

En vente chez votre marchand de journaux



Retrouvez DIPLOMATIE sur Internet

[WWW.GEOSTRATEGIQUE.COM](http://WWW.GEOSTRATEGIQUE.COM)



Et ne manquez pas en librairie dès le 27 février prochain !

## ATLAS GÉOPOLITIQUE MONDIAL 2013

270 cartes et graphiques pour décrypter toute l'actualité internationale  
(Éditions ARGOS/AREION - Diffusion PUF - 212 pages - 22,50 €)

## VRAI OU FAUX

# Une température absolue peut-elle être négative ?

*Oui. Mais cela ne signifie pas qu'elle passe par le zéro absolu en devenant négative.*

**Roger Balian**



**E**n physique, on utilise une échelle de température dite absolue, dont l'unité est le kelvin [K]. Selon le troisième principe de la thermodynamique, énoncé par le physicien allemand Walther Nemst en 1906, le zéro absolu (0 K, soit  $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) ne peut être atteint. Ce principe traduit l'impossibilité de créer un ordre parfait dans un système donné. Les physiciens refroidissent aujourd'hui des atomes jusqu'à moins de un nanokelvin ( $10^{-9}$  K), mais ils ne peuvent parvenir au zéro absolu.

Pourtant, depuis un demi-siècle, certains manipulent couramment des températures absolues négatives, en particulier dans le domaine de l'imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire (IRM). Comment comprendre ce paradoxe apparent ?

Pour ce faire, examinons comment est définie la température absolue. On l'interprète communément comme une mesure de l'agitation thermique : elle serait alors toujours positive. Cependant, cette interprétation est trompeuse. Elle n'est valide que lorsque l'énergie du système se réduit à l'énergie cinétique de ses molécules. C'est le cas des gaz classiques, qu'étudiaient les physiciens du XIX<sup>e</sup> siècle.

Pour la thermodynamique moderne, la température absolue caractérise la façon dont l'entropie d'un système varie avec son énergie (elle est égale à l'inverse de la dérivée de l'entropie par rapport à l'énergie). L'entropie est une grandeur qui mesure le désordre du système – plus précisément le nombre de configurations microscopiques compatibles

avec les contraintes macroscopiques (énergie, volume, etc.). On montre qu'à l'équilibre thermodynamique, deux systèmes en contact ont la même température. Et dans le cas d'un gaz classique, on retrouve l'interprétation de la température en termes d'agitation.

Dans les systèmes usuels, l'entropie augmente toujours avec l'énergie, d'où une température absolue positive. Ce n'est pas le cas dans d'autres systèmes, tels ceux de spins nucléaires (moments magnétiques portés par les noyaux atomiques) soumis à un champ magnétique, comme nous allons l'expliquer. On utilise de tels systèmes en IRM, où les spins des noyaux d'hydrogène d'un organe placé dans deux champs magnétiques (l'un constant, l'autre variable) créent un signal qui permet de visualiser cet organe.

## Deux températures distinctes

Dans le matériau renfermant les spins, l'énergie se répartit en une énergie de spin (résultant de l'interaction des spins avec le champ magnétique) et une énergie « de réseau » (comportant les énergies cinétiques dues aux mouvements des atomes et les énergies de leurs interactions). Les spins sont si faiblement couplés avec les autres degrés de liberté du matériau qu'ils se comportent temporairement comme un système isolé. Dès lors, on a une température propre à ce système, dite de spin et distincte de la température de réseau.

Dans une assemblée de spins, l'énergie globale est minimale lorsque les spins sont

tous dans le sens du champ. Elle augmente lorsqu'ils se retournent, ce qui fait d'abord croître l'entropie (le désordre). Mais à mesure que la majorité des spins se réorientent dans le sens inverse du champ, un ordre se rétablit tandis que l'énergie continue à croître : dès lors, l'entropie devient une fonction décroissante de l'énergie. La température absolue ayant le même signe que la dérivée de l'entropie par rapport à l'énergie, la température de spin est dans ce cas négative.

Notons que l'énergie du système de spins est plus élevée quand sa température est négative que quand elle est positive. De façon générale, un système de température négative cède de l'énergie à tout système de température positive. On ne peut donc pas considérer les températures négatives comme inférieures aux températures positives, ce qui explique que la température ne passe pas par le zéro absolu en devenant négative. Cette étrangeté mathématique résulte d'une définition malheureuse de la température au XIX<sup>e</sup> siècle. On aurait pu l'éviter en définissant la température comme l'inverse de la grandeur utilisée depuis cette époque.

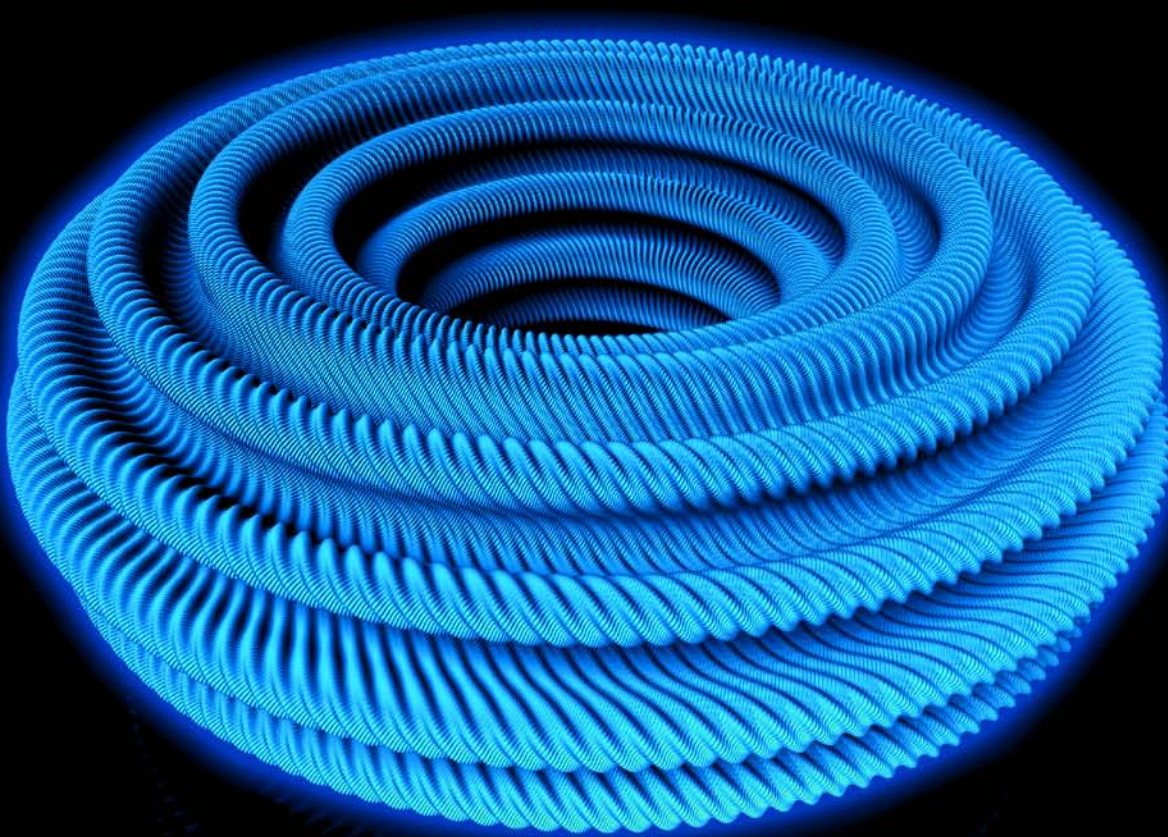
Ainsi, le zéro absolu reste impossible à atteindre. En outre, une température absolue négative ne peut pas subsister indéfiniment. Le système de spins n'étant pas parfaitement isolé, il échange de l'énergie avec les autres degrés de liberté et l'équilibre thermique global finalement atteint a une température positive. ■

*Roger BALIAN, physicien, est membre de l'Académie des sciences.*

# Les fractales lisses

Vincent Borrelli, Francis Lazarus et Boris Thibert

Il est possible de transformer une portion de plan en une surface torique sans modifier les longueurs. Le résultat, visualisé pour la première fois, inaugure une nouvelle famille d'objets géométriques.



## 1. CETTE SURFACE A ÉTÉ OBTENUE

en transformant un carré en une surface torique de telle façon que toutes les longueurs soient préservées. C'est la première fois que l'on visualise le résultat d'un tel « plongement isométrique du tore carré plat ». La surface ressemble à une fractale, mais n'en est pas une ; c'est un objet géométrique plus régulier.