

# Les mouvements des macromolécules qui 'dansent'

## Dancing with Macromolecules

Série Jazz Quantique de l'eau

*Les macromolécules ont besoin de beaucoup d'eau pour fonctionner sans effort et pour acquérir des propriétés complètement nouvelles lorsqu'elles sont convenablement hydratées. [Dr. Mae-Wan Ho](#)*

Rapport de l'ISIS en date du 18/10/2010

L'article original en anglais avec références et illustrations s'intitule [Dancing with Macromolecules](#) ; il est accessible par les membres de l'ISIS sur ce site [www.isis.org.uk/dancingWithMacromolecules.php](http://www.isis.org.uk/dancingWithMacromolecules.php)

Le matériel du présent site ne peut être reproduit sous aucune forme sans autorisation explicite. POUR OBTENIR SON APPROBATION et les EXIGENCES DE REPRODUCTION, [ISIS CONTACT](#) S'IL VOUS PLAÎT. Lorsqu'une autorisation est accordée TOUS LES LIENS doivent rester inchangés

Les organismes possèdent un énorme répertoire de réactions chimiques qui leur permet de transformer l'énergie et les matières pour leur croissance, leur développement et de faire tout ce qui est exigé par tout être vivant.

Ce qui est peut-être le plus remarquable, c'est que ces réactions chimiques sont catalysées par des protéines enzymatiques qui accélèrent le taux de réaction par un facteur de  $10^{10}$  à  $10^{23}$ . Mais la question de savoir comment les enzymes font ce travail reste à ce jour sans réponse [1].

Si un sujet a reçu trop peu d'attention jusqu'à une date relativement récente, c'est bien l'eau. Il est bien connu que les enzymes et d'autres macromolécules, l'ADN et l'ARN, ont besoin d'une quantité minimum d'eau afin de fonctionner à tout instant et, bien plus encore, pour travailler efficacement.

C'est pourquoi les cellules sont chargées avec de l'eau, environ 70 pour cent en poids. En termes de nombre de molécules, l'eau dépasse de loin toutes les autres espèces chimiques : les ions, les petites molécules organiques et les macromolécules réunies.

L'eau est nécessaire pour donner de la souplesse aux macromolécules, afin qu'elles puissent danser librement dans le jazz quantique de l'eau, afin d'accomplir leurs tâches qui seraient autrement impossibles à réaliser : faire en sorte que les réactions chimiques puissent se produire spontanément et sans effort.

Beaucoup de chercheurs scientifiques sont en effet prêts à admettre l'idée que les protéines agissent mécaniquement de manière quantique, ou, comme certains d'entre nous l'ont proposé depuis des années déjà, que les protéines enzymatiques sont des mécanismes moléculaires quantiques qui transforment l'énergie de manière cohérente (voir [2] [The Rainbow and the Worm, The Physics of Organisms](#) , ISIS publication).

Mais nous devons revenir en arrière pour tenter d'esquisser un tableau d'ensemble.

## L'eau d'hydratation en surfusion

Au cours des 20 dernières années, l'eau a été reconnue comme un constituant actif de la biochimie cellulaire et pas seulement un solvant inerte [3]. L'eau a une relation spéciale avec les protéines dans leur 'enveloppe d'hydratation'.

L'enveloppe d'hydratation peut être définie comme une eau associée à la protéine au point final d'hydratation, quand l'addition d'eau supplémentaire ne produit aucun changement de ses propriétés essentielles, dans le cas d'une enzyme, ce serait son activité enzymatique. Cette enveloppe d'hydratation est une simple couche de molécules d'eau couvrant la surface de la protéine.

L'eau se trouvant en dehors de la monocouche est perturbée dans une moindre mesure de manière significative, mais généralement non détectée par les mesures de propriétés telles que la capacité thermique, le volume ou la quantité de chaleur (elle est toutefois de plus en plus reconnue par les techniques de mesure plus récente, voir plus loin).

L'activité du **lysozyme**, par exemple, suit de près le développement des mouvements de surface lorsque l'hydratation augmente, laquelle est donc responsable de la fonction de la protéine.

Contrairement à l'eau libre, l'eau d'hydratation des protéines ne gèle pas à 0°C, mais elle peut être refroidie, en **surfusion**, jusque dans une transition [4] à  $T_g \sim 170$  K (environ -103°C), et elle est reflétée dans les discontinuités dans la chaleur spécifique et par le coefficient de dilatation thermique de l'eau d'hydratation. En-dessous de cette température, l'eau d'hydratation se fige dans un solide non-cristallin qui n'a pas d'ordre moléculaire. Près de  $T_g$ , le mouvement de l'eau est arrêté.

Cependant, la protéine a sa propre transition dynamique, une apparition brutale de mouvements atomiques qui peuvent être détectés par **diffusion de neutrons**, et qui se produit à  $T_D \sim 225 \pm 5$  K. Il s'agit d'une propriété générique des protéines hydratées et qui est absente dans les systèmes déshydratés.

Cette propriété est donc liée à la dynamique de l'enveloppe d'hydratation. Certains chercheurs considèrent la transition dynamique des protéines comme la "manifestation microscopique" de la transition de la couche d'hydratation. D'autres, cependant, l'interprètent comme un liquide à transition depuis un fluide, un liquide à haute densité (HDL) jusqu'à un liquide moins fluide, un liquide de faible densité (LDL), ou de l'eau en surfusion [3].

Un comportement similaire a été trouvé pour l'eau confinée dans divers milieux biologiques et non biologiques, et dans une gamme de 18 solutions, y compris des

formations organiques *in vitro* de faible poids, des polymères, des sucres, ainsi que des protéines et des sondes à ADN avec une large bande en **spectroscopie diélectrique** (voir encadré) : entre  $10^{-2}$  et  $10^7$  Hz [5].

Les caractéristiques universelles de la dynamique de l'eau sont apparues au-dessus et en dessous de la transition, qui étaient semblables à de l'eau en surfusion et à de l'eau confinée en surfusion respectivement. Cependant, la température de transition s'étend sur une assez large gamme de 165 à 220 K.

### Encadré - Spectroscopie diélectrique

Un diélectrique est une molécule telle que l'eau qui est polarisée - avec des charges séparées, négatives et positives - ou qui peut être polarisée par un champ électrique appliqué. La spectroscopie diélectrique mesure la réponse diélectrique d'un échantillon à un champ électromagnétique externe, appliqué sur une plage de fréquences.

Les propriétés diélectriques d'un matériau sont exprimées en un nombre complexe connu sous le nom de **permittivité**. La partie réelle de la permittivité mesure l'énergie stockée, la partie imaginaire mesure la perte d'énergie et elle est appelée la perte diélectrique. Lorsque le champ extérieur est appliqué, les dipôles dans l'échantillon vont s'orienter avec le champ appliqué.

Aux basses fréquences, ils peuvent suivre parfaitement la polarisation du champ appliqué, résultant de la permittivité maximum et du minimum de pertes diélectriques.

Lorsque la fréquence augmente, les molécules ne peuvent plus suivre le changement du champ électrique : cela se traduit par moins d'énergie stockée et des pertes plus élevées. Même aux fréquences plus élevées, les molécules ne répondent plus au champ appliqué, et les molécules se séparent. Par exemple, les molécules d'eau sont 'étirées' à des fréquences supérieures à  $10^{11}$  Hz, et au-delà, elles se brisent.

Le temps de relaxation diélectrique est la mesure du temps qu'il faut pour que les charges séparées dans un diélectrique, soient neutralisées par le processus de conduction.

### Davantage de couches d'hydratation ont été mises en évidence

Au cours des dernières années, une nouvelle technique de **spectroscopie térahertz** ( $10^{12}$  Hz) a créé des remous dans la communauté des spécialistes de l'**hydratation des protéines**.

Martina Havenith et ses collègues de l'Université de la Ruhr à Bochum, en Allemagne, ont eu recours à cette nouvelle 'technologie de pointe' pour révéler les propriétés globales de protéines et de leurs couches d'hydratation [6], ce qui a incité un certain nombre de scientifiques travaillant sur l'eau, à repenser l'hydratation des protéines.

Beaucoup de techniques sophistiquées ont été utilisées pour sonder la dynamique des protéines et l'eau d'hydratation sur une large plage de temps et d'espace. Par exemple, la spectroscopie de relaxation RMN résout la dynamique de l'eau depuis les

nanosecondes jusqu'à quelques secondes, alors que la cristallographie aux rayons X révèle des structures fixes des protéines et des molécules d'eau liées à l'intérieur des protéines et dans les environs.

Ces deux techniques fournissent des informations sur l'hydratation à courte portée, jusqu'à 3 Å (angström =  $10^{-10}$  m) de la surface de la protéine qui correspond à une couche d'hydratation. Les sondes de spectroscopie diélectrique traditionnelles fonctionnent de 100 secondes à 100 ps (picoseconde =  $10^{-12}$  s). La spectroscopie diélectrique Terahertz étend l'échelle de temps vers le bas dans la gamme des picosecondes ps. La diffusion des neutrons résout la dynamique à ce niveau des picosecondes.

Sur les échelles de temps plus rapide, les sondes de spectroscopie infrarouge en deux dimensions procèdent dans une gamme de temps qui se déroule en femtosecondes (1 fs =  $10^{-15}$  s).

Et l'image remarquable qui en ressort est que les protéines et la dynamique d'hydratation peuvent être corrélées sur toutes les échelles de temps, comme elles le seraient par ailleurs dans les systèmes de cohérence quantique [2].

La spectroscopie d'absorption térahertz, rendue possible par les puissantes sources électromagnétiques térahertz de pointe, ouvre une nouvelle fenêtre entre les micro-ondes et l'infrarouge permet de scruter dans les interactions globales de l'eau avec les protéines qui sont complètement dissoutes (dans un milieu avec un excès d'eau).

L'absorption de la protéine solvatée augmente linéairement avec la fréquence dans une étroite plage de fréquences de 2.25 à 2.55 THz. En se concentrant sur des mesures à une seule fréquence, les chercheurs ont constaté que le coefficient d'absorption de la solution par rapport à l'eau libre, augmente avec la concentration en protéines, avant de chuter et de diminuer de façon presque linéaire à des concentrations plus élevées.

*Figure 1. Coefficient d'absorption versus concentrations en protéines (à gauche) et son explication (à droite)*

À des concentrations en protéines de 0,5 à 1 mM, lorsqu'apparaissent les pics des coefficients d'absorption et que ces derniers commencent à retomber, le volume d'eau déplacé par les molécules de protéines est négligeable, de l'ordre d'environ 1 pour cent. Par conséquent, l'eau d'hydratation autour de la protéine doit largement contribuer à l'absorption THz totale.

Les chercheurs ont eu recours à des simulations de dynamique moléculaire pour calculer l'absorbance de la protéine et la couche d'hydratation, d'abord comme une fonction de la distance entre la surface des protéines, qui devraient dépendre de la concentration en protéine.

En accord avec les observations de l'expérience à des concentrations au-delà du pic d'absorbance, la distance entre les protéines influence de manière significative l'absorption de la protéine, ainsi que sa couche d'hydratation et les couches au-delà. L'absorbance diminue à mesure que les protéines se sont rapprochées de 24 à 18 Å, puis s'aplatit ensuite pour les distances les plus courtes, changeant peu avec la distance entre les protéines.

D'autres simulations de dynamique moléculaire ont révélé que les **liaisons hydrogène** entre les molécules d'eau, dans les couches d'hydratation jusqu'à environ 10 Å, survivent plus longtemps que celles qui sont en place dans l'eau libre. Les données expérimentales indiquent une séparation moyenne de plus de 20 Å lorsque l'absorbance atteint un sommet, qui couvre près de 7 couches d'eau.

Les premiers résultats ont été obtenus dans une protéine génétiquement modifiée 'I\*<sub>6-85</sub>', mais des résultats similaires ont été obtenus avec le lysozyme et la myoglobine normales [non-OGM] [7]. A 23 g d'eau par g de protéines de lysozyme, l'absorbance a fait un bond vers le haut avec une souplesse structurelle accrue de la protéine. De même, la myoglobine a montré un maximum à 98 pour cent en poids d'eau (24 g / g).

Tandis que l'eau libre et son absorption diminuent, la concentration en protéines augmente : ceci est plus que compensé par l'absorption de couches d'hydratation et de la protéine hydratée, qui devient alors une unité cohérente dynamique (Fig. 1, schéma de droite).

### L'eau d'hydratation ferroélectrique

Les résultats inattendus de la spectroscopie d'absorption diélectrique TéraHertz [6, 7] ont stimulé les chercheurs et les ont amené à examiner les propriétés électrostatiques de l'eau d'hydratation. Davis LeBard et Dmitry Matyushov de l'Arizona State University, à Tempe, aux Etats-Unis, ont déclaré que [8] pour expliquer ces observations, « il faut un très grand moment dipolaire efficace de la protéine et de son enveloppe d'hydratation, dépassant largement le moment dipolaire de la protéine elle-même ».

Ces chercheurs LeBard et Matyushov ont montré par des simulations numériques que l'eau d'hydratation des protéines est polarisée dans une enveloppe **ferroélectrique** d'environ 3-5 molécules d'eau d'épaisseur, avec de grands moments dipolaires moyens.

En outre, le moment dipolaire de l'enveloppe d'hydratation fluctue en fonction d'une grande amplitude, beaucoup plus large que celle de l'eau libre, et dépassant de loin l'ampleur prévue par la théorie de réponse linéaire habituelle, comme l'indiquent aussi des mesures réelles. Ces fluctuations importantes sont dominées par une 'lente' dynamique de l'ordre de la nanoseconde, probablement associée à des mouvements collectifs de conformation de la protéine.

Ces résultats correspondent tout juste à ce qui est attendu de la nature cristalline liquide dynamique des organismes vivants, comme cela a été découvert dans mon laboratoire en 1992, et qui implique que l'eau associée à des macromolécules est également polarisée et se déplace de manière cohérente avec les macromolécules [2].

N'y a-t-il pas là une preuve évidente que le système d'hydratation-protéine est dans un état de cohérence quantique, comme j'ai suggéré qu'un organisme vivant est en cohérence quantique ?

### La danse quantique des protéines

La possibilité d'**effet tunnel quantique** a été invoquée dans la catalyse enzymatique. Le tunnel quantique est un effet mécanique quantique dans lequel les particules passent

*en-dessous* une barrière d'énergie, pour parvenir à une réaction chimique qui est impossible dans la chimie classique. Le tunnel quantique est déjà bien admis dans le transfert d'électrons et il est fréquemment observé pour le transfert de protons [2].

De récentes études expérimentales et des simulations de calculs ont montré clairement que la flexibilité des protéines induite par l'eau est importante dans la réduction des barrières d'énergie libre entre les réactifs et les produits. La flexion de protéines augmente la probabilité d'effet tunnel quantique entre les réactifs et produits par une compression temporaire de la barrière d'énergie. (Évidemment, dans le cas de transfert d'électrons ou de protons, l'effet tunnel quantique n'aura lieu que si les actions du donneur et de l'accepteur sont également corrélées ou cohérentes, ainsi, la **cohérence** doit alors s'étendre à l'ensemble des protéines de l'accepteur et du donneur). Les mêmes études indiquent que la dynamique des protéines est étroitement liée à celle de l'eau.

Certains scientifiques vont jusqu'à dire que c'est surtout la mobilité de l'eau qui détermine l'ampleur des fluctuations des protéines, non seulement à la surface de la protéine, mais aussi dans le centre de la protéine. Mais les mouvements collectifs de conformation des protéines, viendraient en retour influencer l'eau d'hydratation de manière cohérente (voir ci-dessus). Un signe de l'effet quantique est la différence de comportement observée lorsque de l'hydrogène (H) est remplacé par son isotope lourd deutérium (D), comme cela a déjà été clairement indiqué pour l'eau elle-même (voir [9] [Cooperative and Coherent Water](#) , S/S 48) \*.

\* Version en français intitulée "**L'eau est coopérante** et cohérente" par le Dr. Mae-Wan Ho, traduction et compléments de Jacques Hallard ; elle est accessible sur le site <http://yonne.lautre.net/spip.php?article4577&lang=fr>

Fabio Bruni et ses collègues de l'Université Tre Studi Rome en Italie ont utilisé la spectroscopie diélectrique pour comparer la relaxation diélectrique du lysozyme dans l'eau ordinaire (H<sub>2</sub>O) et dans l'eau lourde (D<sub>2</sub>O), dans la gamme de fréquences de 10<sup>-2</sup> à 10<sup>7</sup> Hz, et sur une plage de température de 210 K à 330 K [10].

Si l'effet est classique, il devrait n'y avoir aucune différence entre l'échantillon de H<sub>2</sub>O ou de D<sub>2</sub>O. Pourtant, de grandes différences ont été trouvées. En particulier, le temps de relaxation diélectrique de H<sub>2</sub>O était complètement différent de celui mesuré avec D<sub>2</sub>O sur la plage de température (voir Fig. 2).

*Figure 2. Temps de relaxation diélectrique vs température T (a); logarithme naturel de la réciprocity des temps de relaxation rapport  $t_D / t_H$  ( $\equiv w_H / w_D$ ) vs réciproque de la température ; la ligne horizontale pointillée indique la valeur 1,4, ce qui devrait être valable pour toutes les températures s'il n'y avait pas les effets quantiques*

Ces observations sont en accord étroit avec les résultats d'une étude théorique sophistiquée utilisant des méthodes de mécanique quantique à partir des premiers principes.

En outre, les chercheurs ont réanalysé les données d'une expérience de diffusion des neutrons inélastiques en profondeur : ils ont mesuré la distribution dynamique de protons n(p) et l'énergie cinétique moyenne d'un échantillon de lysozyme préparé de la même

manière que pour l'expérience de spectroscopie diélectrique. Les mesures ont été effectuées au-dessus et au-dessous de la température de transition dynamique de la protéine (voir ci-dessus) à 290 K et 180 K respectivement.

Ils ont calculé la fraction minimum de protons qui est nécessaire pour produire la différence observée dans la distribution de quantité de mouvements entre les deux températures, en supposant que les énergies cinétiques moyennes du proton sont indépendantes de la température, à l'exception de petites contributions  $kT$  (Boltzmann, arrière-plan), d'une part, et que la distribution d'impulsion à 290 K provient d'une population de protons avec le même  $n(p)$  que celle à 180 K, plus une contribution due à une fraction inconnue de protons, montrant un comportement mécanique quantique caractéristique, d'autre part.

Cette fraction de protons qui ont montré un comportement quantique se trouve à 0,29, précisément la fraction de protons présente dans l'échantillon qui appartient à l'eau d'hydratation.

### L'eau confère des propriétés électriques à l'ADN

L'histoire fascinante de l'ADN et de l'eau ne fait que commencer. L'eau d'hydratation de l'enveloppe de l'ADN partage de nombreuses propriétés avec les couches d'hydratation des protéines.

En outre, l'eau transforme l'ADN en un conducteur électrique et lui donne des propriétés magnétiques, et beaucoup de scientifiques sont à la recherche de l'exploitation de l'ADN synthétique dans de nouveaux dispositifs électroniques moléculaires.

L'eau d'hydratation de l'ADN semble avoir une dynamique tout à fait inhabituelle, telle qu'elle fut mesurée par la technique dite '*time-resolved Stokes-shift (TRSS)*', de '**Déplacement de Stokes** dépendant du temps' et confirmé par des simulations de dynamique moléculaire.

Dans ces expériences sur un oligonucléotide de 17 paires de base, la lumière excite l'ADN et elle est réémise sous forme de fluorescence, déplacée vers les basses énergies, par rapport à la lumière absorbée (décalage ou déplacement de Stokes). La fréquence moyenne de fluorescence est mesurée en fonction du temps après l'excitation, couvrant six périodes de 40 fs à 40 ns.

Contre toute attente, la relaxation (désintégration de la fluorescence) n'a pas montré des échelles de temps distinctes qui pourraient être facilement attribuées à des processus multiples et indépendants. Au contraire, elle correspond une loi de puissance unique, ce qui suggère un degré élevé de corrélation sur toutes les échelles de temps.

Des chercheurs dirigés par Mark Berg à l'Université de Caroline du Sud aux États-Unis, ont utilisé un modèle de polarisation basé sur l'idée que le couplage entre les composants du système est dû à la polarisation d'un composant par un autre, qui non seulement s'ajuste bien avec les données expérimentales, mais qui leur a aussi permis d'attribuer la réponse obtenue par cette technique aux différentes composantes du système: l'eau, les contre-ions de l'ADN ou la molécule d'ADN elle-même [11].

Ces résultats ont montré que l'eau est le principal facteur qui contribue à la réponse obtenue par cette technique, et ceci à tout moment. Son étendue de relaxation couvre entièrement la plage de temps mesurée et contribue au comportement de la loi de puissance. Les contre-ions ont une contribution secondaire, mais non négligeable, avec un temps de relaxation bien défini de l'ordre de 200 ps. Le temps de relaxation de l'ADN est proche de 30 ps, mais l'amplitude est très faible.

De leur côté, Christophe Yamahata et ses collègues de l'Université de Tokyo et de l'Université de Kagawa à Takamatsu au Japon, ont démontré de manière convaincante que la capacité de l'ADN à transporter des charges électriques, dépend de l'eau [12].

Des paillettes d'ADN en suspension dans l'air, entre des nano-pincettes, (voir Fig. 3) ont augmenté de façon exponentielle la conductivité électrique jusqu'à  $10^6$  fois, lorsque l'humidité relative de l'air a augmenté.

Cette augmentation a été attribuée à une augmentation de la concentration de porteurs de charge, car l'hydratation de l'ADN a augmenté avec l'humidité relative; les porteurs de charge étant  $H^+$  et  $OH^-$  : cela suggère que le saut de conduction du proton (positif électriquement), pourrait être impliqué (voir [13] [Positive Electricity Zaps Through Water Chains](#), *SiS* 28) ainsi que la conduction des électrons.

*Figure 3. ADN en suspension dans l'air avec des nano-pinces*

Une constatation importante est que la voie de transfert de charge (conduction) se fait par les bases empilées dans le noyau de la double hélice où les orbitales moléculaires p se chevauchent.

Une orbitale moléculaire est une forme d'onde décrivant la distribution et l'énergie d'une paire d'électrons, et elle est le plus souvent représentée comme une combinaison linéaire des orbitales atomiques des atomes formant une liaison covalente dans la molécule. Une orbitale p est l'orbitale moléculaire d'une liaison p où deux lobes des orbitales atomiques se chevauchent et se rejoignent. Les deux moitiés d'une molécule reliées par une liaison p ne peuvent pas tourner autour de ce lien sans le casser. Les composés du carbone et de l'azote forment des liaisons p lorsqu'ils se livrent à des liaisons multiples, comme dans  $C = C$  et  $N = N$ .

Dans des composés cycliques, tels que le benzène et les bases de l'ADN, où des liaisons simples alternent avec des liaisons doubles, les électrons de liaison p sont délocalisés, ou étalés dans l'ensemble de la structure du noyau et qu'il stabilise.

Julia Berashevich et Tapash Chakraborty de l'Université du Manitoba, à Winnipeg au Canada, ont utilisé des calculs de chimie quantique pour montrer que l'interaction des bases avec de l'eau (voir Fig. 4) brise quelques liaisons p dans la structure cyclique des bases, donnant lieu à des électrons p non liés.

Ces électrons non consolidés, non reliés, ainsi que le changement de conformation de l'ADN, d'une forme A (déshydratée) en forme B (hydratée), pourraient expliquer l'augmentation exponentielle de la conductivité, lorsqu'augmente l'humidité relative et l'hydratation de la molécule d'ADN.

Figure 4 - L'eau se liant à des bases d'ADN

En outre, à basse température, l'efficacité du transfert de charge est déterminée par l'interaction de spin des deux électrons non liés voisins, situés sur les bases du même brin. L'échange n'est autorisé que lorsque les spins des électrons sont antiparallèles (dans des directions opposées). D'où le fait que la conductance de l'ADN peut être contrôlée par un champ magnétique. Cela donne la possibilité de développer des dispositifs 'spintroniques' nanométriques, basés sur la molécule d'ADN, où l'efficacité de l'**interaction spin** sera déterminée par la séquence d'ADN.

Indépendamment des applications pratiques, ces résultats ont des implications profondes pour les fonctions biologiques de l'ADN, en plus de son intervention sous la forme d'un code linéaire, pour organiser la séquence des acides aminés dans les protéines. Nous ne faisons là qu'effleurer la pointe émergée d'un très gros iceberg.

© 1999-2010 The Institute of Science in Society

[Contact the Institute of Science in Society](#)

MATERIAL ON THIS SITE MAY NOT BE REPRODUCED IN ANY FORM WITHOUT EXPLICIT PERMISSION. FOR PERMISSION, PLEASE [CONTACT ISIS](#)

## Définitions et compléments

**Cohérence** - Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.

\* Cette page d'[homonymie](#) répertorie les différents sujets et articles partageant un même nom.

Le mot **cohérence** caractérise la liaison étroite des différents éléments constitutifs d'un ensemble. Toutes les parties de cet ensemble ont un rapport logique, comportant une absence de contradiction entre eux, et sont intimement unis. Ils présentent un rapport harmonieux entre eux, un rapport homogène et sont organisés dans une progression ordonnée. Il est employé dans plusieurs domaines :

- en [mathématique](#), la **cohérence** est la propriété en [logique](#) d'une théorie absente de [contradiction](#) ;
- en [physique](#), la **cohérence** est l'ensemble des propriétés de corrélation d'un système ondulatoire ;
- en [philosophie](#), le **principe de cohérence de Novikov** est un principe développé par Igor Novikov au milieu des années 80 pour résoudre le problème des paradoxes liés au voyage dans le temps ;
- en [urbanisme](#), la **cohérence territoriale** est un concept lié à la répartition de l'habitat ;
- en [informatique](#), des copies d'une donnée sont **cohérentes** lorsque la lecture d'une copie reflète les modifications intervenues sur les autres données.

- En [géologie](#) on parle de [roche cohérente](#).
- En [linguistique](#), la cohérence d'un texte est la propriété d'un texte qui, notamment, ne demande pas de déduction pour passer d'un élément documentaire au suivant. On parle alors de cohérence du [langage naturel](#).

La **cohérence** est parfois appelée improprement [consistence](#) par attraction de l'anglais.

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Coh%C3%A9rence>

**Cohérence (physique)** - Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.



Cet article est une [ébauche](#) concernant la [physique](#). Vous pouvez partager vos connaissances en l'améliorant ([comment ?](#)) selon les recommandations des [projets correspondants](#).

La **cohérence** en [physique](#) est l'ensemble des propriétés de [corrélation](#) d'un système ondulatoire. Son sens initial était la mesure de la capacité d'[onde\(s\)](#) à donner naissance à des [interférences](#) - du fait de l'existence d'une relation de [phase](#) définie - mais il s'est élargi. On peut parler de cohérence entre 2 ondes, entre les valeurs d'une même onde à deux instants différents (cohérence temporelle) ou entre les valeurs d'une même onde à deux endroits différents (cohérence spatiale).

Le terme *cohérent* s'emploie à la fois pour une [radiation électromagnétique](#) ou pour des particules, dont le comportement ondulatoire a été postulé en 1924 par [Louis de Broglie](#).

### *Cohérence temporelle* [[modifier](#)]

La cohérence temporelle d'une onde est liée à la [largeur de bande](#) spectrale de la source. Une onde réellement [monochromatique](#) (une seule [fréquence](#)) aurait, en théorie, un temps et une longueur de cohérence infinis. En pratique, aucune onde n'est réellement monochromatique (car cela requiert un [train d'ondes](#) de durée infinie), mais, en général, le temps de cohérence de la source est inversement proportionnel à sa largeur de bande  $\Delta\nu$ . On définit le temps de cohérence  $\tau_c$  de la source par l'inverse de la [largeur spectrale](#)  $\tau_c = 1 / \Delta\nu$ . La longueur de cohérence temporelle est  $L_c = \tau_c v$  où  $v$  est la [vitesse de propagation](#) de l'onde. Si les différents [chemins](#) suivis par l'onde diffèrent d'une longueur supérieure à  $L_c = \tau_c v$ , il n'y aura pas d'interférences. La [différence de marche](#) est alors supérieure au train d'onde (ou longueur de cohérence).

### *Cohérence spatiale* [[modifier](#)]

Les ondes ont également une cohérence spatiale ; c'est la capacité de chacun des points du [front d'onde](#) à interférer avec n'importe quel autre point. En effet, si la source est étendue, il y aura addition d'ondes incohérentes émises par chaque point source, ce qui peut brouiller les interférences. L'expérience des [fentes de Young](#) repose sur la cohérence spatiale du faisceau illuminant les deux fentes : si le faisceau avait été incohérent spatialement, par exemple si la lumière solaire n'était pas passée à travers une première fente, alors aucune frange d'interférence ne serait apparue. La largeur de cohérence de la source donne la taille maximale permise pour qu'il y ait interférences. Dans le cas des fentes de Young, la largeur de cohérence est  $l_s = \lambda D / \Delta S$  ( $\lambda$  est la

longueur d'onde de la source,  $\Delta S$  la largeur de la distribution spatiale d'intensité et  $D$  la distance où l'on se place) : la largeur de cohérence dépend donc à la fois de caractéristiques intrinsèques à la source ( $\lambda$  et  $\Delta S$ ) et de la distance à laquelle on se trouve : plus on s'éloigne, plus la source se rapproche d'une source ponctuelle.

### *Incohérence* [[modifier](#)]

Par opposition, *incohérent* qualifie un faisceau qui ne dispose pas de ces caractéristiques. Les ondes incohérentes, lorsqu'elles sont combinées, produisent des [interférences](#) qui se déplacent rapidement. Un détecteur va alors faire la moyenne de l'[intensité](#) reçue, et il n'y aura pas d'interférences : les intensités s'ajoutent.

### *Exemples de faisceau cohérent* [[modifier](#)]

- la lumière [laser](#)
- le [rayonnement synchrotron](#) généré par un onduleur

### *Exemples de faisceau, ou de source, incohérent* [[modifier](#)]

- la lumière solaire
- la lumière émise par une ampoule
- une [diode électroluminescente](#) (sauf pour la [diode laser](#))

### *Voir aussi* [[modifier](#)]

- [holographie](#)
- [Tavelure](#) (« Speckle » en anglais)

Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Coh%C3%A9rence\\_%28physique%29](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coh%C3%A9rence_%28physique%29)

## Déplacement de Stokes – Un article de Wikipédia



Cet article est une [ébauche](#) concernant la [physique quantique](#). Vous pouvez partager vos connaissances en l’améliorant ([comment ?](#)) selon les recommandations des [projets correspondants](#).

Le **déplacement de Stokes** est la différence (en [longueur d'onde](#) ou en [fréquence](#)) entre la position du pic du [spectre d'absorption](#) et le pic du spectre de [luminescence](#) ([fluorescence](#) ou [phosphorescence](#)) de la même [transition électronique](#).

Diagramme de déplacement des longueurs d'onde entre lumière reçue et émise

Ce déplacement est aussi à la base de la [spectroscopie Raman](#). Ce phénomène est nommé en hommage au [physicien](#) Irlandais [George G. Stokes](#), qui l'a décrit en 1852 dans la fluorescence du minéral [fluorine](#) (CaF<sub>2</sub>).

### *Définition* [[modifier](#)]

On parle de *déplacement de Stokes* si la longueur d'onde de la luminescence est plus grande (donc d'[énergie](#) plus petite) que la lumière incidente et **anti-Stokes** et si on

observe un déplacement vers des longueurs d'ondes plus petites (donc d'énergie supérieure) que la lumière incidente.

### *Principe* [\[modifier\]](#)

---

Lorsqu'un [atome](#) (ou une [molécule](#)) absorbe un [photon](#) ([lumière](#)), il accède à un état électronique excité (i.e. un [électron](#) passe à une [orbitale](#) d'[énergie](#) plus élevée, la différence d'énergie entre son état initial et son état final étant égale à l'énergie du photon absorbé).

Avant de se désexciter, l'atome (ou la molécule) subit une relaxation vibrationnelle, c'est-à-dire qu'il perd un peu d'énergie sous forme de vibration ([phonon](#)) ou de [chaleur](#).

Il retourne ensuite à son état électronique initial en émettant un [photon](#) d'énergie correspondant à la différence d'énergie entre l'état excité (relaxé) et l'état initial. Ce photon émis est d'énergie inférieure au photon absorbé car il y a eu une perte d'énergie en vibration. Sa [longueur d'onde](#) est par conséquent plus longue.

Le contraire se produit lorsqu'il y a un **déplacement anti-Stokes** : lorsqu'un atome (ou une molécule) absorbe un photon, il accède à un état électronique excité, mais au lieu de perdre de l'énergie sous forme d'un [phonon](#), il absorbe l'énergie d'un phonon qui était déjà présent. En se désexcitant, l'atome émet donc un photon d'énergie égale à la somme de l'énergie du photon absorbé et du phonon. La longueur d'onde du photon émis est donc plus courte.

Ce principe est utilisé dans la [microscopie à épifluorescence](#).

### *Liens externes* [\[modifier\]](#)

---

Cette section est vide, pas assez détaillée ou incomplète. [Votre aide](#) est la bienvenue !

### *Bibliographie* [\[modifier\]](#)

---

Cette section est vide, pas assez détaillée ou incomplète. [Votre aide](#) est la bienvenue !

Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9placement\\_de\\_Stokes](http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9placement_de_Stokes)

## **Diélectrique** – Article de Wikipédia

---

Un matériau est **diélectrique** s'il ne contient pas de [charges électriques](#) susceptibles de se déplacer de façon [macroscopique](#). Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le [courant électrique](#). À ce titre, on l'appelle parfois [isolant électrique](#). On compte parmi ces milieux : le vide, le [verre](#) et de nombreux [plastiques](#). Par exemple, les câbles électriques sont souvent protégés d'un revêtement en plastique pour éviter que le courant électrique puisse en sortir.

Malgré l'impossibilité des milieux diélectriques de conduire le courant, ils présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En effet les atomes qui constituent le matériau peuvent présenter des [dipôles électrostatiques](#) qui sont susceptibles d'interagir avec un [champ électrique](#). Cette interaction se traduit par la création d'une [polarisation](#) liée à ce champ électrique, au niveau microscopique, par une [polarisabilité](#), et au niveau

### *Phénomènes physiques dans les milieux diélectriques* [\[modifier\]](#)

---

Les électrons présents dans un milieu diélectrique ne peuvent pas, par définition, se déplacer sur des grandes distances. Il peuvent par contre présenter des mouvements d'amplitude très petite à notre échelle, mais qui peuvent être à l'origine de nombreux

phénomènes. Ces mouvements sont souvent des mouvements d'[oscillation](#) autour du [noyau](#) : le *nuage électronique* peut être déformé et ainsi créer un [dipôle électrostatique](#). Il en va de même pour le déplacement global des atomes au sein du matériau (ils créent également des dipôles).

### Création d'une polarisation [\[modifier\]](#)

Article détaillé : [Polarisation \(diélectrique\)](#).

En soumettant le matériau à un [champ électrique](#) de tels dipôles peuvent être créés. S'ils existaient déjà, cela peut avoir comme effet de tous les aligner dans le même sens. D'un point de vue microscopique, on peut relier l'[amplitude](#) de l'onde au dipôle créé via la notion de [polarisabilité](#), qui est une caractéristique propre à chaque atome. Il est cependant impossible de mesurer de telles grandeurs microscopiques. On préfère utiliser une grandeur macroscopique, la [polarisation](#), qui vaut la somme de tous les dipôles du matériau. Cette polarisation vient donc de différents effets physiques :

- la *polarisation électronique*, toujours présente, est due au déplacement et à la déformation de chaque nuage électronique,
- la *polarisation atomique* est due aux déplacements des atomes,
- la *polarisation d'orientation* existe lorsque des dipôles déjà présents sont tous alignés entre eux.

La polarisation  $\vec{P}$  est souvent proportionnelle au champ électrique  $\vec{E}$  qui l'a créée (ce cas est dit *linéaire*) :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$$

avec  $\epsilon_0$  la [permittivité du vide](#) et  $\chi$  la [susceptibilité électrique](#) du matériau, qui est un [nombre complexe](#). Dans le cas d'un diélectrique anisotrope,  $\chi$  est un [tenseur](#) de rang 2.

En généralisant cela à des phénomènes où la polarisation n'est pas proportionnelle au champ électrique, on atteint le domaine de l'[optique non-linéaire](#).

### Phénomènes de réfraction, de réflexion et d'absorption [\[modifier\]](#)

La polarisation créée dans le milieu diélectrique intervient dans des phénomènes mettant en jeu des [ondes électromagnétiques](#), comme la [lumière](#), car elles présentent un champ électrique. Les [équations de Maxwell](#) permettent alors de montrer que la partie réelle de  $\chi$  modifie la vitesse  $c$  d'une onde lumineuse se propageant dans le matériau par rapport à la vitesse  $c_0$  qu'elle aurait dans le vide selon la relation :

$$c_0 = c \sqrt{1 + \Re(\chi)}$$

Cela correspond exactement à la définition de l'[indice de réfraction](#)  $n$  d'un milieu :  $n = c_0/c$ . Cela explique donc le phénomène de [réfraction](#) de la lumière. D'autre part, la partie imaginaire correspond à une [absorption](#) de la lumière par le matériau. Lorsque le matériau est [anisotrope](#), les relations ne sont pas aussi simples, et on voit apparaître le phénomène de [biréfringence](#) : deux rayons sont réfractés au lieu d'un seul.

La [réflexion](#) peut également être comprise de cette façon. On peut alors montrer que, au passage de la lumière à travers un [dioptre](#) séparant deux milieux différents, une partie de l'onde est réfléchi, et le reste est réfracté. Le calcul correspondant aboutit aux [coefficients de Fresnel](#) qui donnent les proportions de la lumière réfléchi et réfracté. Dans le cas où toute la lumière est réfléchi ([réflexion totale](#)), on peut observer une [onde évanescente](#), c'est-à-dire une onde de très courte portée qui apparaît de l'autre côté du dioptre. On peut même, en plaçant un autre dioptre très proche du premier, récupérer cette onde évanescente : c'est le phénomène de [réflexion totale frustrée](#).

### *Grandeurs caractéristiques des milieux diélectriques* [[modifier](#)]

---

Les matériaux diélectriques sont caractérisés en particulier par :

- leur [rigidité diélectrique](#) ;
- leur [permittivité](#) diélectrique  $\epsilon$ , ou constante diélectrique ;
- leur angle de perte ou tangente delta,  $\tan(\delta)$ .

### *Quelques milieux diélectriques usuels* [[modifier](#)]

---

#### Solides [[modifier](#)]

---

- le [verre](#), utilisé pour faire des [isolateurs](#) de [lignes haute tension](#) ;
- la [céramique](#), très utilisée pour les matériels [HTB](#) des [postes électriques](#) ;
- la plupart des plastiques, en particulier [polyéthylène](#) sous sa forme réticulée (XLPE) et [PVC](#), tous deux utilisés pour les câbles ;
- le [Polypropylène](#), utilisé en particulier dans les [condensateurs](#) en [HTA](#) ou [HTB](#) ;
- le [mica](#), qui n'est guère plus utilisé de nos jours dans l'[industrie électrotechnique](#) ;
- la [bakélite](#), autrefois très utilisée pour l'[appareillage électrique](#) basse tension ;
- le [téflon](#), utilisé pour certaines pièces des [disjoncteurs à haute tension](#).
- certains matériaux sous forme cristalline perovskite comme le PZT qui sont actuellement en cours de développement pour être utilisés comme condensateur à capacité variable.

#### Gazeux [[modifier](#)]

---

- l'air
- l'[hexafluorure de soufre](#)
- l'[azote](#)

## Liquides [[modifier](#)]

---

- le [pyralène](#), autrefois utilisé dans les [transformateurs](#), mais qui tend à disparaître à cause de ses risques
- l'[huile minérale](#), qui a remplacé le [pyralène](#) dans les [transformateurs](#)
- l'eau pure. Si l'eau usuelle est conductrice, une eau parfaitement pure est un très bon isolant. La difficulté de garder une eau très pure rend toute utilisation industrielle difficile.
- l'huile végétale, innovation récente dans l'isolation diélectrique dans les transformateurs électriques.

## *Utilisations des diélectriques* [[modifier](#)]

---

Les diélectriques étant de bons isolants électriques et thermiques, et sont donc utilisés pour gainer les câbles électriques afin d'éviter des contacts avec d'autres câbles ou des personnes aussi bien que dans les manches des casseroles.

Les diélectriques sont utiles dans les [condensateurs](#). Dans le cas, très simple, du [condensateur plan](#), on peut rapprocher les plaques sans risque de contact ou de claquage. On insère ainsi des couches de diélectriques dans les condensateurs industriels, ce qui permet d'augmenter la [capacité](#) en diminuant l'encombrement.

D'autre part, si on la soumet à un champ électrique suffisamment puissant, toute substance s'ionisera et deviendra conductrice. Les diélectriques étant plutôt difficiles à ioniser, l'air ambiant devient conducteur avant eux : on peut les employer pour des condensateurs à haute tension.

La plupart des diélectriques sont également transparents dans de larges gammes de fréquences, et sont parfois utilisés pour constituer une couche anti-reflet, par exemple sur certains modèles de verres de lunette.

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Di%C3%A9lectrique>

## Diffusion neutronique – Article IRAMIS Saclay

La diffusion neutronique est un outil précieux pour explorer les protéines, les édifices biologiques (complexes ADN-protéines), les cellules entières, l'eau cellulaire. En effet, les propriétés neutroniques très différentes de l'hydrogène et du deutérium, permettent de faire « ressortir » un ou des groupements chimiques donnés et ainsi d'étudier les conformations des macromolécules biologiques (forme, taille, association), et d'identifier, dans une gamme temporelle de 10<sup>-12</sup> s à 10<sup>-9</sup> s, les mouvements internes en relation avec leur fonction (LLB).

Représentation graphique - Comprendre le rôle du tréhalose dans la protection des organismes soumis à des conditions extrêmes.

Source : [http://iramis.cea.fr/Phoce/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_visu.php?id\\_ast=204](http://iramis.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=204)

---

## Effet tunnel – Introduction à un article de Wikipédia

L'**effet tunnel** désigne la propriété que possède un objet [quantique](#) de franchir une [barrière de potentiel](#), franchissement impossible selon la [mécanique classique](#) si l'énergie de la particule incidente est inférieure à l'énergie potentielle qu'elle doit acquérir, au détriment de son énergie cinétique, pour passer au-dessus de la barrière. Pour une telle particule, la [fonction d'onde](#), dont le carré du module représente la densité de probabilité de présence, ne s'annule pas au niveau de la barrière, mais s'atténue à l'intérieur de la barrière, pratiquement [exponentiellement](#) pour une barrière assez large. Si, à la sortie de la barrière de potentiel, la particule possède une probabilité de présence non nulle, elle peut traverser cette barrière. Cette probabilité dépend des [états accessibles](#) de part et d'autre de la barrière ainsi que de son extension spatiale. Article complet sur le site : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet\\_tunnel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_tunnel)

---

## Ferroélectricité – Un article de Wikipédia



Cet article est une [ébauche](#) concernant la [physique de la matière condensée](#). Vous pouvez partager vos connaissances en l'améliorant ([comment ?](#)) selon les recommandations des [projets correspondants](#).

On appelle **ferroélectricité** la propriété selon laquelle un matériau possède une [polarisation électrique](#) à l'état spontané, polarisation qui peut être renversée par l'application d'un [champ électrique](#) extérieur. La signature d'un matériau ferroélectrique est le [cycle d'hystérésis](#) de la polarisation en fonction du champ électrique appliqué. Le préfixe ferro- fut emprunté au [ferromagnétisme](#) par analogie.

L'étude des matériaux ferroélectriques est relativement récente ; il fallut attendre le début des années 1950 et la découverte d'oxydes ferroélectriques simples de structure [pérovskite](#) pour pouvoir progresser dans la compréhension de cette propriété.

Aujourd'hui, les matériaux ferroélectriques sont très largement exploités en [microélectronique](#) en raison de leurs propriétés diélectriques qui peuvent être ajustées avec la composition chimique ou encore la mise en forme du matériau. Ils sont utilisés pour la réalisation de divers composants : [filtres](#), [condensateurs](#) etc.

On peut expliquer cela simplement en évoquant le décalage des [barycentres](#) des charges positives et négatives.

*Historique* [[modifier](#)]

La ferroélectricité a longtemps été connue uniquement dans le sel de Seignette, un sel de composition chimique et de structure cristallographique complexe. Cette complexité a freiné les recherches et laissé penser que la ferroélectricité était une propriété tout à fait exotique nécessitant des conditions bien particulières (liaisons hydrogène notamment). De plus, cette propriété ne trouvait alors aucun intérêt pratique.

Un saut majeur dans l'étude des ferroélectriques a été la découverte au début des années 1950 des oxydes ferroélectriques de structure pérovskite : BaTiO<sub>3</sub>, PbTiO<sub>3</sub>, etc. Ces matériaux plus simples ont permis le développement de théorie de la ferroélectricité.

## Cycle d'hystérésis ferroélectrique [[modifier](#)]

---

### Schéma d'un cycle d'hystérésis

Un matériau ferroélectrique est caractérisé par un cycle d'hystérésis décrit par la polarisation en fonction du champ appliqué. De même que pour les matériaux [ferromagnétiques](#), on parlera de ferroélectrique « dur » ou « mou » selon la forme de la courbe. Le cycle est caractérisé principalement par une polarisation rémanente, une polarisation de saturation et un [champ électrique coercitif](#).

Un cycle d'hystérésis est habituellement mesuré avec un montage dit de [Sawyer-Tower](#).

Les [pertes diélectriques](#), toujours présentes dans le matériau peuvent déformer significativement le cycle d'hystérésis et rendent parfois l'interprétation des mesures hasardeuses.

## Transitions de phase ferroélectriques [[modifier](#)]

---

Habituellement on observe une variation rapide des propriétés [diélectriques](#) (par exemple la polarisation) à la température de Curie  $T_c$  (ou température de [transition de phase](#)  $T_{tr}$ ). Si elle est continue, elle indique une transition du second ordre selon la théorie de [Landau](#), car le degré d'ordre tend continûment vers [zéro](#) lorsque la [température](#) augmente.

Graphique - Polarisation spontanée en fonction de la température dans les matériaux ferroélectriques.

On distingue généralement deux sortes de transitions ferroélectriques :

- La transition ordre-désordre : généralement, dans la phase [paraélectrique](#) les mailles du [cristal](#) ont un moment dipolaire sans orientation privilégiée car les dipôles permanents sont parfaitement désordonnés ; la polarisation macroscopique est donc nulle. Au contraire dans la phase ferroélectrique les moments dipolaires des différentes mailles présentent un ordre orientationnel.
- La transition displacive (de l'anglais *displace* qui veut dire déplacer) : le moment dipolaire est inexistant dans la phase paraélectrique, même au point de vue microscopique, généralement pour des raisons de symétrie cristalline (le matériau est alors dans sa phase cubique). Il apparaît au moment de la transition car le déplacement des [atomes](#) crée des dipôles orientés selon l'axe de déplacement.

Ces deux modèles de transitions sont des modèles idéalisés. Dans un système réel, on peut trouver des transitions de phases qui présente des caractéristiques. On a longtemps considéré que le titanate de plomb était l'exemple type d'une transition displacive, toutefois des aspects caractéristiques d'une transition ordre-désordre ont également été mis en évidence et sont encore sujet à discussion<sup>1</sup>.

## Utilisations des matériaux ferroélectriques [[modifier](#)]

---

Les matériaux ferroélectriques tel que le BST font l'objet de nombreuses études pour la réalisation de fonctions agiles aux fréquences micro-ondes. Ces matériaux ont des propriétés diélectriques, notamment une constante diélectrique, qui peuvent être modifiées sous l'action d'un champ électrique dont la commande est facilement intégrable sur les dispositifs planaires.

## Notes et références [modifier]

---

- ↑ Pour un travail récent sur la question, voir par exemple Young-Han Shin *et al.*, *Order-Disorder character of PbTiO<sub>3</sub>*, *Journal of Physics: Condensed Matter* **20**, 015224 (2008).

## Bibliographie [modifier]

---

- (en) Warren P. Mason, « *Fifty years of ferroelectricity* », dans *Journal of the acoustical society of America*, vol. 50, 1971, p. 1281-1298 [ [texte intégral](#) ]

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ferro%C3%A9lectricit%C3%A9>

---

## Interaction spin-orbite – Un article Wikipédia

---

En [mécanique quantique](#), l'**interaction spin-orbite** (aussi appelée *effet spin-orbite* ou *couplage spin-orbite*) qualifie toute interaction entre le [spin](#) d'une particule et son mouvement. Le premier et le plus connu des exemples de cette interaction est la production de décalages dans les [niveaux d'énergie électroniques](#) (que l'on observe par la séparation des [raies spectrales](#)) en raison de l'interaction entre le spin de l'électron et le champ électrique nucléaire dans lequel il se meut. Un effet similaire, dû à la relation entre [moment angulaire](#) et la [force nucléaire forte](#), se produit pour les mouvements des [protons](#) et [neutrons](#) dans le [noyau atomique](#), conduisant à un décalage dans leurs niveaux d'énergie dans le [modèle en couches](#) du noyau. En [spintronique](#), les effets spin-orbite pour les électrons dans les [semi-conducteurs](#) et autres matériaux sont étudiés et exploités technologiquement.

### *Interaction spin-orbite dans les niveaux d'énergies atomiques* [modifier]

---

On présentera dans cette section une description relativement simple et quantitative de l'interaction spin-orbite pour un électron lié à un atome, en utilisant de l'[électrodynamique](#) semi-classique et de la [mécanique quantique non-relativiste](#), jusqu'au premier ordre dans la [théorie de la perturbation](#). Cela donne des résultats qui sont en accord, mais pas parfait, avec les observations. Une démonstration plus rigoureuse du même résultat se baserait sur l'[équation de Dirac](#), et atteindre un résultat plus précis nécessiterait le calcul des petites corrections issues de l'[électrodynamique quantique](#), ce qui est au-delà de l'objectif de cet article.

### *Energie de moment magnétique* [modifier]

---

L'énergie d'un moment magnétique dans un champ magnétique est donnée par :

$$\Delta H = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B},$$

où  $\boldsymbol{\mu}$  est le [moment magnétique](#) de la particule et  $\mathbf{B}$  est la valeur du [champ magnétique](#) de l'expérience.

### *Champ magnétique* [modifier]

---

Traitons d'abord du champ magnétique. Bien que dans le référentiel au repos du noyau, il n'y ait aucun champ magnétique, il y en a un dans le référentiel au repos de l'électron. En ne tenant pas compte pour le moment que ce référentiel ne soit pas [galiléen](#), on traite l'équation :

$$\mathbf{B} = -\frac{\mathbf{v} \times \mathbf{E}}{c^2},$$

où  $\mathbf{v}$  est la vitesse de l'électron et  $\mathbf{E}$  le champ électrique traversé. On sait que  $\mathbf{E}$  est

$$\mathbf{E} = \left| \frac{E}{r} \right| \mathbf{r}$$

radial, on peut réécrire

On sait aussi que la quantité de mouvement de l'électron est  $\mathbf{p} = m_e \mathbf{v}$ . En y introduisant ces quantités et en changeant l'ordre du produit vectoriel, on a :

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{p}}{m_e c^2} \left| \frac{E}{r} \right|.$$

Puis on exprime le champ électrique comme le gradient du [potentiel électrique](#)  $\mathbf{E} = -\nabla V$ . On effectue ici l'[approximation du champ central](#) en considérant que le potentiel électrostatique a une symétrie sphérique, donc qu'il est fonction du seul rayon. Cette approximation est vérifiée pour l'hydrogène, et par conséquent pour les systèmes hydrogénoïdes. On peut alors dire que :

$$|E| = \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{e} \frac{\partial U(r)}{\partial r},$$

où  $U = V \cdot e$  est l'[énergie potentielle](#) de l'électron dans un champ central, et  $e$  est sa [charge élémentaire](#). D'après la mécanique classique, le [moment angulaire](#) d'une particule est  $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ . Par substitution, on a alors :

$$\mathbf{B} = \frac{1}{m_e e c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial U(r)}{\partial r} \mathbf{L}.$$

Il est important de noter qu'à ce moment,  $B$  est un nombre positif factorisant  $L$ , ce qui signifie que le champ magnétique est parallèle au moment angulaire orbital de la particule.

### *Moment magnétique de l'électron* [\[modifier\]](#)

Le [moment magnétique d'un électron](#) est :

$$\boldsymbol{\mu} = -g_s \mu_B \mathbf{S} / \hbar,$$

où  $\mathbf{S}$  est le vecteur du moment angulaire de spin,  $\mu_B$  est le [magnéton de Bohr](#) et  $g_s \approx 2$  est le [facteur g](#) de spin électronique. Ici,  $g_s$  est une constante négative multipliée par le [spin](#), donc le moment magnétique est antiparallèle au moment angulaire de spin.

### *Énergie d'interaction* [\[modifier\]](#)

L'énergie d'interaction est :

$$\Delta H = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}.$$

Effectuons quelques substitutions :

$$-\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = \frac{2\mu_B}{\hbar m_e e c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial U(r)}{\partial r} (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})$$

On n'a jusqu'à présent pas pris en compte le fait que le référentiel électronique soit non-galiléen. Cet effet est appelé [précession de Thomas](#) et introduit un facteur  $\frac{1}{2}$ . On a alors :

$$-\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = \frac{\mu_B}{\hbar m_e c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial U(r)}{\partial r} (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})$$

### Évaluation du décalage énergétique [\[modifier\]](#)

Grâce aux approximations ci-dessus, on peut évaluer exactement le décalage en énergie dans ce modèle. En particulier, on souhaite trouver une base qui diagonalise à la fois  $H_0$  (hamiltonien non perturbé) et  $\Delta H$ . Afin d'identifier cette base, on définit en premier lieu l'[opérateur](#) de [moment angulaire total](#).

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}.$$

En prenant le produit scalaire de cette expression sur elle-même, on a :

$$\mathbf{J}^2 = \mathbf{L}^2 + \mathbf{S}^2 + 2\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$$

(puisque  $\mathbf{L}$  et  $\mathbf{S}$  commutent), puis :

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} = \frac{1}{2}(\mathbf{J}^2 - \mathbf{L}^2 - \mathbf{S}^2)$$

On peut montrer que les cinq opérateurs  $H_0$ ,  $J^2$ ,  $L^2$ ,  $S^2$ , et  $J_z$  commutent tous les uns avec les autres ainsi qu'avec  $\Delta H$ . Ainsi, la base que l'on recherche est la [base propre](#) des cinq opérateurs simultanément (donc la base dans laquelle ces cinq opérateurs sont diagonaux). Les éléments de cette base ont les cinq [nombres quantiques](#) :  $n$  (nombre quantique principal),  $j$  (nombre quantique du moment angulaire total),  $l$  (nombre quantique du moment angulaire orbital),  $s$  (nombre quantique de spin) et  $j_z$  (la composante  $z$  du moment angulaire total).

Pour le calcul des énergies, on note que :

$$\left\langle \frac{1}{r^3} \right\rangle = \frac{2}{a^3 n^3 l(l+1)(2l+1)}$$

pour les fonctions d'ondes hydrogénoïdes (ici  $a = \hbar / Z\alpha m_e c$  est le [rayon de Bohr](#) divisé par la charge nucléaire  $Z$ ) ; et :

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \rangle &= \frac{1}{2}(\langle \mathbf{J}^2 \rangle - \langle \mathbf{L}^2 \rangle - \langle \mathbf{S}^2 \rangle) \\ &= \frac{\hbar^2}{2}(j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)) \end{aligned}$$

### Déplacement énergétique final [\[modifier\]](#)

On a alors :

$$\Delta E = \frac{\beta}{2}(j(j+1) - l(l+1) - s(s+1))$$

où

$$\beta = \frac{-\mu_B}{m_e e c^2} \left\langle \frac{1}{r} \frac{\partial U(r)}{\partial r} \right\rangle$$

Pour l'hydrogène, on peut écrire le résultat explicite :

$$\beta(n, l) = \frac{\mu_0}{4\pi} g_s \mu_B^2 \frac{1}{n^3 a_0^3 l(l + 1/2)(l + 1)}$$

Pour tout atome mono-ionisé à Z protons :

$$\beta(n, l) = Z^4 \frac{\mu_0}{4\pi} g_s \mu_B^2 \frac{1}{n^3 a_0^3 l(l + 1/2)(l + 1)}$$

Voir aussi [[modifier](#)] [Effet Stark](#) , [Effet Zeeman](#)

Références [[modifier](#)]

---

E. U. Condon, G. H. Shortley, *The Theory of Atomic Spectra*, Cambridge University Press, 1935

D. J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics (2<sup>e</sup> édition)*, Prentice Hall, 2004

(en) Cet article est partiellement ou en totalité issu de l'article de Wikipédia en [anglais](#) intitulé « [Spin-orbit interaction](#) » (voir [la liste des auteurs](#))

Sourcev : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Interaction\\_spin-orbite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Interaction_spin-orbite)

**Hydratation des protéines** – Deux articles se rapportant au sujet

---

*Confinement et hydratation des protéines et peptides*. Document du Laboratoire d'Imagerie Paramétrique CNRS UPMC. Personnes impliquées : M. Waks, W. Urbach et N. Taulier.

### *Introduction.*

L'hydratation (resp. solvation) d'une macromolécule concerne toutes les molécules d'eau (resp. de solvant) dont les propriétés sont modifiées par la présence que de la macromolécule. L'hydratation joue notamment un rôle important dans la stabilité, la conformation et les interactions des protéines et peptide. En effet ces propriétés sont liées à des changements dans la surface accessible à l'eau (au solvant) de la protéine. Elles dépendent donc du nombre de molécules d'eau (de solvant) qui entrent ou qui sortent de la sphère d'hydratation de la protéine. Ce nombre est lui-même dépendant de la différence d'activité entre les molécules d'eau (de solvant) dans et hors la sphère d'hydratation. On peut donc le modifier par exemple par des effets de confinement.

Pour étudier le rôle de l'hydratation nous utilisons les techniques volumétriques. Elles consistent en les mesures des masses volumiques et des vitesses ultrasonores d'échantillons. La différence de mesure entre une solution et son solvant permet le calcul du volume partiel et de la compressibilité adiabatique partielle de la protéine. Ces deux propriétés contiennent une information à la fois sur l'hydratation et la conformation de la protéine. Le problème réside alors à séparer ces deux contributions, grâce notamment aux informations sur la structure tridimensionnelle de la protéine.

### ***Confinement dans des micelles inverses : hydratation et conformation des protéines/peptides***

Les micelles inverses sont des objets sphériques composés d'une coque constituée de molécules tensioactives et d'une cavité aqueuse. Les micelles inverses se trouvent en suspension dans une solution huileuse. En modifiant la proportion d'eau contenue dans les micelles, nous sommes capables de caractériser les molécules d'eau non-hydratées et hydratées (i.e. en interaction avec les molécules tensioactives de la micelle). Ces études ont été effectuées avec des micelles composées soit d'AOT, soit de C12E4 et ont permis de mesurer le volume spécifique et la compressibilité adiabatique spécifique des différents types de molécules d'eau confinées dans les micelles.

*Protéines [1]* : Nous avons examiné les effets d'une déshydratation progressive sur les propriétés volumétriques de quatre protéines dont les caractéristiques physico-chimiques diffèrent sensiblement. Pour ce faire, elles ont été encapsulées dans des micelles inverses, dans lesquelles on a fait varier expérimentalement la quantité d'eau présente, donc l'hydratation des protéines. Nous avons observé que les protéines présentent les valeurs de compressibilité les plus élevées, pour des valeurs minimales de leur hydratation compatibles avec leur solubilisation. Ces résultats, indépendants de la nature de la protéine, (par exemple de la charge des protéines ou de leur taille), ont permis pour la première fois, l'estimation expérimentale d'une constante : la compressibilité intrinsèque d'une protéine, trouvée en bon accord avec les valeurs théoriques de la littérature. Nous avons également mesuré les variations de compressibilité obtenues pour divers degrés d'hydratation des protéines.

*De peptides [2]* : Nous avons étudié la stabilité et les changements de conformation d'un peptide lorsqu'il est encapsulé dans une micelle inverse par simulation de dynamique moléculaire. Ce travail s'effectue en collaboration avec S. Abel (C.E.A.) .

### ***Confinement par des osmolytes : hydratation et interactions des protéines.***

Les protéines transporteur de médicaments : l'albumine du sérum bovin. Nous avons étudié les variations de compressibilité [3] liées à la transconformation de l'albumine bovine (BSA), protéine majoritaire du sérum, cristallisée depuis déjà plusieurs années. Son rôle est celui d'un transporteur universel de médicaments. Nous avons exploré les changements de conformation observés en fonction du pH entre 7 et 2. Cette transition dite acide, conservée dans de nombreuses espèces animales, est vraisemblablement en relation avec la fixation et la libération de substances thérapeutiques au voisinage des membranes biologiques. Nous avons suivi les variations du volume et de la compressibilité pendant cette transition. Ces deux grandeurs diminuent entre pH 4 et 2. Les variations de la quantité d'hélice  $\alpha$  ont été mesurées simultanément dans la même zone de pH par dichroïsme circulaire. Dans ces conditions, la quantité d'hélice  $\alpha$  décroît de 70 à 40%. Nous avons montré qu'à pH 2.0, un cosolvant, le sorbitol, utilisé à des concentrations de 0 à 1,5 molaire, induit une restauration progressive de la structure initiale. Ces résultats montrent que les variations de compressibilité mesurées reflètent fidèlement les changements de structure de la BSA.

*Dépliection/repliection de protéines/peptides et formation d'aggrégats amyloïdes.*

### ***Transition de conformation en présence de solvants [4]***

Nous étudions le mécanisme qui induit la transformation de la structure d'une protéine d'une hélice  $\alpha$  à une structure en feuillet  $\beta$ . Ce processus a été mis en évidence dans des

maladies neurodégénératives telles que la maladie de la « vache folle » (ESB), les maladies de Parkinson, d'Alzheimer et le scorbut. Il provoque la transformation de la forme native, riche en hélices  $\alpha$ , en une forme pathologique riche en feuillets  $\beta$ , tendant à s'agréger et à former des plaques amyloïdes. Nous avons étudié ce processus pour une protéine majoritaire du lait, la  $\beta$ -lactoglobuline (BLG), qui solubilisée dans différents mélanges eau/alcool, présente ce type de transition. Nous avons observé en même temps que le volume et la compressibilité augmentent en fonction de la concentration de l'alcool, et que cette transition présente une variation de la compressibilité, hautement coopérative. La courbe ainsi obtenue est superposable à celle, mesurée par dichroïsme circulaire. La présence d'une structure intermédiaire à l'équilibre, mise en évidence par des mesures de fluorescence, est observée dans les courbes de compressibilité.

#### ***Formation d'agrégats amyloïdes.***

L'élucidation du mécanisme par lequel les protéines se convertissent en fibres amyloïdes, demeure un objectif d'importance majeure. Le fait que de nombreux peptides et protéines, même sans aucun rapport avec des pathologies connues, soient susceptibles de former des fibrilles amyloïdes suggèrent que ce mode d'organisation structurale est une propriété intrinsèque des chaînes polypeptidiques. Des études suggèrent que ce processus est réversible, ouvrant ainsi la porte à des processus de désagrégation. L'un des exemples connus dans ce domaine est celui de la  $\beta$ -lactoglobuline (BLG), protéine majoritaire du lait de mammifères. Une des questions que les travaux de recherche n'abordent pas, est le rôle de l'hydratation dans la formation et la propagation de l'agrégation amyloïde où les séquences hydrophobes des protéines semblent jouer un rôle important. Pour élucider cette question, nous étudions des peptides qui possèdent chacun une partie de la séquence de la BLG. Ces peptides sont connus pour former des fibres et des agrégats amyloïdes. Nous examinons par simulation de dynamique moléculaire l'agrégation de ces peptides dans l'eau, puis nous évaluons les changements induit par la présence d'osmolytes tels que le sorbitol, le tréhalose et l'iboprufen. Ce travail s'effectue en collaboration avec S. Abel (C.E.A.) et nous avons obtenu pour ce projet des temps de calcul sur les supercalculateurs du CINES en 2009 et 2010.

[1] D. Valdez et al. *Biophys. J.* **80** (2001) 2751-2760

[2] Structure, stability, and hydration of a polypeptide in AOT reverse micelles. S. Abel, M. Waks, W. Urbach, M. Marchi. *J. Am. Chem. Soc.* 128 (2006) 382-383

[3] El Kadi et al. *Biophys. J.* **91** (2006) 3397-3404

[4] S. Kanjilal et al. *Biophys. J.* **85** (2003) 3928-3934

Source : <http://www.labos.upmc.fr/lip/spip.php?article90>

---

*L'eau ne dicte pas les mouvements des protéines membranaires* - Paris, 29 octobre 2007. Document CNRS.

La dynamique des protéines a longtemps été considérée comme étant « dictée » par la fine couche d'eau qui les entoure, l'eau d'hydratation. Des chercheurs du laboratoire de biophysique moléculaire (LBM) de l'Institut de biologie structurale (IBS, institut mixte CEA-CNRS-Université Joseph Fourier) en collaboration avec l'Institut Laue-Langevin, l'Université de Californie et l'Institut Max-Planck, ont montré qu'un changement de la dynamique de l'eau n'avait pas d'effet sur celle d'une protéine membranaire, contrairement à ce qui est observé pour les protéines solubles. Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives sur la régulation du fonctionnement des protéines membranaires qui sont la cible aujourd'hui de plus de 50% des médicaments. Ces résultats seront publiés dans la revue PNAS du 29 octobre 2007.

**L'eau d'hydratation**, la fine couche d'eau qui entoure une protéine, a longtemps été considérée comme le « maître » de cette protéine, qui lui impose ses mouvements, c'est-à-dire sa dynamique. Ainsi quand l'eau d'hydratation se fige, la protéine se fige ; si elle vibre, la protéine vibre également. De cette manière l'environnement cellulaire peut réguler la dynamique d'une protéine et, par conséquent, sa fonction. Jusqu'à présent, il était admis que cette prépondérance de l'eau dans la dynamique était commune à tous les types de protéines.

Des chercheurs, dans le cadre d'une collaboration entre l'IBS/LBM, l'Institut Laue-Langevin, l'Université de Californie et l'Institut Max-Planck de Biochimie en Allemagne, ont étudié séparément les mouvements d'une membrane cellulaire naturelle, dans laquelle les protéines membranaires sont insérées dans une bicouche lipidique, et ceux de l'eau d'hydratation à sa surface, grâce à des mesures de diffusion de neutrons, lors desquelles des variations de température modifient la dynamique. Ces mesures ont été complétées par des simulations de dynamique moléculaire. Ils ont ainsi démontré qu'un changement dans la dynamique de l'eau n'avait pas d'effet sur la dynamique de la protéine membranaire, contrairement à ce qui est observé pour les protéines solubles.

Même si l'eau reste indispensable à la fonction biologique, les chercheurs pensent que la dynamique de la protéine membranaire est très probablement gouvernée majoritairement par l'environnement lipidique. Ainsi, l'activité biologique d'une protéine membranaire dans la cellule pourrait bien être contrôlée par son déplacement d'un environnement lipidique vers un autre, par exemple d'une zone contenant des lipides rigides vers une zone riche en lipides plus mobiles. Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives sur la régulation du fonctionnement des protéines membranaires par l'intermédiaire de leur dynamique.

Schéma - Membrane biologique lipidique en rouge et couche d'hydratation en bleu. Les courbes du bas montrent les amplitudes des mouvements thermiques en fonction de la température. La membrane biologique et l'eau d'hydratation n'ont pas la même dépendance en température. Contrairement aux protéines solubles, les protéines membranaires ne sont donc pas « esclaves » de l'eau.

**Références :**

Coupling of protein and hydration water dynamics in biological membranes. Wood, K., Plazanet, M., Kessler, B., Gabel, F., Oesterhelt, D., Tobias, D., Zaccai, G. & Weik, M. (2007) Proc. Natl. Acad. Sci., PNAS 29 octobre 2007.

Source : <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/1211.htm?debut=232&theme1=7>

---

**Liaison hydrogène** - Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.



Cet article est une **ébauche** concernant les **réactions chimiques**. Vous pouvez partager vos connaissances en l'améliorant ([comment ?](#)) selon les recommandations des [projets correspondants](#).

La **liaison hydrogène** ou **pont hydrogène** est une **liaison physique** non **covalente**, de type **dipôle-dipôle**. Elle est de basse intensité (vingt fois plus faible que liaison covalente classique), et relie des molécules en impliquant un atome d'hydrogène. On pensait à l'origine que le proton de cet atome était partagé entre les molécules liées<sup>[1]</sup>, et donc que cette liaison hydrogène était quasi-covalente. On sait aujourd'hui qu'elle est à 90% électrostatique<sup>[2]</sup>. Bien que de la même famille que les **forces de van der Waals**, les liaisons hydrogène s'en distinguent par leur intensité : leur énergie de liaison est environ dix fois supérieure à celle de la force de van der Waals.

Pour que cette liaison s'établisse, il faut être en présence d'un donneur de liaison hydrogène et d'un accepteur :

- le donneur est composé d'un composé à H acide, c'est-à-dire un hétéroatome (azote, oxygène, fluor) porteur d'un atome hydrogène (comme dans les amines, alcools, thiols) ;
- l'accepteur est composé d'un hétéroatome (uniquement azote, oxygène ou fluor) porteur de doublets libres.

Lorsqu'une liaison hydrogène s'établit, les deux hétéroatomes se trouvent à une distance d'environ 2 Å, c'est-à-dire 0,2 nm.

Exemples :  $\text{H}_2\text{O} \cdots \text{H}-\text{O}-\text{H}$  ;  $-\text{C}=\text{O} \cdots \text{H}-\text{O}-\text{H}$

Schéma de la liaison hydrogène entre des molécules d'eau.

Article complet à lire sur le site [http://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison\\_hydrog%C3%A8ne](http://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_hydrog%C3%A8ne)

**Lysosyme** – Extrait d'un article de Wikipédia

Le **lysozyme** est une **protéine** globulaire formée d'**acides aminés** (129 chez l'être humain), que l'on rencontre dans un certain nombre de **sécrétions** (larmes, salive, lait maternel, mucus...) et dans le **blanc d'œuf**.

---

Il s'agit d'une **hydrolase** acide (EC3.2.1.17) sécrétée par les **granulocytes** et les **monocytes**. Elle détruit la **paroi bactérienne** en catalysant l'**hydrolyse** des **glycosaminoglycanes** la constituant. Cette propriété a incité certains auteurs à la qualifier d'**antibiotique** corporel.

Cette protéine a été découverte par **Alexander Fleming** en 1922.

Le lysozyme de blanc d'œuf (type-C) possède une [saveur sucrée](#) 200 fois plus intense que celle de la protéine édulcorante [thaumatine](#) (au [seuil de perception](#)).<sup>1</sup>

[Structure tertiaire](#) du lysozyme

Article complet sur : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Lysozyme>

## Permittivité – Extrait d'un article de Wikipédia



Cet article est une [ébauche](#) concernant l'[électromagnétisme](#). Vous pouvez partager vos connaissances en l’améliorant ([comment ?](#)) selon les recommandations des [projets correspondants](#).

La **permittivité**, plus précisément **permittivité diélectrique**, est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un [champ électrique](#) appliqué.

C'est une grandeur [macroscopique](#), essentielle de l'[électrostatique](#), ainsi que de l'[électrodynamique des milieux continus](#). Elle intervient dans de nombreux domaines, notamment dans l'étude de la propagation des [ondes électromagnétiques](#), et en particulier la [lumière](#) visible et les ondes utilisées en radiodiffusion.

On la retrouve donc en [optique](#), via l'[indice de réfraction](#). Les lois gérant la [réfraction](#) et la [réflexion](#) de la lumière y font appel.

### *Théorie* [\[modifier\]](#)

En électromagnétisme, le [champ d'induction électrique](#)  $\vec{D}$  représente la façon dont le [champ électrique](#)  $\vec{E}$  influence sur l'organisation des [charges électriques](#) dans un matériau donné, notamment le déplacement des charges et la réorientation des dipôles électriques.

### Dans un milieu simple [\[modifier\]](#)

La relation des champs électrique et d'induction à la permittivité, dans le très simple cas d'un matériau *linéaire, homogène, isotropique*, et avec *réponse instantanée* aux changements du champ électrique, est :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

où  $\epsilon$  désigne la permittivité sous forme [scalaire](#).

### Dans un milieu plus complexe [\[modifier\]](#)

- Si le matériau n'est pas isotrope, la permittivité est un [tenseur](#) de rang 2, c'est-à-dire une matrice  $\epsilon_{ij}$ . Dans ce cas le champ de vecteur  $\vec{D}$  n'est pas colinéaire à  $\vec{E}$ .
- Si le matériau n'est pas homogène, les coefficients  $\epsilon_{ij}$  de la matrice  $\epsilon_{ij}$  dépendent des coordonnées de l'espace  $(x, y, z)$ .
- Si le matériau n'est pas à réponse instantanée (ces derniers milieux sont dits « parfaits »), les coefficients  $\epsilon_{ij}$  de la matrice  $\epsilon_{ij}$  dépendent des coordonnées de temps  $t$  ou de fréquence  $\omega$ .

- Si le matériau n'est pas linéaire, la relation précédente  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  n'est plus valable.

D'une manière générale, la permittivité n'est pas une constante : elle varie suivant la position dans le matériau, la fréquence du champ appliqué, l'humidité, la température, et d'autres paramètres. Dans un matériau non linéaire, la permittivité peut dépendre de la force du champ électrique.

De plus, la permittivité en fonction de la fréquence des champs électriques et d'induction peut prendre des valeurs réelles ou complexes...

Article complet sur <http://fr.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A9>

---

## Orbitale moléculaire - Introduction d'un article de Wikipédia

---



Cet article ou cette section doit être **recyclé**. Une réorganisation et une clarification du contenu sont nécessaires. Discutez des points à améliorer en [page de discussion](#).

L'**orbitale moléculaire** est un modèle utilisé en [chimie quantique](#) pour décrire les états électroniques au niveau des molécules. Les orbitales moléculaires sont déterminées à partir de la méthode dite [combinaison linéaire d'orbitales atomiques](#) (CLOA), c'est-à-dire construites à partir des [orbitales atomiques](#) de chaque atome constituant la molécule. Orbitales électroniques atomiques et moléculaires

Article complet sur le site [http://fr.wikipedia.org/wiki/Orbitale\\_mol%C3%A9culaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Orbitale_mol%C3%A9culaire)

*La liaison chimique dans les complexes : approche des orbitales moléculaires* – Extrait d'un cours sur la chimie des éléments [uel-pcsm.education.fr](http://uel-pcsm.education.fr)

Dans cette dernière ressource relative à la liaison chimique dans les complexes de coordination, le modèle des orbitales moléculaires est décrit. Ce modèle est particulièrement performant pour justifier qualitativement les propriétés des complexes dans l'état fondamental et dans leurs états excités.

### Prérequis :

- Avoir une bonne connaissance des notions suivantes : orbitale atomique et moléculaire des composés diatomiques, diagramme d'énergie d'orbitales moléculaires, liaisons s et p, approche du champ cristallin.

### Objectifs :

- Etre capable de donner le principe de la construction des orbitales moléculaires.
- Etre capable de décrire les orbitales moléculaires liantes et antiliantes d'un complexe de coordination donné.
- Savoir si un ligand est p donneur/neutre/accepteur et associer un ordre de grandeur du paramètre de champ cristallin.

*Temps de travail prévu* : 1 heure et 30 minutes

### Sommaire :

- :: [Rappel introductif sur la liaison chimique dans les complexes](#)
- :: [Existence d'orbitales moléculaires](#)
- :: [Rappel sur la formation des orbitales moléculaires](#)
- :: [Liaison  \$\sigma\$  dans les complexes : exemple de  \$\text{NH}\_3\$](#)
- :: [Liaison  \$\pi\$  dans les complexes , exemple d'un ligand  \$\pi\$ -donneur :  \$\text{Cl}^-\$](#)
- :: [Liaison  \$\pi\$  dans les complexes , exemple d'un ligand  \$\pi\$ -accepteur :  \$\text{CO}\$](#)
- :: [Conclusion : série spectrochimique](#)

### *Rappel introductif sur la liaison chimique dans les complexes*

Deux grands types de liaisons chimiques peuvent être considérés.

- **La liaison chimique mettant en jeu des électrons.**

Lorsque la liaison chimique est basée sur la mise en commun d'électrons, les électrons mis en jeu sont les électrons présents dans les orbitales les plus externes. Trois grands sous groupes de liaison chimique peuvent être alors considérés :

- **La liaison covalente** (homopolaire). Dans ce cas de figure, les deux atomes liés par covalence sont identiques, le doublet électronique que les atomes ont en commun est partagé entre eux de façon identique. Ex :  $\text{C}-\text{C}$  dans le diamant.
- **La liaison ionique** (hétéropolaire). Les deux atomes ne sont pas les mêmes, l'un est toujours plus électronégatif que l'autre, et il attire plus fortement le doublet électronique. Dans ce cas, on parle de liaison ionique ou de liaison covalente polarisée. Ex :  $\text{Na}-\text{Cl}$  du sel de cuisine.
- **La liaison métallique**. Ce mode de liaison des atomes de métal est d'un type particulier. Il relève du même principe de base que la covalence : la mise en commun d'électrons. Cependant, ce mode de liaison repose sur l'idée de la mise en commun de tous les électrons de valence entre tous les atomes de l'échantillon de métal quel que soit son volume. C'est une extension de la notion de covalence. Ex :  $\text{Cu}^+ - \text{Cu}^+$  dans le cuivre.

- **La liaison chimique ne mettant pas en jeu des électrons.**

Ce sont des liaisons de type électrostatique ou de type Van der Waals. Certaines molécules sont polaires ; elles sont constituées de liaisons polarisées. Par exemple, si l'on

considère la molécule d'eau,  $\text{H}_2\text{O}$  : elle est constituée d'un atome d'oxygène plus électronégatif que les atomes d'hydrogène. Par conséquent, bien qu'elle soit électriquement neutre dans sa globalité, la molécule présente une extrémité chargée positivement et une autre chargée négativement, de sorte qu'il s'agit d'une molécule polaire. Les molécules polaires s'attirent mutuellement et cette attraction est appelée une attraction dipôle-dipôle.

Ex :  $\text{O}^{-\delta} \cdots \cdots \text{H}^{+\delta} - \text{OH}$  , la liaison hydrogène entre molécules d'eau (voir [figure a](#)).

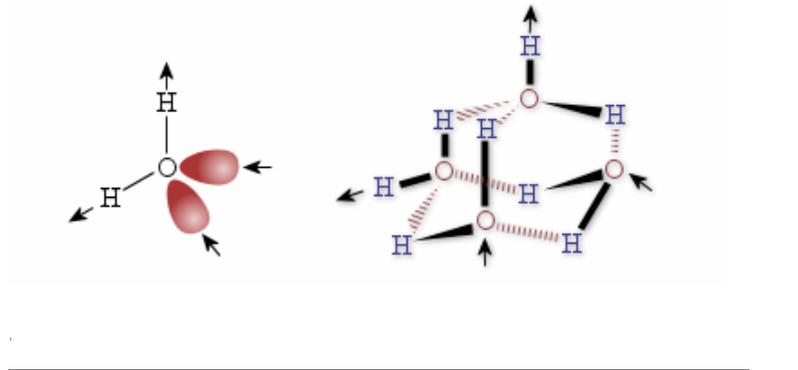


Figure a. Schéma représentant : à gauche, une molécule d'eau. Chaque molécule d'eau joue à la fois le rôle de donneur de liaison H grâce à ses deux liaisons  $O-H$  et d'accepteur de liaison H grâce à ses deux doublets non liants sur l'atome O ; à droite, un réseau de liaisons hydrogène entre plusieurs molécules d'eau

Les associations dipôle-dipôle ont souvent lieu par l'intermédiaire d'un atome d'hydrogène, d'où le nom de *liaison hydrogène* que l'on donne à ce type d'interaction.

Dans les composés de coordination, espèces dans lesquelles divers anions ou molécules neutres ( $H_2O$ ,  $NH_3$ , ...) se lient à un atome ou à un ion d'un métal de transition ( $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , ...), la formation de la liaison se réalise de façon singulière.

La liaison se forme par mise en commun d'électrons selon le modèle type « Réaction Acide-Base » de Lewis. Les liaisons entre l'ion métallique central et les ligands (ou coordinats) résultent de la mise en commun d'un doublet libre apporté par le ligand, en utilisant une case vide de l'ion central. Le métal (ou l'ion) de transition agit donc en tant qu'acide de Lewis, alors que le ligand est une base de Lewis caractérisée par un doublet d'électrons. La caractéristique de tous les ligands est donc de posséder au moins un doublet libre (non liant).

Trois grandes approches permettent de décrire plus en détail cette liaison « métal-ligand » dans les composés de coordination :

- l'approche de la liaison de valence,
- celle du champ cristallin,
- celle des orbitales moléculaires.

Pour chacune de ces approches, la notion de symétrie de l'environnement de l'ion de transition est un facteur important. En effet, l'appellation « COMPLEXES » pour les composés de coordination est venue du fait qu'ils ne satisfaisaient pas à la notion classique de « VALENCE ».

## Existence d'orbitales moléculaires

Les interactions « électron-électron » au sein du nuage électronique sont évaluées par le paramètre de Racah B. La valeur de B étant inférieure pour un ion de transition participant à un complexe par rapport au même ion nu, il en découle que les interactions entre électrons sont plus faibles dans un complexe.

Le nombre d'électrons pour un même degré d'oxydation du métal demeurant constant, cette diminution de la valeur de B ne peut être attribuée qu'à une extension de la région de l'espace où ces électrons peuvent exister – d'où le passage du concept d'orbitale atomique à celui d'orbitale moléculaire.

**Une orbitale moléculaire est construite à partir d'un jeu d'orbitales atomiques correctement choisi.**

La théorie des orbitales moléculaires permet de justifier la diminution du paramètre de Racah B. Plus important encore, elle va nous permettre, dans une certaine mesure, de justifier la série spectrochimique qui avait été introduite dans la partie du champ

cristallin. Pourquoi  $\text{Cl}^-$  est-il un ligand champ faible ? Pourquoi CO est-il un ligand champ

fort ? Pourquoi  $\text{NH}_3$  est-il un ligand champ intermédiaire ? Dans la suite de cette *ressource*, nous allons nous attacher à répondre à ces questions.

## Rappel sur la formation des orbitales moléculaires

Par définition, une **orbitale moléculaire** est une combinaison linéaire d'orbitales atomiques. Pour pouvoir être formée, deux conditions sur les orbitales atomiques de départ doivent être réunies :

- avoir des énergies proches,
- avoir les **mêmes symétries**.

Il existe deux grands types de liaisons, définies suivant la symétrie du recouvrement entre orbitales atomiques de départ : les **liaisons  $\sigma$**  et  **$\pi$** .

- Les **orbitales  $\sigma$**  sont formées par recouvrement axial d'orbitales atomiques.

L'exemple le plus simple en est donné par le recouvrement de deux orbitales 1s dans la

formation des orbitales  $\sigma$  liantes et  $\sigma^*$  anti-liantes de la molécule de dihydrogène  $\text{H}_2$ .

Des orbitales  $\pi$  peuvent aussi être formées à partir d'orbitales de type  $p$  si ces dernières sont dirigées le long de l'axe reliant les deux atomes. Ces exemples sont illustrés sur la figure 1 ci-dessous.

*Figure 1. Construction de deux orbitales moléculaires liante  $\sigma$  et anti-liante  $\sigma^*$  à partir d'orbitales atomiques  $s$  ou  $p$  pour une molécule dinucléaire A-B*

Dans le cas de la figure 1, on a pris en considération une molécule dissymétrique AB, l'énergie des orbitales de B étant inférieure à celles de A. L'orbitale liante  $\sigma$ , la plus basse en énergie est principalement centrée sur B. L'orbitale anti-liante  $\sigma^*$ , la plus basse en énergie est principalement centrée sur A.

- Les orbitales  $\sigma$  sont formées par recouvrement de part et d'autre de l'axe d'orbitales atomiques.

Un exemple en est donné par le recouvrement de deux orbitales  $p$  dans la formation des orbitales  $\sigma$  liantes et  $\sigma^*$  anti-liantes. Dans la figure 2, la même molécule AB que précédemment est étudiée, les énergies des orbitales de B étant inférieures à celles de A. Là encore, l'orbitale liante  $\sigma$  est principalement centrée sur B, l'orbitale anti-liante  $\sigma^*$  sur A.

*Figure 2. Construction de deux orbitales moléculaires liante  $\sigma$  et anti-liantes  $\sigma^*$  à partir d'orbitales atomiques  $p$  pour une molécule dinucléaire A-B*

Source : <http://www.uel-pcsm.education.fr/consultation/reference/chimie/elementsd1/apprendre/gcb.eld.fa.203.a2/content/access.htm>

## Spectroscopie diélectrique



Cet article est une [ébauche](#) concernant la [physique](#). Vous pouvez partager vos connaissances en l'améliorant ([comment ?](#)) selon les recommandations des [projets correspondants](#).

En [physique](#), on désigne par **spectroscopie diélectrique** l'ensemble des techniques de mesures des propriétés *diélectriques* d'un milieu en fonction de la [fréquence](#). Dans certains domaines, on parle également de **spectroscopie d'impédance**.

### Spectroscopie aux longueurs d'ondes térahertz

**Résumé** : La spectroscopie impulsionnelle apporte une quantité d'informations considérable sur les systèmes physico-chimiques : indice de réfraction, absorption, temps de relaxation. S'agissant de la **spectroscopie aux longueurs d'ondes térahertz** (1 THz = 10<sup>12</sup> Hz), il est possible de mesurer directement le champ électrique de l'impulsion et donc son spectre en amplitude et en phase. On peut extraire ainsi la réponse diélectrique complète. À relativement court terme, en combinant imagerie et spectroscopie large bande, les ondes térahertz pourraient ainsi trouver des applications innovantes.

**Abstract**: *Time domain and Time dependent spectroscopy are powerful tools for physical and chemical analysis. It gives access to numerous information such as refractive index, absorption, relaxation time. In the terahertz range (1 THz = 10<sup>12</sup> Hz), the spectroscopy has a key advantage since it is possible to directly measure the electric field of the pulse, and thus the spectrum in amplitude and phase. In relatively short term, by combining imaging and broadband spectroscopy, the terahertz waves could find innovative applications...*

Source : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/techniques-d-analyse-ti630/spectroscopie-terahertz-re144/>

## Spintronique – Un article de Wikipédia

---

La **spintronique**, **électronique de spin** ou **magnétoélectronique**, est une [technique](#) qui exploite la propriété quantique du [spin](#) des [électrons](#) dans le but de stocker des informations.

### *Introduction* [[modifier](#)]

L'électronique actuelle repose sur une propriété essentielle d'une particule élémentaire ([électron](#)), sa [charge électrique](#). Avec le développement poussé de la technique du silicium ([technique top-down](#)), la gravure des circuits intégrés va atteindre une limite physique de miniaturisation qu'il ne sera pas possible de dépasser sans devoir repenser le concept même de cette technique (développement d'une [électronique moléculaire](#) ou une autre [technique bottom-up](#)). La spintronique telle que développée en ce moment repose sur la technique du silicium, bien maîtrisée, mais permet d'exploiter une propriété supplémentaire de l'électron, la propriété [quantique](#) de spin. La spintronique ouvrira des portes à des applications nouvelles, sans pour autant modifier totalement la technique employée par les fondeurs.

### *Le spin* [[modifier](#)]

---

Article détaillé : [Spin](#).

Le spin est une propriété quantique d'une particule qui, d'une manière imagée (et un peu faussée) pourrait être décrite comme un moment cinétique dû à la rotation de cette particule sur elle-même, à l'instar d'une toupie. Le spin est l'équivalent quantique du [moment cinétique](#) en physique classique. Le moment cinétique quantique a ceci d'étonnant qu'il est responsable du [moment magnétique](#) que porte une particule possédant un spin. D'une manière encore imagée, une particule possédant un spin serait un minuscule aimant.

Pour mieux se représenter cela, par analogie avec la physique classique, imaginons une charge électrique suivant une trajectoire circulaire. La [loi d'Ampère](#) nous apprend qu'un courant électrique crée un champ magnétique. L'intensité de ce champ magnétique sera en [relation directe](#) avec la manière dont l'électron tourne sur cette trajectoire circulaire, et une manière de caractériser ce mouvement circulaire est le moment cinétique. En [physique classique](#), le moment cinétique et le moment magnétique sont donc étroitement liés. Il en est de même en [physique quantique](#) où le spin (moment cinétique quantique) et le moment magnétique partagent d'intimes relations.

### *Applications potentielles* [[modifier](#)]

---

Le spin de l'électron est une sorte de minuscule aimant, il interagit avec des matériaux possédant aussi une aimantation, tels les matériaux ferromagnétiques.

Un courant électrique traversant un matériau ferromagnétique va voir sa proportion d'électrons spin *down* et spin *up* se modifier. On dit que ces électrons sont polarisés en spin. Par ce fait, on arrive à inscrire une information dans le spin des électrons.

Un second matériau ferromagnétique traversé par ce courant polarisé en spin exercera une résistance différente selon la polarisation du courant et l'orientation de l'aimantation

du matériau. Une mesure de la résistance électrique nous permet de lire l'information que le spin des électrons possède.

Le principe de base d'une application en spintronique est donc jeté. L'effet magnétorésistif géant ([GMR](#)) utilisé dans les têtes de lecture des disques durs actuellement est la première application de la spintronique.

L'utilisation conjointe de matériaux aimantés et de l'électronique constitue la base des applications spintroniques de demain. Le phénomène clé à maîtriser reste le contrôle précis de l'orientation de l'aimantation des matériaux ferromagnétiques. Or celui-ci était impossible à contrôler autrement que par l'application d'un champ magnétique, technologiquement difficile à intégrer dans la fabrication des circuits électroniques.

Or il a été découvert expérimentalement en 1999 (sur la base de prédictions théoriques publiées en 1996) qu'un courant polarisé en spin était capable d'agir sur l'orientation de l'aimantation d'un ferromagnétique simplement par le transfert de moment cinétique entre les électrons constituant le courant et les électrons responsables de l'aimantation dans le matériau ferromagnétique ([CIMS](#), *current-induced magnetization switching*). L'inconvénient majeur de cette découverte est que ce phénomène se produit lorsque des densités de courant de l'ordre de  $10^7$  A/cm<sup>2</sup> sont atteintes. Pour éviter que le circuit se comporte comme un fusible à de telles densités, des structures nanométriques sont donc indispensables.

*Qubits* [[modifier](#)]

---

L'utilisation conventionnelle de l'état d'un électron dans un [semi-conducteur](#) est un système purement binaire, puisque l'état représente seulement 1 ou 0, et 8 bits peuvent représenter tous les nombres entiers entre 0 et 255, un nombre à la fois. Les bits en spintronique, nommés *qubits*, exploitent les états *spin up* et *spin down* comme une superposition de 0 ou 1, et 8 qubits couplés possèdent la propriété de représenter tous les nombres entiers entre 0 et 255 de façon simultanée.

*Voir aussi* [[modifier](#)]

---

*Articles connexes* [[modifier](#)]

---

- [Magnétorésistance géante](#)
- [Filtre à spin](#)
- [MRAM](#)

*Lien externe* [[modifier](#)]

---

- « [Spintronique : on a construit la première puce !](#) », Futura-Sciences, 30 mai 2007

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Spintronique>

**Surfusion** – Extrait d'un article de Wikipédia

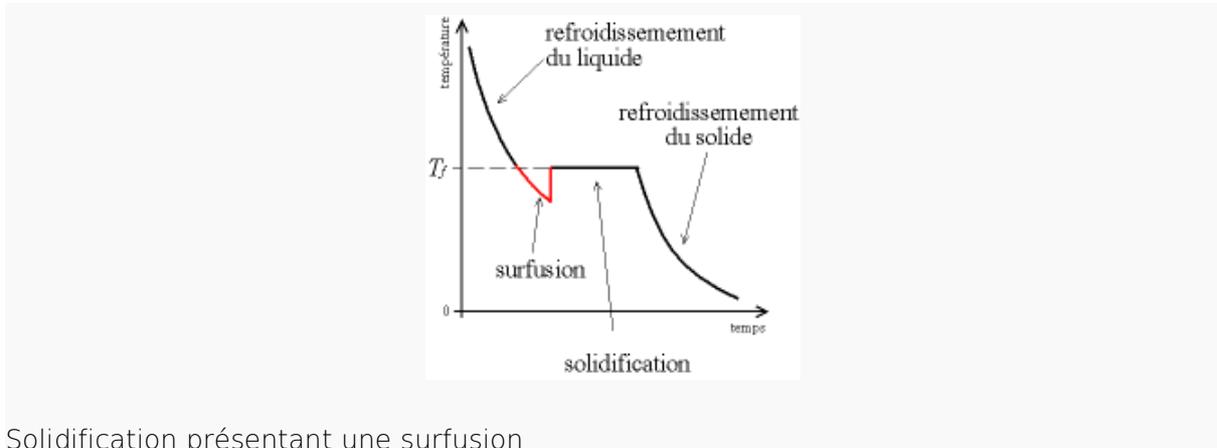
---

La **surfusion** est l'état d'une [matière](#) qui demeure en [phase liquide](#) alors que sa [température](#) est plus basse que son point de [solidification](#). C'est un état dit [métastable](#), c'est-à-dire qu'une petite perturbation peut suffire pour déclencher abruptement le changement vers la phase [solide](#). Un état apparenté, appelé « [retard à l'ébullition \(en\)](#) »,

existe pour une matière qui demeure en phase liquide alors que sa température est plus élevée que son [point d'ébullition](#).

**Principe** [[modifier](#)]

Article détaillé : [Solidification](#).



Solidification présentant une surfusion

La surfusion est due à l'énergie de [tension superficielle](#) à l'interface solide-liquide. De manière simplifiée, on peut considérer que dans un liquide libre d'impuretés, les petits germes de solide en voie de congélation sont instables car ils sont refondus par l'[agitation thermique](#). Plus rigoureusement, l'énergie libérée par la solidification ([chaleur latente](#) de fusion) ne compense pas l'énergie dépensée pour créer l'interface solide-liquide. Le liquide continue donc à se refroidir sans solidifier. Cet état peut être déstabilisé par l'ajout d'impuretés microscopiques ([poussière](#)) ou un [cristal de glace](#), pouvant servir de noyaux de [condensation](#), ou par un brassage qui stimule la formation de cristaux suffisamment gros pour ne pas refondre.

Une explication alternative serait liée à l'impossibilité de paver l'espace périodiquement avec un type de solide régulier. Cette hypothèse s'est, en avril 2010, vue renforcée par les travaux de chercheurs de l'[ESRF](#) travaillant sur les processus de croissance de [nanofils semi-conducteurs](#) et s'apercevant qu'un [alliage d'or](#) et de [silicium](#) présente aussi ce phénomène de surfusion<sup>1</sup>

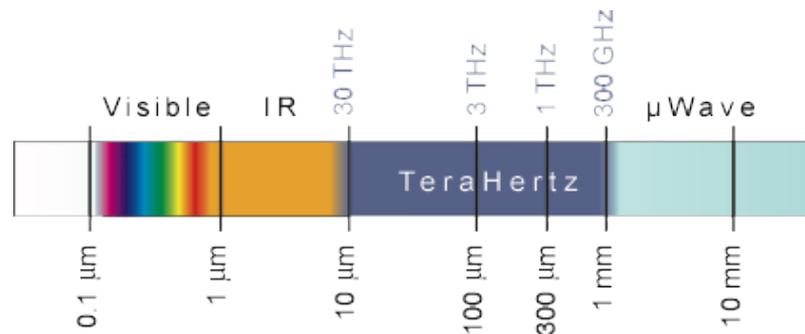
Article complet avec références sur <http://fr.wikipedia.org/wiki/Surfusion>

**Térahertz (THz)** – Extrait d'un document Laurent CHUSSEAU, Directeur de Recherche au CNRS

### [Introduction : Les ondes térahertz \(THz\) et leurs applications](#)

Le domaine des ondes millimétriques présente de multiples intérêts scientifiques et technologiques. Il correspond à de nombreuses excitations dans la matière (phonons, rotation de molécules, transitions intrabandes...) que la spectroscopie THz permet de mieux appréhender. Des applications nombreuses existent aussi dans l'analyse de polluants de l'atmosphère, et en biophysique car les ondes THz sont fortement absorbées par les liquides. Pour des applications technologiques, les hautes fréquences mises en jeu se situent au-dessus de celles atteintes actuellement par les circuits électroniques et microondes, mais on peut espérer qu'elles constitueront, à moyen terme, les fréquences

de fonctionnement de systèmes ultimes, par exemple en télécommunication. D'autres applications des ondes millimétriques et sub-millimétriques sont envisageables, principalement dans le domaine de la radioastronomie millimétrique, mais aussi des radars anti-collision, de l'imagerie biomédicale, etc...



Les ondes THz constituent un domaine intermédiaire entre l'Optique et les Microondes.  $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ , ce qui correspond à une longueur d'onde de  $300 \text{ } \mu\text{m}$  dans le vide ou à un écart entre deux niveaux énergétiques de  $E = 4,1 \text{ meV}$ . Ce domaine de fréquence fut longtemps l'apanage des seuls radioastronomes, il intéresse à présent les électroniciens et les opticiens. À l'heure actuelle, il n'existe pas de source continue de radiation THz ayant une intensité confortable en dehors du laser à électrons libres... qui nécessite un accélérateur de particules pour l'injection !

Le verrou technologique à lever pour le développement de ces applications est la non-disponibilité de sources continues de THz relativement puissantes (quelques centaines de  $\text{mW}$  à quelques dizaines de  $\text{mW}$ , par exemple, serait un bon ordre de grandeur pour une expérience basée sur de la spectroscopie). Cette source n'existe pas encore (sauf peut-être le laser à électrons libres qui est d'un coût plus que prohibitif) mais l'arrivée récente des [lasers à cascade quantique](#) est prometteuse. Toutefois, ceux-ci ne fonctionnent encore qu'à de très faibles rapports cycliques et seulement dans la partie haute du spectre THz. La solution alternative sur laquelle nous nous basons est le battement de deux fréquences optiques que l'on transpose en bande de base THz grâce à un matériau optique non-linéaire, par exemple le GaAs crû à basse température (LT-GaAs).

Mise à jour 16 septembre 2004 © L. Chusseau Tous droits réservés. « Pour une vue nationale plus globale de ce sujet, vous pouvez consulter le site de l'[Action Spécifique "Sources et Systèmes THz"](#) dont je m'occupe par ailleurs ».

Source : <http://www.opto.univ-montp2.fr/~chusseau/research/thz/thzFR.html>

## Transition vitreuse – Article de Wikipédia



Cet article est une **ébauche** concernant la **physique**. Vous pouvez partager vos connaissances en l'améliorant ([comment ?](#)) selon les recommandations des [projets correspondants](#).

Dans un [verre](#), la **transition vitreuse** désigne le passage de l'état solide à un état de fluide visqueux provoqué par un changement de température<sup>1</sup>. L'existence de cette transition est caractéristique des verres.

*Notes et références* [[modifier](#)]

- ↑ [Barton & Guillemet](#), p. 1

*Voir aussi* [[modifier](#)]

- [Verre](#)
- [Température de transition vitreuse](#)

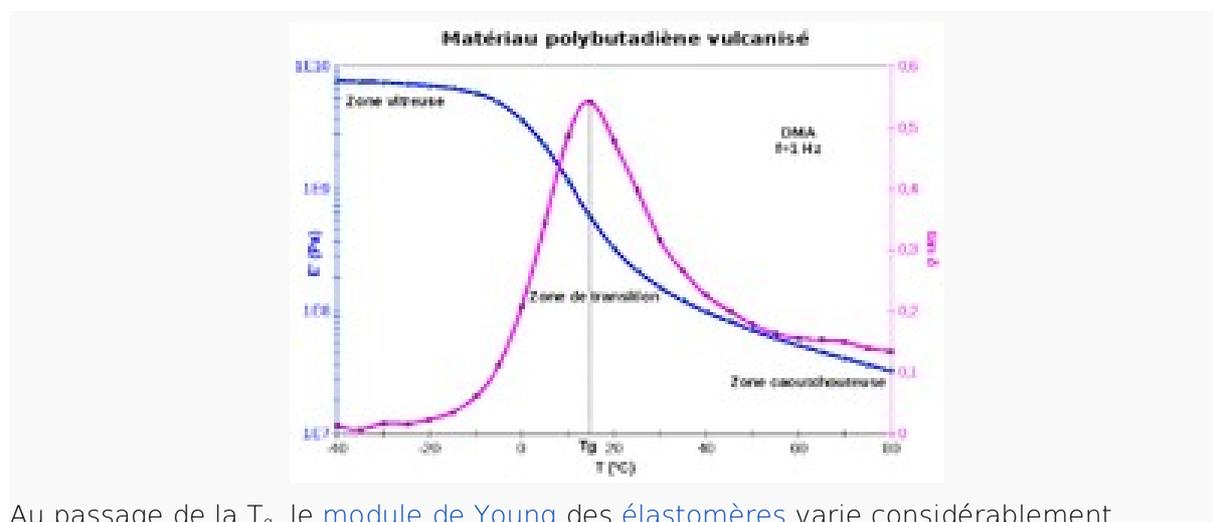
*Bibliographie* [[modifier](#)]

- James Barton et Claude Guillemet, *Le Verre, Science et technologie*, EDP Sciences, 2005 ([ISBN 2-86883-789-1](#))

Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Transition\\_vitreuse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Transition_vitreuse)

**Température de transition vitreuse** – Introduction à un article de Wikipédia

Article connexe : [Transition vitreuse](#). [voir ci-dessus]



Au passage de la  $T_g$ , le [module de Young](#) des [élastomères](#) varie considérablement

En termes de propriétés physiques, la **température de transition vitreuse** ( $T_v$ , anglais :  $T_g$ ) d'une matière est souvent décrite comme représentant l'intervalle de température à travers lequel la matière passe d'un état caoutchouteux à un état vitreux, solide (rigide).

La température de transition vitreuse reste l'un des principaux mystères de la [science des matériaux](#). C'est un paramètre difficile à cerner. Aucune théorie (dont celle fondée sur le volume libre, sur la thermodynamique, sur la cinétique, ou plus récemment sur des statistiques complexes, sur un modèle de paysage d'énergie) ne parvient à expliquer entièrement le phénomène macroscopique qui se produit au voisinage de  $T_g$ . La

température de transition vitreuse dépend de nombreux facteurs, dont la structure moléculaire ; sa mesure exacte n'est pas aisée.

« Les phénomènes physiques qui interviennent dans la transition vitreuse restent l'un des plus fascinants mystères en science des matériaux et en physique de la matière condensée. » — Salvatore Torquato.

Article complet à découvrir sur le site [http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature\\_de\\_transition\\_vitreuse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature_de_transition_vitreuse)

### **Traduction, définitions et compléments :**

Jacques Hallard, Ing. CNAM, consultant indépendant.

Relecture et corrections : Christiane Hallard-Lauffenburger, professeur des écoles honoraire.

Adresse : 19 Chemin du Malpas 13940 Mollégès France

Courriel : [jacques.hallard921@orange.fr](mailto:jacques.hallard921@orange.fr)

Fichier : ISIS Biologie Eau *Dancing with Macromolecules* French version.4 allégée

---