

## IDÉES DE PHYSIQUE

# Refroidir avec des aimants

*Certains matériaux s'échauffent quand on les plonge dans un champ magnétique. Des réfrigérateurs de nouvelle génération utilisent cet effet magnétocalorique.*

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

**L**e temps des réfrigérateurs fonctionnant avec des compresseurs, des hautes pressions et des gaz nocifs à la couche d'ozone est-il révolu ? La société alsacienne *Cooltech* est la première au monde à industrialiser et à commercialiser une alternative crédible à ces dispositifs classiques : un système de réfrigération constitué d'aimants ! Il est fondé sur l'effet magnétocalorique, découvert en 1881 sur le fer par le physicien allemand Emil Warburg. Plongez un matériau magnétique dans un champ magnétique et il s'échauffera légèrement ; retirez-le et il se refroidira. Nous donnerons plus loin une explication de ce phénomène. Commençons par le plus facile : comment, à partir de ces variations de température, réaliser un réfrigérateur ?

## Un cycle thermique avec un matériau magnétique

Le principe est simple (voir la figure de gauche page 87) et ressemble au cycle suivi par le fluide frigorigène dans un réfrigérateur classique. Lorsqu'on plonge le matériau magnétique à température ambiante dans le champ d'un aimant, il s'échauffe. Au moyen d'un échangeur thermique, on évacue partiellement la chaleur produite. Il suffit alors de retirer le matériau du champ

pour le refroidir à une température inférieure à la température ambiante, puis refroidir l'espace à réfrigérer grâce à un second échangeur thermique.

Comment optimiser le dispositif ? D'abord en réalisant des champs magnétiques puissants, ce qui est possible aujourd'hui avec des aimants au néodyme en U. Le champ qu'ils créent peut atteindre une intensité de un tesla, soit plus de 10 000 fois l'intensité du champ magnétique terrestre.

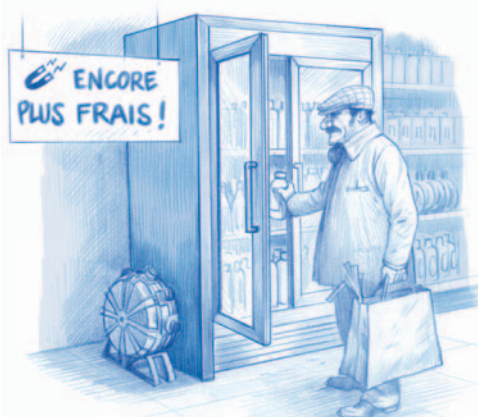
Vient à présent le choix du matériau magnétocalorique. Dans un réfrigérateur classique, pour plus d'efficacité, le cycle met en jeu l'évaporation et la condensation d'un fluide, c'est-à-dire le passage entre le liquide, une phase ordonnée, et le gaz, une

phase non ordonnée. De façon analogue, pour un réfrigérateur magnétique, on met à profit la transition entre un état magnétique ordonné, où les aimants élémentaires – ou spins – du matériau sont alignés, et un état non ordonné, où les orientations des spins sont quelconques.

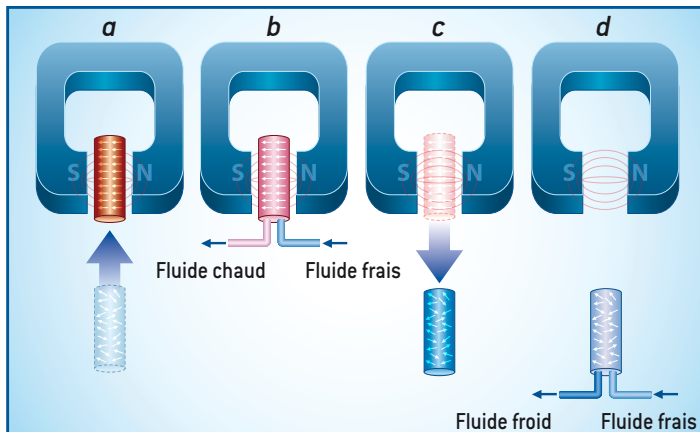
Cette transition se produit à une température nommée température de Curie. Le fer, par exemple, perd son aimantation (état magnétique ordonné) à 770 °C. Autour de cette température, l'aimantation varie considérablement avec la température et est très sensible au champ magnétique ; les variations d'énergie y sont donc importantes.

Cependant, la température de Curie du fer est trop élevée pour des applications. Le gadolinium, avec une température de Curie de 18 °C, est un bien meilleur candidat. Il a été utilisé dans le prototype de réfrigérateur réalisé par les laboratoires américains Ames en 1997, mais les performances de cet appareil sont demeurées modestes, avec un écart de température de 10 °C pour un champ de 10 teslas.

Aujourd'hui, de nouveaux alliages, d'utilisation plus souple et présentant un effet magnétocalorique plus marqué, ont fait leur apparition. Comme l'élévation de température demeure limitée à quelques degrés, il faut envisager des séries de cycles de magnétisation-démagnétisation de ces alliages pour cumuler l'effet et obtenir des différences de température utiles.



**DES RÉFRIGÉRATEURS** fondés sur l'effet magnétocalorique commencent à être commercialisés, pour des applications encore surtout industrielles (à gauche, le dispositif réfrigérant).



**LE CYCLE D'UN RÉFRIGÉRATEUR MAGNÉTIQUE** comporte quatre principales étapes. Le matériau magnétique est introduit dans un champ magnétique et s'échauffe [a]. Puis la chaleur est en partie évacuée à l'aide d'un fluide froid [b]. Le matériau est ensuite retiré du champ, ce qui le refroidit à une température inférieure à celle de départ [c]. Il refroidit ainsi un fluide, qui va remplir son rôle réfrigérant [d]. Et ainsi de suite. Dans ces transformations, l'ensemble des spins [petites flèches] du matériau magnétique passe d'une phase désordonnée [aimantation nulle] à une phase ordonnée [aimantation non nulle], et inversement.

Pour ce faire, on monte l'alliage sur un stator tandis que les aimants sont disposés sur un rotor, mis en rotation à des fréquences de quelques hertz. Le réfrigérateur conçu par Cooltech permet ainsi de créer des écarts de température de plus de 40 °C, avec une puissance refroidissante qui peut atteindre 700 watts pour une température de conservation de -18 °C.

## Des spins qui montent en énergie

Venons-en à l'effet magnétocalorique lui-même. Pourquoi un champ magnétique chauffe-t-il un matériau magnétique ? Une analogie avec la compression et la détente d'un gaz donne une première explication intuitive.

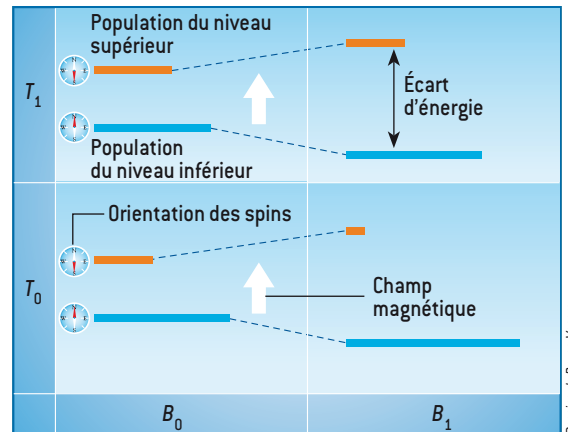
Lorsque nous comprimons un gaz, celui-ci s'échauffe, car, en déplaçant les parois pour réduire l'espace disponible, nous lui donnons de l'énergie et augmentons la vitesse d'agitation de ses molécules. Pour un matériau magnétique, « l'agitation » correspond aux rotations rapides des spins (portés par les électrons) qui le composent. Le rôle des parois est joué par le champ magnétique : plus celui-ci est intense, plus le couple qui tend

à aligner les spins dans sa direction est fort. En augmentant ce champ, nous comprimons l'espace angulaire autorisé et augmentons ainsi l'agitation des aimants élémentaires. Cette agitation se transmet au réseau cristallin qui s'échauffe alors. Comme pour un gaz, cet effet est réversible et une réduction du champ magnétique refroidit l'aimant.

Cependant, pour mieux comprendre l'effet magnétocalorique, il faut faire appel à la physique quantique et à la physique statistique. Dans un champ magnétique, l'énergie des spins portés par les électrons est quantifiée ; elle ne peut prendre que deux valeurs, correspondant à un alignement du spin dans le même sens que le champ ou dans le sens opposé.

Que se passe-t-il en l'absence d'agitation thermique ? Après quelques oscillations, l'aiguille d'une boussole pointe dans le sens du champ magnétique. Il en est de même pour les aimants élémentaires d'un matériau : les spins des électrons s'alignent avec le champ, c'est-à-dire qu'ils peuplent le niveau de plus basse énergie.

À température absolue non nulle, il y a de l'agitation thermique et les faibles interactions des spins avec leur environnement et entre eux les déstabilisent. Une



**CE SCHÉMA INDIQUE** l'énergie des états de spin [échelle verticale] et la population, à l'équilibre thermique, de ces états [échelle horizontale], pour des valeurs différentes de la température  $T$  et du champ magnétique  $B$ . Mais si le champ augmente rapidement de  $B_0$  à  $B_1$ , les populations des deux états de spin restent provisoirement inchangées : les spins n'ont pas le temps de se réarranger. L'écart d'énergie ayant augmenté, on se retrouve momentanément dans la situation correspondant à la température supérieure  $T_1$  (et au champ  $B_1$ ).

## LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

## BIBLIOGRAPHIE

V. Delecourt, M. Hittinger et C. Muller, **Réfrigération magnétique appliquée au froid**, *Revue générale du froid et du conditionnement d'air*, pp. 50-56, avril 2014.

H. R. El-Hana Boucekara et M. Nahas, **Magnetic refrigeration technology at room temperature**, dans V. Barsan (éd.), *Trends in Electromagnetism - From Fundamentals to Applications*, InTech, 2012 (<http://dx.doi.org/10.5772/33789>).

Retrouvez la rubrique  
Idées de physique sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

certaine proportion des spins se retrouvent alors dans le sens opposé au champ, dans l'état de plus haute énergie. Quelle est cette proportion ?

De façon remarquable, la physique statistique montre qu'indépendamment de la nature des interactions, cette proportion ne dépend que de la température absolue  $T$  et de l'écart d'énergie  $\Delta E$  entre les niveaux. C'est la loi de Boltzmann : le logarithme du rapport des populations des deux niveaux est proportionnel au quotient  $\Delta E/T$ , le niveau inférieur étant le plus peuplé. Dans notre cas,  $\Delta E$  est proportionnel au champ magnétique. Cela signifie qu'à l'équilibre, lorsqu'on augmente la température à champ constant, ou lorsqu'on diminue le champ à température constante, on peuple l'état de haute énergie (voir la figure de droite page 87) et les spins sont de plus en plus désordonnés.

Que se passe-t-il quand on plonge le matériau dans un champ magnétique intense ? L'écart entre les niveaux d'énergie des spins augmente (on a d'ailleurs le même effet sur les niveaux d'énergie des molécules d'un gaz dont on diminue le volume). Cependant, si le processus est rapide, les spins n'ont pas le temps de se réorganiser et les populations de chacun des niveaux restent inchangées : avec un champ augmenté, cela n'est possible que si la température elle-même s'est accrue d'autant : l'assemblée de spins est plus chaude !

Le reste du matériau étant resté à la même température, il s'ensuit une phase où l'ensemble des spins refroidit un peu tandis que le reste du matériau s'échauffe. Le résultat final est que le matériau se retrouve à une température plus élevée qu'au départ, ce qui caractérise justement l'effet magnétocalorique. ■



# les conférences

au Palais de la découverte

Dans la limite des places disponibles

Trois conférences proposées par l'Académie de l'air et de l'espace

**Quel modèle cosmologique ?**

Autrefois hautement spéculative, la cosmologie est devenue une science d'observation. Que donne la confrontation observation/théorie ?

**> jeudi 5 février**

**14h La mesure de l'Univers, de l'Antiquité à aujourd'hui**  
avec Jean-Pierre Luminet, astrophysicien

**15h L'Univers révélé par le satellite Planck**  
avec Alain Riazuelo, chargé de recherche à l'Institut d'astrophysique de Paris

**16h Les limites de notre modèle cosmologique**  
avec Jean-Philippe Uzan, astrophysicien

En partenariat avec

Académie de l'Air et de l'Espace  
Air and Space Academy

Avec soutien de

SCIENCE

FUTURA SCIENCES

plus

programme complet sur [palais-science.fr](http://palais-science.fr)