



Placés dans un congélateur classique (à gauche), certains aliments tels que tomates ou feuilles d'épinard se dégradent, surtout durant la décongélation. En empêchant le gel de toute l'eau dans laquelle on immerge les aliments, la congélation à volume constant (à droite) assure une bien meilleure préservation.

Cependant, tout cela a un coût énergétique non négligeable. Pour fixer les idées, prenons un simple litre d'eau que nous voulons refroidir à -18°C à partir de la température ambiante (20°C). On peut distinguer trois étapes dans le processus : refroidissement de l'eau liquide de 20°C à 0°C (84 kilojoules, kJ), transformation de l'eau en glace à 0°C (334 kJ) et refroidissement de la glace de 0°C à -18°C (38 kJ). Au total, cela fait 456 kJ, soit environ 0,13 kilowattheure. Cette énergie à prélever semble modeste, mais, compte tenu de l'importance de la chaîne du froid à l'échelle mondiale, elle requiert 4% de la consommation globale d'électricité. Et l'on remarque aussi que 73% du coût énergétique provient de l'étape du gel.

Ne pourrait-on pas alors éviter l'apparition de la glace, à la fois responsable de la dénaturation du matériel biologique et du coût énergétique ?

ABAISSE LA TEMPÉRATURE DE SOLIDIFICATION

Il y a deux pistes. La première est l'utilisation d'un « antigel » ou, comme disent les biologistes, d'un « cryoprotecteur » : un composé qui non seulement abaisse le point de congélation de la solution, mais peut aussi pénétrer dans les cellules pour les protéger du gel sans être trop nocif. Ce procédé est courant dans les laboratoires de biologie où l'on utilise du glycérol, de l'éthylène glycol, etc., mais uniquement pour des échantillons en faible quantité ou très fins (sperme, sang, coupes

histologiques...), qu'il faut ensuite, après décongélation, « rincer » afin d'éliminer le cryoprotecteur. On ne voit pas comment faire de même en cuisine !

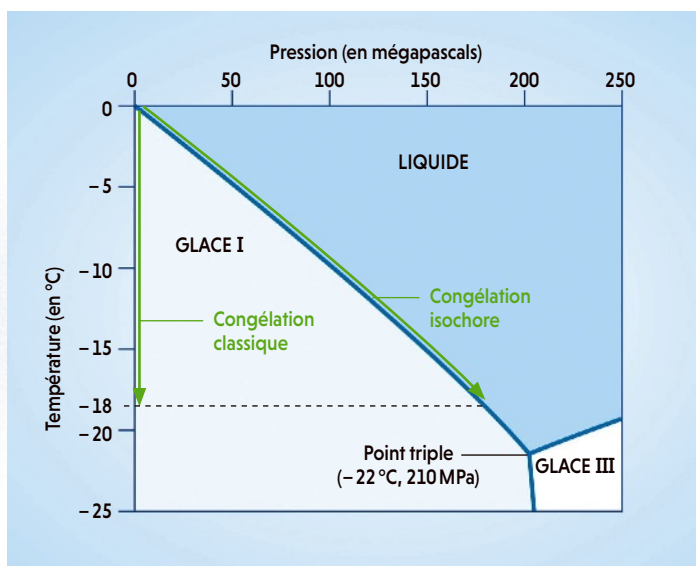
La seconde piste consiste à profiter d'une propriété remarquable de l'eau (voir l'encadré ci-dessus) : la température de son point de congélation diminue lorsque la pression augmente. Cela provient du fait qu'en se transformant en glace, l'eau prend du volume, contrairement à la plupart des autres matériaux ; elle enfle d'environ 10% à pression atmosphérique.

Les auteurs ont notamment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



SUIVRE L'ÉQUILIBRE LIQUIDE-SOLIDE

Le diagramme de phase d'un corps indique l'état physique de ce corps en fonction de la température et de la pression. Celui de l'eau, montré ici partiellement, indique que la température du point de congélation diminue lorsque la pression augmente. La congélation classique, à la pression atmosphérique, implique à 0°C le passage intégral de l'eau de son état liquide à un état solide (glace de type I). La congélation isochore, à volume constant (donc à pression croissante quand la température diminue), correspond à une diminution de la température jusqu'à -18°C en suivant la ligne de coexistence liquide-solide : une partie de l'eau reste liquide, à l'équilibre avec la glace.



Augmenter la pression permet ainsi de retarder la congélation de l'eau de façon notable, mais cela nécessite des pressions considérables. La température de gel se décale à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à la pression de 111 mégapascals (MPa), soit plus de 1000 fois la pression atmosphérique; et elle atteint $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 193 MPa. Ainsi, l'eau peut rester liquide jusqu'à des températures de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais à des pressions difficiles à produire en toute sécurité dans un usage domestique.

L'idée géniale de l'équipe de Berkeley a été de laisser faire la nature. Puisque l'eau se dilate en gelant, empêchons-la d'enfler en la maintenant dans un volume constant. Imaginons donc que nous refroidissions peu à peu un récipient scellé et rempli d'eau. À $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou un peu en deçà, l'eau commence à geler; mais, comme le volume est fixé, le tout premier cristal de glace qui naît ne trouve sa place qu'en comprimant l'eau environnante. Le contenu du récipient se retrouve donc à une pression supérieure à la pression atmosphérique, avec la coexistence d'un peu de glace et beaucoup d'eau liquide. Cela abaisse le point de congélation et l'on peut alors continuer à refroidir sans que tout gèle. Et ainsi de suite.

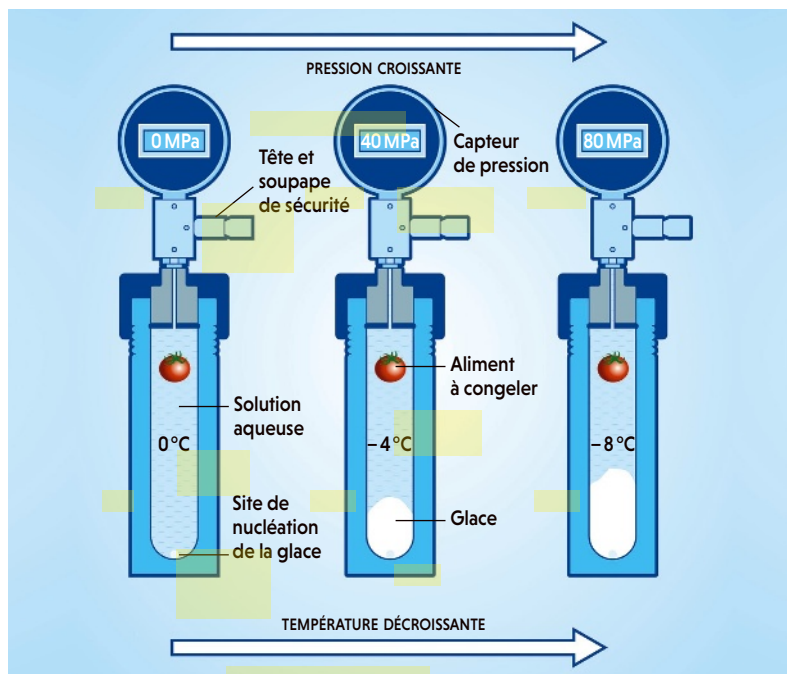
DE L'EAU LIQUIDE QUI COEXISTE AVEC LA GLACE

Dans ce processus, on suit donc la courbe de coexistence liquide-glace du diagramme de phase de l'eau (voir l'encadré page 89). La pression à l'intérieur du récipient scellé dépend de la température, de même que la proportion de glace par rapport à l'eau liquide. Par exemple, à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, la pression vaut 173 MPa et la glace représente 52% de la masse d'eau. Le point important est qu'il reste donc de l'eau sous forme liquide. Si, par un dispositif approprié (voir l'encadré ci-dessus), on maintient les aliments à conserver dans la région liquide, on évite la dénaturation des tissus biologiques provoquée par le gel.

Les résultats sur des aliments difficiles à congeler, comme les tomates ou les cerises, semblent prometteurs. Par ailleurs, comme tout l'intérieur du dispositif n'est pas gelé, on a moins d'énergie à prélever. Par conséquent, on dépense moins d'énergie par rapport au procédé habituel. Qui plus est, à mesure que la température baisse, l'énergie à prélever pour la transformation de l'eau liquide en glace diminue : de 334 kJ par kilogramme à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, elle passe à 250 kJ à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le gain d'énergie est donc accentué et pourrait, selon les chercheurs de Berkeley, atteindre 70% dans certaines conditions.

CONGÉLATEUR ISOCHORE

Dans un dispositif de congélation isochore, l'aliment à congeler est placé dans de l'eau (plus précisément une solution aqueuse) à l'intérieur d'un récipient scellé. À mesure que la température diminue, la pression augmente et donc la température de solidification de l'eau diminue. Bien que de la glace se forme et que sa proportion augmente, une partie de l'eau, où est immergé l'aliment, reste liquide même au plus froid ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les tissus cellulaires dont est composé l'aliment sont ainsi mieux préservés.



Et il semble qu'il y ait bien d'autres avantages. Par exemple, considérons la répercussion des fluctuations de température du milieu environnant sur l'intérieur du récipient. Dans le cas de la congélation isochore, l'interface liquide-glace sert d'amortisseur. L'apport d'énergie dû à une hausse de la température extérieure est en effet essentiellement absorbé via la diminution de la proportion de glace dans le récipient, tandis qu'une diminution de la température externe engendre au contraire un accroissement de cette proportion. En conséquence, la température dans le récipient est bien mieux stabilisée que dans le cas d'une congélation isobare. Autrement dit, maintenir les aliments à la température désirée coûtera moins d'énergie.

Un autre atout est que, en raison des pressions élevées atteintes, la congélation isochore tue les bactéries. Enfin, il semble possible de mettre en œuvre cette nouvelle méthode en conservant pour l'essentiel les systèmes de refroidissement existants. Une révolution dans la conservation des aliments s'annonce-t-elle? L'équipe de Berkeley le pense. ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Zhao *et al.*, **Analysis of global energy savings in the frozen food industry made possible by transitioning from conventional isobaric freezing to isochoric freezing**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151, article 111621, 2021.

M. J. Powell-Palm et B. Rubinsky, **A shift from the isobaric to the isochoric thermodynamic state can reduce energy consumption and augment temperature stability in frozen food storage**, *Journal of Food Engineering*, vol. 251, pp. 1-10, 2019.

B. Rubinsky *et al.*, **The thermodynamic principles of isochoric cryopreservation**, *Cryobiology*, vol. 50, pp. 121-138, 2005.