

# Marcher sur l'eau... gelée !

Yves Peysson (ancien Président du Comité Scientifique de la FFCAM)



**François Valla, Joëlle Giraud et François Laugier** sur un trottoir de glace longeant la rivière. Photo : Claude Charlier

**E**n parcourant en hiver les profondes gorges du Chadar dans le Cachemire indien, on ne peut s'empêcher de penser à la formation de la glace sur laquelle on marche pendant de longues heures. Outre la question de la solidité du terrain gelé sur lequel on évolue, on est frappé par la métamorphose très rapide du paysage au niveau de la rivière, bien que les conditions atmosphériques restent très stables durant plusieurs semaines. Alors que l'on s'imagine glisser paisiblement sur un miroir gelé, c'est en fait un univers chaotique auquel on est confronté, formé de lisses plaques de glace fracturées telles des continents se

chevauchant dans leur migration tectonique ou de lacs d'eau en surfusion recouvrant la glace, lorsqu'à la faveur d'une fracture, l'eau de la rivière sous pression peut jaillir brutalement et inonder de grandes surfaces gelées.

Chaque hiver, la rivière Zaskar est recouverte plus ou moins totalement d'une épaisse couche de glace, rendant possible son parcours. Elle est alors dénommée Chadar ou rivière gelée en zanskari. Sa métamorphose physique qui transforme cette rivière impraticable en été en une route

commerciale l'hiver est due à l'air froid et dense de Sibérie qui envahit le massif de l'Himalaya et reste bloqué au fond des gorges très profondes. Les conditions favorables à l'englacement durable de la rivière sont ainsi assurées, même en présence d'un réchauffement transitoire de l'atmosphère.

La formation de la glace dans l'eau est un problème physique plutôt ancien, puisque c'est en 1762 que Joseph Black, professeur de médecine à Glasgow en Ecosse, s'intéressa à cette question, et identifia le phénomène de chaleur latente qui est si utile pour refroidir nos sodas l'été. Il faut en effet enlever une calorie par gramme d'eau pour

## HISTOIRE DES RECHERCHES CONCERNANT LA GLACE

Josef Stefan, professeur de physique à l'Université de Vienne, fut à l'origine de très nombreuses découvertes majeures en thermodynamique, notamment la fameuse loi de Stefan-Boltzmann du rayonnement des corps stipulant que l'énergie rayonnée est fonction de la température du corps considéré. Grâce à cette loi qui fut incorporée dans la théorie générale des quantas de Max Planck quelques années plus tard, il fut ainsi possible d'obtenir pour la première fois une estimation raisonnable de la température de la surface du soleil ! Mais les travaux les plus fondamentaux de Josef Stefan portèrent certainement sur la détermination expérimentale de la conductivité de la chaleur par les gaz, ce qui permit d'étayer de manière robuste la thermodynamique statistique que son étudiant Ludwig Boltzmann porta à un degré de développement exceptionnel pour l'époque et qui reste au centre de bien des aspects de la physique moderne d'aujourd'hui.

Josef Stefan fut sensibilisé au problème de la croissance d'une couche de glace par des collègues de l'Académie, qui l'informèrent de l'existence de données expérimentales obtenues par des expéditions polaires britanniques et allemandes. Très porté sur la compréhension des mécanismes de conduction de la chaleur compte tenu de ses centres d'intérêt, il proposa alors une méthode élégante pour résoudre ce problème bien plus subtil qu'il n'y paraît de prime abord. En effet, la question de la croissance d'une couche de glace



© JUELLE GRAUD

revient à résoudre l'équation de la chaleur posée et résolue par le mathématicien français Joseph Fourier quelques dizaines d'années plus tôt, mais en considérant une frontière libre, l'épaisseur de la glace évoluant avec le temps. Il s'agit d'une catégorie de problèmes généralement très complexes, qui n'ont toujours pas été résolus de manière exacte et font encore l'objet de nombreux travaux.

Parmi ces problèmes, outre celui de la glace, on peut citer la croissance de la croûte terrestre, liée au refroidissement du globe. Contrairement au cas de la glace que l'on peut modéliser par une géométrie plane simple, le cas de la croûte terrestre relève d'une géométrie sphérique. L'expansion d'une sphère d'hydrogène chauffée par laser, situation que l'on rencontre pour mettre au point une bombe thermonucléaire, relève du même type de problème...

**Il n'est donc pas étonnant que ce problème mathématique générique ait intéressé de nombreux mathématiciens et physiciens jusqu'à aujourd'hui !**

En 1930, Marcel Brillouin, célèbre professeur de physique mathématique au Collège de France consacra une revue entière à ces deux problèmes (croissance de la glace et de la croûte terrestre) enrichissant les premiers calculs de raffinements rendant les solutions plus réalistes. Mais il pointait déjà du doigt les grandes difficultés pour obtenir des solutions analytiques. Plus tard, la question de la croissance d'une couche de glace fut reprise dans le cadre plus général de la résolution des équations différentielles partielles à frontières libres, par les mathématiciens russes Dacev et Rubenstein dans les années 40, où cette question d'une frontière libre évoluant avec le temps fut pour la première fois baptisée comme le "problème de Stefan" en hommage au travail pionnier de J. Stefan.

De nombreux travaux suivirent pour explorer l'existence et l'unicité des solutions et le travail de Stefan fut ensuite largement diffusé dans la communauté scientifique par le traité sur la conduction thermique rédigé par H. S. Carslaw et J. C. Jaeger en 1959. Des travaux encore plus récents ont également contribué à rendre ce problème très populaire, au point qu'il fait partie aujourd'hui des problèmes physiques classiques posés en maîtrise de physique et lors de concours aux grandes écoles.

abaisser sa température de  $1^{\circ}\text{C}$ , alors qu'il est nécessaire d'extraire 80 calories pour ce même gramme d'eau pour que celui-ci se change en glace à  $0^{\circ}\text{C}$ . Il est alors facile de comprendre qu'un cube de glace à  $0^{\circ}\text{C}$  a un énorme pouvoir réfrigérant, puisqu'un seul gramme de glace se transformant en eau refroidira 80 grammes d'eau de  $1^{\circ}\text{C}$  ! A l'inverse, il faut fournir 80 fois plus de chaleur pour faire fondre de la glace à  $0^{\circ}\text{C}$  que pour élever de un degré la même quantité d'eau à la même température.

La question de la croissance d'une couche de glace fut abordée par Franz Neuman (1798-1895) dans ses *Leçons Inédites* de Koenigsberg au début de sa sixième année de cours (vers 1840), travail qui resta inconnu jusqu'en 1901 lorsqu'il fut publié par H. Weber dans le cadre de la résolution d'équations différentielles partielles. De manière indépendante, ce problème fut résolu en 1889 par Josef Stefan, membre de l'Académie des Sciences de Vienne en Autriche, la publication de ces travaux apparaissant en 1890 dans les *Annales de l'Académie*. (Voir encadré)

### La loi de Stefan

On ne détaillera évidemment pas dans ces colonnes le calcul de la loi de Stefan que l'on peut retrouver intégralement dans les pages Internet du Comité Scientifique de la FFCAM. Cette loi stipule que l'épaisseur de la glace croît approximativement comme la racine carrée du temps et de la différence de température entre l'air et l'eau. Plus l'épaisseur de la couche de glace est importante, moins celle-ci peut donc augmenter rapidement, car la source de froid - l'air - s'éloigne en même temps de l'eau au fur et à mesure que la glace se forme ! Ce proces-

**Le Chadar** charriant des pains de glace à Chilling, point de départ du trek.  
Photo: Joan Decker



**Forme insolite** résultant de la dilatation de la glace. Photo : François Laugier

sus ne conduit pas cependant à une épaisseur maximale de glace pour une température donnée de l'air. Si l'on attend suffisamment longtemps, toute l'eau gèlera !

De la loi de Stefan, on peut tirer plusieurs enseignements qui corroborent bien les observations qualitatives faites le long du Chadar. D'après ce modèle, en une journée, l'épaisseur de glace peut atteindre la quinzaine de centimètres si la température de l'air est maintenue constante à  $-15^{\circ}\text{C}$ . Un lac formé à la surface de la glace par l'eau de la rivière inondant une zone gelée n'a donc qu'une vie très éphémère, même si sa profondeur dépasse trente centimètres. Un secteur quasi-impraticable un jour ne posera donc aucun problème le lendemain !

Au bout d'un mois de temps très froid, l'épaisseur de glace calculée est de l'ordre du mètre ! De telles épaisseurs sont bien visibles le long du chemin et la résistance mécanique du terrain est alors exceptionnelle. Un camion pesant plusieurs tonnes pourrait circuler sans aucune difficulté, comme sur les lacs gelés canadiens. Il n'est donc pas étonnant que les Zankaris en profitent pour transporter de très lourdes charges comme les matériaux pour construire leurs maisons.

Le modèle de Stefan considère un lac de dimension infinie, alors que les gorges du Chadar sont étroites.

La croissance de la glace étant rapide, les contraintes mécaniques exercées sur les bords de la rivière deviennent rapidement considérables, la glace se dilatant lorsque sa température baisse. Sous l'effet de ces forces, la glace se fracture, parfois sur de très grandes distances. On comprend alors l'aspect chaotique de la surface de la rivière constituée de plans inclinés, mais aussi des formations étranges comme ces coquillages de glace qui jalonnent le chemin. Le processus d'épitaixie<sup>1</sup> de la glace ne s'arrêtant jamais tant que l'air froid stagne, d'un jour à l'autre, le paysage peut donc changer du tout au tout par le jeu de la dilatation de la glace, ce qui est un des attraits du Chadar.

### Marcher sur le Chadar

Enfin, une fois le manteau de glace bien constitué, son inertie thermique fait qu'une variation de température brutale de l'air n'a qu'un très faible impact sur son épaisseur. Si l'on suppose qu'une masse d'air chaude s'installe subitement dans les gorges pendant de nombreux jours, la température de la glace remontera progressivement pour rejoindre celle de la nouvelle masse d'air. Ce processus mettra d'autant plus de temps que la période de froid a été longue. Pendant toute cette phase, la glace ne fond pas ! Comme il faut fournir une très grande énergie pour fondre la glace – la fameuse énergie latente de fusion, seule une mince pellicule d'eau se formera à sa surface. Ce n'est que lorsque l'épaisseur de glace n'atteint plus que quelques centimètres que la fonte s'accélère, ce que l'on appelle la débâcle. Le risque d'être piégé dans les gorges est donc extrêmement minime, et les fluctuations de température au cours de l'hiver sont sans aucun risque pour parcourir le Chadar, n'affectant en rien l'épaisseur globale de la glace sur la durée du trek.

On pourrait raffiner le modèle en



prenant en compte le rôle de la circulation de l'eau, de la présence de neige sur la glace, d'impuretés et de bulles d'air piégées dans celle-ci ainsi que de la taille finie des gorges. Tous ces aspects relèvent alors de la simulation numérique où les effets physiques et géométriques sont entremêlés. C'est évidemment bien au-delà des simples propos évoqués ici, mais la loi de Stefan permet en elle-même de mieux comprendre certains aspects spectaculaires que l'on peut rencontrer le long des rivières ou lacs gelés par très grand froid. M

<sup>1</sup> Technique consistant à faire croître du cristal sur du cristal.



**François Valla et Joan Decker** (à gauche), longeant de grandes fissures aux rebords coupants. Photo: Yves Peysson

*Cette aventure a rassemblé François Valla, Joan Decker et Yves Peysson du Comité Scientifique, ainsi que Joëlle Giraud, Claude Charlier et François Laugier de fin janvier à fin février 2008.*

### Références

- «Josef Stefan : His life and legacy in the thermal sciences», par John Crepeau *Experimental Thermal and Fluid Science* Volume 31, Issue 7, July 2007, Pages 795-803
- «Chadar ou la métamorphose du Zanskar» par Yves Peysson, *Revue CIMES 2009* du Groupe de Haute Montagne (GHM)
- On trouvera également des informations intéressantes sur Internet avec les mots-clés : loi, Stefan, glace.
- Le détail des calculs de la loi de Stefan est accessible sur la pages Internet du Comité Scientifique de la FFCAM : [http://www.ffcam.fr/comite\\_scientifique.html](http://www.ffcam.fr/comite_scientifique.html) à la rubrique « Sciences et écritures »