

Laboratoire Léon Brillouin
Fédération Française de Diffusion Neutronique

ISABELLE MIREBEAU - CHRISTIANE ALBA-SIMIONESCO
DENIS MORINEAU - AURÉLIE BORDENAVE

VOYAGE EN CANAUX

Des liquides confinés
vus par les neutrons



Édito

Nous subissons tous depuis plus d'un an l'expérience du confinement. Cette expérience inédite modifie profondément nos modes de vie, nos interactions sociales, nos comportements, notre regard sur le monde. Elle induit également de nouvelles perspectives.

Dans la nature, la matière aussi change de propriétés lorsqu'on la confine dans des volumes extrêmement petits. Elle peut changer de couleur ou conduire différemment l'électricité. Ses changements d'état s'opèrent dans des conditions différentes: par exemple, la glace confinée fond en dessous de 0°C. Le confinement de la matière est omniprésent dans les cellules du monde vivant, les argiles et minéraux, les matériaux de construction, les nouveaux dispositifs électroniques ou les futurs ordinateurs quantiques. Il a donc un rôle crucial que les scientifiques cherchent à comprendre pour le maîtriser.

Que se passe-t-il quand on confine un liquide dans des canaux dont le diamètre a la taille de quelques atomes ou molécules? Comment ce liquide va-t-il s'écouler? Quelles sont ses interactions avec les parois? Va-t-on pouvoir séparer deux liquides miscibles dans des conditions ordinaires? D'un point de vue fondamental, ces questions passionnent les physiciens. Y répondre permet d'envisager de nombreuses applications, de la catalyse aux biotechnologies, en passant par la désalinisation de l'eau de mer, la dépollution, ou... les litières pour chats!

Notre bande dessinée, illustrée par Aurélie Bordenave, aborde ces questions de façon ludique, en évoquant l'histoire d'une véritable expérience, vécue par une équipe de

physiciens, chimistes et techniciens dans un Très Grand Instrument de Recherche (TGR) utilisant la diffraction des neutrons. Les neutrons sont un fantastique outil d'investigation de la matière à l'échelle nanométrique, celle des distances entre atomes. Ils pénètrent facilement les matériaux et distinguent les isotopes d'un même élément chimique, comme l'hydrogène et le deutérium. Cette propriété permet de modifier à volonté le contraste entre deux liquides, ou avec le matériau qui les confine, afin de savoir « ce qui se passe à l'intérieur ».

Pour passer du monde du laboratoire au nanomonde, les physiciens envoient des rayons, et ils utilisent un outil mathématique où intervient un espace intermédiaire imaginaire. Cet outil conceptuel extraordinairement efficace, nous avons choisi de le gommer. À la place, nos chercheurs se font aider par un chat, qui peut passer directement de notre monde à celui des atomes ou des molécules. Ce chat matérialise aussi l'esprit scientifique, en posant son regard critique sur ces deux mondes et sur leur interaction.

Mais quel chat? Depuis le chat de Schrödinger, héros de la physique quantique, les chats jouent un rôle dans la science. Ils sont aussi présents dans la bande dessinée, qui apprécie leur espièglerie et leur indépendance d'esprit. Entre le chat massif de Geluk et le chat squelettique du rabbin, bien d'autres félins sont venus se frotter aux pages de la BD. Ici, nous rendons hommage au chat de Sophie Calle, dont le nom futé est aussi un conseil à suivre en ces temps troublés: SOURIS!

Isabelle Mirebeau

Directrice de recherche au CNRS

Physicienne au Laboratoire

Léon Brillouin

Christiane Alba-Simionesco

Directrice de recherche au CNRS

Physico-chimiste au Laboratoire

Léon Brillouin

Denis Morineau

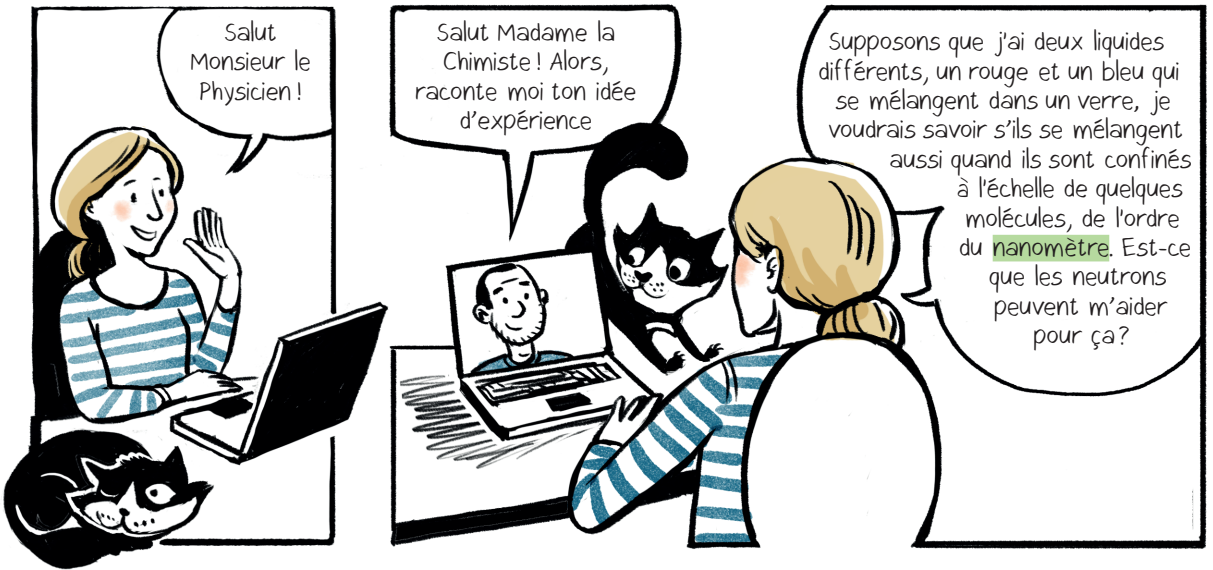
Directeur de recherche au CNRS

Physico-chimiste à l'Institut

de Physique de Rennes

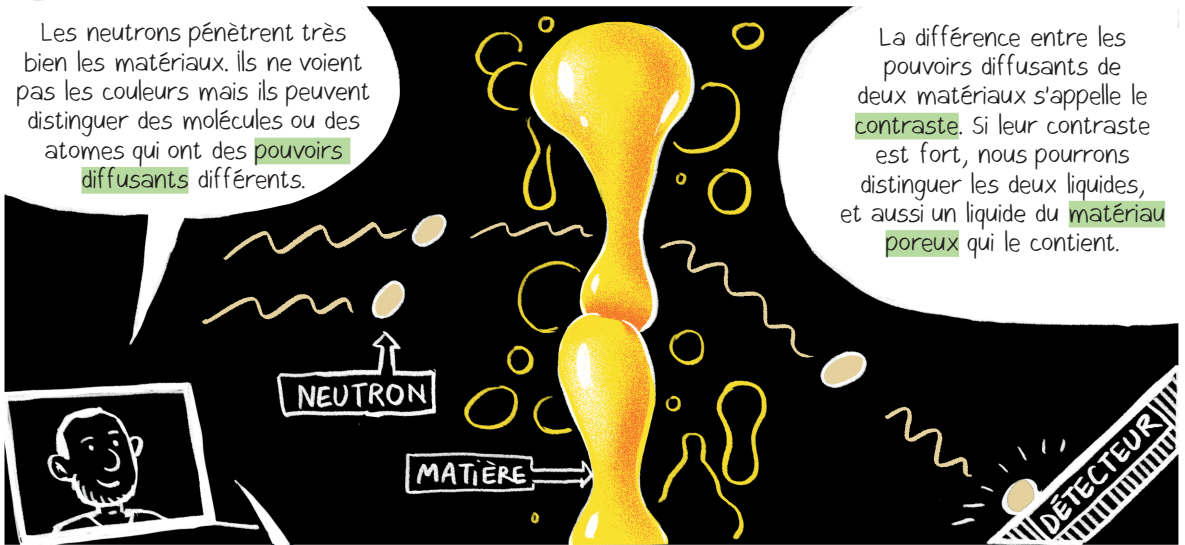


* Les mots surlignés en vert sont définis dans le glossaire



Les neutrons pénètrent très bien les matériaux. ils ne voient pas les couleurs mais ils peuvent distinguer des molécules ou des atomes qui ont des pouvoirs diffusants différents.

La différence entre les pouvoirs diffusants de deux matériaux s'appelle le **contraste**. Si leur contraste est fort, nous pourrions distinguer les deux liquides, et aussi un liquide du **matériau poreux** qui le contient.



Il faut savoir si les canaux de ton matériau ont la bonne taille pour les neutrons et de quoi le matériau est fait. Dans quoi veux-tu confiner tes liquides?

Petits canaux très espacés?

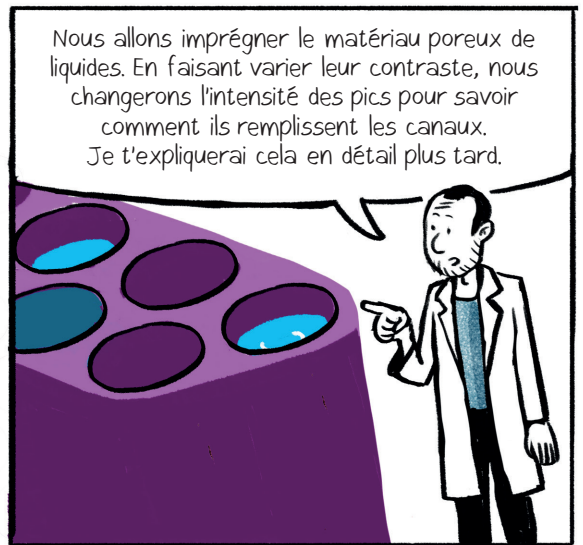


Grands canaux rapprochés?



Je peux fabriquer un matériau poreux, percé de canaux qui seront arrangés sur un réseau hexagonal, en nid d'abeilles.





Salut, tu me reçois? Je vais rentrer dans le **hall des guides** et te présenter l'instrument sur lequel on va travailler.



Quel dommage que je sois si loin, je serais volontiers venue participer dès la phase de test



Pendant que nos amis découvrent le **diffractomètre**, arrêtons-nous un instant sur un point théorique majeur...



La loi de BRAGG

Écrite par le père et le fils Sir William Henry Bragg et William Lawrence Bragg vers 1915, la loi dite de Bragg est formulée ainsi :

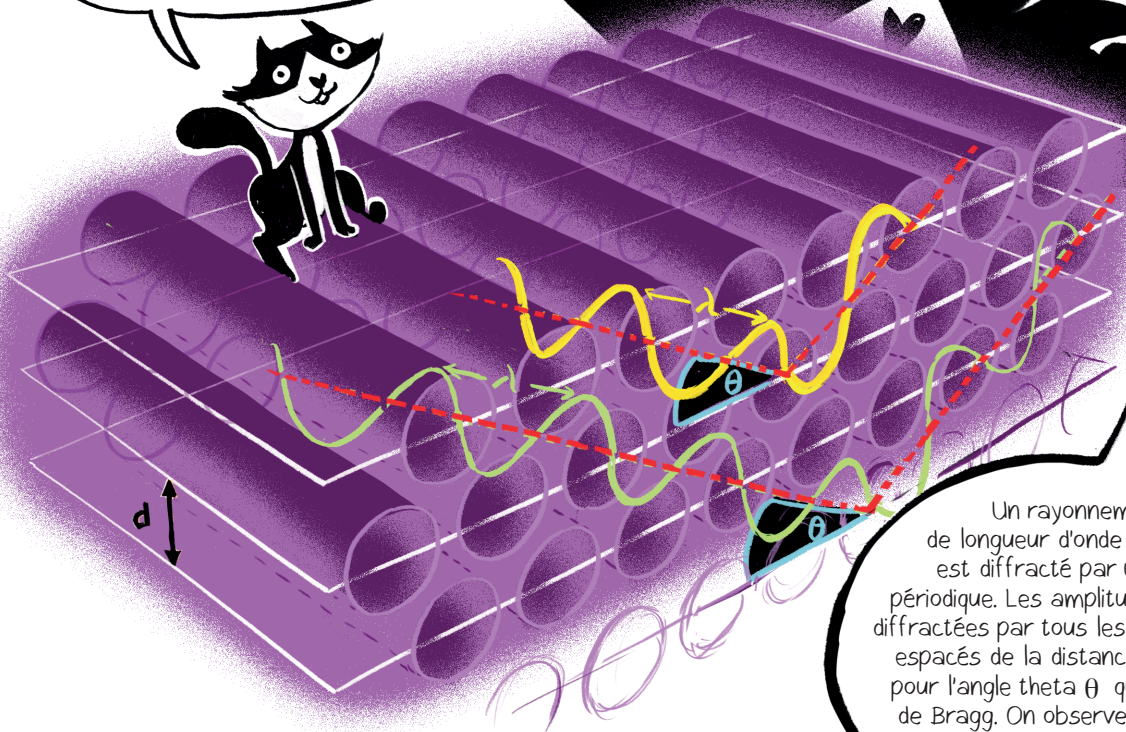
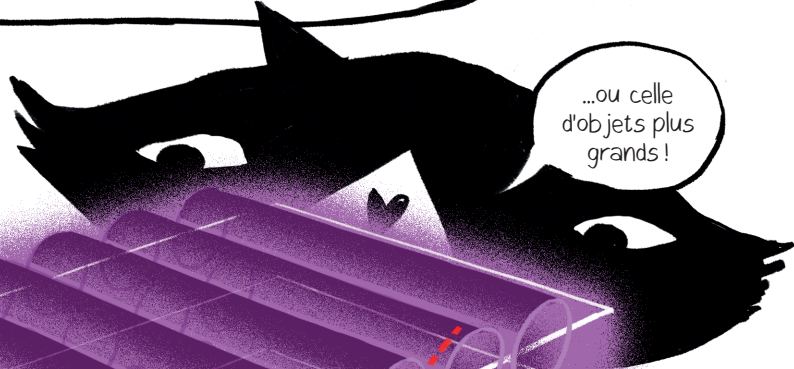
$$2d \sin \theta = \lambda$$



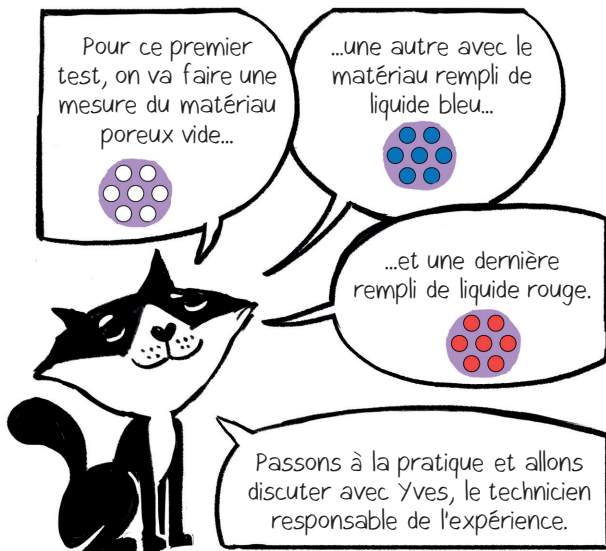
Elle permet de décrire une organisation périodique d'atomes ...



...ou celle d'objets plus grands!

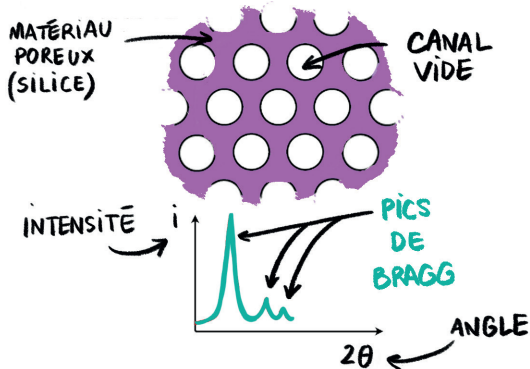


Un rayonnement de longueur d'onde λ est diffracté par un réseau périodique. Les amplitudes des ondes diffractées par tous les plans parallèles espacés de la distance d s'ajoutent pour l'angle θ qui vérifie la loi de Bragg. On observe alors un pic d'intensité ou pic de Bragg.

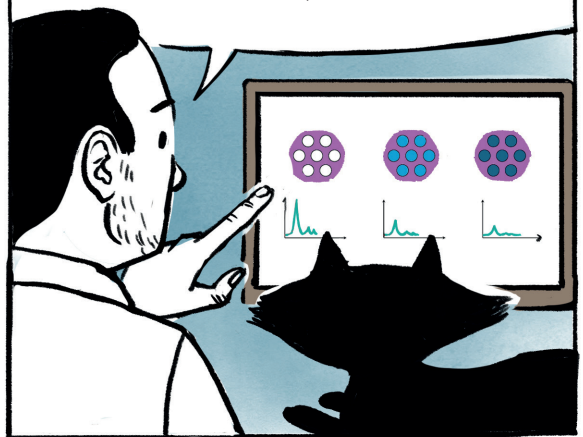


* Voir la réponse à la question du chat Souris à la fin de la BD.

Ce test nous permet de confirmer notre intuition : lorsque le matériau poreux est vide, on obtient des pics de Bragg très intenses, synonymes de fort contraste.

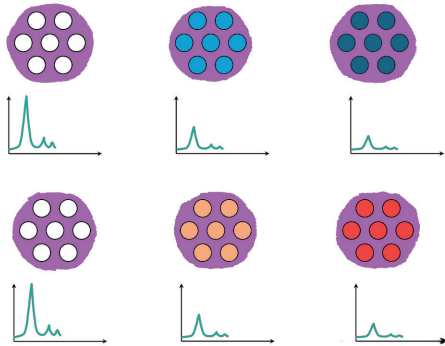


Lorsque tu as vu le liquide remplir le canal, je voyais l'intensité des pics de Bragg diminuer, puis se stabiliser, une fois que tout a été rempli.



Même constat avec les deux liquides, le bleu et le rouge. On dit que l'intensité des pics de Bragg varie comme le carré du contraste.

Quand il n'y a rien dans les canaux, le contraste entre la silice et le vide est fort. Les pics de Bragg sont intenses. Au fur et à mesure que les canaux se remplissent, le contraste diminue.



Il faudrait penser à la vraie expérience



Le test est positif, il est temps de rédiger une proposition d'expérience !

Tu as raison... je dois définir un scénario et une stratégie d'expérience

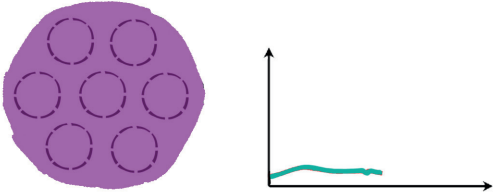


Je vais préparer un mélange des deux liquides dont le pouvoir diffusant moyen sera exactement celui du matériau poreux.



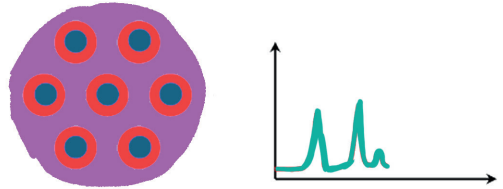
Hypothèse 1

Si les deux liquides se mélangent bien, alors je vais éteindre complètement les pics de Bragg, pas de contraste.



Hypothèse 2

Si j'obtiens un contraste, cela signifie que le mélange se sera séparé en deux régions à l'intérieur de chaque canal (couronne et cœur du pore).



Dans ce cas-là, lorsque j'irai dans un canal j'aurai la surprise de trouver du rouge derrière le bleu!



Au risque de poser une question bête, de quoi sont fait les liquides bleu et rouge?

Ce sont des liquides moléculaires, un alcool et un hydrocarbure, contenant du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène. Je peux faire varier leurs contrastes (entre eux et avec la silice) en remplaçant l'hydrogène par un **isotope**, le deutérium.

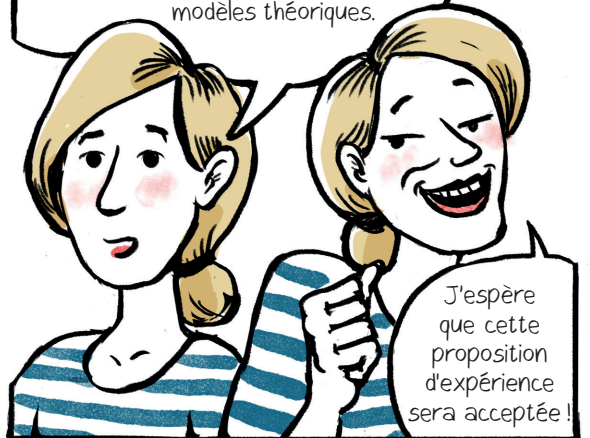


Et comment feras-tu pour connaître exactement l'épaisseur de la couronne et du cœur? La composition du liquide dans ces deux zones?



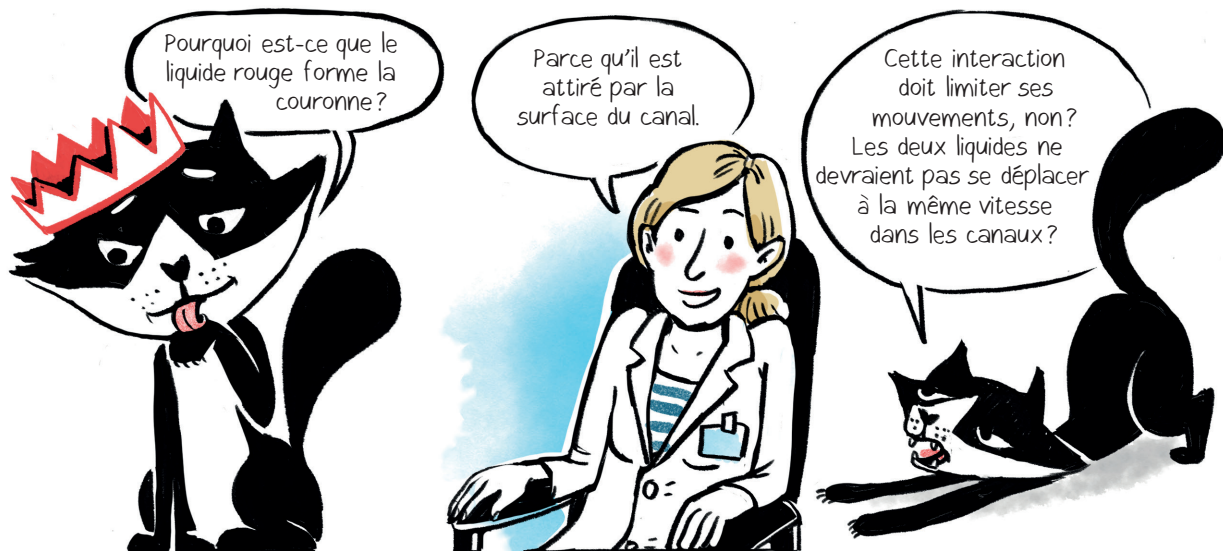
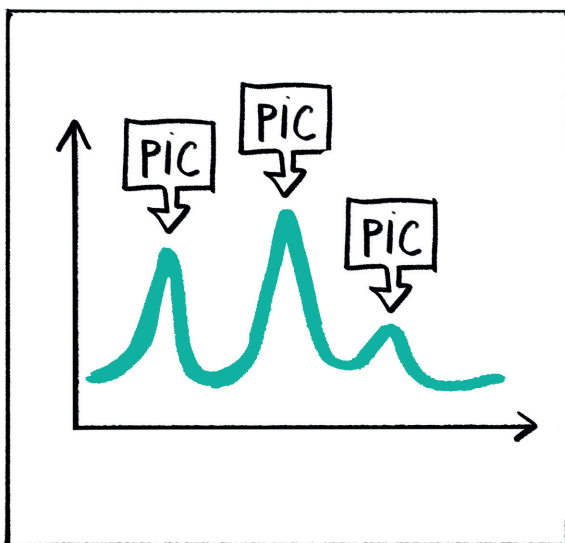
Si je ne suis pas là pour aller vérifier?

Pour déterminer précisément la structure, on comparera les intensités mesurées avec des modèles théoriques.



LA PROPOSITION D'EXPÉRIENCE EST ACCEPTÉE
ET TOUT LE MONDE S'AFFAIRE AUTOUR!



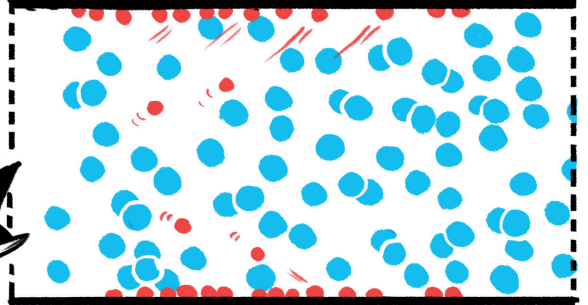


* Précisons que le chat Souris n'est pas devenu radioactif. Sinon, une simple douche n'aurait pas suffi! Dans une véritable expérience, on vérifie systématiquement la radioactivité du matériau mis dans le faisceau. Les liquides étudiés ne sont pas radioactifs.

Si on mesure comment le neutron échange de l'énergie avec le matériau, on va avoir accès aux mouvements des liquides

Génial !!!

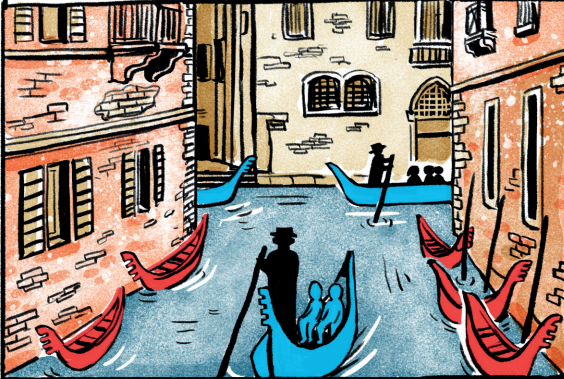
On peut penser que le liquide bleu va se déplacer plus vite que le liquide rouge qui est attiré par la surface.



Imaginez-vous à Venise. Les gondoles au centre se déplacent facilement. Celles près des bords bougent beaucoup moins. Dans cette métaphore, vous êtes le liquide bleu, les bateaux amarrés sont le liquide rouge.

Grâce aux neutrons, on pourra suivre les déplacements des deux liquides dans le canal.

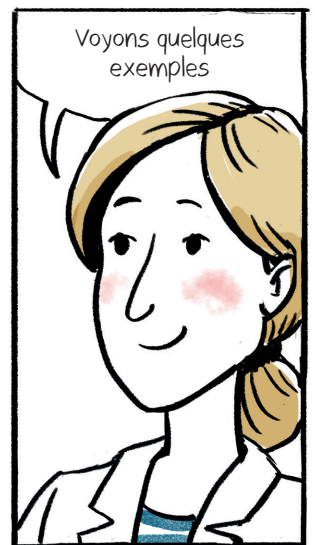
Comment ? Dis-nous !



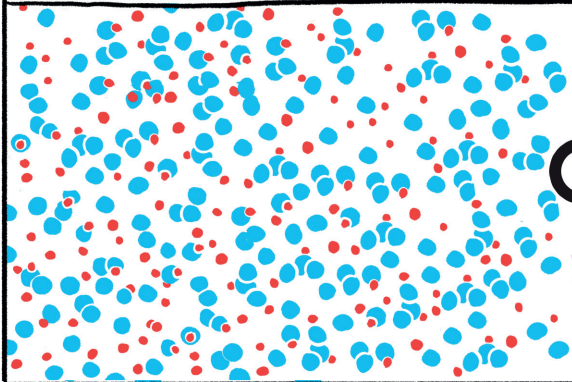
Il faut utiliser un spectromètre qui mesure l'énergie échangée entre les neutrons et les molécules. On pourra rédiger une proposition d'expérience pour le prochain comité !

Au fait, à quoi vont servir ces premiers résultats ? J'ai donné de ma personne, je dois savoir !

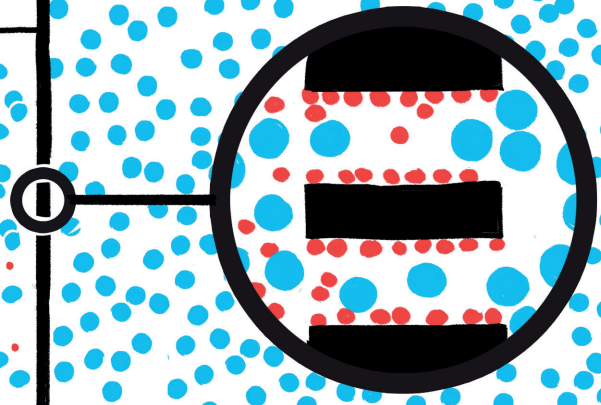
Voyons quelques exemples



Séparer les constituants d'un mélange en utilisant un matériau poreux, comme une membrane, peut servir à désaliniser l'eau de mer.



← MEMBRANE



Ma litière est aussi faite de matériau poreux c'est ainsi qu'elle piège mes urines, non?



Oui tu as raison et dans l'industrie on utilise aussi des matériaux poreux, par exemple pour purifier les hydrocarbures issus du pétrole.

La prochaine fois tu me mets bien du sirop de cassis et pas d'alcool, d'accord?



La séparation de ces liquides ne peut marcher qu'à l'échelle nanométrique...

C'est extraordinaire, qu'est-ce que tu es intelligente, tu devrais partager tout cela en conférence!

Pas besoin de me caresser dans le sens du poil pour obtenir ton diner!



Ceci dit, c'est une bonne idée la conférence!

QUELQUES SEMAINES PLUS TARD...



Glossaire

Atome - Constituant élémentaire de la matière, (solide, liquide ou gazeuse). L'atome est formé d'un noyau comprenant des protons et des neutrons, et d'un nuage d'électrons.

Contraste - Différence entre les pouvoirs diffusants de deux matériaux. Il permet de distinguer deux liquides, ou un liquide du matériau poreux qui le contient.

Contraste isotopique - Différence entre les pouvoirs diffusants de deux isotopes. Le contraste isotopique obtenu grâce au remplacement de certains atomes d'hydrogène d'un matériau par des atomes de deutérium est souvent utilisé en diffusion de neutrons. Il existe d'autres possibilités de substitution pour d'autres atomes.

Deutérium - Noté D ou ^2H , le deutérium est un isotope naturel de l'atome d'hydrogène. Il comprend un proton et un neutron, contrairement à l'isotope le plus répandu noté H ou ^1H , qui comporte un proton mais pas de neutron. Il est donc plus lourd, mais reste le même élément chimique.

Diffractomètre - Instrument qui sélectionne un faisceau de neutrons, l'envoie sur le matériau à étudier et collecte les neutrons diffractés. On peut distinguer deux types d'instruments : le diffractomètre mesure seulement le nombre de neutrons diffractés suivant leur direction ; le **spectromètre** en mesure aussi leur énergie.

Hall des guides - Hall expérimental attenant le bâtiment d'une source de neutrons, où se trouvent les instruments et où sont effectuées les expériences. Les neutrons sont conduits depuis la source de neutrons jusqu'aux instruments dans des tubes longs de plusieurs dizaines de mètres, appelés guides.

Isotope - Les isotopes d'un atome possèdent le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons. Deux isotopes ont donc des propriétés physiques différentes (comme la masse ou le pouvoir diffusant) mais ils constituent le même élément chimique.

Liquide moléculaire - Liquide composé de molécules. Les deux liquides utilisés dans l'expérience réelle sont un alcool, le tert-butanol et un hydrocarbure, le toluène.

Longueur d'onde - En physique, on peut représenter un faisceau de neutrons qui se déplacent à la même vitesse sous la forme d'une onde, c'est-à-dire une vibration dont l'amplitude présente une succession de maxima et de minima, à l'instar de vaguelettes à la surface de l'eau. La longueur d'onde est la distance entre deux maxima successifs, et vaut typiquement de l'ordre de 0.1 à 1 nanomètre pour les neutrons utilisés en recherche.

Matériau - Objet solide ou liquide constitué par l'assemblage d'un ensemble d'atomes et/ou de molécules.

Matériau poreux - Matériau solide comportant des cavités vides pouvant être imprégnées d'un liquide ou d'un gaz. Les cavités du matériau poreux utilisé dans cette étude sont alignées et de taille nanométrique, d'où leur nom de nanocanaux.

Molécule - Assemblage d'atomes électriquement neutre; les atomes y sont reliés entre eux par des liaisons chimiques. Exemple la molécule d'eau H_2O .

Nanomètre - Unité de longueur correspondant à un milliardième de mètre, (10^{-9}m) et qui correspond aux distances usuelles entre atomes dans les matériaux.

Neutron - Particule constituante du noyau des atomes (avec le proton). Emis lors d'une réaction nucléaire, les faisceaux de neutrons permettent d'étudier la matière condensée (solide ou liquide).

Poudre - Le matériau poreux est une poudre, c'est-à-dire qu'il est composé de petits cristaux, les grains de poudre, de quelques centaines de nanomètres à plusieurs microns. Dans chaque grain sont percés des canaux régulièrement alignés sur un réseau hexagonal. Les grains sont orientés dans toutes les directions de l'espace.

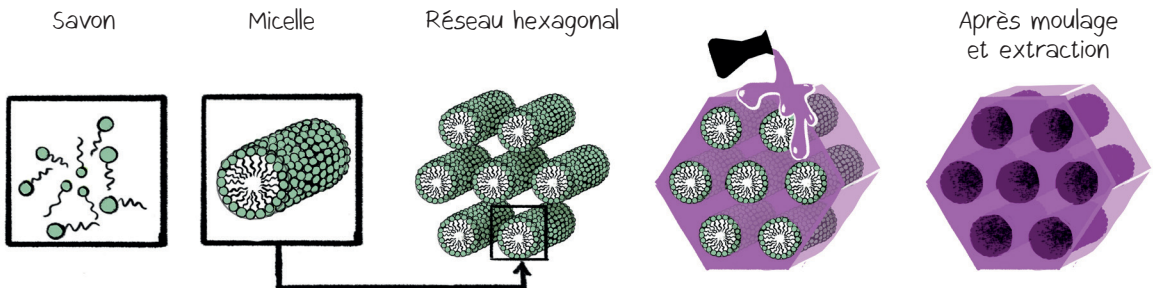
Pouvoir diffusant - Capacité d'un atome ou d'un matériau à diffuser le faisceau de neutrons en changeant sa direction (suivant la loi de Bragg). Il module l'amplitude de l'onde diffusée et donc l'intensité des pics de Bragg. Les isotopes d'un même atome ont des pouvoirs diffusants différents. La substitution isotopique permet donc de faire varier le contraste.

Comment est fabriqué le matériau poreux ?

On dissout dans l'eau des molécules comportant une tête hydrophile (qui aime l'eau) et une queue hydrophobe (qui n'aime pas l'eau). Ces molécules sont dites amphiphiles, comme les molécules de savon.

Pour interagir le mieux possible avec l'eau, elles s'organisent spontanément en longs bâtonnets, appelés micelles cylindriques. Les micelles s'ordonnent entre-elles pour former un réseau hexagonal. On réalise l'empreinte de ce

réseau par moulage d'un matériau solide, appelé silice, autour des micelles. Après extraction des micelles, on obtient un matériau poreux dont la structure hexagonale rappelle celle d'un nid d'abeille.



Conception : Isabelle Mirebeau et Christiane Alba-Simionesco physiciennes au LLB, Denis Morineau, physico-chimiste à l'Institut de Physique de Rennes, et Aurélie Bordenave designer-illustratrice. Merci à Maette Chantrel, Ronan Lefort, Sandrine Lyonnard, Pierre Mirebeau, Sylvie Salamitou, Gilles Tarjus, José Teixeira, Jean-Marc Zanotti pour leurs relectures attentives.

Ce projet a été rendu possible grâce au financement du laboratoire Léon Brillouin et de la Fédération Française de Diffusion Neutronique.

Licence : cette bande dessinée est mise à disposition sous licence "Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 2.0 France".

Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr/>

Achévé d'imprimer et relié en juin 2021 par DFS+ Imprimerie numérique, à Aix-en-Provence.

VOYAGE EN CANAUX

Des liquides confinés vus par les neutrons

Un chat et sa maîtresse vont explorer des canaux remplis de liquides, creusés dans un matériau poreux. Ce voyage aux péripéties multiples leur fait découvrir les propriétés fascinantes des liquides confinés, révélées par le rayonnement d'une source de neutrons. Ces propriétés ont des applications, pour désaliniser l'eau de mer par exemple. Saisie au vol par la bande dessinée, leur aventure illustre celle d'un projet de recherche scientifique, qui requiert de leur part imagination, prise de risque, collaboration et esprit critique. Le confinement a aussi des vertus !

POUR ALLER PLUS LOIN

SUR LES LIQUIDES CONFINÉS

- JDN 14 - *Surfaces, Interfaces, Milieux Confinés par Diffusion de Neutrons*. Murol, France, Mai 2006
A. Brûlet et G. Chaboussant - ISBN : 978-2-7598-0022-3
- Matériaux inorganiques et hybrides bio-inspirés, Clément Sanchez (2012), mediachimie.org/ressource/matériaux-inorganiques-et-hybrides-bio-inspirés

LA SÉRIE ÉDITÉE PAR LE LABORATOIRE LÉON BRILLOUIN

À télécharger gratuitement sur www-llb.cea.fr/BD

- BD *Diffusons les neutrons* (2018)
- Booklet *Le LLB au quotidien* (2019)
- *Glace de Spin : l'expérience* (2020)