque, on l'a vu, des contraintes supplémentaires dans la glace, à savoir une contrainte compressive en amont, tensile en aval, de module $\tau_b \lambda^2 / 2a^2$ sur chacune des deux faces. Cette contrainte va induire une déformation supplémentaire

$$\varepsilon = A \left(\frac{1}{2} \tau_b \frac{\lambda^2}{a^2} \right)^n$$

suivant la loi de fluage de la glace présentée précédemment. Supposons que cette contrainte affecte une distance à peu près égale à la dimension de l'obstacle, nous aurons alors

$$v_2 = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{n+1}{2}} \cdot a \cdot A \left(\frac{1}{2} \tau_b \frac{\lambda^2}{a^2} \right)^n$$

dans laquelle v_2 est la vitesse due à la déformation, et le facteur numérique apparaît car la contrainte est uniaxiale.

(iv) *obstacles contrôlants et vitesse de glissement*

Supposons maintenant que le lit du glacier soit composé d'obstacles de tailles différentes. Les petits obstacles seront surmontés aisément par fonte-regel, les grands par déformation. Mais il y aura une taille intermédiaire pour laquelle aucun des deux mécanismes ne jouera parfaitement, et qui va constituer la principale résistance au glissement. Cette taille est donnée par la relation

$$v_1 = v_2$$

d'où l'on obtient la taille critique a_c

$$a_c = 2^{\frac{n-1}{2}} \cdot 3^{\frac{n+1}{4}} \left(\frac{C \cdot k}{A \cdot L \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2}} \tau_b^{\frac{1-n}{2}} \left(\frac{\lambda}{a} \right)^{n-1}$$

Si la vitesse de glissement est entièrement déterminée par la taille de ces obstacles, on a alors

$$v_b = v_1 + v_2 = \text{const} \cdot \tau_b^{\frac{n+1}{2}} \left(\frac{\lambda}{a} \right)^{-n-1}$$

(v) développement récents

A la suite de celle de Weertman, d'autres théories ont été élaborées. Citons en particulier celles de Nye (1970) et Kamb (1970) qui ont introduit dans leurs calculs un modèle de lit plus réaliste.

D'autre part, des mesures de la vitesse horizontale des glaciers ont mis en évidence des variations saisonnières et journalières, qui semblent être en corrélation avec des variations de hauteur de la surface du glacier. Pour comprendre ce phénomène, il est nécessaire de tenir compte du réseau hydrologique sous-glaciaire. Le drainage de l'eau sous-glaciaire semble se faire soit par un réseau de canaux, soit par un système de cavités reliées les unes aux autres. Ces cavités se forment en aval des obstacles lorsque la pression d'eau est suffisante pour contrebalancer la pression de la glace. L'adaptation du réseau hydrologique à une augmentation de l'eau de fonte nécessite un certain temps. Ceci explique les variations observées: en effet, avant que l'eau puisse à nouveau s'écouler facilement, sa pression augmente sous le glacier, favorisant un décollement de la glace ainsi que le glissement. Lliboutry (1964) fut le premier à introduire la formation de cavités dans ses modèles.

Un récent congrès (Interlaken 1985) a démontré l'importance du réseau hydrologique et le manque de connaissance précise dans ce domaine. Il a permis aussi de mettre en évidence le rôle joué par la nature du lit glaciaire, rocheux ou non. De récentes mesures semblent en effet révéler l'existence d'un mouvement basal dans des glaciers froids dont le lit serait déformable. On le voit, la question du glissement d'un glacier sur sa base est encore ouverte. L'amélioration de nos connaissances passe par trois points:

- l'élaboration d'un modèle mathématique simple tenant compte des nouvelles mesures et permettant une vérification expérimentale.
- des mesures et des observations directes du lit du glacier.
- des mesures en laboratoire apportant une meilleure connaissance des propriétés physiques et mécaniques de la glace ainsi que du processus de fonte-regel.