



Froid

5 décembre 2017 – 26 août 2018
Enseignants de cycle 3, de cycle 4 et de lycée

1^{re} partie : l'exposition « Froid », compléments, informations pratiques



Département Éducation et Formation

Cité des sciences et de l'industrie

30 avenue Corentin-Cariou

75019 Paris

www.cite-sciences.fr

2017

cité
sciences
et industrie



froid
exposition
05 décembre 2017
— 26 août 2018



M > Porte de la Villette
cite-sciences.fr
#ExpoFroid

En partenariat
avec



Avec le soutien de



les Français
des Glaces / surgelés



© 2017 Cité des Sciences et de l'Industrie. Tous droits réservés.

Sommaire

1 L'exposition *Froid*

1.1	Situation et plan de l'exposition	4
1.2	Propos et contenu de l'exposition	6
1.2.1	Repères	7
1.2.2	Les défis pour le vivant	9
1.2.2.1	Humains face au froid	9
1.2.2.2	Animaux et les plantes : composer avec le froid	13
1.2.2.3	Guérir grâce au froid ?	17
1.2.3	Les défis pour la société	20
1.2.3.1	Froid naturel, froid « fabriqué »	20
1.2.3.2	Produire et utiliser le froid	25
1.2.3.3	Froid et alimentation	31
1.2.4	Les défis pour la science	35
1.2.4.1	Sur le chemin du zéro absolu	35
1.2.4.2	L'espace médiation	40

2 Compléments

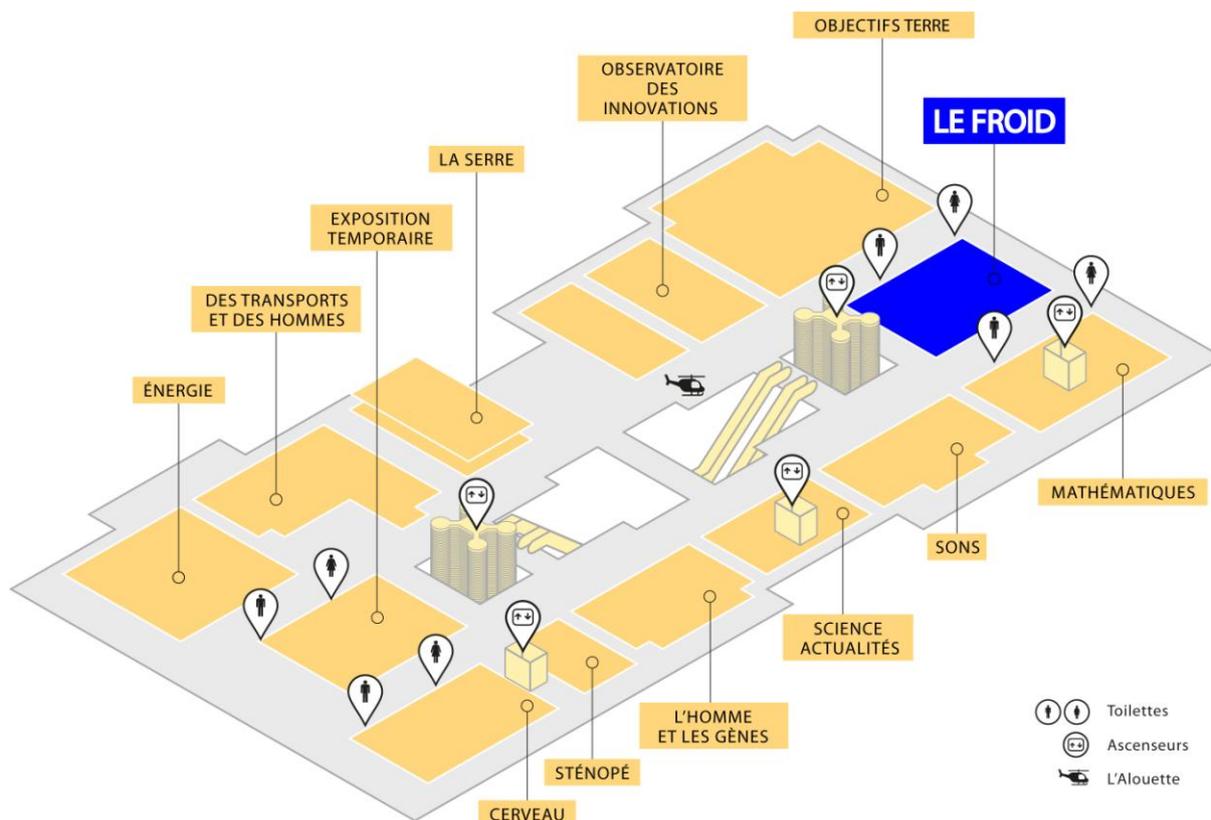
2.1	Les différentes échelles de température	40
2.2	Le froid glacial de l'espace...	44

3 Informations pratiques

1 L'exposition *Froid*

1.1 Situation et plan de l'exposition

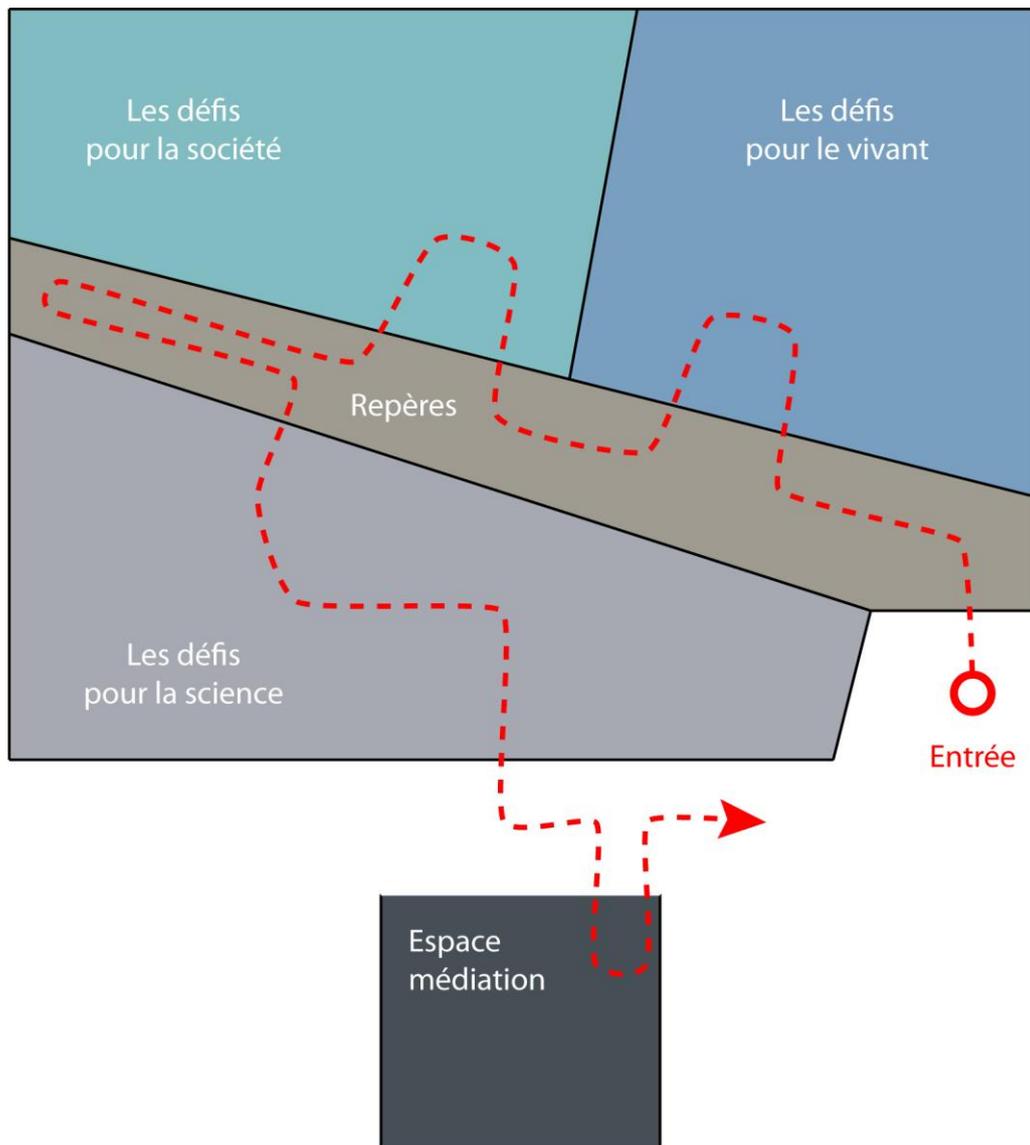
L'exposition « Froid », qui occupe une surface totale de 600 m², prend place au niveau 1 de la Cité des sciences et de l'industrie.



Le parti-pris scénographique de l'exposition adopte un concept global unifiant : le froid est transposé dans l'espace scénique grâce à un décor translucide et opalescent. Associé à l'esthétique du dépouillement et de la rigueur, il est suggéré grâce à l'association de deux composantes, la lumière et les matériaux des parois et des mobiliers. Cette identité scénique forte est obtenue par la matière (voilages créant un effet diaphane) et par la lumière projetée sur des surfaces sablées ou dépolies.

En partenariat avec l'Association française du Froid, Les entreprises des glaces et surgelés, Marie, Air Liquide, Darégal et Dehon.

Le graphique ci-dessous révèle l'organisation schématique de l'exposition *Froid* et suggère un sens de parcours. Dans la suite du document, nous présenterons un aperçu des éléments d'exposition dans cet ordre. Cependant, les espaces thématiques peuvent être explorés dans n'importe quel ordre : chacun est libre de créer son propre parcours de visite. L'exposition, accessible au public handicapé, est présentée en trois langues : français, anglais et italien.



1.2 Propos et contenu de l'exposition

Dans l'imaginaire collectif, le froid est souvent associé à la cruauté, à l'immobilité et à la mort. C'est le froid que l'on affronte pendant les mois d'hiver ou lorsque l'on vit dans les endroits les plus hostiles de notre planète. Il est pourtant incontestable que le froid joue un rôle fondamental dans les mécanismes adaptatifs développés par les organismes vivants. Le froid évoque également le froid produit par des machines conçues par l'Homme. Le réfrigérateur domestique n'est qu'une application parmi des centaines d'autres de la technologie et de l'industrie du froid, présentes dans de multiples secteurs allant de l'alimentation à la santé en passant par l'énergie et la science.

Nos lointains ancêtres, simples témoins subissant les effets du froid, étaient à la merci d'une force naturelle qui les dépassait. Ils étaient cependant conscients qu'ils pouvaient s'en servir pour mieux conserver des aliments ou pour soulager certaines douleurs. Ce n'est qu'au cours du XVIII^e siècle que nous avons enfin réussi à le mesurer avec précision. Il a fallu encore un siècle pour parvenir à développer des techniques pour produire du froid artificiellement. Les recherches sur les phénomènes étonnants se développant près du zéro absolu sont plus que jamais actives.

Aujourd'hui, nous avons la technicité pour affronter, jusqu'à un certain point, le froid naturel. La façon dont divers organismes arrivent à survivre dans les endroits les plus inhospitaliers sur Terre nous a inspiré des techniques pour transformer le froid en allié de la vie. La quête du « froid fabriqué » a permis le développement de machines qui ont incontestablement révolutionné notre façon de vivre.

Objectifs de l'exposition

Le froid est un sujet à la fois poétique et tangible, attractif et populaire. L'exposition *Froid* propose une exploration du froid selon trois registres : celui du corps humain et du vivant, celui de la vie quotidienne et, enfin, celui de la science et de la technologie. Immérgés dans chacun de ces trois univers, les élèves prendront alors conscience que l'étude et la conquête du froid ont permis d'ouvrir des horizons insoupçonnés et de relever de nouveaux défis.

L'exposition traitera le froid sous plusieurs angles : physico-chimique, biologique, technique, quotidien et pratique. Son but est de proposer une expérience de visite et non un catalogue des propriétés et des applications liées au froid. Pour ce faire, l'exposition ne vise pas à l'exhaustivité et certains aspects liés au froid (le climat, la glaciologie, les loisirs et sports du froid) ne sont pas développés.

Pour chaque élève, le froid peut évoquer des sensations, des images ou des applications. Cette exposition lui donnera les clés pour appréhender les mécanismes qui se cachent derrière ces phénomènes ou ces usages. Elle lui proposera des repères concrets pour lui permettre de se forger une idée globale de ce qui se cache derrière le mot « froid ».

1.2.1 Repères

Du point de vue de la physique, le mot « froid » cache deux notions différentes :

- La première est en lien avec la notion de température : « froid » est donc synonyme de « basse température » ;
- La seconde est liée à la notion de transfert d'énergie thermique : refroidir un corps, c'est-à-dire abaisser sa température, revient à effectuer un transfert de chaleur de ce corps vers un autre. « Froid » désigne donc une quantité d'énergie extraite d'un corps.

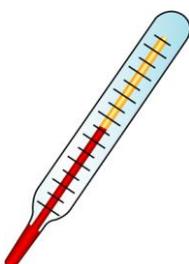
Froid, quel froid ?

Ce premier audiovisuel, situé à l'entrée de l'exposition, constitue une introduction aux deux notions-clés de l'exposition : la température et la chaleur. Il explique également la notion de l'agitation thermique qui est liée à la notion de température et à celle du zéro absolu. Il présente enfin deux échelles de mesure de la température : Celsius et Kelvin.

Cette première séquence intitulée « repères » a pour objectif de familiariser vos élèves avec la notion de froid en tant que basse température. Bien évidemment, selon que l'on parle du froid dans le cadre de la vie quotidienne, dans un cadre biologique ou encore dans celui de la physique des basses températures, on ne se réfère pas au même domaine de température. Ainsi, un corps humain peut être qualifié de froid à partir de 35-36 °C. Au quotidien, le froid peut être associé aux températures atteintes artificiellement par des machines frigorifiques comme les réfrigérateurs (aux alentours de 5 °C) ou les congélateurs (- 18 °C). Pour les chercheurs des basses températures, il se situe bien en dessous. Enfin, il existe ce qu'on pourrait désigner comme « froid absolu », à - 273,15 °C, une température qu'il est impossible d'atteindre mais dont on peut s'approcher autant que l'on veut... en s'en donnant les moyens.

L'échelle de température

Cet espace, qui matérialise une échelle des températures, constitue la colonne vertébrale de l'exposition. Il s'agit d'un dispositif muséographique se présentant sous la forme d'une allée emplies d'effets lumineux et sonores. Les élèves s'y déplacent vers des températures toujours plus basses jusqu'à buter sur un point limite, le zéro absolu.



Dès l'entrée de l'exposition, les élèves accèdent à cette échelle par un jalon correspondant à 37 °C, la température interne de leur corps. Devant eux, des jalons matérialisent des températures de plus en plus basses correspondant à des phénomènes, objets, pratiques ou applications liés aux « différents froids » qu'ils pourront ensuite explorer dans les trois espaces défis.

L'asymétrie entre le « chaud » et le « froid » est portée par deux aménagements aux extrémités de l'espace : d'une part, un miroir reflétant la perspective linéaire des graduations de température en signifiant la continuité de l'échelle vers les hautes températures et, d'autre part, une installation lumineuse symbolisant le zéro absolu et suggérant qu'il s'agit d'une limite infranchissable.

Un éclairage dynamique avec des sources de lumière rotatives traduit dans l'espace la diminution de l'agitation thermique à mesure de la progression dans l'allée. Cet environnement lumineux et sonore contribue à l'intention de ne pas donner une impression de simple linéarité. En effet, les pas entre les différentes graduations de cette échelle, même s'ils ont la même valeur, ne sont pas vraiment équivalents : abaisser la température d'une substance de - 263 °C à - 273 °C est loin d'être aussi facile que de l'abaisser de 20 °C à 10 °C. S'approcher des températures proches du zéro absolu relève de l'exploit.

Associés aux jalons de température, des visuels légendés représentent un phénomène, un endroit, un objet ou une application et accompagnent la progression dans l'allée. En voici quelques exemples : la température la plus basse enregistrée chez l'être humain vivant (12 °C), la température à l'intérieur d'un réfrigérateur (4 °C), la température à l'intérieur d'un congélateur (- 18 °C), la température la plus basse jamais estimée sur Terre (- 93,2 °C), la température à laquelle l'oxygène devient liquide sous pression atmosphérique (- 182,96 °C), la température moyenne du fond diffus cosmologique (- 270,42 °C), etc.



1.2.2 Les défis pour le vivant

Quels sont les effets du froid sur le vivant ? Comment notre corps réagit-il à une baisse de la température extérieure ? Quels sont les dégâts – ou parfois les bienfaits – qui peuvent en résulter ? Quels sont les astuces et les moyens pour s'en protéger ? Comment les animaux et les plantes peuvent-ils survivre dans les endroits les plus froids de notre planète ?

Quelles sont les techniques qui utilisent le froid pour étudier, conserver ou guérir le vivant ? Quelle place occupe le froid dans l'imaginaire collectif et dans la science-fiction ?

Trois îlots thématiques constituent cette séquence.

- Humaines face au froid ;
- Animaux et plantes : composer avec le froid ;
- guérir grâce au froid ?

1.2.2.1 Humains face au froid

✚ L'objectif de cet îlot est de décortiquer les mécanismes que le corps humain met en place lorsqu'il est confronté à une baisse de température, d'exposer les dangers que nous encourons par grand froid, de présenter les astuces permettent de s'en protéger (comportement, vêtements) et de mettre en scène l'ingéniosité et la créativité de l'être humain face au froid qui le menace.

Nous sommes des organismes homéothermes : nos organes vitaux ne fonctionnent normalement que lorsque notre température corporelle reste constante. Notre corps est doté de thermorécepteurs qui s'activent lorsque la température extérieure descend dangereusement. Des mécanismes, comme les frissons ou la chair de poule, se déclenchent ainsi, tentant de produire plus de chaleur et d'équilibrer notre température interne. Cependant, l'exposition prolongée de notre corps à des températures en dessous de 0 °C peut provoquer des dégâts irréversibles et même conduire à la mort. Les explorateurs des pôles et les peuples de l'Arctique connaissent bien ces dangers ; ils ont une relation particulière avec le froid, dont des récits et des légendes témoignent.

Regarde-toi quand t'as froid !

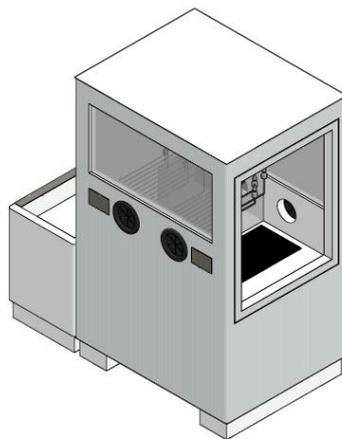
Dans ce premier élément, vos élèves sont invités à entrer par petit groupe de trois ou quatre à l'intérieur d'une cabine dans laquelle la température est comprise entre 0 °C et 5 °C. Un grand écran les attend. Une voix les interpelle et un audiovisuel explique les mécanismes du corps humain face au froid : la thermorégulation.

→ La thermorégulation représente l'ensemble des processus nous permettant de maintenir notre température interne dans des limites normales, quels que soient notre niveau métabolique ou la température ambiante. Cette température se situe normalement entre 36,5 °C et 37,5 °C. Elle repose sur un équilibre constant entre les apports et les pertes de chaleur.

Son contrôle est principalement assuré par une partie du cerveau appelée l'hypothalamus, qui est le centre de contrôle de la thermorégulation et qui réagit aux fluctuations de température provenant de divers récepteurs tel que la peau.

Le vent, un ennemi redoutable

Un par un, les élèves sont invités à tester différentes matières afin de mettre à l'épreuve leurs propriétés coupe-vent et/ou coupe-froid. Pour cela, ils choisissent et enfilent des "manchons" réalisés en différents matériaux : coton, laine, Gore-Tex, etc. Ils glissent leurs avant-bras dans un décor sous vitrine où il fait entre 0 et 5 °C. La vitrine est séparée en deux : d'un côté il n'y a pas de vent, de l'autre souffle un vent de 30 km.h⁻¹.



→ Notre corps dépense de l'énergie pour essayer de maintenir une pellicule d'air chaud à la surface de notre peau. Celle-ci isole notre corps de l'extérieur et permet d'éviter un transfert de chaleur vers l'extérieur. Quand il y a du vent, cette pellicule d'air est balayée et notre corps est directement en contact avec l'air extérieur qu'il n'a pas le temps de réchauffer – d'où la sensation de froid. Cette sensation est accentuée par le fait que, privée de l'isolant constituée par la pellicule d'air chaud, l'humidité de la peau s'évapore pour accentuer encore le refroidissement. La combinaison des deux donne le refroidissement éolien. L'humain utilise donc des vêtements réalisés dans différents matériaux pour se protéger du froid et du vent.

Le concept de refroidissement éolien a été développé aux États-Unis par les scientifiques et explorateurs Paul Siple (1908 – 1968) et Charles Passel (1915 – 2002) juste avant l'entrée de leur pays la Seconde Guerre mondiale. Leur formule exprimait la perte de chaleur en joule par mètre carré de peau exposée et par heure. Bien évidemment, une telle unité n'était pas parlante pour le grand public. Aussi, en 2001, le Canada, les États-Unis et le Royaume-Uni ont mis en place un nouvel indice de refroidissement éolien s'exprimant par un nombre (R_C) ressemblant à la température en degré Celsius, mais sans unité. Sa valeur équivaut à la sensation ressentie sur la peau par une journée calme à cette température.

Pour un vent soufflant jusqu'à 3 milles par heure (soit $4,8 \text{ km.h}^{-1}$), R_C se calcule à l'aide de la formule $R_C = T_C + 0,2(0,1345 T_C - 1,59)v$ où T_C est la température ambiante exprimée en degré Celsius et v la vitesse du vent exprimée en kilomètre par heure.

Au-delà, il convient d'utiliser la formule $R_C = 13,12 + 0,6215 T_C + (0,3965 T_C - 11,37)v^{0,16}$.

Le tableau ci-dessous donne la valeur de l'indice de refroidissement éolien pour différentes vitesses du vent et différentes températures de l'air ambiant, mesurée sous abri du vent, du Soleil et des intempéries. Les températures (lignes) vont de $+10 \text{ °C}$ à -50 °C par pas de 5 °C et les vitesses du vent (colonne) de 0 à 100 km.h^{-1} par pas de 5 km.h^{-1} . Les couleurs des cases du tableau correspondent à une quantification des risques pour la santé, dévoilés en page suivante.

Température de l'air ambiant (°C)

	+10	+5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
0	+10,0	+5,0	0	-5,0	-10,0	-15,0	-20,0	-25,0	-30,0	-35,0	-40,0	-45,0	-50,0
5	+9,8	+4,1	-1,6	-7,3	-12,9	-18,6	-24,3	-30,0	-35,6	-41,3	-47,0	-52,6	-58,3
10	+8,6	+2,7	-3,3	-9,3	-15,3	-21,2	-27,2	-33,2	-39,2	-45,1	-51,1	-57,1	-63,0
15	+7,9	+1,7	-4,4	-10,6	-16,7	-22,9	-29,1	-35,2	-41,4	-47,6	-53,7	-59,9	-66,1
20	+7,4	+1,1	-5,2	-11,6	-17,9	-24,2	-30,5	-36,8	-43,1	-49,4	-55,7	-62,0	-68,3
25	+6,9	+0,5	-5,9	-12,3	-18,8	-25,2	-31,6	-38,0	-44,5	-50,9	-57,3	-63,7	-70,2
30	+6,6	+0,1	-6,5	-13,0	-19,5	-26,0	-32,6	-39,1	-45,6	-52,1	-58,7	-65,2	-71,7
35	+6,3	-0,4	-7,0	-13,6	-20,2	-26,8	-33,4	-40,0	-46,6	-53,2	-59,8	-66,4	-73,1
40	+6,0	-0,7	-7,4	-14,1	-20,8	-27,4	-34,1	-40,8	-47,5	-54,2	-60,9	-67,6	-74,2
45	+5,7	-1,0	-7,8	-14,5	-21,3	-28,0	-34,8	-41,5	-48,3	-55,1	-61,8	-68,6	-75,3
50	+5,5	-1,3	-8,1	-15,0	-21,8	-28,6	-35,4	-42,2	-49,0	-55,8	-62,7	-69,5	-76,3
55	+5,3	-1,6	-8,5	-15,3	-22,2	-29,1	-36,0	-42,8	-49,7	-56,6	-63,4	-70,3	-77,2
60	+5,1	-1,8	-8,8	-15,7	-22,6	-29,5	-36,5	-43,4	-50,3	-57,2	-64,2	-71,1	-78,0
65	+4,9	-2,1	-9,1	-16,0	-23,0	-30,0	-36,9	-43,9	-50,9	-57,9	-64,8	-71,8	-78,8
70	+4,7	-2,3	-9,3	-16,3	-23,4	-30,4	-37,4	-44,4	-51,4	-58,5	-65,5	-72,5	-79,5
75	+4,6	-2,5	-9,6	-16,6	-23,7	-30,8	-37,8	-44,9	-51,9	-59,0	-66,1	-73,1	-80,2
80	+4,4	-2,7	-9,8	-16,9	-24,0	-31,1	-38,2	-45,3	-52,4	-59,5	-66,6	-73,7	-80,8
85	+4,3	-2,9	-10,0	-17,2	-24,3	-31,5	-38,6	-45,7	-52,9	-60,0	-67,2	-74,3	-81,4
90	+4,1	-3,1	-10,2	-17,4	-24,6	-31,8	-39,0	-46,1	-53,3	-60,5	-67,7	-74,9	-82,0
95	+4,0	-3,2	-10,4	-17,7	-24,9	-32,1	-39,3	-46,5	-53,7	-61,0	-68,2	-75,4	-82,6
100	+3,9	-3,4	-10,6	-17,9	-25,1	-32,4	-39,6	-46,9	-54,1	-61,4	-68,6	-75,9	-83,1

Vitesse du vent
(km.h^{-1})

$0,0 < R_c$	Pas de risque de gelures ni d'hypothermie
$-10,0 < R_c \leq 0,0$	Faible risque de gelures
$-28,0 < R_c \leq -10,0$	Faible risque de gelures et d'hypothermie
$-40,0 < R_c \leq -28,0$	Risque modéré de gelures en 10 à 30 minutes de la peau exposée et d'hypothermie
$-48,0 < R_c \leq -40,0$	Risque élevé de gelures en 5 à 10 minutes de la peau exposée et d'hypothermie
$-55,0 < R_c \leq -48,0$	Risque très élevé de gelures en 2 à 5 minutes sans protection intégrale ni activité
$R_c \leq -55,0$	Danger ! Risque extrêmement élevé de gelures en moins de 2 minutes et d'hypothermie. Il est impératif de rester à l'abri.

Écouter les explorateurs

Une installation sonore permet aux élèves d'écouter Jean-Louis Etienne, aventurier et explorateur des pôles, leur relatant quelques morceaux de sa vie quotidienne dans le grand froid lors de son expédition en 1986 où il a marché 63 jours, seul sur la banquise, pour atteindre le pôle Nord. Les élèves découvrent dans un second temps des photographies de cette expédition.



→ Certains humains sont ou ont été confrontés au grand froid, à des températures inférieures à $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Insoutenable ! Quelles sensations ont-ils ? Quels changements ont-ils pu percevoir dans leur corps et dans leur quotidien ?

1.2.2.2 Animaux et plantes : composer avec le froid

- Cet îlot s'intéresse au rôle du froid dans le développement du vivant. Son objectif est de faire découvrir aux élèves les phénomènes se cachant derrière les étonnants mécanismes adaptatifs des organismes extrémophiles face au froid.

Il faut bien distinguer les animaux endothermes des animaux ectothermes. La température corporelle et les fonctions vitales des premiers ne se modifient pas selon la température extérieure. Leurs caractéristiques physiques leur permettent de maintenir leur température interne stable : couche de graisse et fourrure (isolation thermique), rapport « surface sur volume » le plus bas possible, petite taille des extrémités, comportement collectif, etc. Quant aux ectothermes, leur température corporelle suit la température ambiante et ils survivent grâce à plusieurs réactions physiologiques : diminution du métabolisme avec l'abaissement de la température, synthèse d'antigel, déshydratation, etc.

De la même manière, les plantes possèdent des mécanismes qui garantissent leur survie et leur développement quand la température baisse. Cependant, le froid n'est pas forcément un ennemi à combattre. Certaines plantes, même placées dans des conditions favorables, sont incapables de fleurir si elles n'ont pas subi l'influence préalable du froid. Bien évidemment, tout dépend de quel froid on parle...

L'endurcissement au gel

Cet élément présente quatre dispositifs du type « boule à neige » correspondant aux quatre saisons avec inclusion de plantes factices dans un paysage saisonnier. Les dispositifs sont associés à une courbe expliquant l'endurcissement au gel. Un graphisme permet de suivre l'évolution d'un bourgeon au fil de l'année et d'expliquer le rôle des basses températures dans l'évolution de la plante.



→ Sous nos climats, la tolérance des végétaux au froid s'acquiert progressivement avant l'hiver. Au printemps et en été, ils ne supportent pas des températures inférieures à $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, alors qu'en hiver, ils résistent à des températures de l'ordre de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'endurcissement au gel est perdu dès l'élévation des températures à la fin de l'hiver. C'est pourquoi les gels de printemps sont plus dangereux que les températures hivernales très basses.

Au moment de leur récolte, les semences de nombreuses espèces de climats tempérés sont incapables de germer dans des conditions favorables ($15 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, oxygénation et humidité correctes du sol, lumière). C'est le froid hivernal qui permet leur germination au printemps suivant ; c'est la levée de dormance par le froid.

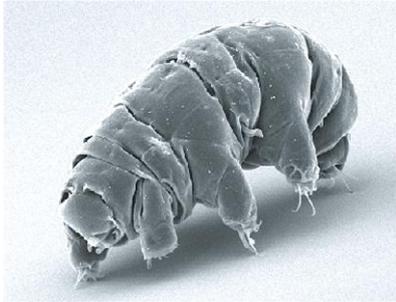
Ectothermes ou endothermes ?

Une fresque opposant ectothermes et endothermes, ainsi qu'un certain nombre de leurs mécanismes d'adaptation au froid, est proposée à vos élèves.



L'analyse des mécanismes d'adaptation de six animaux exposés sous forme de sculptures illustre ensuite l'incroyable diversité des solutions que la nature emploie pour perpétuer la vie. Comment les ectothermes font-ils pour ne pas laisser les cristaux de glace détruire leurs cellules ? Comment les endothermes parviennent-ils à maintenir leur température stable malgré une température ambiante basse ?

Les ectothermes



Le tardigrade, dont plus de mille espèces sont connues aujourd'hui, mesure environ 1 mm. Il peut survivre dans des environnements très hostiles, comme le vide spatial. Il résiste à des températures proches du zéro absolu et jusqu'à 150 °C ! Il ne semble pas non plus incommodé par des pressions intenses, ni par des doses de rayonnement qui nous seraient mortelles. Le mécanisme qu'il utilise pour faire face au froid est sa capacité à se déshydrater presque totalement et à entrer dans un état de cryptobiose : son métabolisme est totalement à l'arrêt.



La grenouille des bois synthétise des protéines antigel abaissant le point de congélation et des protéines permettant un échange osmotique entre les espaces intra et extracellulaire : les cristaux se forment à l'extérieur des cellules, qui ne sont donc pas détruites.



Le poisson des glaces (famille des Channichthyidae) produit des protéines antigel lui permettant d'abaisser la température de congélation de l'eau.

Les endothermes



L'ours polaire possède une couche de graisse, une couche de sous-poils et une couche de poils qui l'isolent thermiquement de l'extérieur. Sa corpulence et la petite taille de ses extrémités sont des caractères adaptatifs qui jouent en sa faveur face au froid. Un schéma en relief compare la morphologie de l'ours polaire à celle de l'ours brun.

Note explicative : la chaleur Q_{gain} produite par un ours l'est par tout son corps. Assimilons celui-ci à une sphère de rayon R . Q_{gain} est proportionnelle au volume de la sphère, c'est-à-dire à R^3 . C'est par sa surface, proportionnelle à R^2 , que la sphère perd une quantité de chaleur Q_{perte} . Ainsi, le rapport $\frac{Q_{perte}}{Q_{gain}}$ est proportionnel à $\frac{1}{R}$. Plus l'animal est gros, plus il minimise ses pertes thermiques.



Le manchot empereur, oiseau endémique de l'Antarctique, possède une bonne isolation thermique grâce à sa graisse et à une densité record en plumes. Sa corpulence, son système sanguin, son comportement grégaire (regroupement en amas compact appelé *tortue*) constituent des aides précieuses face au froid. Un schéma en relief montre la circulation sanguine particulière du manchot empereur.



Le phoque possède une couche de graisse et, chez certaines espèces, un duvet imperméable. Le transfert de chaleur entre la peau et le corps est assuré par un système circulatoire sanguin très bien organisé.

→ Les organismes ectothermes ont la même température corporelle que celle du milieu extérieur ; elle n'est donc pas régulée par l'organisme. Ces organismes sont à opposer aux endothermes, qui contrôlent leur température corporelle grâce à leur métabolisme interne. Ils sont capables de réguler leur température interne pour la conserver dans une certaine fourchette compatible avec leur survie.

1.2.2.3 Guérir grâce au froid ?

✚ Cet îlot s'intéresse aux applications des technologies du froid dans les différents domaines de la biologie et de la médecine : cryothérapie, cryochirurgie, étude des cellules, conservation des tissus, du sang et des organes. Un éclairage est donné sur le rôle de l'eau, principal composant des organismes vivants, et de ses propriétés lorsque la température devient négative.

Dans certaines conditions, le froid se transforme en allié pour la vie. En 2014, deux chercheurs de l'Université d'Aix-Marseille ont annoncé avoir découvert, dans le sol gelé en permanence de l'extrême nord-est sibérien, un virus géant (*Pithovirus sibericum*) datant de 30 000 ans, qu'ils ont réussi à « ressusciter » après décongélation. Les biologistes sont déjà parvenus à cryoconserver des organes d'animaux, puis à les ramener à température ambiante pour les greffer avec succès ; ils ont même réussi à faire revenir à la vie des larves de mouches ou des tardigrades congelés. Divers cellules et tissus sont aujourd'hui cryoconservés et utilisés dans des contextes cliniques chez l'homme (spermatozoïdes, cellules de moelle osseuse, peau, etc.)

En médecine, l'hypothermie thérapeutique (températures de l'ordre de 32 °C) est aujourd'hui utilisée en réanimation médicale. Un froid plus intense (mais toujours supérieur à 0 °C) est également utilisé pour ses propriétés antalgiques, antihémorragiques et anti-inflammatoires. Quant au froid caractérisé par des températures inférieures à 0 °C, il est un outil indispensable en chirurgie (cryodestruction de lésions).

Enfin, le froid permet d'étudier le vivant dans d'autres contextes : grâce à son pouvoir « conservateur », les scientifiques obtiennent des renseignements sur les conditions de vie et de mort d'organismes (y compris l'humain) ayant vécu il y a des milliers d'années.

Cryomédecine

À l'aide d'un dispositif multimédia, les élèves découvrent les nombreux et variés usages du froid dans le monde médical. Ils doivent soigner des patients grâce à des techniques médicales utilisant un froid allant de 35 à – 196 °C. Des explications sont données sous forme de courtes séquences audiovisuelles et d'images.

→ Le froid est très sollicité dans le monde médical. Les techniques utilisées vont du « petit » au « grand » froid et ses usages sont variés : cryochirurgie, cryoconservation, cryodestruction, hypothermie thérapeutique...

Cryoconservation humaine, mythe ou réalité ?

Un audiovisuel au style décalé et au ton humoristique explique pourquoi « cryoconservation des humains ? On n'y est pas encore ! ». La cryogénisation prétend utiliser les techniques de la cryoconservation pour préserver des corps humains, dans l'optique de les ramener à la vie lorsque les progrès de la science le permettront. À l'heure actuelle, on n'arrive à cryoconservation de façon réversible que des cellules, des tissus, des vaisseaux sanguins ou de petits organes d'animaux : il est impossible de faire revenir un corps humain à la vie après une cryoconservation, celui-ci étant bien trop complexe. Cet élément donne l'occasion de soulever les questions d'ordre éthique qu'amène le désir de la cryoconservation de certains humains.



Point commun ? L'eau

À la croisée des espaces « Les défis pour le vivant » et « Les défis pour la société », cet élément illustre le fait que les organismes vivants (et par conséquent des aliments) sont constitués principalement d'eau. Lorsque la température de l'eau est abaissée en dessous de 0 °C, des cristaux se forment. Ces cristaux peuvent endommager les cellules des organismes vivants au point de rendre toute réparation ultérieure impossible.

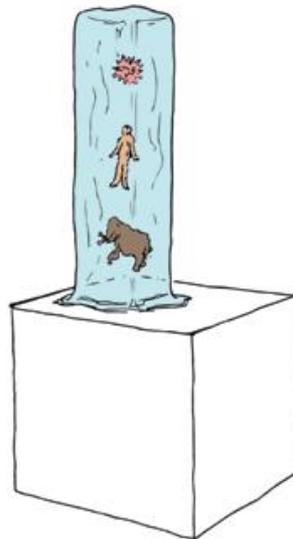
Cet élément explique que plus le refroidissement d'un organisme vivant ou d'un aliment est lent, plus les cristaux de glace formés seront gros, et plus le danger d'endommager les cellules est grand. Il explique enfin la différence entre congélation (refroidissement lent et progressif en dessous de 0 °C) et surgélation (refroidissement ultrarapide à - 18 °C).

→ Les animaux et les végétaux, et par conséquent les aliments, sont constitués principalement d'eau. Or, l'eau est un facteur de développement de microorganismes pathogènes, et donc de dégradation. Si la température d'un aliment est abaissée en dessous de 0 °C, l'eau est transformée en glace et donc éliminée en grande partie. Quand l'aliment est congelé, le refroidissement s'effectue lentement et entraîne la formation de cristaux de taille relativement importante. Les aiguilles tranchantes des cristaux peuvent ainsi percer et déchirer la paroi des cellules. En revanche, avec la surgélation, les denrées sont stabilisées par abaissement rapide de la température jusqu'à - 18 °C. Cette technique permet la formation de petits cristaux de glace qui ne détériorent pas l'aliment.

Dégeler le passé

Les élèves font face à un gros bloc de glace factice dans lequel se trouvent emprisonnés des objets représentant un mammouth, un humain et un virus.

→ Le froid (températures négatives) inhibe l'activité microbienne. Ainsi, les organismes momifiés par le froid des dizaines de milliers d'années avant notre ère sont extrêmement bien conservés et permettent aux chercheurs de travailler sur une "matière" presque vivante. Si les hommes pris dans les glaces sont rares, d'autres animaux habitant les régions froides comme le mammouth en Sibérie sont plus fréquemment retrouvés. Le froid conserve étonnamment bien le vivant qui est mort !



1.2.3 Les défis pour la société

Comment et pourquoi les humains utilisent-ils le froid naturel ?

Pourquoi a-t-on besoin d'une machine pour produire du froid ? Comment fonctionne une machine frigorifique ? Pourquoi fait-il froid dans un réfrigérateur ? Pourquoi un réfrigérateur réchauffe-t-il la pièce où il se situe ?

Pourquoi conserver les aliments au froid ? Quelle est la différence entre congélation et surgélation ? Qu'est-ce que la chaîne du froid ?

Pour quels objets ou pratiques de notre quotidien le froid joue-t-il un rôle important ?

Cette séquence s'organise autour de trois îlots thématiques :

- froid naturel, froid « fabriqué » ;
- fabriquer et utiliser le froid ;
- froid et alimentation.

1.2.3.1 Froid naturel, froid « fabriqué »

- ✚ L'objectif de cet îlot est de dresser un panorama de l'utilisation du froid naturel et de présenter les phénomènes permettant de faire du froid (évaporation, détente d'un gaz, mélanges réfrigérants).

Depuis la haute antiquité, les Hommes se sont servis du froid naturel pour conserver ou pour refroidir leurs aliments. Il y a cinq millénaires, les Égyptiens conservaient des denrées alimentaires dans des amphores enterrées, pour profiter de la température plus fraîche sous terre qu'en surface. Il y a trois mille ans, les Chinois stockaient la glace dans des fosses afin de l'utiliser pour élaborer des desserts glacés. Dans la Rome antique, on transportait les poissons du Rhin ou les huîtres d'Armorique dans de la neige ou de la glace naturelle que l'on pouvait trouver dans des boutiques. Du Moyen Âge jusqu'au XIX^e siècle, on les stockait dans des glacières.

Jusqu'au début du XX^e siècle, le marché de la glace naturelle était encore plus important que celui de la glace artificielle. La glace naturelle était soit issue naturellement des régions froides, soit issue, de manière discontinue, de l'eau des régions tempérées gelées par le froid hivernal. Le froid pouvait également être produit en ayant recours à des phénomènes naturels (et non par une machine, comme on le verra dans l'îlot suivant). L'évaporation et les mélanges réfrigérants sont deux techniques anciennes qui sont encore utilisées.

Le saviez-vous ?

Cet élément propose quatre questions écrites sur quatre bacs à crème glacée. Les réponses se trouvent sur des bâtonnets factices de crème glacée.

→ Le bonbon à la menthe rafraîchit-il vraiment la bouche ?

Non ! La sensation de froid n'est qu'une illusion créée par le menthol, molécule obtenue à partir d'extraits de menthe. En réagissant avec la salive, le menthol active des cellules sensibles à la température qui tapissent le nez et la bouche. Le cerveau reçoit le message de ces millions de thermorécepteurs et l'interprète comme du froid, alors qu'en fait la température reste stable.

→ Le secret du frigo est-il le même que celui de la transpiration ?

Oui ! Ce secret, c'est l'évaporation. Quand nous avons chaud, nous transpirons ; la sueur s'évapore et cela rafraîchit notre peau. Même principe pour le frigo, machine frigorifique à compression de vapeur : il utilise la vaporisation d'un liquide pour refroidir. Il va même plus loin : il récupère la vapeur produite et la condense pour obtenir de nouveau du liquide... en dégageant de la chaleur dans la pièce !

→ Un produit frais est-il de meilleure qualité qu'un surgelé ?

Oui et non... le surgelé vaut largement le frais si les produits sont de première fraîcheur et si la baisse de température a été ultrarapide. Une congélation trop lente risque d'altérer les textures. La qualité sanitaire exige de la rigueur dans la préparation et un respect absolu de la chaîne du froid. Mais il en est de même pour beaucoup de produits frais !

→ Avez-vous déjà accueilli un yaourt espion ?

Peut-être, et ce n'est pas de la science-fiction ! Pour vérifier la chaîne du froid, les chercheurs utilisent des enregistreurs de température ou de simples pastilles dont la couleur change si une température seuil est dépassée. En 2012, des consommateurs qui décapsulaient leur yaourt ont découvert un enregistreur noyé dans un gel et un message leur demandant de poster le dispositif en échange d'une compensation financière.



Histoires de froid

Une vitrine présentant des images d'archives et des objets historiques retrace les grandes étapes de l'histoire de l'utilisation du froid naturel et « fabriqué » depuis l'Antiquité jusqu'à aujourd'hui selon plusieurs thématiques : utilisation de la glace naturelle, froid fabriqué, transport frigorifique, réfrigérateurs domestiques.

Froid sans frigo

On présente ici des objets ou des techniques ancestrales utilisant des phénomènes naturels produisant du froid : frigo du désert, gargoulette, glacière....



→ L'utilisation du froid avant l'avènement des machines frigorifiques ne concerne pas uniquement le froid récupéré par la glace formée naturellement. Il concerne le froid produit à l'instigation de l'humain en utilisant des phénomènes naturels provoquant des échanges de chaleur importants entre un objet et son environnement. L'évaporation et l'abaissement cryoscopique (mélanges réfrigérants) sont deux exemples de ce type de phénomènes qui sont à la base d'objets ou des techniques ancestrales utilisés pour le refroidissement des aliments.

Faire du froid au naturel

L'élève découvre cinq objets factices posés à côté d'un grand écran horizontal : un frigo désert, un seau à glace avec une boisson, une caisse remplie de morceaux de glace carbonique avec une poche de plasma sanguin, un spray, une sorbetière. Il est incité à choisir un objet et à le poser sur l'écran à l'endroit où est donnée la définition du phénomène qui correspond à son principe de fonctionnement : évaporation, fusion, sublimation, détente de gaz, abaissement cryoscopique. S'il réussit, une séquence vidéo présentant l'explication du principe de fonctionnement de l'objet se déclenche.

→ La fusion, **l'évaporation (1)**, la sublimation, **l'abaissement cryoscopique (2)** et **la détente d'un gaz (3)** sont des phénomènes naturels qui permettent d'abaisser la température d'objets ou de milieux. Ils ont été largement utilisés - et le sont toujours - quand il n'y a pas d'accès à une machine frigorifique ou quand le besoin de refroidir est ponctuel.

1. L'évaporation. Prenons le cas d'une substance omniprésente sur Terre : l'eau, de formule chimique H_2O . Des interactions attractives de nature électrostatique s'établissent entre les atomes d'hydrogène d'une molécule d'eau et les atomes d'oxygène de ses voisines. Elles portent le nom de *liaisons hydrogène* et confèrent à l'eau liquide des propriétés tout à fait remarquables :

- un grand pouvoir de cohésion couplé à une forte adhérence entre elle et la paroi des tissus végétaux, qui facilite sa montée dans les tiges des plantes malgré la gravité ;
- une tension superficielle importante dont le bénéfice pour une membrane cellulaire réside dans la possibilité de retenir un plus grand volume d'eau pour une surface donnée ;
- une masse volumique plus faible à l'état solide qu'à l'état liquide : l'eau se dilate quand elle gèle. Aussi la glace flotte-t-elle et en hiver, elle joue le rôle d'un isolant thermique empêchant le fond des rivières de geler et par là, préserve la vie ;
- un point d'ébullition élevé (100 °C sous une pression d'un bar), si on le compare à celui d'autres molécules comme le méthane CH_4 , l'ammoniac NH_3 et le fluorure d'hydrogène HF ;
- une capacité thermique massique importante, qui lui permet d'amortir les variations de température sur Terre comme dans les cellules des êtres vivants. La capacité thermique massique définit la quantité d'énergie à apporter pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance ;
- **une énergie de vaporisation considérable, que notre corps met à profit pour abaisser sa température par l'intermédiaire de la transpiration.** L'énergie de vaporisation est l'énergie qu'il faut fournir à l'unité de masse d'un corps pour le faire passer de l'état liquide à l'état gazeux à température et pression constante.

Bien que la molécule et le changement de phase mis en jeu soient différents, un phénomène de même nature se déroule sur la lointaine planète naine Pluton. À l'aide du *Submillimeter Array*, un réseau de huit radiotélescopes de 6 m de diamètre situés sur l'île d'Hawaï, des astronomes ont réussi à mesurer en 2005 la température de sa surface : -230 °C, soit 10 °C de moins qu'attendu. Une fraction du rayonnement solaire incident absorbé par cette surface, composée presque exclusivement de diazote solide, est utilisée pour sublimer la glace en gaz, au lieu de la réchauffer. Ainsi, l'évaporation d'un liquide ou la sublimation d'un solide peut refroidir une surface... tout comme la sudation refroidit la peau.

2. L'abaissement cryoscopique. La présence d'un soluté abaisse, parfois significativement, la température de solidification de l'eau, qui demeure liquide à des températures inférieures à 0 °C. Ainsi, l'eau de mer, dont la salinité moyenne s'élève à 35 g.L⁻¹, ne se solidifie qu'à $-1,8$ °C. Le mélange eau – chlorure de sodium $NaCl$ peut rester liquide jusqu'à $-21,1$ °C avec la quantité adéquate de $NaCl$.

Avec le chlorure de calcium (CaCl_2), on descend à $-51,6\text{ }^\circ\text{C}$. Il est possible d'atteindre des mélanges se solidifiant à des températures encore plus basses. On sait, par exemple, que l'ion perchlorate ClO_4^- associé aux ions sodium, magnésium et calcium dans des molécules plus ou moins hydratées forme des sels extrêmement hygroscopiques (ils absorbent l'humidité de l'air), très solubles et, en solution aqueuse, ils peuvent former des mélanges liquides jusqu'à $-77\text{ }^\circ\text{C}$. Des solutions aqueuses de sulfates (MgSO_4 et FeSO_4) et de chlorures (FeCl_3 , MgCl_2 et CaCl_2) présentent un comportement tout à fait similaire à celui des solutions de sels de perchlorates. Enfin, la solution aqueuse d'ammoniac, l'ammoniaque, peut demeurer liquide jusqu'à $-100\text{ }^\circ\text{C}$ dans certaines conditions !

3. La détente d'un gaz. Le premier principe de la thermodynamique est une loi de conservation de l'énergie adaptée aux systèmes thermodynamiques. Dans le cas d'un système fermé, donc sans échange de matière avec le milieu extérieur, ce principe se traduit par l'égalité entre la variation de l'énergie du système et la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, par transfert thermique et transfert mécanique. On l'exprime mathématiquement par la relation $\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = W + Q$ où :

- ΔE est la variation d'énergie du système ;
- ΔU est la variation de son énergie interne correspondant aux variations d'énergies cinétiques et potentielles microscopiques des particules qui le constituent ;
- ΔE_c est la variation de son énergie cinétique macroscopique ;
- ΔE_p est la variation de son énergie potentielle due aux interactions conservatives avec l'extérieur ;
- W est le travail des forces non conservatives appliquées au système ;
- Q est le transfert thermique reçu, c'est-à-dire la quantité d'énergie que le milieu extérieur cède au système par trois processus : la conduction, la convection et le rayonnement.

Si le système est au repos, les variations d'énergie cinétiques et potentielles sont nulles et le premier principe de la thermodynamique se réduit à $\Delta U = W + Q$.

Considérons la détente dans l'atmosphère d'un gaz assimilable à un gaz parfait (les interactions entre particules qui le composent sont uniquement des chocs élastiques). Cette hypothèse équivaut à ce que son énergie interne n'est fonction que de sa température – une fonction strictement croissante. Sans idée sur la nature de la transformation qu'on lui fait subir, on ne peut prévoir le signe de ΔU ni l'évolution de sa température.

Il est non seulement possible d'imaginer une transformation où le gaz se détend sans que sa température ne baisse, mais également une transformation où le gaz se détend tout en voyant sa température augmenter ! Il suffit pour cela que la quantité $W + Q = \Delta U$ soit positive.

Si les échanges thermiques avec l'extérieur sont négligeables (le gaz se détend dans des conduits calorifugés et/ou la détente est rapide), la transformation est dite *adiabatique*. Elle est caractérisée par $Q = 0$ et le premier principe se réduit à $\Delta U = W$. On montre que le travail de la force pressante exercée par l'atmosphère lors de la détente du gaz vaut $W = -P_{atm}(V_f - V_i)$ où V_i est le volume initial occupé par le gaz et $V_f (> V_i)$ son volume final. La variation d'énergie interne du gaz est donc négative. Il s'est refroidi lors de sa détente.

Trois questions-réponses concluent l'espace.

- Quel est le point commun entre le mécanisme de la transpiration et mon réfrigérateur ?
- Combien y a-t-il de machines frigorifiques dans le monde ? Combien y a-t-il de personnes travaillant dans le domaine du froid ?
- Et si le froid disparaissait du jour au lendemain ?

1.2.3.2 Produire et utiliser le froid

-  Cet îlot donne des clés pour comprendre le principe de fonctionnement des machines frigorifiques ainsi que les défis à relever pour les améliorer dans une problématique de développement durable. Par ailleurs, les élèves entrevoient le large éventail des applications du froid et se rendent compte de son rôle central dans différents secteurs de l'activité humaine.

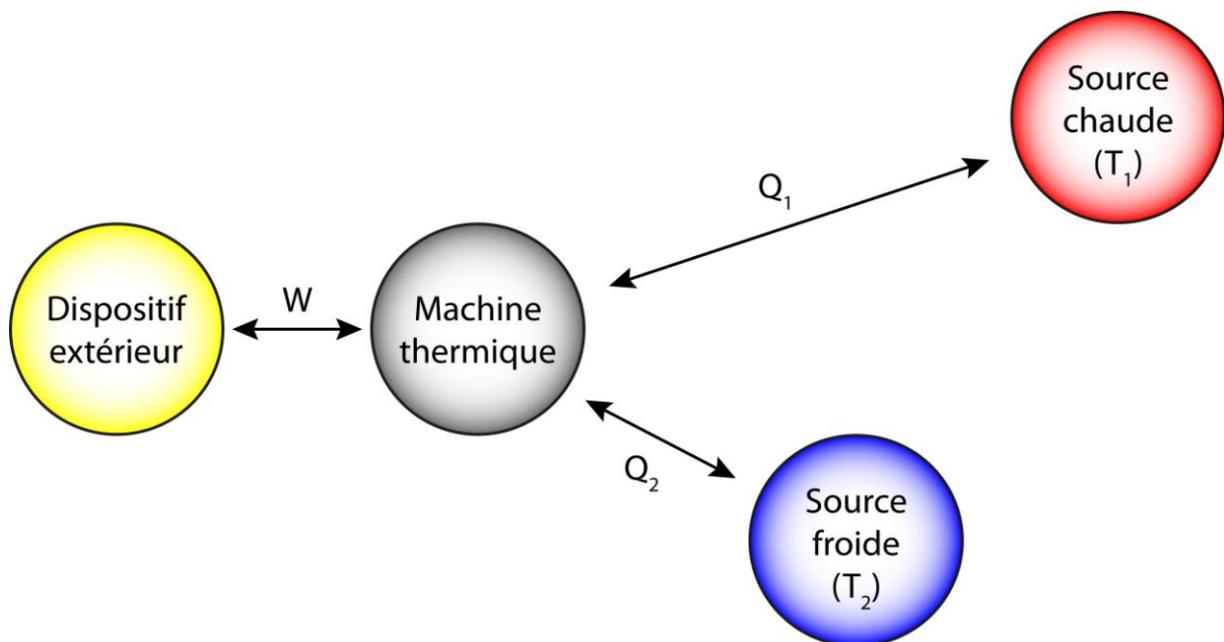
Il existe plusieurs types de machines produisant du froid de façon artificielle. Leur principe réside toujours en un transfert de chaleur à partir du système à refroidir vers l'environnement. Le principe le plus répandu est celui des systèmes mécano-frigorifiques à compression, qui utilisent la plupart un cycle de changement de phase. 90 % des machines produisant du froid (réfrigérateurs ou congélateurs domestiques, systèmes frigorifiques industriels, systèmes de conditionnement de l'air) sont des systèmes à compression. Il existe des réfrigérateurs à absorption de gaz, à effet Peltier, à moteur Stirling, des réfrigérateurs thermoacoustiques, magnétiques, etc.

À quoi ressemblerait notre monde sans froid ? Alimentation, industrie, médecine... tout serait différent si l'humain n'était pas arrivé à maîtriser la production de froid. Le large éventail des applications du froid joue un rôle essentiel et grandissant dans l'économie mondiale d'aujourd'hui.

Comment marche mon frigo ?

Un film d'animation explique qu'une machine frigorifique est, ce qu'en thermodynamique, on appelle une pompe à chaleur. Son principe est de faire subir à la chaleur un parcours « contre nature » : forcer la chaleur à circuler d'un objet froid (et le refroidir davantage) vers un objet chaud (en le réchauffant encore plus). Le cycle des machines frigorifiques à compression de vapeur est détaillé. Le principe des machines qui fondent leur fonctionnement sur d'autres systèmes est présenté brièvement.

→ Considérons un système subissant des cycles de transformations en échangeant du travail avec un dispositif extérieur et de la chaleur avec deux sources de chaleur de températures différentes T_1 et T_2 . Un tel système est appelé une machine thermique. W , Q_1 et Q_2 sont les énergies échangées par la machine thermique pour la totalité d'un cycle.



Si $W < 0$, la machine fournit du travail, c'est un moteur. L'application du premier principe de la thermodynamique ($W + Q_1 + Q_2 = 0$ pour un cycle) implique alors que, pour être un moteur, une machine thermique doit recevoir de la chaleur d'une source chaude ($Q_1 > 0$) et en céder une partie à une source froide ($Q_2 < 0$).

Si $W > 0$, la machine reçoit du travail, c'est un récepteur. Dans quel sens les échanges de chaleur sont-ils alors permis ? Voici les quatre possibilités de fonctionnement :

Si $Q_1 > 0$ et $Q_2 > 0$: impossible, en contradiction avec le premier principe.

Si $Q_1 > 0$ et $Q_2 < 0$: pas d'intérêt.

Si $Q_1 < 0$ et $Q_2 > 0$: machine frigorifique.

Si $Q_1 < 0$ et $Q_2 < 0$: pas d'intérêt.

L'efficacité ε d'une machine frigorifique est définie comme le rapport du froid produit Q_2 à l'énergie dépensée W : $\varepsilon = \frac{Q_2}{W}$. On montre que l'on peut l'écrire également sous la forme

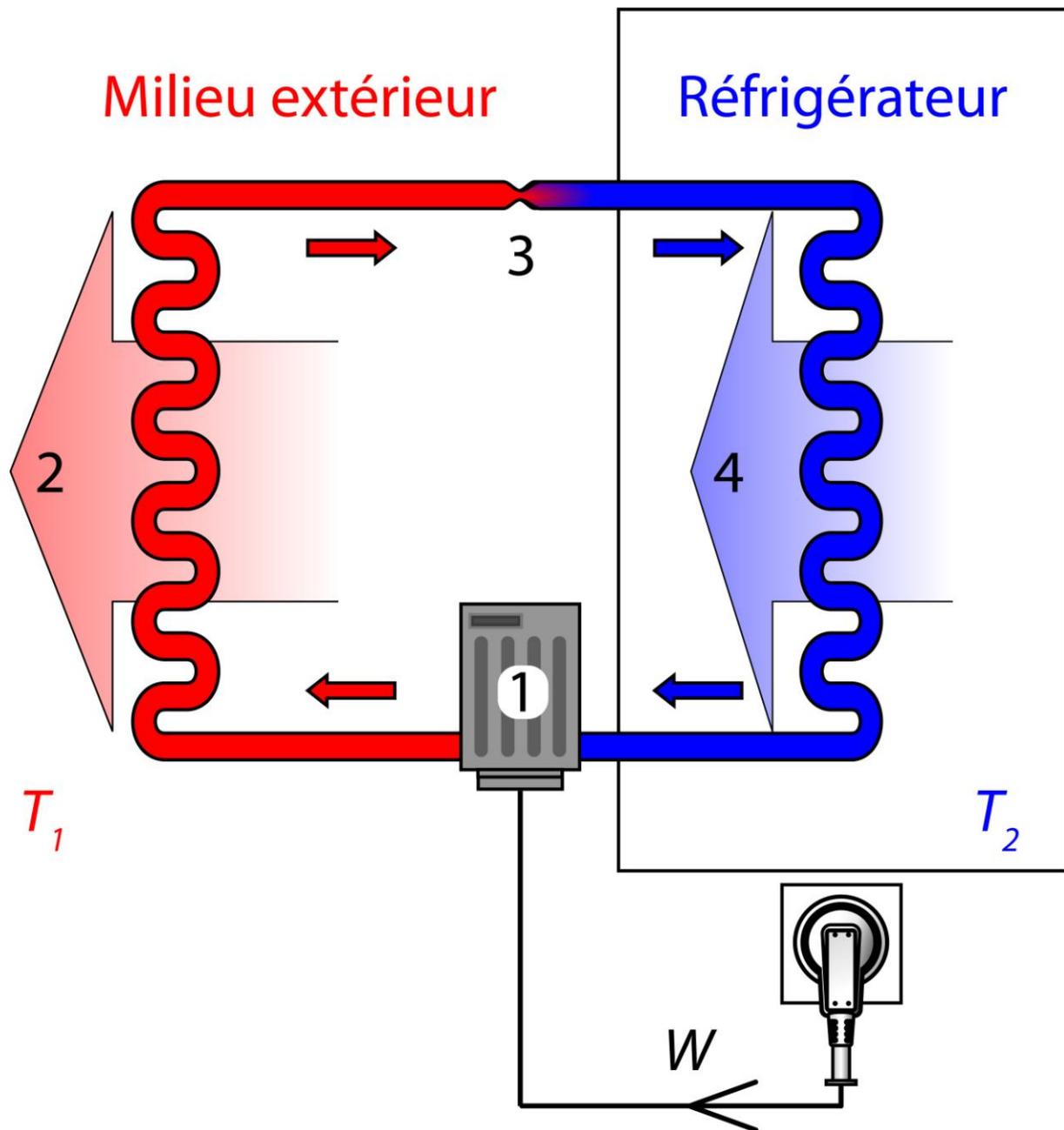
$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Ces considérations thermodynamiques étant posées, nous pouvons maintenant appréhender le fonctionnement d'un réfrigérateur.

Le compresseur est la pompe du circuit. Il permet de faire circuler un réfrigérant appelé *fluide frigorigène*. Nous considérons ici le 2-méthylpropane ou *isobutane* (C_4H_{10}). Le cycle se déroule en quatre étapes :

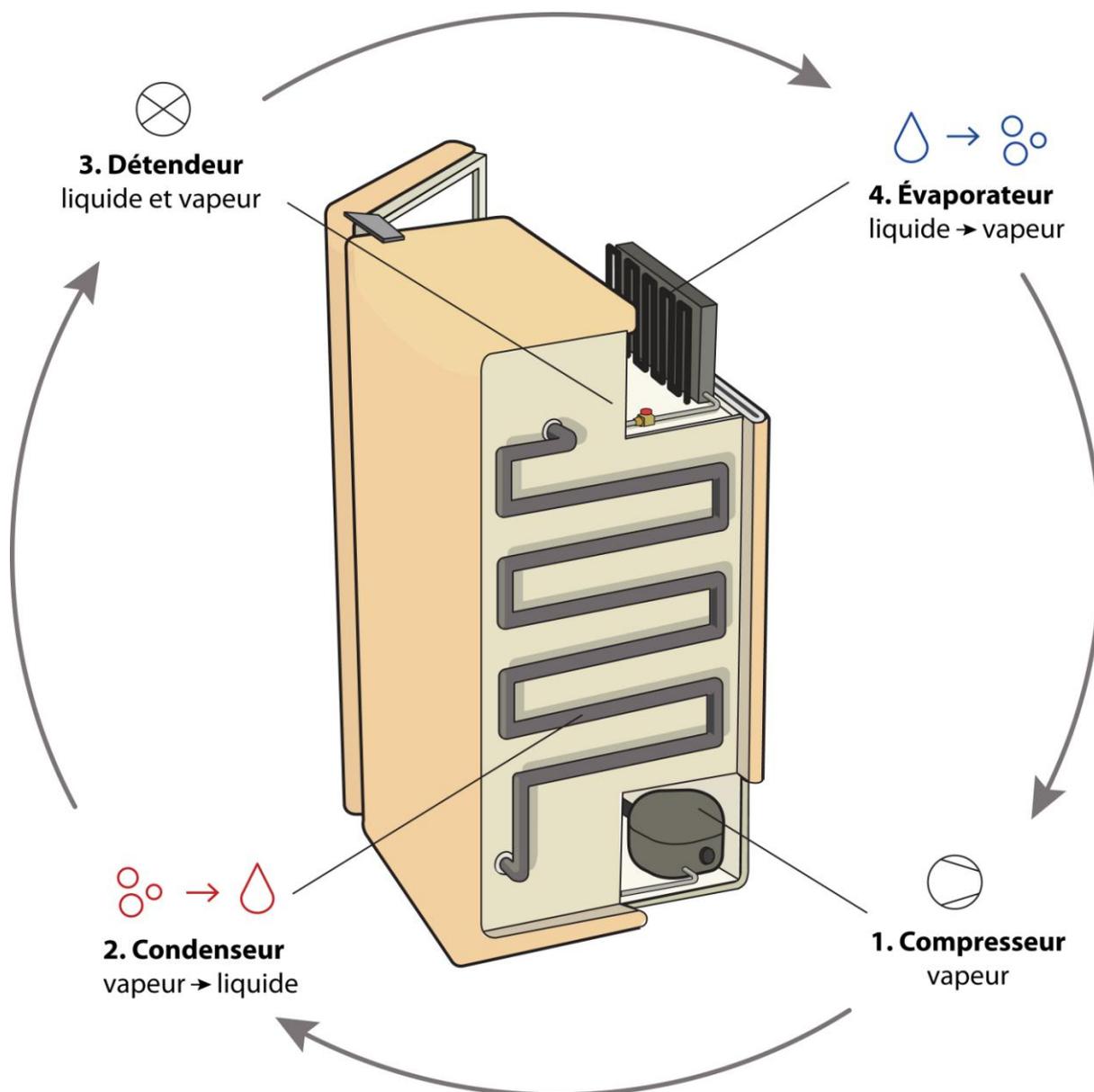
1. Le fluide frigorigène, sous forme gazeuse, arrive dans le **compresseur**, qui le comprime en faisant augmenter sa température jusqu'à 60 °C environ. Il le propulse ensuite dans le condenseur.
2. Le gaz arrive dans le **condenseur** (le serpentin qui se trouve à l'extérieur du réfrigérateur) à haute pression et à haute température. Il cède de la chaleur au milieu ambiant – l'air de la pièce – se refroidit jusqu'à environ 35 °C et se liquéfie.
3. Le liquide frigorigène, sous pression, passe ensuite dans le **détendeur** où il se détend. Sa pression chute, ce qui a pour effet de vaporiser une partie du fluide. Un tel changement de phase consomme de l'énergie et la chaleur est prise à la partie du réfrigérant encore liquide. La température a plongé jusqu'à environ – 20 °C.
4. Enfin, le fluide frigorigène à présent très froid et partiellement vaporisé circule dans un échangeur de chaleur, l'**évaporateur**, à l'intérieur du réfrigérateur. Il absorbe de la chaleur à l'air et aux aliments, les refroidit et s'évapore totalement.

Le fluide frigorigène décrit un cycle perpétuel fermé : il est (en théorie) recyclé indéfiniment. Quelles qualités doit-il posséder ? Il doit d'abord être doté de propriétés thermodynamiques adéquates : une température d'ébullition légèrement inférieure à la température que l'on souhaite atteindre dans le réfrigérateur, une enthalpie de vaporisation élevée, etc. Il ne doit pas être corrosif pour les composants mécaniques du système et doit respecter des normes de sécurité vis-à-vis de sa toxicité, de son inflammabilité et de la protection de l'environnement.



1. Compresseur
2. Condenseur
3. Détendeur
4. Évaporateur

Une puissance électrique W est fournie au réfrigérateur pour actionner le compresseur (1). Dans le condenseur (2), le fluide frigorigène cède une quantité de chaleur $Q_1 < 0$ au milieu extérieur. À son passage dans l'évaporateur (4), au sein même du réfrigérateur, il absorbe une quantité de chaleur $Q_2 > 0$: il refroidit donc son contenu.



Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur. D'après un schéma conçu par Daniele De Pietri, du laboratoire de recherche DensityDesign de l'École polytechnique de Milan (Italie).

Frigo éclaté

L'élève se retrouve face à un éclaté de système frigorifique à compression mécanique, dont il peut observer les différentes parties : compresseur, condensateur, détendeur et évaporateur. Les parties chaudes et froides sont accessibles au toucher.



Projection vers l'avenir

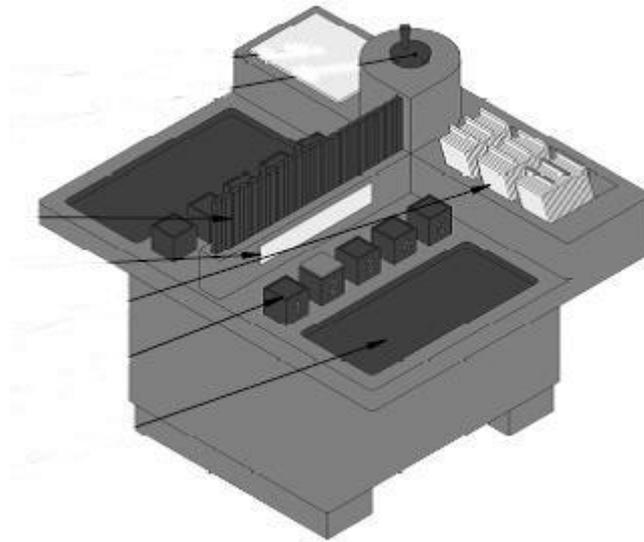
Une fresque graphique présente les grands enjeux du secteur du froid dans les années à venir : améliorer les performances des systèmes réfrigérants tout en réduisant leur impact sur l'environnement.

→ Les défis concernant l'amélioration des systèmes frigorifiques dans un souci environnemental se concentrent vers deux directions : la réduction des émissions néfastes des fluides frigorigènes (meilleur confinement, frigorigènes alternatifs), l'utilisation des nouvelles technologies permettant de remplacer les systèmes de compression mécanique lorsque cela est possible et l'augmentation de leur efficacité énergétique (utilisation des matériaux à changement de phase, des énergies renouvelables...) Ainsi, les fluides frigorigènes utilisés jusqu'au début des années 1930 pouvaient être toxiques, combustibles ou nécessitaient des compresseurs à très haute pression. On synthétisa alors et produisit à l'échelle industrielle des molécules moins dangereuses pour l'homme, comme les célèbres chlorofluorocarbures (CFC). Vers le milieu des années 1970, les scientifiques comprirent que les CFC étaient à l'origine de la destruction partielle et saisonnière de la couche protectrice d'ozone. Le protocole de Montréal de 1987, qui compte aujourd'hui 196 pays signataires plus l'Union européenne, visait et vise toujours à éradiquer les substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Les CFC ont donc été remplacés par des espèces plus respectueuses de la couche d'ozone, comme le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane ($C_2H_2F_4$). Malheureusement, elles sont, bien souvent, susceptibles de contribuer à l'effet de serre de manière très intense en cas de fuite, leur potentiel de réchauffement global pouvant atteindre des milliers de fois celui du dioxyde de carbone (CO_2). Par conséquent, on leur substitue maintenant des fluides frigorigènes de troisième génération comme le 2,3,3,3-tétrafluoropropène ($C_3H_2F_4$) ou l'isobutane dont le potentiel de réchauffement est beaucoup plus proche de celui du CO_2 .

Le froid est partout

Un jeu collectif permet d'aborder les applications du froid dans différents domaines industriels. Deux élèves s'affrontent sous les ordres d'un maître du jeu. Le maître du jeu choisit cinq cartes parmi une série portant des questions. Associées à chacune des questions, il y a la solution (le nom de l'objet) et une explication.

Chaque joueur a devant lui un bac rempli de photos d'objets (data center, satellite, tunnel de métro, IRM, etc.) et doit deviner chacun des cinq objets associés aux questions et positionner leurs photos sur les emplacements adéquats. Les deux joueurs comparent finalement les objets choisis et comptent leurs points.



→ Les réfrigérateurs domestiques et les rayons surgelés des grandes surfaces ne sont que la partie visible des applications du froid. Le froid, positif et négatif, mécanique et cryogénique, est présent dans de multiples secteurs comme le génie civil, chimique ou médical, ainsi que dans le milieu des matériaux et l'industrie. Il est utilisé dans différentes étapes du cycle de vie de plusieurs objets de la vie quotidienne. Le froid a un rôle essentiel non seulement dans notre quotidien, mais aussi dans l'économie mondiale.

1.2.3.3 Froid et alimentation

- ✚ Cet îlot est consacré au rôle du froid dans le domaine alimentaire. Les élèves voient l'action des basses températures sur les aliments et peuvent ainsi mieux comprendre l'effet des pratiques qu'il utilise dans leur quotidien : la réfrigération et la congélation. Ils se familiarisent avec les techniques du froid utilisées dans l'industrie alimentaire, et comprennent l'enjeu crucial que représente la chaîne du froid.

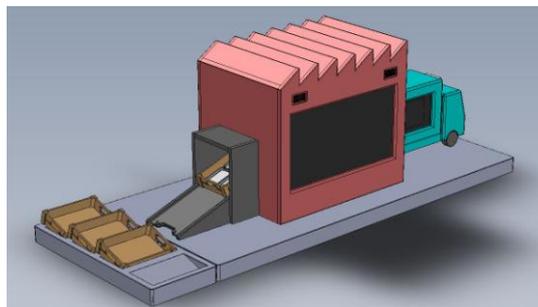
Depuis toujours, les techniques de conservation des aliments ont été une des préoccupations majeures de l'humanité. Le froid a ainsi un rôle central dans le secteur alimentaire car il permet d'assurer une conservation optimale des aliments et de nous fournir des produits sûrs. Cependant, la réfrigération et la congélation permettent uniquement de ralentir la prolifération des bactéries : elles ne les détruisent pas. D'où l'importance du respect de la chaîne du froid.

Dans le secteur alimentaire, mis à part la surgélation, le froid est utilisé dans plusieurs processus pour la préparation des aliments. Selon le type du produit initial et selon le résultat souhaité pour le produit final, ces différents processus utilisent le froid mécanique (produit par les machines frigorifiques traditionnelles à cycle de compression) ou le froid cryogénique (obtenu grâce à des fluides cryogéniques, tels que le diazote N_2 ou le dioxyde de carbone). Dans le premier cas, les températures atteintes sont comprises entre $-20^{\circ}C$ et $-50^{\circ}C$. Dans le second, on atteint des températures inférieures à $-70^{\circ}C$. Les aliments sont alors plongés ou arrosés avec le fluide cryogénique.

Quant aux produits finaux, l'enjeu est de ne pas rompre la chaîne du froid. Celle-ci consiste à les maintenir et à les transporter aux températures requises pour qu'ils ne s'altèrent pas entre le moment de leur fabrication jusqu'à leur utilisation.

L'usine à froid

L'élève choisit une parmi quatre cagettes factices contenant des aliments : basilic frais / pâtes, sauce, champignons et morceaux de poulet / ingrédients pour soupe / oranges. Il pose la cagette sur un tapis roulant pour l'introduire dans une enseigne représentant une usine. Devant l'enseigne, un écran diffuse un film d'animation expliquant les transformations que subit l'aliment grâce au froid avant d'arriver au point de vente. À la fin du film, un deuxième écran affiche l'image de l'objet après la transformation et son conditionnement : boîte avec herbes aromatiques surgelées, sachet avec un plat poulet aux pâtes surgelé, sachet de soupe lyophilisée, brique de jus d'orange.



→ L'industrie agroalimentaire est le secteur le plus concerné par l'utilisation du froid. Le froid est utilisé dans plusieurs processus pour la préparation des aliments. Ainsi, la *surgélation* consiste à refroidir brutalement les aliments en les exposant à des températures allant de -18 °C à -35 °C , ce qui limite la destruction cellulaire par les cristaux de glace. Les produits ainsi traités conservent leur texture et leur saveur. La *lyophilisation*, elle, désigne la dessiccation (déshydratation poussée) d'un produit congelé, par sublimation, c'est-à-dire par passage direct de l'eau de la phase solide à la phase gazeuse. Enfin, la *cryoconcentration* désigne la concentration d'une solution par congélation partielle de l'eau et l'élimination des cristaux de glace formés.

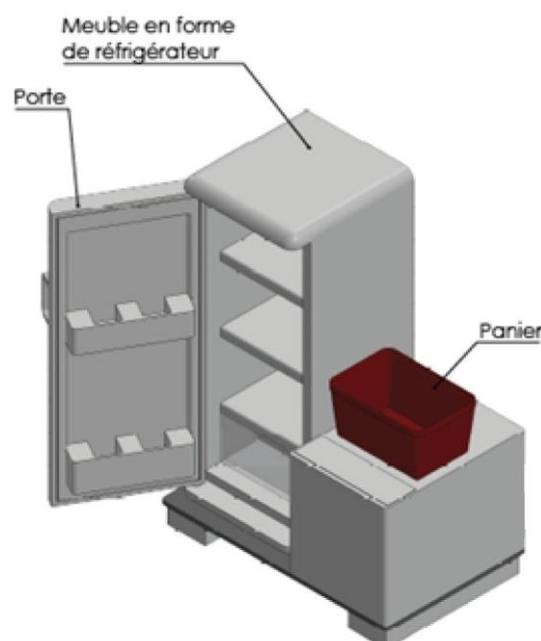
La chaîne du froid

Cet élément se présente sous la forme d'un jeu collectif sur écran tactile où les élèves doivent collaborer pour ne pas rompre la chaîne du froid de différents aliments, tout au long des différentes étapes allant de la fabrication à la consommation.

→ La chaîne du froid est une succession ininterrompue d'opérations diverses qui s'effectuent sous température contrôlée au moyen d'équipements frigorifiques.

Range ton frigo

Une consigne sur l'écran d'un réfrigérateur factice invite les élèves à y ranger des facsimilés radio-identifiés d'aliments : laitages, légumes, viandes, œufs, beurre, etc. Une fois la porte refermée, l'écran dévoile une version numérisée de l'intérieur du réfrigérateur sur laquelle on superpose des zones vertes et rouges, fonction de la pertinence du rangement. Les élèves reçoivent alors des explications sur le rangement idéal, la température de conservation de chaque aliment et les gestes écoresponsables du consommateur.



→ Le maintien à basse température d'aliments réfrigérés ralentit la croissance des micro-organismes et ainsi de limiter la survenue des infections alimentaires. De plus, il permet de conserver les qualités nutritionnelles des aliments. Comment faut-il alors placer les différents aliments à l'intérieur d'un réfrigérateur ?

- Les produits surgelés se placent dans le congélateur, dont la température est comprise entre -6 °C et -18 °C .
- Dans le réfrigérateur lui-même, on trouve une zone « tempérée » (6 à 10 °C) dans la porte. Elle est destinée à recevoir les produits ne nécessitant qu'une réfrigération légère : beurre, œufs, condiments, sauces et boissons.
- Les bacs situés en bas (6 °C) sont affectés aux fruits et aux légumes pouvant être endommagés par des températures trop basses.
- En fonction du modèle de réfrigérateur, la zone la plus froide (0 à 4 °C) peut se situer juste au-dessus des bacs à légumes ou, au contraire, à l'étage le plus haut. On doit stocker là les jus de fruits frais, les laitages entamés, les viandes, volailles et poissons crus, les fruits de mer, les crustacés, les viandes et poissons cuits, la charcuterie, les fromages frais et les produits en décongélation.
- Enfin, les yaourts, la crème fraîche, les fruits et légumes cuits et les pâtisseries sont à positionner aux étages encore libres (4 à 6 °C).

Derrière eux, le froid

Une fresque graphique laisse apparaître plusieurs aliments ayant subi une transformation grâce au froid avant de prendre leur forme finale. C'est l'occasion de présenter, dans un univers du quotidien, un ensemble de technologies de congélation traditionnelles et innovantes. Chaque aliment est représentatif d'une technologie.



→ Dans l'industrie agroalimentaire, le froid est utilisé dans plusieurs processus pour la préparation des aliments. Trois des processus que nous avons déjà définis (surgélation, lyophilisation et cryoconcentration) utilisent des technologies traditionnelles. Il en existe d'autres, d'invention plus récente : congélation à haute pression, action de bactéries glaçogènes (à titre d'exemple, transportée par le vent, la bactérie *Pseudomonas syringae* favorise la formation de la neige, car une des protéines de sa paroi réorganise les molécules d'eau de façon à mimer un cristal de glace. Elle sert ainsi de noyau de condensation) ou des ultrasons, application de champ électrique, etc.



1.2.4 Les défis pour la science

Quels sont les effets d'un abaissement de la température sur la matière ?

Comment peut-on mesurer les basses températures ? Comment conserver ou manipuler un objet à très basse température ? Pourquoi liquéfier l'azote, le dioxyde de carbone ou l'hélium ?

Qu'est-ce le zéro absolu et pourquoi ne peut-on jamais l'atteindre ? Comment se comporte la matière lorsque la température s'approche du zéro absolu ?

Comment le froid nous permet-il d'étudier l'infiniment grand et l'infiniment petit ?

Un îlot thématique et un espace de médiation composent cette dernière séquence :

- sur le chemin du zéro absolu.

1.2.4.1 Sur le chemin du zéro absolu

- ✚ Cet espace permet aux élèves d'explorer des phénomènes liés à l'effet des basses températures sur la matière à travers l'expérience et l'observation. Il leur permet aussi de faire le lien avec des applications du froid dans le secteur industriel. Les élèves se familiarisent avec les outils et les travaux des chercheurs en basses températures. Ils découvrent ici la notion du zéro absolu et l'étrange comportement de la matière à son voisinage.

Les pouvoirs de l'azote liquide

Une série de courts audiovisuels réalisés par l'équipe "La physique autrement" de l'Université Paris-Sud et du CNRS présente des expériences avec de l'azote liquide révélant les propriétés de la matière aux basses températures. Chaque phénomène est accompagné d'un schéma graphique expliquant le comportement de la matière au niveau microscopique (agitation thermique, etc.) et d'une ressource présentant les éventuelles applications dans le secteur industriel.



→ Qu'arrive-t-il à la matière refroidie ? Tout dépend de la gamme de températures et du corps refroidi. De manière générale, plusieurs phénomènes peuvent être observés : changement d'état (les gaz se liquéfient, les liquides se solidifient, sans oublier le rôle de la pression), contraction des solides, modification des propriétés électriques et magnétiques de certains solides ou encore modification de la tenue mécanique des matériaux élastiques.

→ Les gaz liquéfiés sont à la base d'applications industrielles dans de multiples secteurs, et la liste est longue ! La liquéfaction induit une diminution du volume des gaz industriels (ou même du gaz naturel) et, par conséquent, une importante diminution des coûts pour leur stockage et leur transport. La vaporisation des fluides cryogéniques permet d'obtenir de fortes puissances de réfrigération avec des investissements faibles. Beaucoup de produits sont ainsi surgelés à l'azote liquide. Cette technique est même employée pour congeler un sol humide avant terrassement. L'azote liquide permet de condenser ou de solidifier une grande variété de gaz : cette propriété est à la base de procédés de purification de gaz ou de rétention de produits nocifs pour l'environnement. Le passage par l'état liquide permet également de séparer des corps qui sont mélangés à l'état naturel.

Plongées à $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

L'élève choisit à l'écran l'objet à mettre dans de l'azote liquide. Il a le choix entre un ballon gonflé, un végétal, une peluche, de l'eau chaude et une balle de ping-pong trouée. La vidéo de l'immersion de l'objet débute... et s'arrête au moment où l'objet va être retiré. Une question est alors posée à l'élève : « de quelle manière l'objet va-t-il être modifié ? ». Quatre propositions sont données, par exemple : il ne va pas être modifié, il va exploser, il va se briser en 1 000 morceaux, il va changer de couleur. La réponse est donnée en vidéo.



Mesurer, manipuler, conserver le froid

Ici est reconstitué et mis en scène l'équipement du laboratoire des basses températures : gants et lunettes de protection, vases Dewar, réservoirs de fluides cryogéniques, thermomètres, cryostat éclaté, pompes, modules électroniques (connectés à des appareils de mesure), cannes de transfert de l'azote liquide, système de tuyauterie pour la récupération des fluides, tableau avec équations.

Galerie de portraits



Dans cet élément, des photos de chercheurs d'aujourd'hui légendées sont insérées pour intriguer les élèves et présenter leur sujet de recherche et leur passion pour les très basses températures. Les très basses températures constituent un domaine de recherche vivant où beaucoup de questions restent encore ouvertes.

Les grandes énigmes explorées grâce au froid

On expose ici de belles images relatives aux grandes questions dans différents domaines scientifiques :

- le fond diffus cosmologique. Les satellites qui permettent de prendre ce type de cliché sont équipés de bolomètres qui, pour remplir leur mission, sont refroidis à des températures de l'ordre de -270 °C voire moins ;
- la détection de particules élémentaires prise au LHC. Cet accélérateur du Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN) fonctionne avec de supraconducteurs refroidis avec de l'hélium superfluide ;
- une image de la surface d'une puce de silicium. Le cliché a été réalisé avec un microscope à effet tunnel qui comporte une pointe métallique qui balaie la surface et mesure la position des atomes. À très basse température (-269 °C), la pointe peut attraper des atomes ;
- une image IRM du cerveau. Le cliché a été réalisé par un appareil qui fonctionne grâce à un aimant supraconducteur refroidi à une température de l'ordre de -269 °C ;
- une représentation de la distribution des vitesses des atomes dans un condensat de Bose-Einstein, un phénomène purement quantique.



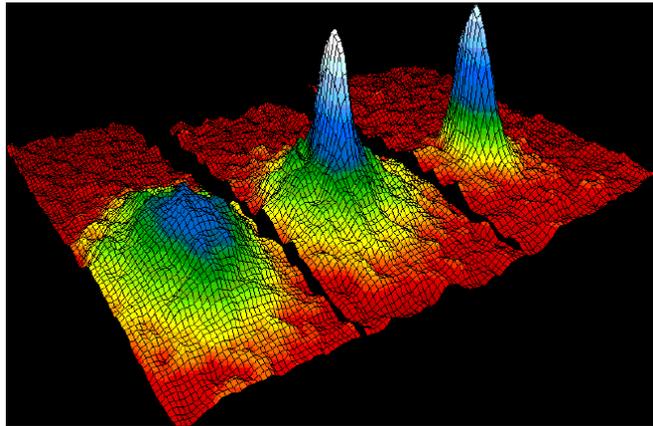
→ La cryogénie trouve aujourd'hui de nombreuses applications dans plusieurs domaines, car elle a permis la mise au point d'outils, d'appareils ou de techniques innovants. Ainsi, le champ d'utilisation de la cryogénie s'étale sur un large spectre de recherche, éloignés en apparence, mais dont le point commun est que leur sujet ne pourrait pas être étudié sans la maîtrise des très basses températures.

Descendre vers le zéro absolu

Un film expose les principes de fonctionnement des machines qui permettent de réaliser de très basses températures, que ce soit pour liquéfier des gaz ou pour étudier le comportement de la matière près du zéro absolu. Grâce à ces dispositifs sophistiqués, nous pouvons nous approcher aujourd'hui de la limite absolue du froid et parvenir à des températures inférieures au milliardième de kelvin. Et c'est aux alentours du zéro absolu que la matière manifeste des propriétés étonnantes comme le condensat Bose-Einstein, la supraconductivité ou la superfluidité.

Le concept de condensat de Bose-Einstein a été formulé en 1925 par Albert Einstein (1879 – 1955) à partir des travaux de Satyendranath Bose (1894 – 1974) sur le comportement quantique des photons. Ce condensat désigne un état de la matière d'un gaz dilué de bosons (des particules pouvant occuper simultanément un même état quantique, à la différence des fermions) refroidi à des températures proches du zéro absolu. Dans de telles conditions, une grande partie des bosons occupe l'état quantique de plus basse énergie, ce qui confère aux condensats de Bose-Einstein des propriétés de cohérence spectaculaires, semblables à celles des photons composant les lasers. Ainsi qualifie-t-on souvent de « laser à atomes » le jet de particules issu d'un condensat.

En 1995, des chercheurs de l'institut de recherche JILA, situé sur le campus de l'université du Colorado à Boulder, ont annoncé avoir refroidi des atomes de rubidium à 170 milliardièmes de kelvin, entraînant la formation d'un condensat d'atomes se comportant comme une entité unique. L'image présente trois instantanés successifs de densité atomique, allant croissantes du rouge vers le blanc, en passant par le jaune, le vert et le bleu.
Crédit : NIST / JILA / CU-Boulder.



Dans un supraconducteur, les électrons se lient entre eux deux par deux et forment ce que l'on appelle des paires de Cooper. Ces paires sont des bosons et forment le condensat. La supraconductivité est un phénomène caractérisé par l'absence totale de résistance électrique et l'expulsion du champ magnétique à l'intérieur de certains matériaux dits *supraconducteurs*, lorsqu'ils sont refroidis en-dessous d'une température critique. Elle permet, entre autres, de transporter l'électricité sans perte d'énergie. Elle fut découverte en 1911 par le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes (1853 – 1926), qui reçut le prix Nobel de physique en 1913 pour « ses recherches sur les propriétés de la matière aux basses températures, qui conduisirent, entre autres, à la production d'hélium liquide ».

La superfluidité caractérise un état de la matière dans lequel celle-ci se comporte comme un fluide dépourvu de toute viscosité. Un liquide superfluide n'oppose aucune résistance à l'écoulement et lorsqu'on le remue, il se forme des tourbillons qui tournent indéfiniment. L'hélium-4 et l'hélium-3 subissent une transition de phase (ils deviennent des superfluides) quand ils sont refroidis à des températures inférieures à 2,17 K et 2 mK respectivement. La superfluidité fut annoncée en 1938 par le physicien russe Piotr Kapitsa (1894 – 1984) et, indépendamment, par les physiciens canadiens Don Misener et John F. Allen (1908 – 2001). Seul Kapitsa reçut la moitié du prix Nobel de physique en 1978 pour « ses inventions et découvertes fondamentales dans le domaine de la physique à basse température ».

1.2.4.2 L'espace médiation

La médiation humaine occupe une place importante dans cet espace thématique, au même titre que les éléments d'exposition en accès libre. L'objectif est de montrer aux élèves de véritables expériences à très basse température. Ce type d'expériences unique est spectaculaire mais nécessite la manipulation d'azote liquide. Aussi est-il impossible de les mettre en accès libre. La présence des médiateurs est donc indispensable.

Juste en face de l'espace médiation, un coin lecture permet aux élèves de s'installer confortablement pour découvrir des livres sur le froid dans le cadre des différentes thématiques abordées dans l'exposition.

Pour en savoir plus, rendez-vous au chapitre « Ressources », dans la quatrième partie de ce document.

2 Compléments

2.1 Les différentes échelles de température

Dans le Système international d'unités, l'unité de température est le **kelvin**, de symbole **K**. Le mot *kelvin* doit être écrit en minuscule et ne jamais être précédé par le mot *degré* ni par le symbole « ° ». Le nom de cette unité est un hommage au physicien britannique d'origine irlandaise William Thomson (1824 – 1907), mieux connu sous le nom de Lord Kelvin, pour ses contributions à la thermodynamique. La résolution 10 de la 23^e Conférence générale des poids et mesures qui s'est tenue à Paris en 2007 donne, par exemple, la définition actuelle du kelvin : il s'agit de la fraction $\frac{1}{273,16}$ de la température thermodynamique du point triple

de l'eau. La valeur de la fraction n'a, bien sûr, pas été choisie au hasard ; elle manifeste la volonté de définir une unité de température permettant de retrouver les intervalles de températures usuels associés aux anciennes échelles de température, comme l'échelle Celsius.

Qu'est-ce que le point triple de l'eau ? Il correspond, dans le diagramme de phase température – pression de l'eau, aux conditions qui permettent la coexistence des trois phases vapeur, liquide et solide ; il est déterminé de manière unique. Toutefois, sa température dépend des abondances relatives des isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène présents dans l'échantillon d'eau utilisé.

Alors, de quelle eau parle-t-on ? À une eau de composition isotopique spécifiée, possédant la même composition isotopique que nos océans mais constituée d'eau pure ne contenant pas d'air. Cet étalon, connu sous le nom de VSMOW (pour **V**ienne **S**tandard **M**ean **O**cean **W**ater) et mis en place par l'Agence internationale de l'énergie atomique en 1968, est caractérisé par les rapports d'abondance suivants :

- $^2\text{H} / ^1\text{H} = 155,76 \pm 0,1$ ppm (pour **partie par million**) ;
- $^3\text{H} / ^1\text{H} = 1,85 \pm 0,36 \times 10^{-11}$ ppm ;
- $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O} = 2005,20 \pm 0,43$ ppm ;
- $^{17}\text{O} / ^{16}\text{O} = 379,9 \pm 1,6$ ppm.

Nous avons un point de référence (la température du point triple de l'eau) et ce qui définit l'intervalle de un kelvin : l'échelle Kelvin est construite ! Elle s'étend de 0 K à... ce que vous voulez, même si certaines théories encore hypothétiques affirment l'existence d'une température maximale dans l'Univers.

La **température Celsius** tire son nom de l'astronome suédois Anders Celsius (1701 – 1744). Nous avons tous appris à l'école que l'échelle de température Celsius est définie par deux points : la température de la glace fondante, qui marque le point 0, et la température d'ébullition de l'eau, qui marque le point 100, le tout sous une pression d'une atmosphère (101 325 Pa). Cette définition est, en fait, celle de l'échelle de température centigrade, qui n'est plus utilisée officiellement depuis 1948. L'échelle Celsius est très légèrement différente, plus en théorie qu'en pratique d'ailleurs. Il s'agit désormais d'une simple translation : la température Celsius est définie comme étant la température thermodynamique en kelvin, à laquelle on ôte 273,15 K.

L'unité de température Celsius est le **degré Celsius**, de symbole **°C**. Elle est égale en grandeur au kelvin. Les unités *kelvin* et *degré Celsius* sont équivalentes pour exprimer une différence de température et un intervalle de température en degrés Celsius ou en kelvins a la même valeur numérique. La définition du kelvin et donc du degré Celsius a pour conséquence que, maintenant, la température d'ébullition de l'eau – plus précisément, la température d'ébullition du VSMOW – sous une atmosphère n'est pas 100 °C, mais 99,9839 °C. En pratique, cette différence de 16,1 mK est négligeable puisque la température d'ébullition de l'eau est très sensible aux variations de pression. Ainsi, une élévation de 28 cm entraîne une diminution de la température d'ébullition de l'eau de 1 mK.



Il existe bien d'autres échelles de température : échelle de Rankine, de Delisle, de Newton, de Réaumur, de Rømer, etc. L'échelle de Fahrenheit est employée de nos jours aux États-Unis, au Belize et aux Îles Caïman. Daniel Gabriel Fahrenheit (1686 – 1736) était un physicien, inventeur et fabricant d'instruments scientifiques. Trois températures de référence définissaient son échelle originelle :

- la température d'un mélange de glace, d'eau et de chlorure d'ammonium (0 °F) ;
- la température d'un mélange de glace et d'eau (32 °F) ;
- la température d'un homme en bonne santé (96 °F).

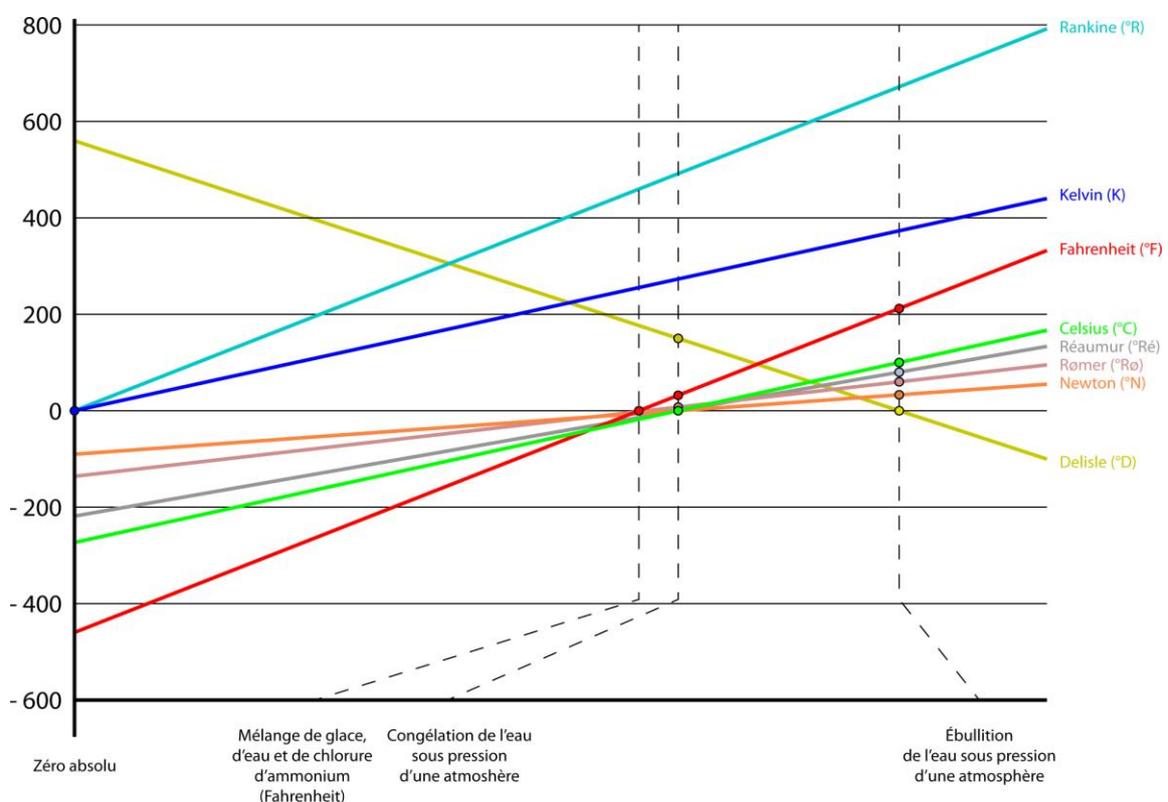
Aujourd'hui, l'échelle Fahrenheit est calée sur l'échelle Celsius par la relation $[^{\circ}F] = 32 + \frac{9}{5}[^{\circ}C]$. La conversion inverse donne la température en degré Celsius à partir de la

température en degré Fahrenheit : $[^{\circ}C] = \frac{5}{9}([^{\circ}F] - 32)$. Pour passer des degrés Fahrenheit aux kelvins (et l'inverse), on applique les formules :

$$[K] = \frac{5}{9}([^{\circ}F] + 459,67) \quad [^{\circ}F] = \frac{9}{5}[K] - 459,67$$

Pour des intervalles de température, on a $1^{\circ}F = 5/9^{\circ}C = 5/9 K$.

La figure suivante compare huit échelles de température.



- L'échelle Kelvin a son origine au zéro absolu.
- L'échelle Celsius passe très près des points de congélation et d'ébullition de l'eau.
- Le mélange de glace, d'eau et de chlorure d'ammonium de Fahrenheit, la congélation et l'ébullition de l'eau sous pression d'une atmosphère ont, quasiment pour valeur respective, 0 °F, 32 °F et 212 °F dans l'échelle de Fahrenheit.
- William Rankine (1820 – 1872) était un ingénieur et physicien écossais. La valeur du zéro Rankine est la même que celle du zéro Kelvin. Donc, 0 K = 0° R. Toutefois, les graduations des degrés Rankine sont celles des degrés Fahrenheit. Par conséquent, une différence de 1 °R est égale à une différence de 1 °F. L'échelle Rankine est donc parallèle à l'échelle Fahrenheit.

$$\begin{aligned} [^{\circ}C] &= \frac{5}{9}([^{\circ}R] - 491,67) & [^{\circ}R] &= \frac{9}{5}([^{\circ}C] + 273,15) \\ [^{\circ}F] &= [^{\circ}R] - 459,67 & [^{\circ}R] &= [^{\circ}F] + 459,67 \\ [K] &= \frac{5}{9}[^{\circ}R] & [^{\circ}R] &= \frac{9}{5}[K] \end{aligned}$$

Pour des intervalles de température, on a 1 °R = 1 °F = 5/9 °C = 5/9 K.

- Dans l'échelle Réaumur, les points de congélation et d'ébullition de l'eau ont pour valeur 0 et 80 °Ré. Cette échelle tire son nom de René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683 – 1757), physicien et naturaliste français.

$$\begin{aligned} [^{\circ}C] &= \frac{5}{4}[^{\circ}R\acute{e}] & [^{\circ}R\acute{e}] &= \frac{4}{5}[^{\circ}C] \\ [^{\circ}F] &= \frac{9}{4}[^{\circ}R\acute{e}] + 32 & [^{\circ}R\acute{e}] &= \frac{4}{9}([^{\circ}F] - 32) \\ [K] &= \frac{5}{4}[^{\circ}R\acute{e}] + 273,15 & [^{\circ}R\acute{e}] &= \frac{4}{5}([K] - 273,15) \end{aligned}$$

Pour des intervalles de température, on a 1 °Ré = 2,25 °F = 1,25 °C = 1,25 K.

- L'échelle Rømer est une échelle nommée ainsi d'après l'astronome danois Ole Christensen Rømer (1644 – 1710) qui l'a proposée en 1701. La congélation de l'eau définit la valeur 7,5 °Rø et son ébullition, 60 °Rø.

$$\begin{aligned} [^{\circ}C] &= \frac{40}{21}([^{\circ}R\omicron] - 7,5) & [^{\circ}R\omicron] &= \frac{21}{40}[^{\circ}C] + 7,5 \\ [^{\circ}F] &= \frac{24}{7}([^{\circ}R\omicron] - 7,5) + 32 & [^{\circ}R\omicron] &= \frac{7}{24}([^{\circ}F] - 32) + 7,5 \\ [K] &= \frac{40}{21}([^{\circ}R\omicron] - 7,5) + 273,15 & [^{\circ}R\omicron] &= \frac{21}{40}([K] - 273,15) + 7,5 \end{aligned}$$

Pour des intervalles de température, on a 1 °Rø = 24/7 °F = 40/21 °C = 40/21 K.

- Isaac Newton (1642 – 1727) établit son échelle vers 1700 et donna la valeur 0 degré à la température de la neige fondante et 33 degré à l'eau bouillante.

$$[^{\circ}C] = \frac{100}{33} [^{\circ}N]$$

$$[^{\circ}N] = \frac{33}{100} [^{\circ}C]$$

$$[^{\circ}F] = \frac{60}{11} [^{\circ}N] + 32$$

$$[^{\circ}N] = \frac{11}{60} ([^{\circ}F] - 32)$$

$$[K] = \frac{100}{33} [^{\circ}N] + 273,15$$

$$[^{\circ}N] = \frac{33}{100} ([K] - 273,15)$$

Pour des intervalles de température, on a $1^{\circ}N = 180/33^{\circ}F = 100/33^{\circ}C = 100/33 K$.

- L'échelle de Delisle a été conçue en 1732 par l'astronome et cartographe Joseph-Nicolas Delisle (1688 – 1768). Elle a son zéro au point d'ébullition de l'eau ; la valeur 150 degrés est fixée à sa congélation.

$$[^{\circ}C] = 100 - \frac{2}{3} [^{\circ}D]$$

$$[^{\circ}D] = \frac{3}{2} (100 - [^{\circ}C])$$

$$[^{\circ}F] = 212 - \frac{6}{5} [^{\circ}D]$$

$$[^{\circ}D] = \frac{5}{6} (212 - [^{\circ}F])$$

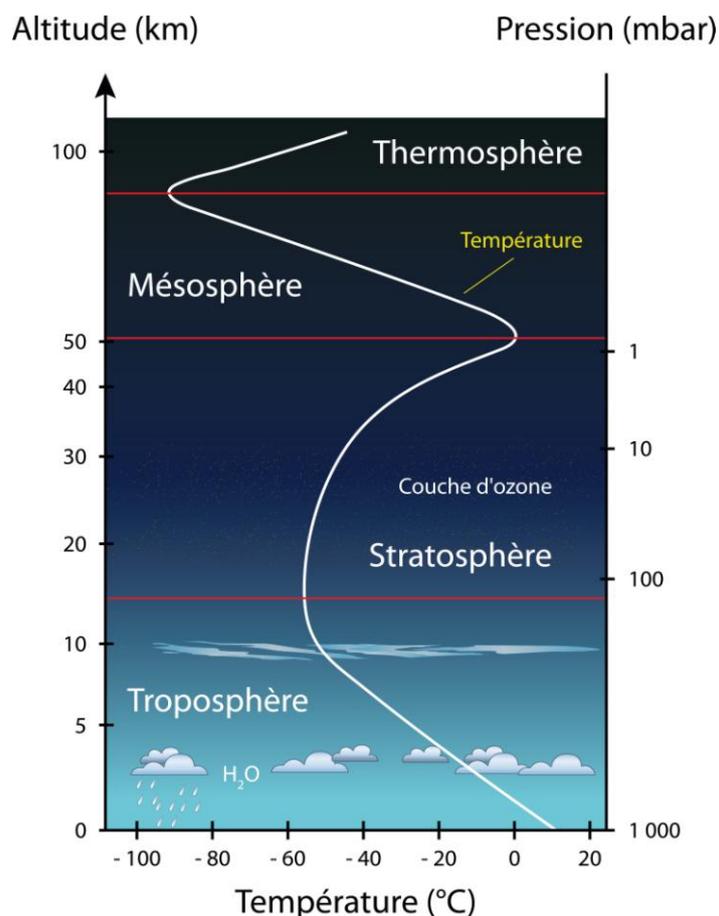
$$[K] = 373,15 - \frac{2}{3} [^{\circ}D]$$

$$[^{\circ}D] = \frac{3}{2} (373,15 - [K])$$

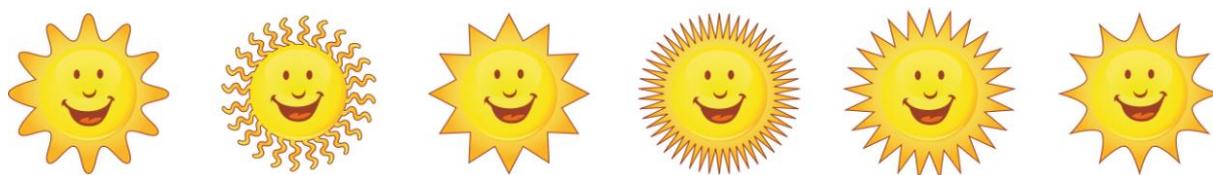
Pour des intervalles de température, on a $1^{\circ}D = 6/5^{\circ}F = 2/3^{\circ}C = 2/3 K$.

2.2 Le froid glacial de l'espace...

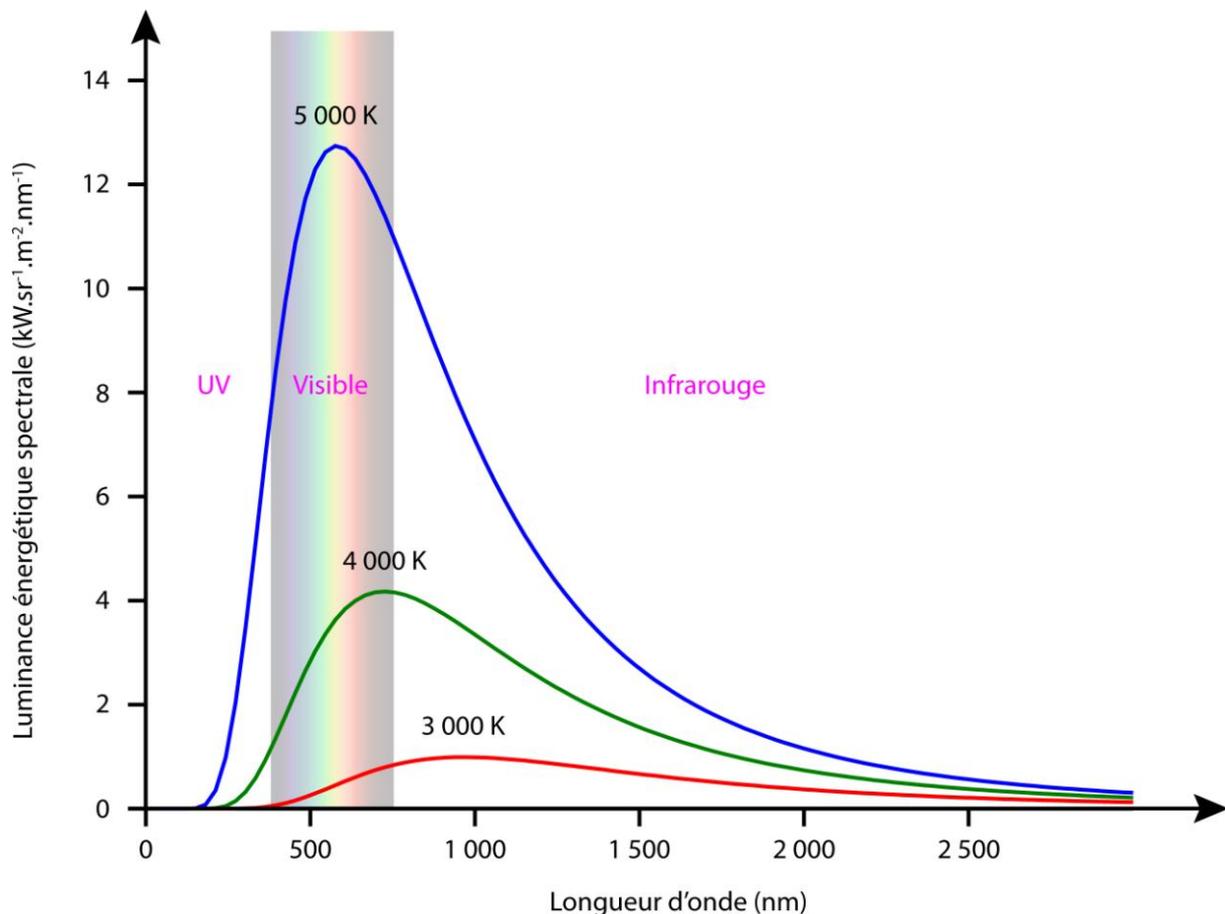
Depuis la surface de la Terre jusqu'à une altitude d'environ 15 km, on trouve une zone caractérisée par une décroissance de la température avec l'altitude : la troposphère. Le chauffage de cette zone où domine la convection provient du sol. Au-dessus de la troposphère s'étend la stratosphère, dans laquelle la température s'élève rapidement avec l'altitude, conséquence de l'absorption du rayonnement solaire ultraviolet par l'ozone (O_3). Entre 50 et 80 km d'altitude se situe la mésosphère où la température diminue jusqu'à la mésopause, pour croître à nouveau très rapidement au-delà, dans la thermosphère. Cette augmentation est provoquée par l'absorption diurne par le dioxygène des rayonnements X et ultraviolet extrême émis par le Soleil et par l'apport d'énergie dû au vent solaire, selon des mécanismes encore mal compris. En fait, les températures dépendent fortement de l'activité solaire et peuvent atteindre plus de 2 000 °C dans la journée. Mais que ressentirait-on vraiment dans la thermosphère ? Dans la vie courante, la température est reliée aux sensations de froid et de chaud. Cependant, lorsque la pression atmosphérique est faible, ce lien est rompu. La température importante qui caractérise la thermosphère traduit le niveau très élevé de l'énergie d'agitation des rares particules composant l'air de cette région. Ces quelques particules ne communiqueraient à un thermomètre que très peu d'énergie, du fait de leur rareté. Malgré un environnement à 2 000 °C, le thermomètre indiquerait, au moins la nuit, une température bien inférieure à 0 °C parce que l'énergie qu'il perdrait par rayonnement excéderait l'énergie acquise par contact direct avec le gaz environnant.



Il est relativement facile de calculer la température approximative d'un corps céleste soumis au rayonnement d'une étoile. Au cœur du Soleil, là où les températures et les pressions sont extrêmes, des réactions nucléaires engendrent de l'énergie sous la forme de photons gamma très énergétiques, en transformant de l'hydrogène en hélium. Des modèles confortés par diverses observations nous apprennent que l'énergie produite à l'intérieur du Soleil est d'abord transportée vers l'extérieur par rayonnement : les photons gamma sont absorbés, réémis, réabsorbés, etc., par la matière environnante. De proche en proche, de choc en choc, ils se font moins énergétiques : de photons gamma, ils deviennent photons X puis ultraviolets etc. La faible densité des couches supérieures facilite les mouvements de matière. Le mode de transport d'énergie change, une zone convective prend le relais jusqu'à la surface. Comme dans une casserole d'eau bouillante, la matière chaude en profondeur monte, puis se refroidissant redescend : la matière est ainsi brassée et l'énergie s'achemine par convection. L'énergie est ainsi transportée du cœur vers la surface qu'elle maintient à une température de 5 500 °C. La lumière est alors libre de s'échapper vers l'espace : le Soleil rayonne.



Ces processus sont très longs (plus d'un million d'années !) et ils assurent un équilibre thermodynamique entre la matière et son rayonnement, depuis le cœur du Soleil jusqu'à sa « surface », la photosphère. En physique, un corps présentant un tel équilibre porte le nom de *corps noir*. Il émet un rayonnement dont l'intensité en fonction de la longueur d'onde n'est fonction que de sa température. À titre d'exemple, le fond diffus cosmologique reproduit (presque) parfaitement le rayonnement d'un corps noir à 2,73 K (soit – 270,42 °C).



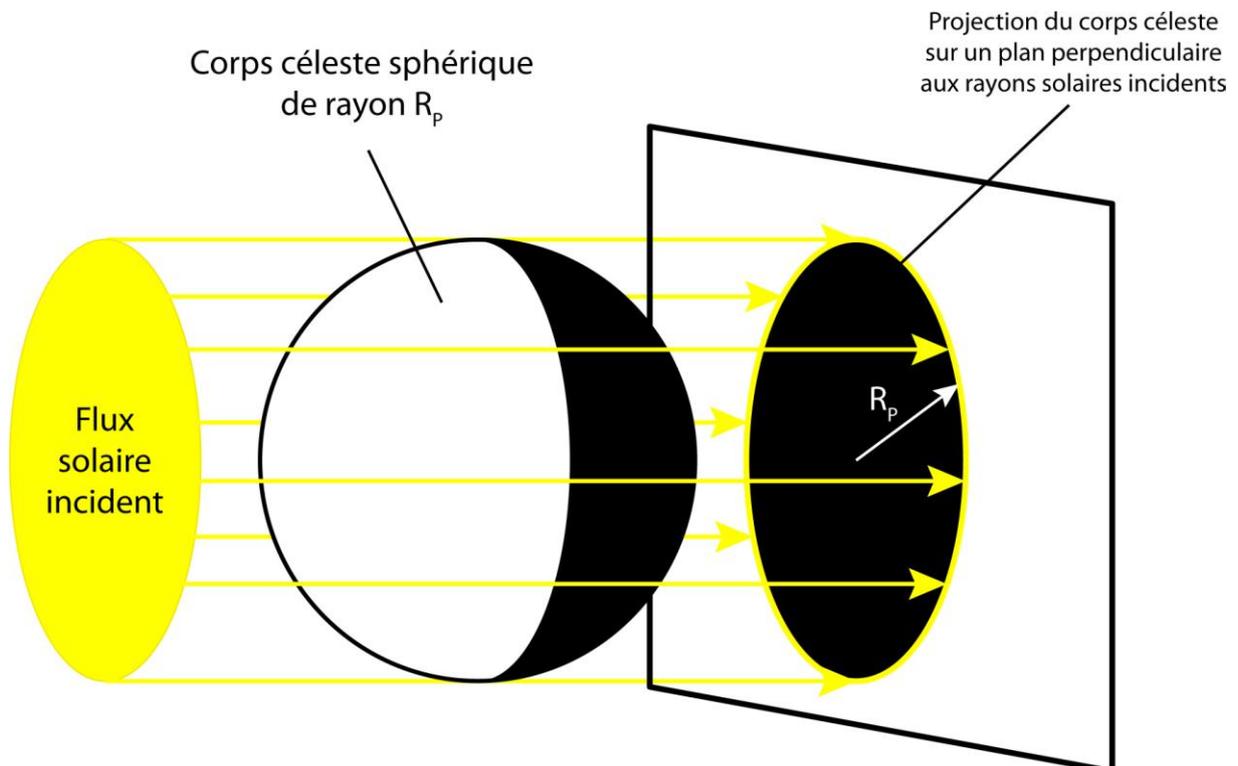
Courbes de rayonnement de corps noirs à 3 000, 4 000 et 5 000 K. La luminance énergétique spectrale est la distribution par rapport au spectre électromagnétique de la puissance du rayonnement émis en un point d'une surface par unité de surface, dans une direction donnée par unité d'angle solide (mesuré en stéradian, de symbole sr).

En première approximation, il est licite d'assimiler le Soleil à un corps noir et, à basse résolution spectrale, son spectre se superpose à celui d'un corps noir à 5 770 K. La loi de Stefan-Boltzmann nous enseigne que la puissance P^* rayonnée par un corps noir par unité de surface dans le demi-espace libre est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température : $P^* = \sigma T^4$ où σ est la constante de Stefan-Boltzmann, valant un peu plus de $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Chaque mètre carré de la surface du Soleil rayonne donc une puissance P_1^* telle que : $P_1^* = \sigma T_{\text{Soleil}}^4 \approx 62,9 \cdot 10^6 \text{ W} = 62,9 \text{ MW}$. La puissance totale rayonnée par le Soleil est le produit de sa surface par la puissance rayonnée par unité de surface : $P_1 = P_1^* \cdot 4\pi R_{\text{Soleil}}^2 = \sigma T_{\text{Soleil}}^4 \cdot 4\pi R_{\text{Soleil}}^2 \approx 3,82 \cdot 10^{26} \text{ W}$. En une seconde, le Soleil émet donc $3,82 \cdot 10^{26} \text{ J}$, plus de 800 000 fois la production énergétique mondiale annuelle !

Le rayonnement du Soleil étant isotrope (il présente les mêmes caractéristiques dans toutes les directions), la puissance rayonnée se conserve au fur et à mesure qu'elle chemine dans l'espace : des sphères concentriques successives reçoivent la même puissance. Ainsi, au niveau de l'orbite d'un corps céleste caractérisé par sa distance d au Soleil, une plaque d'un mètre carré exposée perpendiculairement aux rayons solaires reçoit $\frac{P_1}{4\pi d^2} = \frac{\sigma T_{\text{Soleil}}^4 \cdot 4\pi R_{\text{Soleil}}^2}{4\pi d^2} = \sigma T_{\text{Soleil}}^4 \left(\frac{R_{\text{Soleil}}}{d} \right)^2$. Cette quantité est communément appelée la *constante solaire* (S). Au niveau de l'orbite terrestre ($d \approx 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$), elle s'élève à environ $1359 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Comme le montre la figure suivante, la puissance solaire incidente captée par un corps céleste sphérique de rayon R_p est assimilable à celle interceptée par un disque de rayon R_p .



Le corps céleste intercepte donc $P_2 = S \cdot \pi R_p^2 = \sigma T_{\text{Soleil}}^4 \left(\frac{R_{\text{Soleil}}}{d} \right)^2 \pi R_p^2$. Toutefois, un corps

céleste n'absorbe pas totalement ce qu'il reçoit, car sa surface, son atmosphère et les nuages réfléchissent une partie de l'énergie solaire incidente. On modélise cette réflexion à l'aide d'un paramètre appelé l'*albédo* (A). Un albédo de 1 signifie que le rayonnement incident est intégralement réfléchi ; un albédo de 0 qu'il est entièrement absorbé. À titre d'exemple, les mers possèdent des albédos compris entre 0,05 et 0,15 ; l'albédo d'un désert de sable est proche de 0,40 ; celui de la glace, de 0,60, et celui de la neige fraîche varie entre 0,75 et 0,90.

La puissance réellement absorbée par le corps céleste est donc

$$P_{\text{abs}} = (1 - A)P_2 = (1 - A)\sigma T_{\text{Soleil}}^4 \left(\frac{R_{\text{Soleil}}}{d} \right)^2 \pi R_p^2.$$

La température d'équilibre radiatif de la planète T_p s'obtient en écrivant l'égalité entre la puissance absorbée et émise, cette dernière se montant à $\sigma T_p^4 \cdot 4\pi R_p^2$.

On a finalement l'égalité $(1 - A)\sigma T_{\text{Soleil}}^4 \left(\frac{R_{\text{Soleil}}}{d} \right)^2 \pi R_p^2 = \sigma T_p^4 \cdot 4\pi R_p^2$ et on en déduit T_p .

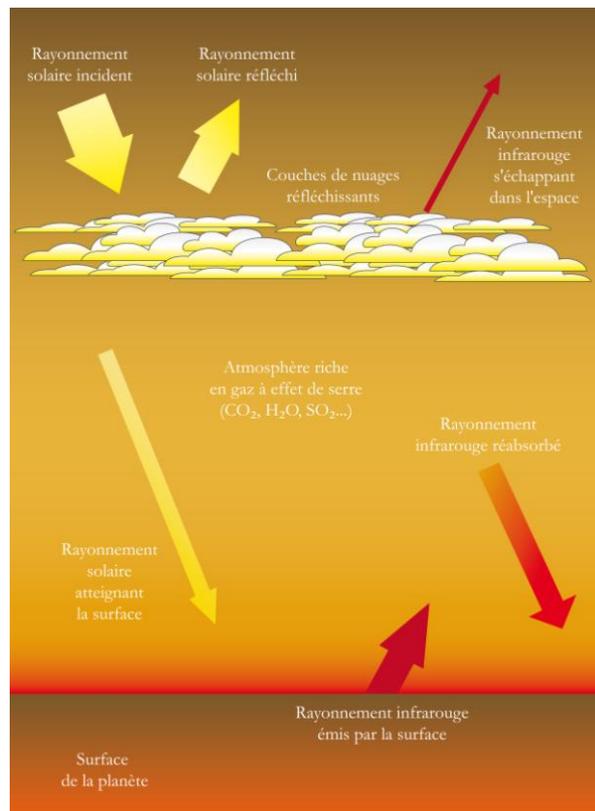
$$T_p = \sqrt[4]{\frac{1 - A}{4\sigma} S} = \sqrt{\frac{R_{\text{Soleil}}}{d}} \left(\frac{1 - A}{4} \right)^{\frac{1}{4}} T_{\text{Soleil}}.$$

Le tableau ci-dessous les températures d'équilibre des huit planètes du système solaire comparées aux valeurs mesurées en surface pour les quatre planètes telluriques (Mercure, Vénus, Terre et Mars) et au niveau de la couche de nuages pour les planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune).

Planète	Distance moyenne au Soleil (km)	Albédo	T_p (°C)	$T_{\text{mesurée}}$ (°C)
Mercure	57,91.10 ⁶	0,068	+ 166	- 180 à + 430
Vénus	108,2.10 ⁶	0,770	- 47	+ 460
Terre	149,6.10 ⁶	0,306	- 19	+ 15 (moy.)
Mars	227,9.10 ⁶	0,250	- 63	- 60
Jupiter	778,4.10 ⁶	0,343	- 163	- 150
Saturne	1 429.10 ⁶	0,342	- 192	- 180
Uranus	2 871.10 ⁶	0,300	- 215	- 210
Neptune	4 503.10 ⁶	0,290	- 227	- 220

Ce tableau appelle quelques commentaires :

- **Mercure** est dénuée d'une atmosphère qui pourrait redistribuer un tant soit peu la chaleur. De plus, elle tourne lentement sur elle-même et sa surface, constituée d'une couche de débris et de poussière de quelques mètres d'épaisseur, se réchauffe et se refroidit très vite selon qu'elle est éclairée ou pas. Il n'est donc pas étonnant que l'amplitude thermique soit extrême. La température d'équilibre que nous avons calculée n'a pas vraiment de sens pour cette planète ;
- Les couches de nuages blancs entourant la planète **Vénus** réfléchissent environ 70 % du rayonnement solaire dans l'espace. Les 30 % qui arrivent à franchir cette barrière chauffent l'atmosphère et la surface, qui réémettent cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge. Toutefois, certains composés atmosphériques comme le dioxyde de carbone, le dioxyde de soufre (SO₂) et la vapeur d'eau sont des gaz à effet de serre : pratiquement transparents au rayonnement visible, ils sont opaques au rayonnement infrarouge. La chaleur emmagasinée reste ainsi piégée près de la surface et la porte à une température moyenne de 460 °C ;



- pour expliquer les quelques 35 degrés séparant la température moyenne mesurée sur **Terre** et la température d'équilibre de notre planète, il faut, là aussi, incriminer l'effet de serre, dû à 60 % à la vapeur d'eau, à 26 % au dioxyde de carbone, à 8 % à l'ozone (O₃) et à 6 % au méthane (CH₄) et au protoxyde d'azote (N₂O). Sans cet effet de serre bénéfique... nous ne serions sans doute pas là pour en parler ;

- la température moyenne sur Mars est voisine de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il existe donc un effet de serre sur Mars (dû au dioxyde de carbone) mais il est faible, en raison de la ténuité de l'atmosphère ;
- enfin, les quatre planètes géantes (à l'exception d'Uranus, semble-t-il) disposent d'une source d'énergie interne comparable en intensité à la source d'énergie externe qu'est le rayonnement solaire. Ces planètes poursuivraient encore aujourd'hui leur contraction et leur refroidissement. Une autre contribution à l'énergie interne pourrait être fournie, dans le cas de Jupiter et de Saturne, par la chute de gouttelettes d'hélium au sein de la phase métallique de l'hydrogène, ce qui dégagerait de la chaleur par friction.

Éloignons-nous encore du Soleil. La température descend toujours... mais jusqu'où ? Sauf cas tout à fait exceptionnel (comme la nébuleuse du Boomerang dans la constellation du Centaure où la température atteint 1 K ; cas unique à ce jour) : $2,728\text{ K}$. En effet, un fond diffus de photons baigne l'Univers dans son ensemble. Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique d'origine cosmologique issu de l'époque dense et chaude qu'a connu l'Univers il y a 13,7 milliards, le Big Bang. La distribution en énergie de ces photons d'un autre temps épouse celle d'un corps noir à $2,728\text{ K}$.

→ Quelle est leur densité aujourd'hui ? On montre que la densité en énergie associée à un corps noir à la température T est donnée par $\frac{4\sigma T^4}{c}$ où c est la vitesse de lumière dans le vide ($299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et σ la constante de Stefan-Boltzmann déjà présentée. On obtient alors une densité de $4,19\cdot 10^{-14}\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$. On montre par ailleurs que l'énergie moyenne d'un photon émis par un corps noir à la température T est $3kT$ où k est la constante de Boltzmann ($1,38\cdot 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$). Le rapport entre la densité en énergie et l'énergie moyenne d'un photon nous donne la densité moyenne de photons d'origine cosmologique emplissant l'Univers : environ 400 millions par mètre cube, soit 400 par centimètre cube.

Les endroits les plus froids dans l'Univers sont habituellement les nuages moléculaires. Avec des densités de cent à un million de particules. cm^{-3} et des températures de 10 à 20 K , ils sont le lieu presque exclusif de la formation des étoiles.

3 Informations pratiques

Adresse

Cité des sciences et de l'industrie
30 avenue Corentin-Cariou
75019 Paris
www.cite-sciences.fr

Accès

Métro : Porte de la Villette (L7)
Bus : 139, 150, 152
Tramway : Porte de la Villette (Ligne 3b)

Horaires d'ouverture

Du mardi au samedi de 10 h à 18 h, le dimanche de 10 h à 19 h.
Fermeture le lundi ainsi que les jours fériés suivants : 1^{er} janvier, 1^{er} mai et 25 décembre.

Élémentaire : 1 gratuité pour 12 entrées payantes

Secondaire : 1 gratuité pour 15 entrées payantes

Tarifs scolaires (valables du 1^{er} septembre 2016 au 31 août 2017)
4,50 € (2,50 € pour les établissements en ZEP)

Tout billet acheté donne droit à une entrée au *Cinéma Louis Lumière* et au sous-marin *Argonaute* (dans la limite des places disponibles) + un accès aux ateliers et au Planétarium sur réservation.

Réservation groupes

Sur internet (devis en ligne)

<http://www.cite-sciences.fr/fr/vous-etes/enseignants/votre-sortie-scolaire/infos-pratiques-et-reservation/devis-en-ligne/>



resagroupescite@universcience.fr



01 40 05 12 12



01 40 05 81 90



Cité des sciences et de l'industrie
Service groupes
30 avenue Corentin-Cariou
75930 Paris Cedex 19