

Anthony Delahaye
Évelyne Derens-Bertheau
Laurence Fournaison
Denis Leducq
Fatou-Toutie Ndoye
Véronique Osswald

La chaîne du froid

?

60
clés pour
comprendre

éditions
Quæ

La chaîne du froid
60 clés pour comprendre

Dans la collection
Clés pour comprendre

Les étoiles de mer et leurs cousins

80 clés pour comprendre
Coralie Taquet, Marc Taquet, 2016, 148 p.

Quel est le meilleur chocolat ?

90 clés pour comprendre le chocolat
Michel Barel, 2015, 136 p.

Les sols ont-ils de la mémoire ?

80 clés pour comprendre les sols
Jérôme Balesdent, Étienne Dambrine, Jean-Claude Fardeau, 2015, 176 p.

Faut-il sentir bon pour séduire ?

120 clés pour comprendre les odeurs
Roland Salesse, 2015, 200 p.

Avec ou sans sucre ?

90 clés pour comprendre le sucre
Philippe Reiser, 2015, 176 p.

L'énergie, moteur du progrès ?

120 clés pour comprendre les énergies
Paul Mathis, 2014, 176 p.

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

© Éditions Quæ, 2017

ISBN : 978-2-7592-2588-0

ISSN : 2261-3188

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Anthony Delahaye
Évelyne Derens-Bertheau
Laurence Fournaison
Denis Leducq
Fatou-Toutie Ndoye
Véronique Osswald



**La
chaîne
du froid**

?

**60
clés pour
comprendre**





Table des matières

Introduction	7
Le froid, un phénomène méconnu de notre quotidien	9
Mon ami le frigo	41
Le froid industriel	69
Progrès et innovations dans le domaine du froid alimentaire	87
60 clés pour comprendre la chaîne du froid	106
Bibliographie	109
Crédits iconographiques	112





Remerciements

L'idée de ce livre a été proposée il y a quelques années par Julienne Baudel, collègue d'Irstea, qui nous a encouragés sans relâche à transmettre au grand public nos connaissances sur la chaîne du froid. C'est la première à nous avoir proposé un sommaire pour cet ouvrage ; nous l'en remercions vivement.

En plus des auteurs, Guy Létang (ex-Irstea), Isabelle Trezzani-Harbelot (maître de conférences à l'IUT de Créteil, département Génie biologique, université Paris-Est Créteil) et Hayat Benkhelifa (maître de conférences à AgroParisTech) nous ont épaulés pour la rédaction de certaines questions. Nous remercions aussi Laurent Guillier (Anses) pour sa relecture attentive.

Nous exprimons notre gratitude aux divers organismes et entreprises qui nous ont fourni des informations et des illustrations pour cet ouvrage : Adepace, Air Liquide, Areco, l'Association des anciennes glaciers de Strasbourg, l'Institut international du froid, Innocold et la *Revue générale du froid et du conditionnement d'air*.

Nous remercions enfin Irstea pour son soutien financier à l'édition de cet ouvrage, et l'équipe des éditions Quæ pour son accompagnement efficace.

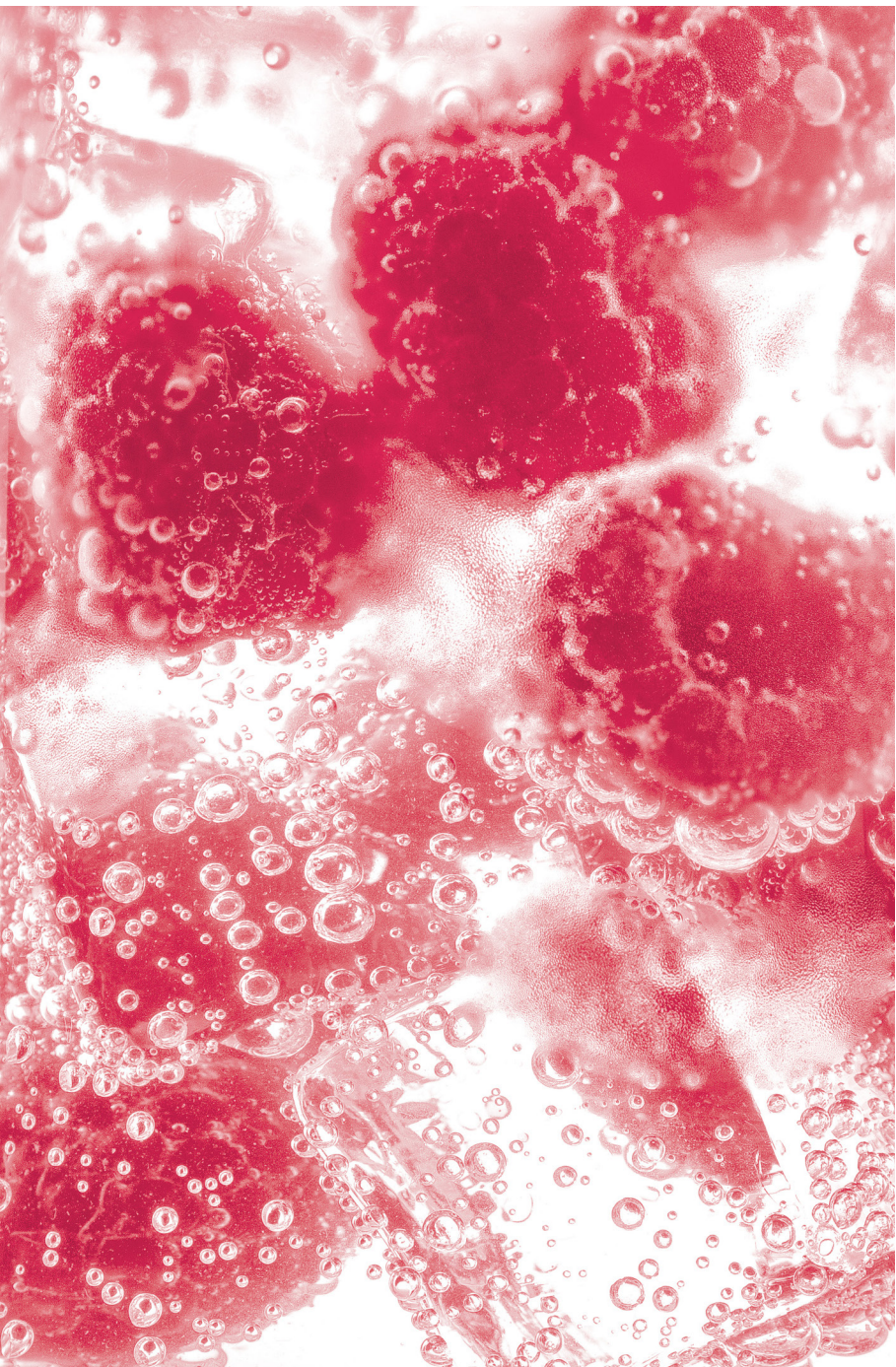
Introduction

Le froid nous entoure au quotidien sans que nous nous en rendions compte. Nous savons tous exprimer une sensation de froid par rapport au chaud, mais que cache le mot « froid » ?

Le froid que nous souhaitons vous faire découvrir concerne principalement le froid artificiel (créé par une machine) et son importance dans la chaîne alimentaire. Dès l'Antiquité, nos ancêtres ont constaté que le froid permettait une meilleure conservation des produits. Les avancées industrielles ont permis qu'aujourd'hui nous puissions conserver des produits frais pendant plusieurs jours. Nous allons vous livrer les réponses à un ensemble de questions concernant la chaîne du froid, dans ce livre organisé autour de quatre thèmes : le froid un phénomène méconnu de notre quotidien, mon ami le frigo, le froid industriel et les progrès et innovations dans le domaine du froid alimentaire.

Nous vous ferons découvrir à quoi sert le froid, et plus particulièrement son action sur les produits alimentaires. Vous regarderez différemment votre frigo quand vous aurez découvert la magie de son fonctionnement. De plus, cela vous incitera à avoir des gestes écoresponsables pour limiter le gaspillage des denrées. Nous vous emmènerons à la découverte de la chaîne du froid avec ses nombreux maillons. En effet, les produits que vous consommez ont tous une histoire avant d'arriver dans les meubles de vente des commerces. Vous comprendrez les processus de refroidissement, de congélation, de surgélation et, surtout, ce qui se passe dans les aliments. Finalement, nous vous présenterons les progrès et les innovations qui ont lieu dans le froid.





Le froid, un phénomène méconnu de notre quotidien



1 Qu'est-ce que le froid ?

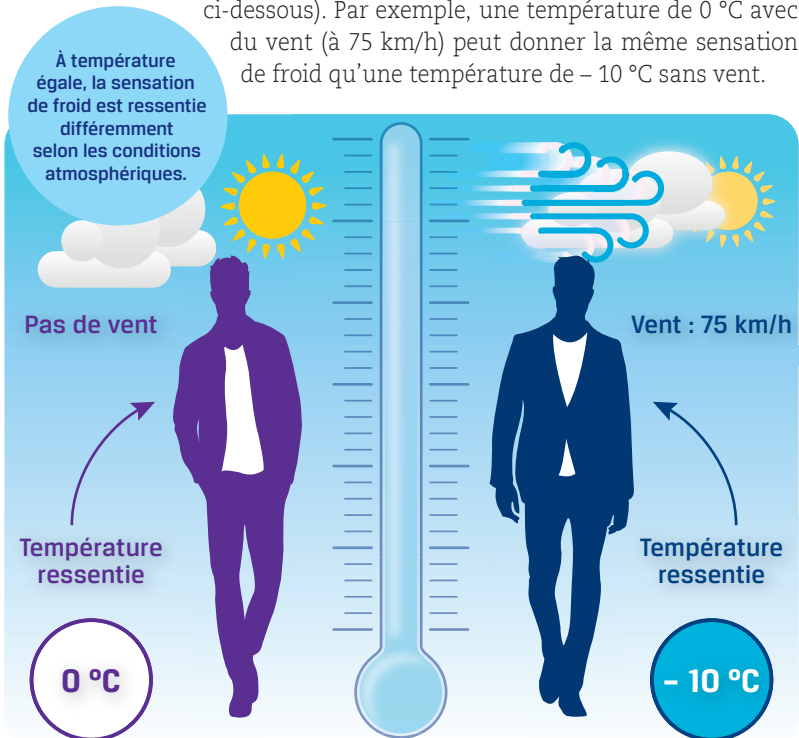
Avoir froid, être en froid, attraper froid, jeter un froid, cueillir à froid, garder son sang-froid, ne pas avoir froid aux yeux... Le froid est un mot utilisé de façon plus ou moins imagée au sens figuré. Même au sens propre, il peut avoir plusieurs significations. Il est donc difficile de donner une définition unique du froid.

En premier lieu, le terme de « froid » est couramment employé pour désigner une sensation, ressentie à basse température, par opposition au chaud ou à la chaleur. Ainsi, on a froid en hiver et chaud en été. Dans le langage commun, les notions de froid et de température sont même souvent confondues : le froid désigne alors les basses températures de l'atmosphère ou de l'air ambiant. On dit par exemple que certaines plantes ne supportent pas le froid, sous-entendu : ne supportent pas les basses températures.

Le froid est aussi une notion relative utilisée pour qualifier l'état thermique : un corps est qualifié de « froid » lorsqu'il est susceptible de recevoir de la chaleur d'un autre corps à température plus élevée. Autrement dit, un objet est considéré comme froid quand sa température est relativement basse, en particulier par rapport à celle du corps humain, qui sert de référence.

Toutefois, deux objets à la même température ne procurent pas forcément la même sensation de froid, par exemple quand l'un est en métal et l'autre en bois. Cette sensation n'est donc pas uniquement associée à une température. Dans le cas du métal, la sensation de froid plus prononcée provient des propriétés du matériau transférant mieux la chaleur que le bois, qui, lui, se comporte plutôt comme un isolant thermique. Lorsqu'on pose sa main sur un objet en métal, la chaleur de notre main se transmet donc plus rapidement que sur un objet en bois. C'est le fait d'enlever de la chaleur à notre main qui nous procure cette sensation de froid. Le vent et l'humidité modifient aussi la manière de refroidir la peau : la température ressentie est donc différente selon les conditions atmosphériques (voir figure

ci-dessous). Par exemple, une température de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec du vent (à 75 km/h) peut donner la même sensation de froid qu'une température de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sans vent.



D'un point de vue plus scientifique, le froid peut également désigner une quantité de chaleur échangée ou un transfert thermique. Par exemple, la chaleur extraite à une pièce par un climatiseur équivaut à une quantité de froid apportée à cette pièce. Du point de vue technologique, le froid regroupe aussi l'ensemble des méthodes et procédés permettant d'abaisser la température (d'ambiance, de réfrigérateurs, d'entrepôts frigorifiques...) pour différentes applications telles que la conservation des aliments ou la climatisation.

En conclusion, il est évident que les notions de froid et de basses températures sont intimement liées. Toutefois, elles ne sont pas rigoureusement identiques, puisque le froid peut aussi bien désigner une sensation, un état thermique, une énergie échangée ou encore une application technologique, sans parler de toutes les acceptions des expressions populaires où le mot est employé. Demandez aux canards s'ils ont vraiment froid !

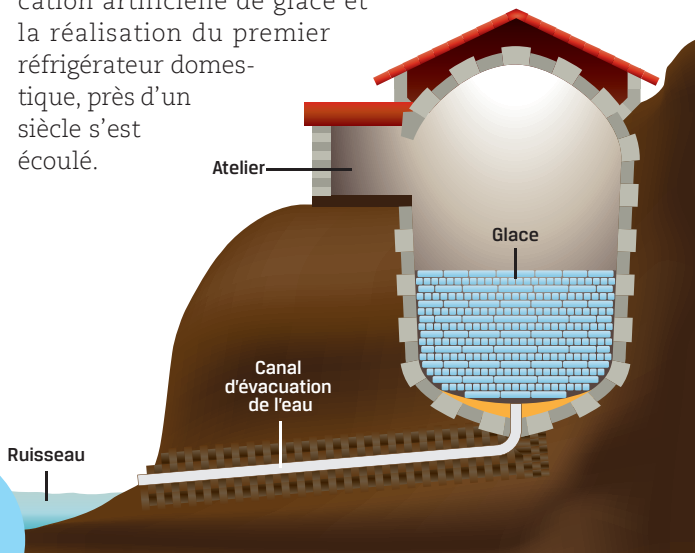
Le zéro absolu est un état thermodynamique correspondant à la plus basse température possible, soit 0 K (échelle Kelvin), c'est-à-dire $-273,15$ °C (échelle Celsius). À cette température, théorique et *a priori* inaccessible, les particules qui composent la matière sont toutes dans le même état fondamental d'énergie minimale, ce qui implique qu'elles sont immobiles. Certaines substances perdraient alors leur viscosité (superfluidité), d'autres leur résistance électrique (supraconductivité). Différentes expériences ont été menées pour s'approcher au plus près du zéro absolu. En pratique, on peut atteindre 0,21 K en faisant évaporer de l'hélium. Pour s'approcher encore davantage, des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology ont utilisé une technique de refroidissement d'atomes par laser et ont atteint $4,5 \times 10^{-10}$ K. Mais le record a été atteint en 1999 en refroidissant du rhodium, avec une température de 1×10^{-10} K, soit 0,000 000 000 1 K !

Qu'est-ce que le zéro absolu ?

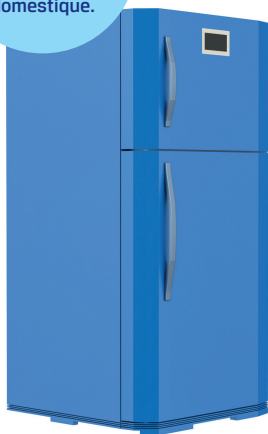
2 Qui a inventé le froid artificiel ?

La conservation des aliments par le froid existe bien antérieurement aux premières machines frigorifiques. En effet, les Mésopotamiens, mais aussi les Grecs et les Romains, utilisaient déjà de la glace, stockée dans des fosses appelées « glaciers », pour garder au frais la viande durant l'été, ou encore rafraîchir

les boissons. Ce type de glacière fut employé en Europe à partir du XVI^e siècle. La glace était alors récupérée dans les régions froides ou les montagnes, ou tout simplement durant l'hiver. Cependant, ce mode de conservation présentait un caractère aléatoire car, comme le disait le baron Haussmann : « La glace manque à Paris quand les hivers sont chauds. » C'est ainsi qu'à partir du XVIII^e siècle apparurent les premiers travaux scientifiques sur le froid dit « artificiel ». Il est difficile de dire précisément qui est l'inventeur du froid artificiel tel qu'on l'entend aujourd'hui. En effet, entre la première fabrication artificielle de glace et la réalisation du premier réfrigérateur domestique, près d'un siècle s'est écoulé.



De la glacière stockant la glace naturelle... au réfrigérateur domestique.



On peut néanmoins lister différents événements qui ont jalonné les progrès dans le domaine du froid.

- En 1755, le Britannique William Cullen découvrit qu'il était possible de fabriquer de la glace par évaporation d'eau sous une cloche à vide.
- En 1805, c'est à l'Américain Oliver Evans qu'on doit la toute première description d'un cycle frigorifique à compression d'éther.
- Avec l'essor de la thermodynamique, symbolisée par les travaux du Français Sadi Carnot en 1824 (voir encadré), les machines

frigorifiques à compression de vapeur furent de plus en plus étudiées. Ces systèmes, de loin les plus répandus aujourd'hui, s'appuient sur le principe de production de froid par évaporation d'un liquide réfrigérant, appelé aussi frigorigène. Dans un « système à compression de vapeur », le liquide utilisé se vaporise et est recomprimé, puis liquéfié pour servir de nouveau à produire du froid.

– En 1835, le premier brevet d'un tel système fonctionnant à l'éther fut déposé par l'Américain Jacob Perkins.

– Quelques années plus tard, l'Américain John Gorrie appliqua le principe de détente d'air (sans évaporation ni liquéfaction) à la première machine frigorifique à air, dont il obtint le brevet en 1851.

– À partir de 1854, les premiers réfrigérateurs produits à l'échelle industrielle furent l'œuvre de l'Écossais James Harrison.

– En 1859, un autre type de machine frigorifique, dit « à absorption », fut inventé par le Français Ferdinand Carré, qui fit breveter un système dont le fluide n'était pas comprimé, mais absorbé.

– D'autres inventeurs prirent une grande part au développement des machines frigorifiques, parmi lesquels le Français Charles Tellier, surnommé « le père du froid », qui, en 1858, introduisit l'ammoniac comme frigorigène et, en 1869, créa à Auteuil la première usine frigorifique au monde pour la conservation de la viande par le froid artificiel. Sa participation à la réalisation, en 1876, du navire *Le Frigorifique* fut probablement l'événement qui contribua le plus à sa notoriété.

Sadi Carnot (1796-1832) est un physicien français considéré comme le fondateur de la thermodynamique. En observant la machine à vapeur, il constata qu'à partir de la chaleur dégagée il était possible de mettre en mouvement une turbine. Cette mise en mouvement correspond à une grandeur thermodynamique appelée « travail ».

Ainsi, Carnot montra que les transferts de chaleur à l'œuvre dans la machine à vapeur étaient équivalents au travail obtenu dans ce processus ; il fut le premier à présenter l'équivalence entre chaleur et travail.

Il imagina aussi un cycle idéal d'opérations thermodynamiques qui permit de montrer les limites de rendement des moteurs réels. Carnot proposa d'autres théorèmes importants à l'origine de la thermodynamique. Plus tard, Clausius et Thomson montrèrent que la quantité de chaleur admise à la chaudière est toujours supérieure à celle qui est cédée au condenseur, d'une quantité exactement équivalente à celle du travail obtenu.

**Sadi Carnot,
fondateur de la
thermodynamique**

3 Que peut-on conserver grâce au froid ?

Lorsqu'on parle de conservation par le froid, on pense d'abord à la conservation des aliments, notamment celle que permet notre réfrigérateur domestique, ou celle des meubles de vente dans les magasins. Cette conservation peut être associée à la mise en place d'une atmosphère neutre pour prolonger la durée de vie des aliments, comme les salades de 4^e gamme (voir question 6) ou la viande. Cette atmosphère modifiée, employant des gaz comme l'oxygène, le CO₂ et l'azote, est utilisée aussi pour conserver des fruits comme les pommes et les poires. De même, le froid joue un rôle dans la conservation des semences, et les conservatoires botaniques sont équipés de chambres froides afin de gérer la dormance des graines.

Une cave d'affinage de fromages en atmosphère maîtrisée.



Dans les procédures d'affinage, la maturation des fromages requiert de contrôler la température, l'humidité et le niveau d'oxygène. La régulation de la température (12 °C) et de l'humidité est également indispensable aux champignonnières, aujourd'hui en grande majorité des hangars réfrigérés, qui ont remplacé les anciennes carrières.

La conservation des œuvres d'art nécessite aussi que l'ambiance soit maîtrisée. Les œuvres peuvent souffrir autant de l'humidité et de la température que de la lumière. Les conditions recommandées en France sont de 45 à 55 % d'humidité relative avec une température de 18 à 25 °C.

L'industrie pharmaceutique fait largement appel au froid pour la préparation et la conservation des médicaments et vaccins. Les produits

médicaux thermosensibles à conserver entre 2 °C et 8 °C représentent aujourd'hui 10 % des médicaments bénéficiant de l'autorisation de mise sur le marché. Les dépassements hors de cette plage de températures, vers le chaud comme vers le froid, nuisent à leur efficacité.

La conservation réfrigérée de tissus cellulaires humains dans des contextes cliniques et la conservation à des températures négatives d'organes, de sperme, d'embryons sont des applications du froid bien connues. Par ailleurs, la cryoconservation est aussi largement utilisée pour entreposer les matériaux génétiques des animaux et des plantes, notamment en vue de la conservation de la biodiversité.

4 Le froid ne sert-il qu'à conserver ?

En France, 24 % du froid artificiel (hors climatisation) est utilisé dans l'agroalimentaire – des études montrent par ailleurs que 60 % de notre bol alimentaire a subi, avant notre consommation, un refroidissement. Cependant, le froid est employé dans de nombreuses autres activités sans que nous nous en rendions compte ou le sachions.

