

neurone est réduite. Les signaux des fibres parallèles participent moins au signal de la cellule de Purkinje, ce qui se traduit comme un apprentissage moteur. La dépression à long terme n'a lieu que lorsque les concentrations en deux «seconds messagers» (le calcium et le diacylglycérol) augmentent simultanément dans la cellule de Purkinje. Ainsi, une chaîne de traitement de l'information dans des circuits neuronaux déclenche une réaction biochimique qui détermine un changement comportemental!

Des réseaux d'oscillateurs

D'autres traits originaux des voies cérébelleuses autorisent des réactions de rattrapage très rapides. Ainsi, les neurones de l'olive inférieure ont des propriétés électriques particulières : leur potentiel de membrane oscille spontanément, au rythme de une à dix fois par seconde. Des potentiels d'action sont émis dans la fibre grimpante quand une des oscillations dépasse un seuil. Or, ces oscillations sont influencées par celles des neurones voisins, car en plus des synapses classiques, les membranes des neurones contigus s'accrochent en des synapses électriques qui transmettent instantanément les potentiels membranaires d'un neurone à l'autre. Ainsi, les variations des potentiels se synchronisent parfois, et s'annulent ou s'amplifient.

Les neurones de l'olive inférieure forment un réseau d'oscillateurs couplés sensible aux coïncidences d'événements. Lorsqu'un mouvement dévie de sa trajectoire, les signaux sensoriels qui mesurent le mouvement en cours et les copies d'ordres moteurs qui codent le mouvement programmé diffèrent. Ces écarts sont détectés par le réseau d'oscillateurs, et les oscillations des potentiels membranaires s'amplifient très vite, jusqu'à dépasser le seuil de déclenchement d'un potentiel d'action. Les neurones de l'olive inférieure envoient alors, via les fibres grimpantes, le signal qui modifie le fonctionnement du cervelet. L'activation du cervelet déclenche une

rétroaction : des neurones des noyaux cérébelleux envoient à l'olive inférieure des signaux inhibiteurs qui bloquent les jonctions électriques, ce qui diminue le nombre de neurones couplés, réduit les oscillations des potentiels membranaires et interrompt l'émission de potentiels d'action dans les fibres grimpantes.

Le fonctionnement alterné du cervelet selon deux modes résulte à la fois de la structure du circuit et des caractéristiques dynamiques des neurones. Cette alternance détermine le rythme des mouvements, tel un métronome, afin d'enchaîner des gestes complexes. Ce rythme permet aussi de percevoir les intervalles de temps entre deux événements proches : ainsi, des malades atteints d'une lésion au cervelet ne réussissent pas à estimer la durée qui s'écoulent entre deux sons.

En assurant la combinaison des signaux sensoriels entre eux et avec les signaux moteurs, le cervelet perçoit précisément les mouvements du corps dans le monde dont il construit une image interne cohérente.

Le fonctionnement du cervelet est une source d'inspiration pour les roboticiens. Il pourrait aussi être utile pour guider l'étude des mécanismes de la pensée. En effet, le cervelet aide peut-être le cerveau à effectuer des calculs. Par ailleurs, des réseaux de neurones semblables à ceux de l'olive inférieure, qui détectent les signaux corrélés entre eux grâce aux oscillations de leurs potentiels de membrane, existent aussi dans le thalamus. Cette région reçoit des signaux de toutes les régions du cerveau et se projette sur le cortex cérébral. Le thalamus coordonnerait le fonctionnement des diverses régions du cortex cérébral de la même façon que l'olive inférieure le fait pour le cervelet. Les concepts abstraits sont peut-être construits comme les représentations internes des mouvements du corps : au cours de l'évolution, les règles de combinaison de signaux qui servent à contrôler les mouvements ont peut-être été transposées pour que l'on perçoivent quels faits sont corrélés et que la cohérence des pensées soit assurée.

Christian DARLOT est neurophysiologiste au CNRS et travaille à l'École nationale supérieure des télécommunications.

J. C. ECCLES, M. ITO et J. SZENTAGOTHAÏ, *The cerebellum as a neuronal machine*, Springer, Berlin, 1967.

M. ITO, *The cerebellum and the neural control*, Raven, New York, 1984.

Larry SQUIRE et Éric KANDEL, *La mémoire des habiletés*, dans *La mémoire, le jardin des pensées*, Dossier Pour la Science, avril 2001.

L'étrange comportement de l'eau ultra-froide

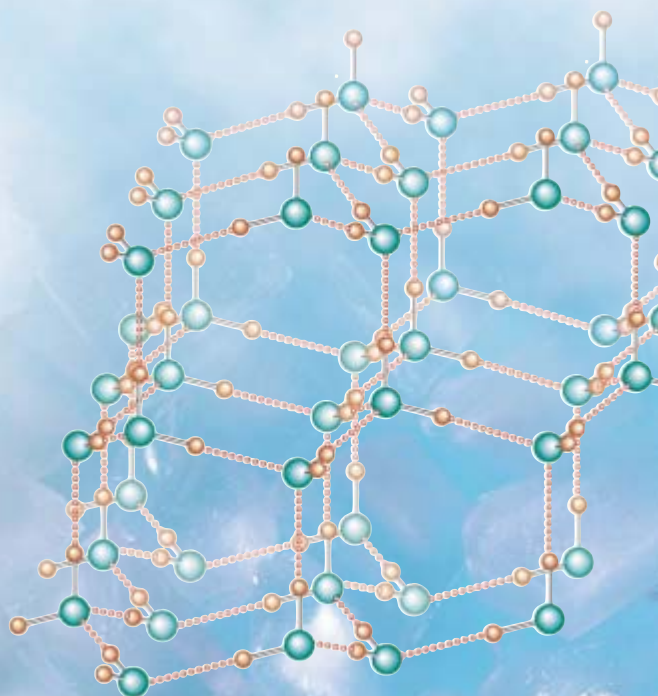
JOSÉ TEIXEIRA

En apparence, l'eau est un corps simple. En fait, elle a des propriétés étonnantes, tout particulièrement à basse température. Ses changements d'état entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-135\text{ }^{\circ}\text{C}$ restent énigmatiques, mais le scénario commence à se préciser.

«**Q**u'est-ce que l'eau? Est-elle fluide ou solide de sa nature? Ne faut-il pas, pour qu'elle coule, qu'un feu secret en désunisse les parties? Ôtez une grande quantité de ce feu, elle devient glace. Or, qu'est-ce qu'un élément qui a besoin d'un autre élément pour exister?» Tirées de son essai *Des singularités de la Nature*, ces réflexions de Voltaire montrent qu'il y a 250 ans déjà, les changements d'état de l'eau intriguaient les «sages». Voltaire avait raison : l'eau est l'une des singularités de la nature. Quelle que soit la température, elle se distingue. L'eau est pratiquement le seul corps plus dense dans sa phase liquide que dans sa phase solide. L'énergie nécessaire pour porter à ébullition un litre d'eau ferait fondre la casserole qui le contient si cette dernière était vide. Plus étonnantes encore sont les transitions de phase de l'eau, c'est-à-dire ses changements d'état. Certes, l'eau se transforme en glace à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et en vapeur à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais, dans certaines conditions, elle peut rester à l'état liquide au-delà de ces températures limites. Ainsi, de l'eau «ultra-propre» peut être portée à $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ sans bouillir. En revanche, cet état est très instable, et la moindre perturbation déclenche une ébullition explosive. Inversement, elle peut rester liquide au-dessous de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; on dit alors qu'elle est surfondue.

Aujourd'hui, les physiciens connaissent la cause de ces remarquables propriétés : la liaison hydrogène. Cette «pseudo-liaison» est différente des «vraies» liaisons covalentes qui lient, dans chaque molécule d'eau, l'atome d'oxygène à ses deux atomes d'hydrogène ; elle ne lie pas entre eux les atomes d'une même molécule, mais les atomes d'oxygène et d'hydrogène de molécules différentes. Nous expliciterons ses propriétés. Depuis 30 ans, on étudie cette liaison entre molécules d'eau ; on l'a décrite, modélisée et l'on en a mesuré la durée de vie à l'aide de lasers ultra-rapides. Les propriétés de la liaison hydro-

1. LES TROIS FORMES COMMUNES DE L'EAU sont la glace cristalline, l'eau liquide et la vapeur. Dans la glace cristalline, les molécules H_2O sont régulièrement disposées au sein d'un vaste réseau hexagonal, où les molécules sont reliées entre elles par de nombreuses liaisons hydrogène. Dans l'eau liquide, de nombreuses liaisons hydrogène sont rompues, de sorte que l'ordre à grande distance qui caractérise la glace cristalline disparaît. Toutefois, quelques figures hexagonales subsistent et des zones de faible densité coexistent avec des zones de densité plus forte. Dans la vapeur, les liaisons hydrogène entre molécules sont rares et la densité est très faible.

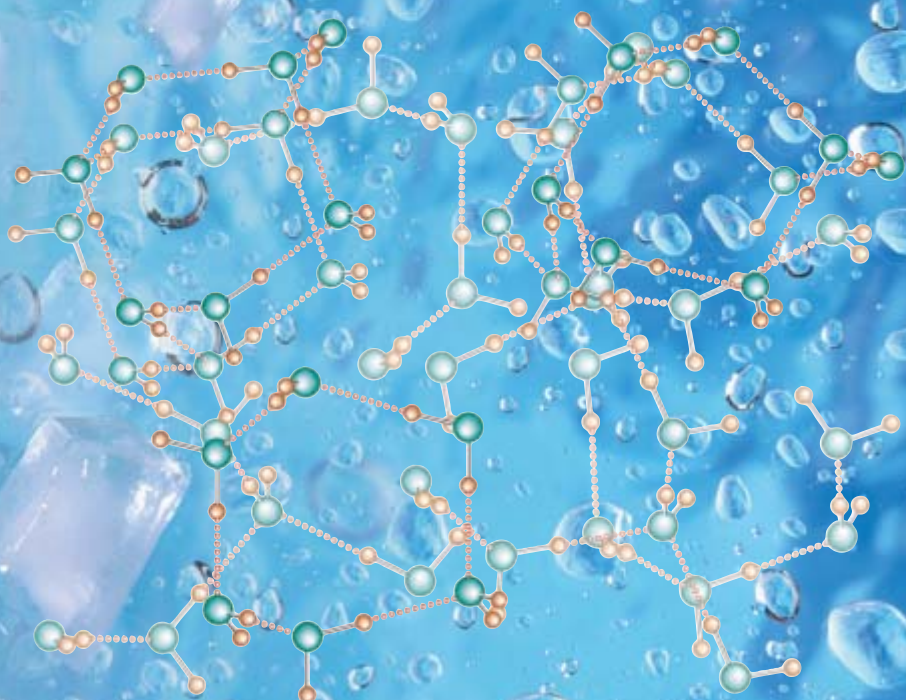
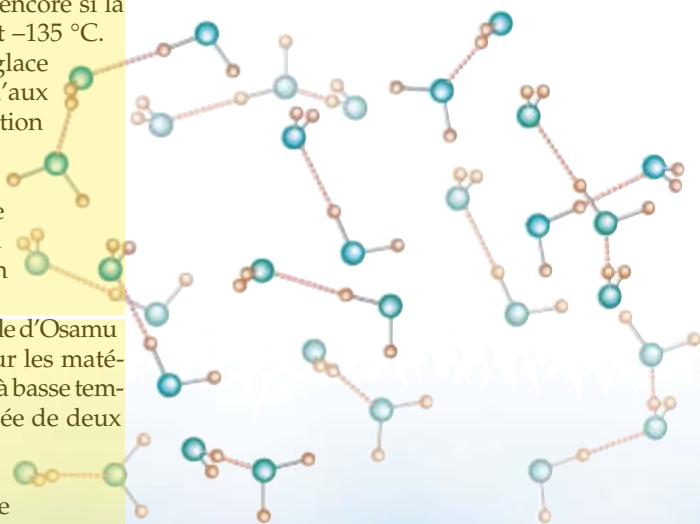


Montage PL/SM/raed/falmer, Susumu Sato/The Stock Market

gène expliquent bien le comportement de l'eau, de la vapeur d'eau et de la glace. Toutefois, il est un domaine de températures où l'on ignore encore si la liaison hydrogène explique les propriétés de l'eau : entre -40°C et -135°C . Au-dessus de -40°C , l'eau est soit surfondue, soit sous forme de glace cristalline. Même quand on parvient à la maintenir en surfusion jusqu'aux environs de -40°C , à cette température, la «température de nucléation homogène», elle finit toujours par se transformer spontanément en glace cristalline. Au-dessous de -135°C , la «température de transition vitreuse», l'eau se transforme en une glace vitreuse. Dans ce type de glace, les molécules d'eau ne s'arrangent pas selon un réseau cristallin régulier, mais comme dans un liquide que l'on aurait brusquement figé. Que se passe-t-il entre -40°C et -135°C ?

Aujourd'hui, deux explications sont proposées. Selon la première, celle d'Osamu Mishima et d'Eugene Stanley, de l'Institut japonais de recherche sur les matériaux inorganiques, formulée en 1994, les transitions de phase de l'eau à basse température traduisent la présence d'un mélange : l'eau serait composée de deux formes de glace vitreuse de densités différentes. La seconde théorie s'appuie sur la dynamique des molécules d'eau. Ces petites molécules formées d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène participent à de grands mouvements d'ensemble, relativement lents, mais subissent aussi des mouvements individuels rapides, parce que les liaisons hydrogène entre molécules se font et se défont sans cesse. La façon dont ces deux types de mouvements se combinent, explique le comportement de l'eau aux alentours de -40°C , et peut-être au-delà...

Avant de décrire le comportement étrange de l'eau dans les contrées difficiles à explorer des basses températures, commençons par rappeler le rôle que joue la liaison hydrogène dans l'eau à toutes les températures.



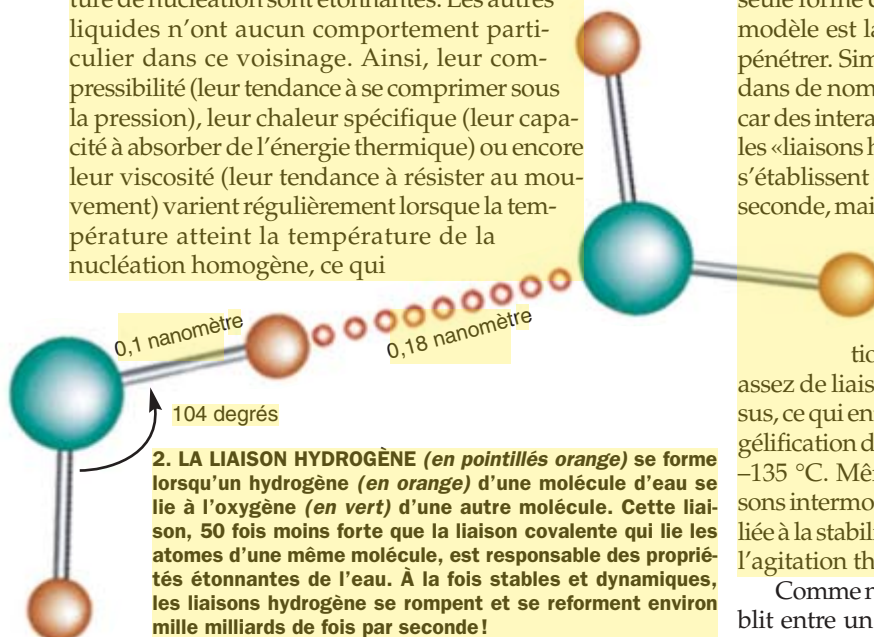
L'eau surfondue

Cette liaison joue un rôle important, notamment dans le cas de l'eau surfondue, entre 0 et -40°C . On s'intéresse à cet état instable, car l'eau surfondue est fréquente dans la nature et souvent utilisée dans l'industrie. Ainsi, certains nuages sont formés de gouttelettes d'eau surfondue. Quand un avion traverse un tel nuage, il perturbe ces gouttelettes qui sont dans un état métastable ; elles cristallisent alors en masse sur les ailes et alourdissent l'engin. Le phénomène a déjà provoqué le crash de plusieurs avions de ligne (pour éviter ce genre d'accident, on fait passer les appareils sous une douche d'antigel). Les microcavités des roches contiennent aussi de l'eau surfondue qui reste liquide même quand la température atteint -20 , voire -30°C .

L'eau surfondue se transforme en un cristal de glace, dès qu'une amorce solide (une micropoussière) y est introduite : c'est le phénomène de «nucléation» (du latin *nucleus* qui signifie noyau). Une fois l'amorce présente, toute la masse d'eau prend en une fraction de seconde, car l'ordre cristallin se propage, telle une onde. Dans les conditions normales, la nucléation se produit à 0°C . Toute aspérité à la surface du récipient qui contient l'eau ou toute impureté est un germe de cristallisation. Ce corps étranger présent au milieu des molécules d'eau sert d'ancrage aux premières molécules ordonnées du cristal, qui constituent l'amorce. En revanche, avec de l'eau pure placée dans un récipient parfaitement lisse et propre, la nucléation n'est spontanée qu'à la température de nucléation homogène, située vers -40°C . En pratique, la probabilité de formation d'un noyau de congélation augmente avec le volume : on atteint une température de nucléation d'autant plus basse que le volume d'eau refroidi est petit, car on a plus de chances d'éliminer tout germe de nucléation.

Pourquoi, cette limite de -40°C n'est-elle jamais dépassée ? Une explication qualitative existe : une fois la température assez basse, de petites variations locales de l'agitation thermique seraient suffisantes pour amorcer la nucléation. En d'autres termes, de petites zones de densité égale à celle de la glace cristalline apparaîtraient vers -40°C et pourraient se maintenir assez longtemps pour amorcer la cristallisation.

Les propriétés de l'eau autour de la température de nucléation sont étonnantes. Les autres liquides n'ont aucun comportement particulier dans ce voisinage. Ainsi, leur compressibilité (leur tendance à se comprimer sous la pression), leur chaleur spécifique (leur capacité à absorber de l'énergie thermique) ou encore leur viscosité (leur tendance à résister au mouvement) varient régulièrement lorsque la température atteint la température de la nucléation homogène, ce qui



semble normal puisque la solidification n'est liée qu'à la présence aléatoire d'un germe de nucléation. Ce n'est que vers la température de transition vitreuse, bien inférieure, que leur viscosité augmente brusquement : on dit qu'elle «diverge». Un verre n'étant qu'un liquide qui ne coule pas, parce que sa viscosité est infinie, on conçoit que cette dernière diverge à la température de transition vitreuse. De plus, au passage de la température de transition vitreuse, leur chaleur spécifique diminue. À l'état vitreux, les molécules se figent et perdent certains de leurs degrés de liberté, donc une partie de leur capacité à absorber de l'énergie.

Dans le cas de l'eau, tout est différent : la viscosité de l'eau surfondue ne diverge pas à la température de transition vitreuse, mais à la température de nucléation homogène ! La compressibilité et la chaleur spécifique de l'eau adoptent, elles aussi, des évolutions différentes de celles que l'on attendrait, par comparaison avec les autres corps.

Ainsi, l'étude de l'eau surfondue au seuil de la nucléation homogène est un enjeu majeur, mais qui, en pratique, est malheureusement hors d'atteinte, car la durée de vie de l'eau liquide devient très inférieure à la seconde vers -40°C . Aujourd'hui, on ne dispose pas de procédure expérimentale qui permettrait l'observation directe des phénomènes à cette température.

Le rôle de la liaison hydrogène

La liaison hydrogène serait-elle la clé des bizarreries de l'eau à basse température ? Sans doute, du moins le nombre et la nature des liaisons entre les molécules d'eau expliquent-ils les caractéristiques de l'eau à température ambiante, qui, elles aussi, sont inhabituelles. L'eau est un «liquide associé», c'est-à-dire que les liaisons intermoléculaires y jouent un rôle dominant. Afin de souligner les particularités moléculaires de l'eau, rappelons brièvement la vision «classique» que les physiciens ont des liquides. Ils les assimilent à des sacs de billes, où les molécules sont représentées par des sphères supposées sans interactions. Une telle conception ressemble à celle que Maxwell établit pour les gaz à la fin du XIX^e siècle, mais, dans le cas d'un liquide, la distance moyenne entre les molécules est, comme dans un solide, de l'ordre de leur diamètre. La seule forme d'interaction prise en compte dans le cadre de ce modèle est la répulsion qui empêche les sphères de s'interpénétrer. Simpliste, le modèle du sac de billes est insuffisant dans de nombreux cas. Dans celui de l'eau, il est même faux, car des interactions attractives règnent dans ce liquide : ce sont les «liaisons hydrogène» entre molécules. Ces liaisons fugaces s'établissent et se rompent environ mille milliards de fois par seconde, mais elles imposent pourtant un certain ordre. Ainsi,

la multiplication des liaisons hydrogène entraîne la gélification. Ce changement d'état s'observe facilement dans une solution de collagène (gélatine) que l'on refroidit. L'agitation thermique n'y est plus assez forte pour rompre assez de liaisons hydrogène, et un certain ordre prend le dessus, ce qui entraîne la formation d'un gel. Soulignons que cette gélification diffère de la transition vitreuse que subit l'eau vers -135°C . Même des corps non associés (dépourvus de liaisons intermoléculaires) subissent cette transition, qui n'est pas liée à la stabilisation progressive des liaisons hydrogène quand l'agitation thermique diminue (la température baisse).

Comme nous l'avons indiqué, une liaison hydrogène s'établit entre un atome d'oxygène d'une molécule et un atome