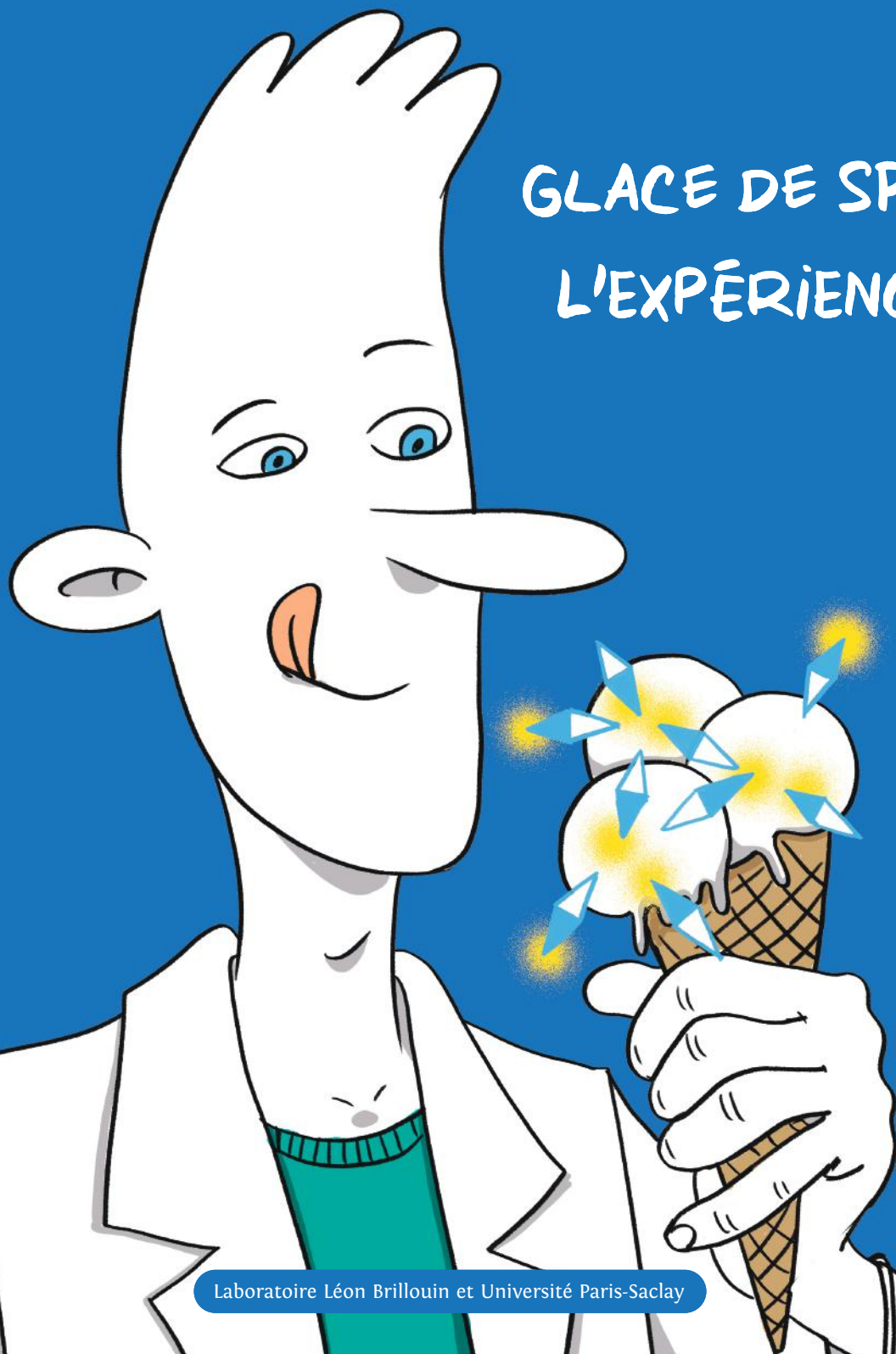


ISABELLE MIREBEAU - CLAUDIA DECORSE  
MIS EN IMAGES PAR AURÉLIE BORDENAVE

# GLACE DE SPIN : L'EXPÉRIENCE



Laboratoire Léon Brillouin et Université Paris-Saclay

# Édito

En quoi consiste le travail d'un chercheur ? Qu'est-ce qu'une expérience de recherche ? Comment est-elle vécue au jour le jour ? Ces questions interpellent les étudiants, et aussi un certain public intéressé par la science « en train de se faire », et pas seulement par ses résultats, dont l'immense majorité lui demeure inconnue.

Une aventure scientifique est d'abord une aventure humaine, avec son lot de surprises, d'essais et d'erreurs, d'interactions entre compétences diverses, entre milieux différents. Un mélange parfois explosif, toujours fascinant, de questions-réponses qui s'élaborent mutuellement, de concepts à géométrie variable, où rien n'est jamais tout à fait acquis, dans une dynamique incessante. Une aventure dont le déroulement tient parfois plus de la marche aléatoire que de la progression linéaire et logique présentée dans les publications.

Plus particulièrement, la recherche en physique de la matière condensée (les solides et les liquides), telle que celle qui se déroule sur le plateau de Saclay, fait appel à de multiples compétences et collaborations, entre chimistes et physiciens, laboratoires universitaires et très grands instruments de recherche, réacteurs nucléaires, synchrotrons, lasers, etc.

Nous avons choisi d'illustrer une telle expérience de recherche par le biais d'une bande dessinée. Le sujet choisi, les glaces de spin, est un exemple de ces couplages, de ces surprises, qui font tout le sel de notre métier. C'est aussi un vrai défi, car l'étude de la ma-

tière condensée et celle du magnétisme sont difficiles à vulgariser, même si leurs applications ont transformé notre vie quotidienne, des téléphones portables aux ordinateurs.

Mis au pied du mur (ou de la page blanche), il nous a fallu simplifier, et dans un souci pédagogique, représenter une expérience fictive, inspirée des premiers temps de la recherche sur le sujet. Celle-ci est nourrie des collaborations du plateau, mais aussi des résultats de nos collègues français et étrangers. Les publications principales sont référencées à la fin de la BD.

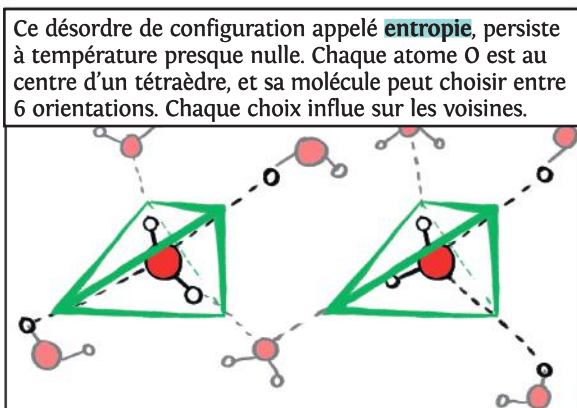
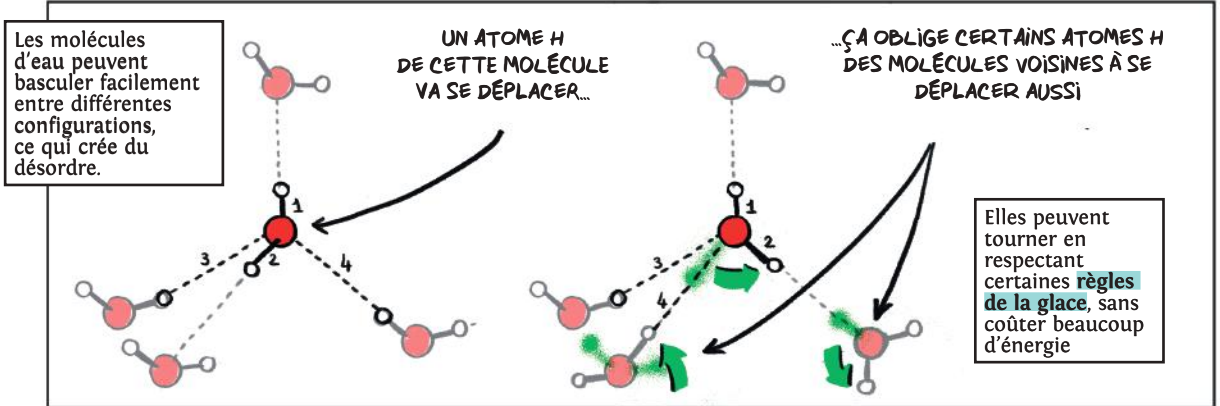
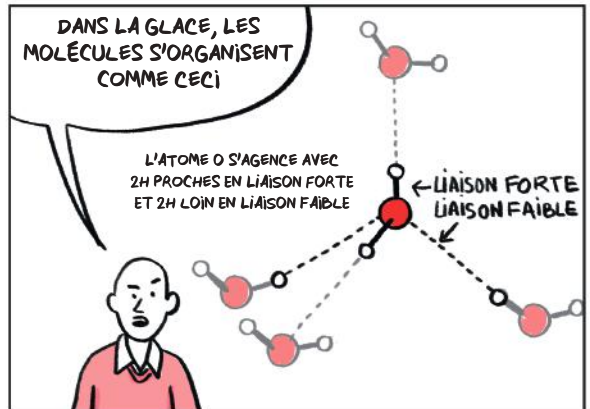
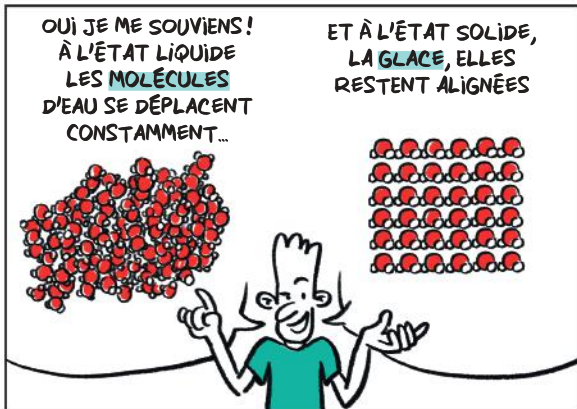
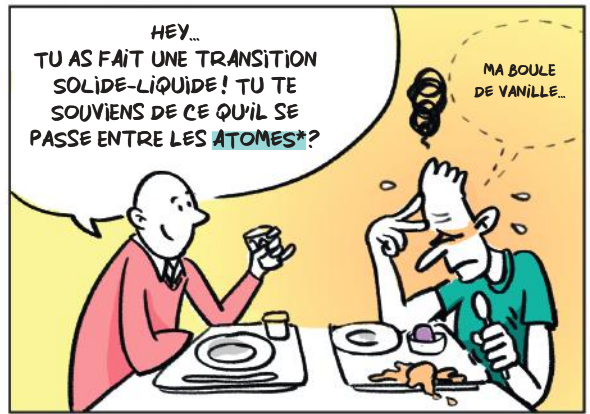
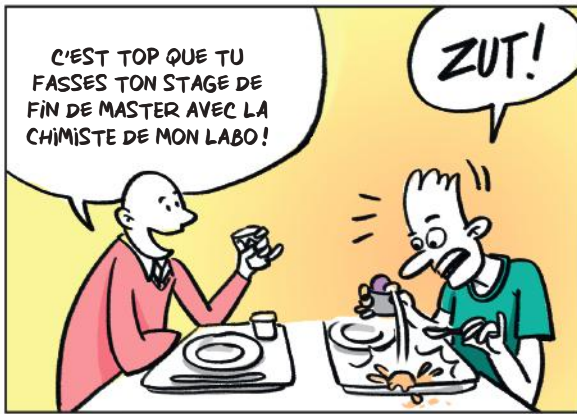
Nous avons essayé de concilier la vision de la dessinatrice, Aurélie Bordenave, pleine d'humour et de fantaisie, avec la rigueur scientifique. Nous avons aussi choisi de montrer toutes les étapes de la démarche, de A (la question de base, la synthèse du matériau) à Z (la soutenance de thèse ou la publication).

Le regard de l'étudiant qui découvre le sujet et s'y implique nous permet d'exprimer quelques ingrédients qui composent la recette d'un chercheur heureux : l'enthousiasme, l'imagination, un travail acharné, la rigueur, le désir de comprendre, le regard critique, la modestie et l'honnêteté, plus un zeste de chance, dans un parcours qui n'a rien d'un long fleuve tranquille.

Nous espérons que la BD contribuera à faire connaître la réalité de notre métier, et qui sait, à attirer de nouvelles vocations ?

Isabelle Mirebeau  
Directrice de recherche au CNRS  
Physicienne au Laboratoire Léon Brillouin

Claudia Decorse  
Maître de conférences  
Chimiste à l'ICMMO\*




\* les mots du glossaire sont **surlignés** lors de leur première occurrence. Le glossaire se trouve en 3<sup>e</sup> de couverture.



LE PREMIER QUI A CALCULÉ ÇA C'EST PAULING.

**Linus PAULING**  
1901-1994  
1954 : PRIX NOBEL pour ses travaux décrivant la nature de la liaison chimique

IL A UTILISÉ LES RÈGLES QUI GOUVERNENT L'ARRANGEMENT DES MOLÉCULES D'EAU POUR CALCULER L'ENTROPIE. DANS LA GLACE D'EAU, C'EST DIFFICILE À MESURER.



DANS LES ANNÉES 1990, ON A TROUVÉ DES ANALOGUES MAGNÉTIQUES: LES GLACES DE SPIN.

COMMENT ON PEUT VOIR ÇA?



ON A MESURÉ LEUR ENTROPIE, C'EST LA MÊME QUE CELLE DE PAULING! SI TU VEUX SAVOIR CE QU'EST UNE GLACE DE SPIN, LE MEILLEUX C'EST D'EN FABRIQUER UNE ET DE REGARDER À L'INTÉRIEUR.

AH NON JE NE M'EN SENS PAS CAPABLE...

MAIS SI!



PUISQUE TU AS TERMINÉ TA GLACE, ON VA ALLER PRENDRE UN CAFÉ AU LABO. JE TE PRÉSENTERAI UNE DES CHIMISTES QUI SYNTHÉTISENT LES CRISTAUX. ENSUITE, LES PHYSICIENS RÉALISENT DES EXPÉRIENCES SUR CES CRISTAUX DANS UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE.



**Au café du labo**

BONJOUR! MON AMI AIMERAIT FABRIQUER UNE GLACE DE SPIN ET COMPRENDRE CE QUI SE PASSE À L'INTÉRIEUR

BIEN SÛR! EN TANT QUE CHIMISTE, JE T'AIDERAI À FABRIQUER UN CRISTAL DE TITANATE D'HOLMIUM

JE SUIS PHYSICIENNE. NOUS ÉTUDIERONS ENSUITE CE CRISTAL AUX NEUTRONS, DANS LE RÉACTEUR NUCLÉAIRE



LES SPINS D'HOLMIUM DOIVENT SE COMPORTEUR UN PEU COMME DES MOLÉCULES D'EAU

C'EST QUOI, L'HOLMIUM?

C'EST QUOI LE SPIN?



L'HOLMIUM EST UNE TERRE RARE MAGNÉTIQUE, COMME LE TERBIUM OU LE GADOLINIUM. LE SPIN CARACTÉRISE SON MAGNÉTISME À L'ÉCHELLE ATOMIQUE. ON UTILISE LE MAGNÉTISME DES TERRES RARES DANS TON TÉLÉPHONE PORTABLE PAR EXEMPLE.

OK. COMMENT ON PROCÈDE?


LEURS PETITS NOMS  
HOLMIUM: Ho  
GADOLINIUM: Gd  
TERBIUM: Tb



POUR SYNTHÉTISER UN CRISTAL DE TITANATE D'HOLMIUM  $Ho_2Ti_2O_7$

$$Ho_2O_3 + 2TiO_2 \rightarrow Ho_2Ti_2O_7$$

- Mélanger, compacter
- Chauffer à  $1400^\circ C$ , broyer
- Suivre par rayons X






**Sur la paillasse**

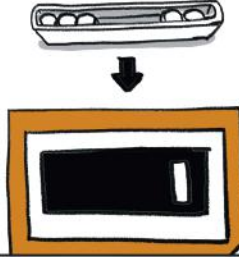
JE PÈSE  
LES COMPOSÉS  
DE DÉPART



JE MÉLANGE  
EN BROYANT  
LES DEUX  
POUDRES  
(POLYCRISTAL)



PUIS JE COMPACTE  
LE MÉLANGE DES POUDRES, ET  
JE LES METS AU FOUR PENDANT  
2 JOURS POUR DÉCLENCHER  
LA RÉACTION CHIMIQUE



APRÈS REFROIDISSEMENT  
JE BROIE DE NOUVEAU  
EN MÉLANGEANT



POURQUOI AI-JE DÛ REBROYER?

CAR NOUS AVONS BESOIN  
DE POUDRE POUR L'ÉTAPE  
SUIVANTE! LA DIFFRACTION  
AUX RAYONS X NOUS  
PERMET D'EXPLORER  
LA MATIÈRE À L'ÉCHELLE  
DES ATOMES.

SI LA RÉACTION N'EST  
PAS FINIE, IL FAUDRA  
RECOMMENCER TOUTES  
LES ÉTAPES PRÉCÉDENTES.



C'EST JAMAIS  
FINI...?!



NOUS VOICI AU  
MILIEU D'UN GRAIN  
DE POUDRE, QUI  
EST UN PETIT  
CRISTAL.

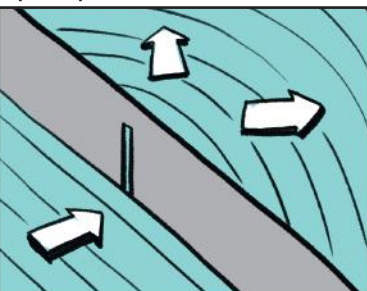
LES ATOMES  
SONT ARRANGÉS  
RÉGULIÈREMENT  
DANS DES PLANS.



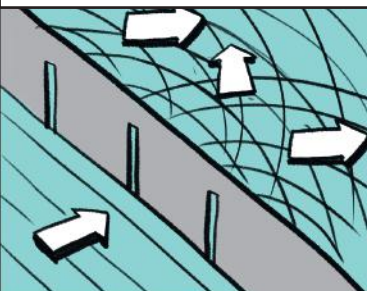
ON ENVOIE SUR LE CRISTAL  
UNE ONDE PLANE DE  
LONGUEUR D'ONDE UNIQUE.  
ÇA PEUT ÊTRE AUSSI UN  
FAISCEAU DE PARTICULES  
AYANT LA MÊME VITESSE.



Lorsqu'elle rencontre un obstacle  
(fente ou atome) l'onde plane  
donne naissance à une onde  
sphérique.



Avec un réseau de fentes,  
les ondes sphériques interfèrent.  
Leurs amplitudes s'ajoutent ou se  
retranchent.



On visualise des pics et des creux  
d'intensité, comme des vagues  
dans un liquide.  
Plus le réseau contient de fentes,  
plus les pics sont hauts et étroits.

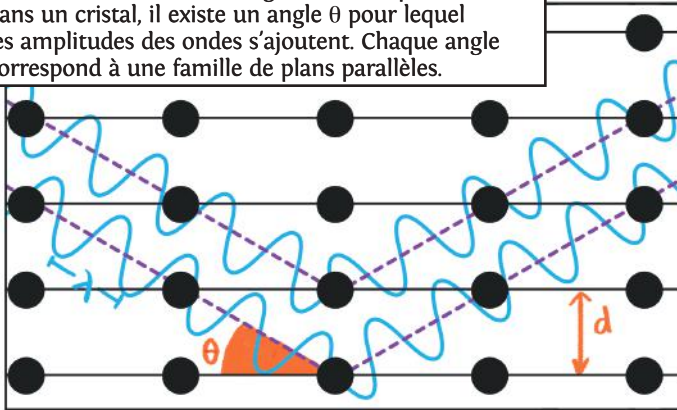
DES ATOMES MAL RANGÉS



UN RÉSEAU D'ATOMES  
(BIEN RANGÉS)



Si les atomes sont bien rangés dans des plans comme dans un cristal, il existe un angle  $\theta$  pour lequel les amplitudes des ondes s'ajoutent. Chaque angle correspond à une famille de plans parallèles.



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

LA FAMEUSE LOI DE BRAGG QUI PERMET DE VOIR À TRAVERS LA MATIÈRE TEL SUPERMAN

SUPERMAN, C'EST DE LA FICTION!

REVENONS À NOTRE MANIP!

GRÂCE AUX LOIS DE LA PHYSIQUE ET AUX MATHÉMATIQUES, ON PEUT SAVOIR CE QUI SE CACHE DANS NOTRE ÉCHANTILLON!

DANS LE DIFFRACTOMÈTRE SUR POUDRES, ON ENVOIE DES RAYONS X MONOCHROMATIQUES, C'EST-À-DIRE D'UNE LONGUEUR D'ONDE UNIQUE

SOURCE RAYON X

MONO-CHROMATEUR

ÉCHANTILLON POUDRE

DÉTECTEUR

La poudre est composée de beaucoup de petits cristaux orientés dans toutes les directions. On va donc voir toutes les familles de plans possibles. Chaque famille va donner un pic d'intensité ou **pic de Bragg**.

Le détecteur va collecter ces intensités. L'ensemble constitue le diffractogramme, "carte d'identité" de l'échantillon. Ici il reste des pics caractéristiques des composés de départ. La réaction chimique n'est pas finie.

Intensité

$2\theta$

H2Ti2O7

PIC D'INTENSITÉ

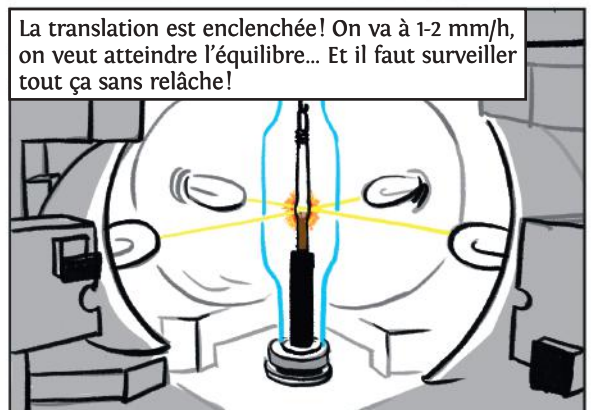
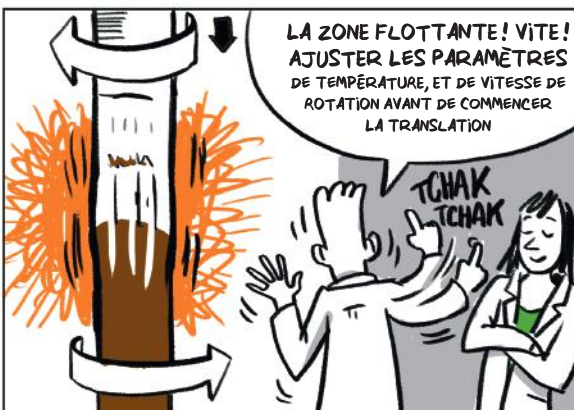
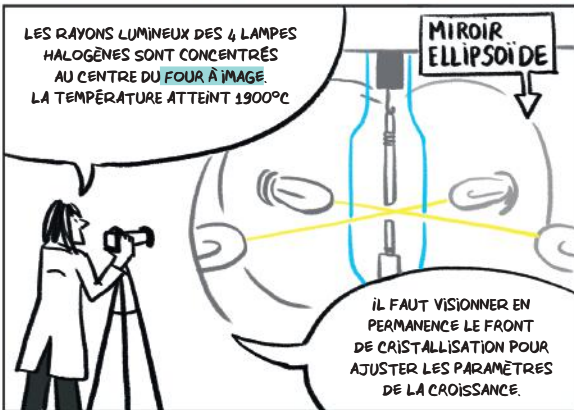
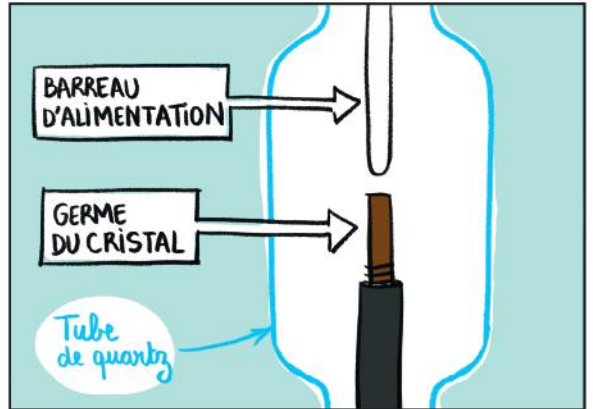
\* = poudres de départ (qui n'ont pas encore réagi)

On recommence à broyer, chauffer et mesurer aux rayons X, jusqu'à l'obtention du seul composé final souhaité, qui alimentera la croissance du cristal.

LA POUDRE EST DEVENUE ENCORE PLUS DURE... ON SE CROIRAIT DANS UNE CARRIÈRE!

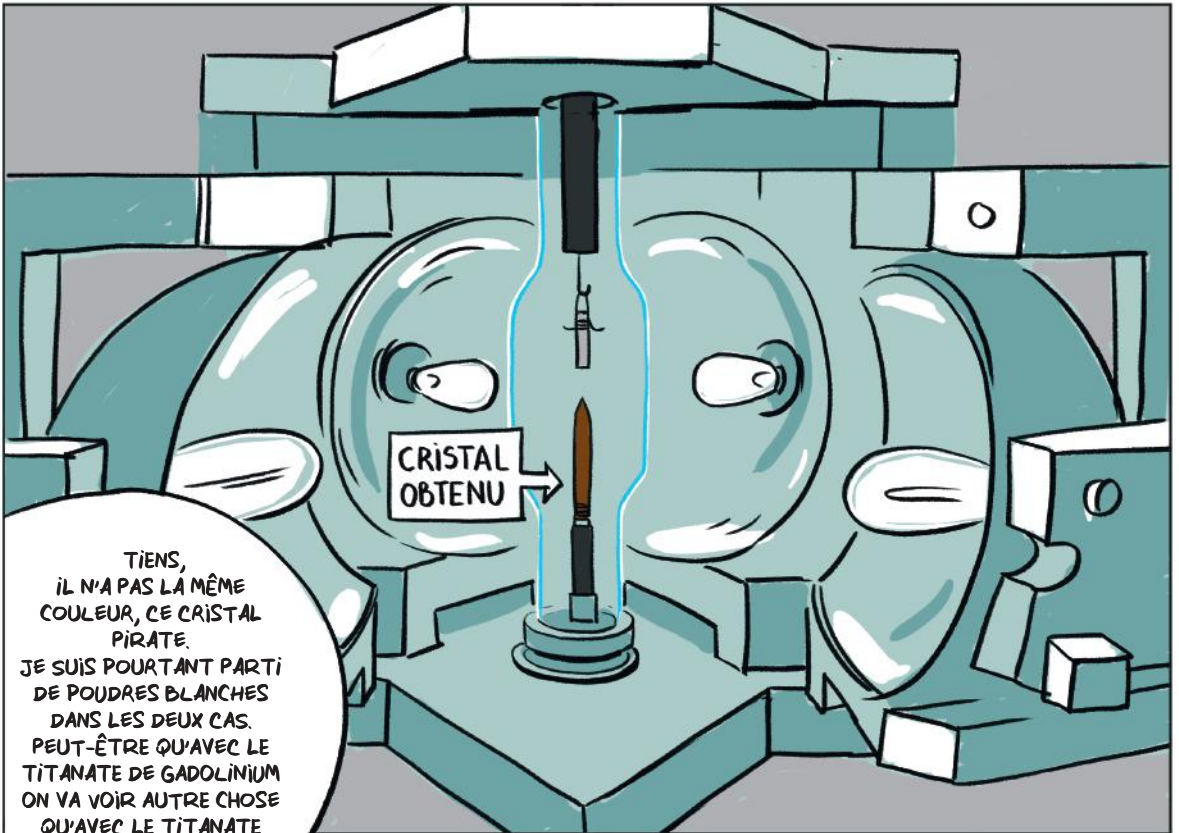
\*la loi de Bragg











TIENS, IL N'A PAS LA MÊME COULEUR, CE CRISTAL PIRATE. JE SUIS POURTANT PARTI DE POUDRES BLANCHES DANS LES DEUX CAS. PEUT-ÊTRE QU'AVEC LE TITANATE DE GADOLINIUM ON VA VOIR AUTRE CHOSE QU'AVEC LE TITANATE D'HOLMIUM?

POUR ÊTRE SÛRS QUE LES CRISTAUX SONT BONS, ON VA FAIRE UNE MESURE AUX RAYONS X.

$\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_3$

$\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_3$

ON FAIT LA MÊME MANIP QUE POUR LA POUDRE?

NON, CETTE FOIS ON ENVOIE UN FAISCEAU DE RAYONS X POLYCHROMATIQUE.

S'IL N'Y A QU'UN SEUL CRISTAL DANS LE BARREAU. ON NE VERRA RIEN DU TOUT AVEC UN FAISCEAU MONOCHROMATIQUE, OU SEULEMENT UN PIC.

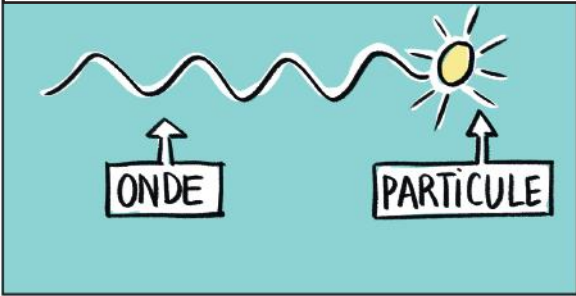
TU AS FAIT UN BON CRISTAL DU MOINS EN SURFACE PUISQUE LES RAYONS X SONDENT JUSTE UNE TOUTE PETITE PROFONDEUR

MAINTENANT ON VA POUVOIR ALLER AU RÉACTEUR ET REGARDER AVEC LES NEUTRONS.

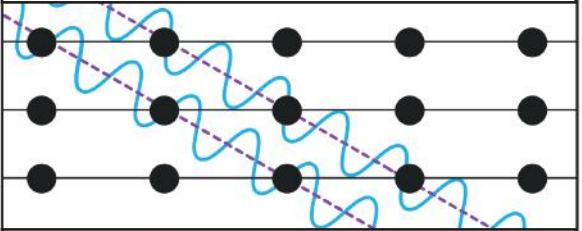
C'EST QUOI LA DIFFÉRENCE ENTRE LES NEUTRONS ET LES RAYONS X?



Le neutron est une onde, comme les rayons X. C'est aussi une particule dont on peut visualiser la trajectoire. Si on connaît la longueur d'onde de cette particule, on peut en déduire sa vitesse et son énergie.

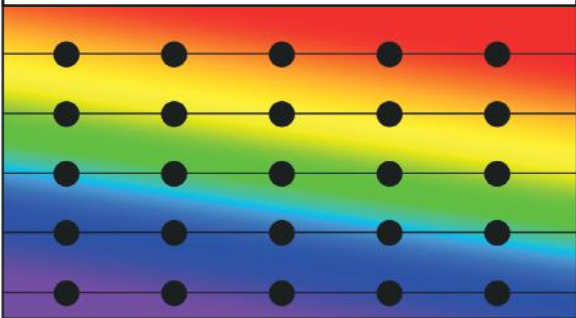


Les Neutrons et les rayons X sont des sondes complémentaires de la matière. Ils ont tous deux des longueurs d'onde du même ordre de grandeur que les distances entre atomes.

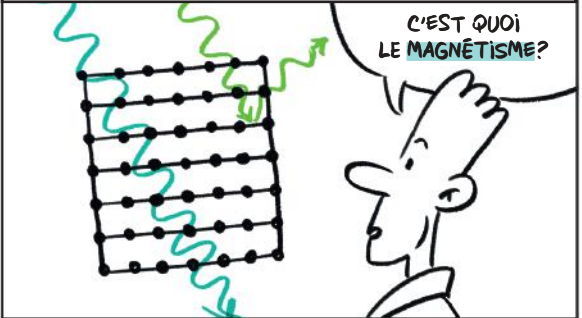


C'est pour ça qu'on peut mesurer ces distances en envoyant ces rayonnements.

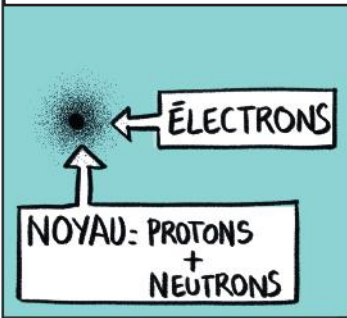
Ça ne marcherait pas avec la lumière visible par exemple, car les longueurs d'onde sont beaucoup trop grandes, et il n'y a pas de diffraction du tout.



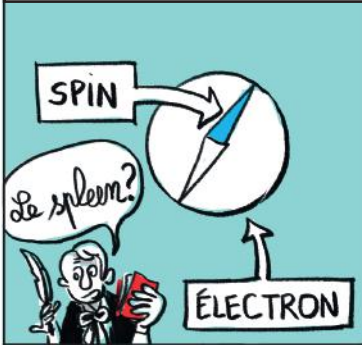
De plus les neutrons permettent d'explorer tout le cristal et pas seulement la surface. Et surtout le neutron a un spin. Il est très sensible au magnétisme des atomes.



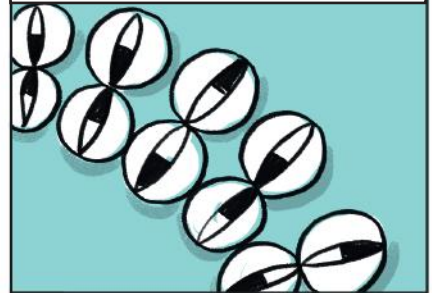
Un atome est composé d'un noyau (protons + neutrons) et d'électrons en orbite.



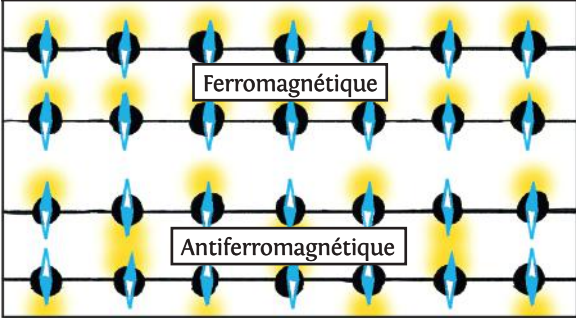
Les électrons ont un spin, comme un petit aimant



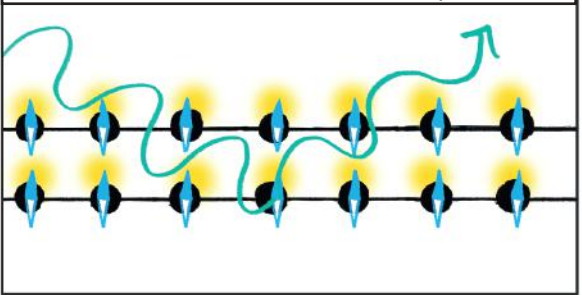
Les électrons des couches atomiques se mettent par paires de spins opposés, ce qui fait que leur magnétisme se compense.



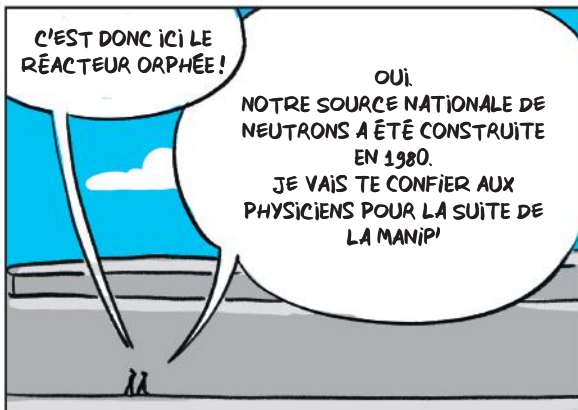
Dans les atomes magnétiques, il reste des électrons célibataires, dont les spins ne se compensent pas. Les spins de ces électrons peuvent s'organiser en réseau.



Le spin des neutrons interagit avec le spin des atomes magnétiques. Ça permet de voir comment les spins atomiques sont organisés d'un atome à l'autre. Mais tu verras ça directement avec les physiciens.





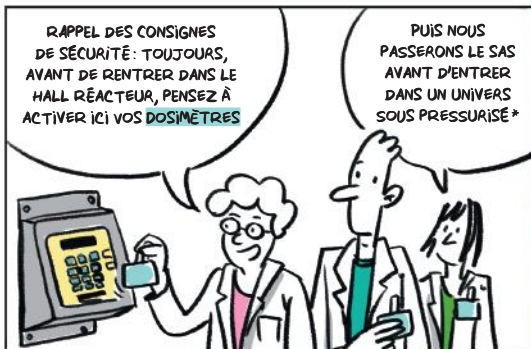


C'EST DONC ICI LE RÉACTEUR ORPHÉE!

OUI, NOTRE SOURCE NATIONALE DE NEUTRONS A ÉTÉ CONSTRUITE EN 1980. JE VAIS TE CONFIER AUX PHYSICIENS POUR LA SUITE DE LA MANIP!



C'EST PARTICULIÈREMENT SÉCURISÉ ICI TU VERRAS



RAPPEL DES CONSIGNES DE SÉCURITÉ: TOUJOURS, AVANT DE RENTRER DANS LE HALL RÉACTEUR, PENSEZ À ACTIVER ICI VOS DOSIMÈTRES

PUIS NOUS PASSERONS LE SAS AVANT D'ENTRER DANS UN UNIVERIS SOUS PRESSURISÉ\*



Dans le hall du réacteur



WAOUH C'EST IMPRESSIONNANT! COMMENT FAITES-VOUS POUR VOUS Y RETROUVER...?

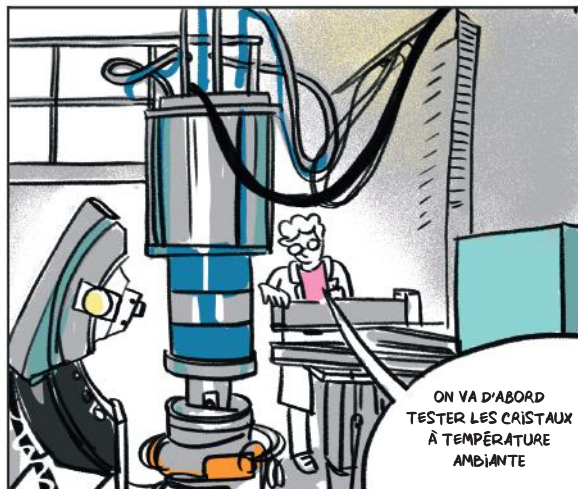
ON SE DEMANDE!



NOUS ALLONS UTILISER LE SPECTROMÈTRE G22 POUR MESURER LA DIFFRACTION DES CRISTAUX.

ON ENVOIE DES NEUTRONS D'UNE SEULE LONGUEUR D'ONDE.

POUR TROUVER LES PICS DE BRAGG, IL FAUT FAIRE TOURNER LE CRISTAL OU LE BASCULER DE FAÇON À METTRE LES PLANS ATOMIQUES AVEC LE BON ANGLE PAR RAPPORT AU FAISCEAU.



ON VA D'ABORD TESTER LES CRISTAUX À TEMPÉRATURE AMBIANTE

\*Le hall expérimental est sous pressurisé pour qu'en cas d'incident radioactif, l'air contaminé ne s'échappe pas vers l'extérieur. (Ici on veut que rien ne sorte, contrairement à une salle blanche où rien ne doit rentrer)



C'EST BON, ON RETROUVE LA MÊME STRUCTURE ATOMIQUE QU'AVEC LES RAYONS X, MAIS CETTE FOIS-CI ON VOIT TOUT L'ÉCHANTILLON.  
REGARDONS TON DEUXIÈME CRISTAL PENDANT QU'ON Y EST



ON NE DÉTECTE RIEN !



POURTANT, AUX RAYONS X, C'ÉTAIT LA MÊME STRUCTURE QUE L'AUTRE. TU ES SÛR QUE TU AS PRIS LES MÊMES POUDRES DE DÉPART ?



BEN... J'AI REMPLACÉ L'HOLMIUM PAR DU GADOLINIUM, POUR VOIR

LE PROBLÈME DU GADOLINIUM, C'EST QU'IL ABSORBE BEAUCOUP LES NEUTRONS. ON PEUT MÊME S'EN SERVIR POUR CONTRÔLER LA RÉACTION NUCLÉAIRE DANS LE CŒUR D'UN RÉACTEUR. DONC PAS LA PEINE DE MESURER CELUI-LÀ POUR LE MOMENT.



MOI QUI CROYAIS AVOIR UNE SUPER IDÉE...



C'EST PEUT-ÊTRE UNE BONNE IDÉE QUAND MÊME. ON Y RÉFLÉCHIRA PLUS TARD. ON VA DÉJÀ REGARDER L'HOLMIUM À BASSE TEMPÉRATURE POUR VOIR SON MAGNÉTISME. LE FAISCEAU N'ATTEND PAS !

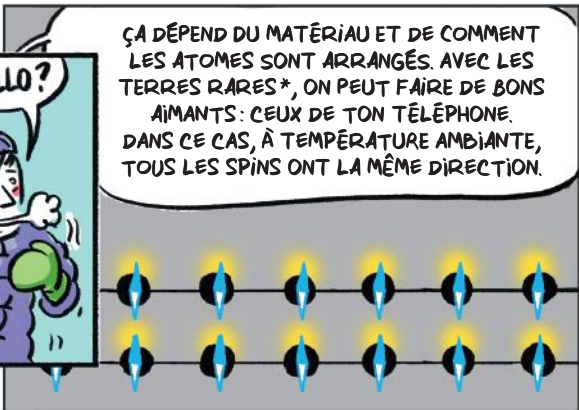


POURQUOI IL FAUT REFRIGÉRER POUR VOIR LE MAGNÉTISME? NOS TÉLÉPHONES PORTABLES\* FONCTIONNENT BIEN À TEMPÉRATURE AMBIANTE!

ÇA SERAIT GÉNANT DE SE REFRIGÉRER CHAQUE FOIS QUE TU PASSES UN COUP DE FIL !



ALLO ?



ÇA DÉPEND DU MATÉRIAU ET DE COMMENT LES ATOMES SONT ARRANGÉS. AVEC LES TERRES RARES\*, ON PEUT FAIRE DE BONS AIMANTS: CEUX DE TON TÉLÉPHONE. DANS CE CAS, À TEMPÉRATURE AMBIANTE, TOUS LES SPINS ONT LA MÊME DIRECTION.



LA GLACE DE SPIN EST UN AIMANT FRUSTRÉ. LES SPINS NE SAVENT PAS COMMENT S'ORDONNER. À TEMPÉRATURE AMBIANTE, ILS FLUCTUENT ET PRENNENT TOUTES LES DIRECTIONS POSSIBLES DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS



POUR VOIR SI TON CRISTAL EST BIEN UNE GLACE DE SPIN, ON VA LE REFRIGÉRER. ALORS LES SPINS AURONT LE CHOIX ENTRE UN PETIT NOMBRE DE DIRECTIONS, SANS TROUVER UNE DIRECTION UNIQUE COMME LES AIMANTS.

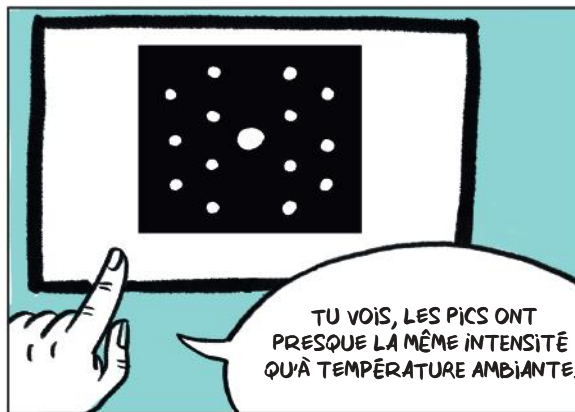
ET LA GLACE DANS TOUT ÇA ?



ON Y VIENT. COMMENÇONS À REFRIGÉRER POUR NE PAS PERDRE DE TEMPS.

\* Les terres rares magnétiques permettent de faire des aimants très puissants et très petits, présents dans les micros, haut-parleurs et vibreurs des téléphones portables.

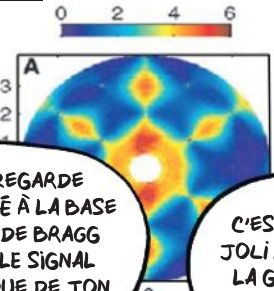




\* Le zéro absolu (zéro Kelvin) correspond à -273.15 degrés Celsius.



**Le lendemain**



0 2 4 6

3  
2  
1  
0

A

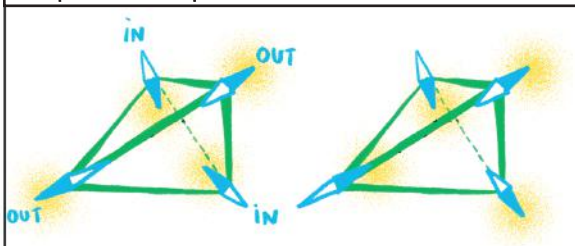
ICI ON REGARDE L'INTENSITÉ À LA BASE DES PICS DE BRAGG TU VOIS LE SIGNAL MAGNÉTIQUE DE TON ÉCHANTILLON.

C'EST SUPER JOLI! C'EST ÇA LA GLACE DE SPIN?

ÇA Y RESSEMBLE.

CETTE FIGURE A ÉTÉ VUE POUR LA PREMIÈRE FOIS PAR DES COLLÈGUES\* EN EN 2001. LES THÉORICIENS ONT MONTRÉ QUE CES POINTS DE PINCEMENTS VENAIENT DE RÈGLES ANALOGUES À CELLES DE LA GLACE.

Dans la glace de spin comme dans la glace d'eau, il y a 6 choix d'arrangement local. Chaque tétraèdre a 2 spins IN et 2 spins OUT. Voici deux choix:



Nos collègues ont simulé la diffusion due à ces arrangements locaux, elle ressemble à ce que tu observes.

MAIS SI ON REMPLACE HO PAR DU TERBIUM (Tb) OU PAR TON Gd, LES SPINS POURRONT S'ÉLOIGNER DES DIRECTIONS IN ET OUT. ÇA DEVRAIT ÊTRE INTÉRESSANT.

J'AIMERAIS BIEN ESSAYER

**Trois ans plus tard**

Soutenance de thèse

Anisotropie magnétique dans les titanates de terres rares

Ho Gd

DANS  $Gd_2Ti_2O_7$  NOUS AVONS UTILISÉ UN ISOTOPE DU Gd QUI N'ABSORBE PAS LES NEUTRONS. LES SPINS S'ORDONNENT À 1 KELVIN DU ZÉRO ABSOLU. GRÂCE À CETTE TRANSITION, ON PEUT ENVISAGER UN THERMOMÈTRE FONCTIONNANT PRÈS DU ZÉRO ABSOLU, À EMBARQUER SUR UN SATELLITE, PAR EXEMPLE

VOICI NOTRE JEUNE PADAWAN DEVENU CHEVALIER!

DOCTEUR! IL EST DOCTEUR!!

CLAP CLAP CLAP!

LE  $Gd_2Ti_2O_7$  EST UTILISÉ PARCE QU'IL S'ORDONNE, CONTRAIREMENT AUX GLACES DE SPIN ON POURRAIT L'APPELER UNE ANTI-GLACE DE SPIN. MAIS LES GLACES DE SPIN, ON NE SAIT PAS SI ÇA VA SERVIR.

PAS ENCORE, MAIS QUI SAIT??

\* Spin correlations in  $Ho_2Ti_2O_7$ : a dipolar spin ice model, S. T. Bramwell et al, Phys. Rev. Lett, 87, 047205, (2001).

# Glossaire

**Anisotropie magnétique** - À l'échelle atomique, propriété du nuage électronique de l'atome magnétique qui comporte une direction ou un plan privilégié. À l'échelle macroscopique, propriété d'un matériau qui présente des directions d'aimantation privilégiées.

**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.

**Barreau d'alimentation** - Matière utilisée pour faire croître un monocristal dans le four à image. C'est un cylindre de céramique constituée du même composé chimique que le cristal qu'on souhaite obtenir.

**Cristal (monocristal)** - Matériau dont les atomes sont arrangés de façon régulière et périodique. La maille caractérise l'arrangement des atomes dans une unité qui se répète dans l'espace. Le réseau caractérise la périodicité.

**Cristal (polycristal - poudre ou céramique)** - Matériau composé d'une multitude de petits cristaux. Il se présente sous la forme d'une poudre ou d'un solide appelé céramique (poudre compressée qui a subi un traitement thermique).

**Degré Kelvin (K)** - Unité de mesure de la température notée K. Le zéro absolu correspond à -273.15 degrés Celsius.

**Dosimètre** - Porté sur la poitrine, il permet de mesurer le rayonnement reçu.

**Entropie** - Le terme entropie a été introduit par Clausius en 1865 à partir d'un mot grec signifiant transformation. En physique statistique, il caractérise le niveau de désorganisation d'un ensemble de particules. Dans la glace, il est lié aux nombre de configurations des molécules d'eau, qui peuvent s'orienter de différentes façons les unes par rapport aux autres.

**Four à image** - C'est un four vertical, où la température augmente dans une zone très petite, le point chaud, en concentrant les rayons lumineux venant de lampes halogène grâce des miroirs (le four solaire d'Odeillo en version de poche !). Il permet de faire croître un

cristal par la méthode de la zone fondue. Au niveau du point chaud, la matière est fondue puis solidifiée très lentement pour obtenir le monocristal. On contrôle la croissance en translatant la zone fondue et en surveillant avec une caméra.

**Frustration** - Un système frustré, comme la glace ou la glace de spin, présente une multitude de configurations ou d'états possibles pour les molécules ou les spins qui le constituent. Le système « hésite » entre ces différents états. La frustration est souvent induite par la compétition d'interactions qui ne peuvent pas être satisfaites simultanément.

**Glace** - L'eau à l'état solide. Il existe de nombreux types de glace. Ici on considère la glace à l'état cristallin dont le réseau est cubique.

**Glace (Règles de la glace)** - Gouvernement l'arrangement des molécules d'eau dans la glace cubique. Chaque oxygène O d'une molécule  $H_2O$  occupe le centre d'un tétraèdre et possède 2 H « proches » (ceux de sa molécule) et 2 H « loin » (appartenant à des molécules voisines). Les molécules peuvent se réorienter en conservant ces règles même près du zéro absolu. Le désordre de configuration ou entropie a été calculé par Linus Pauling en 1935.

**Glace de spin** - Matériau magnétique dont le désordre reproduit celui de la glace d'eau. Les composés  $Ho_2Ti_2O_7$  et  $Dy_2Ti_2O_7$  sont les plus connus. Les atomes Ho ou Dy ont un magnétisme très anisotrope. Ils occupent les sommets de tétraèdres connectés par les sommets et leurs spins pointent soit vers l'intérieur (IN) soit vers l'extérieur (OUT). Chaque tétraèdre possède 2 spins IN et deux spins OUT. Cette analogie avec la glace d'eau explique que l'entropie de configuration est la même.

**Magnétisme** - Dans un atome, les spins des électrons se groupent souvent par paires de spins opposés. Si l'atome est magnétique, les spins de ses électrons ne se compensent pas tous. Les spins de ces atomes magnétiques peuvent s'arranger de plusieurs façons. La plus connue est le ferromagnétisme, où tous les spins sont orientés pareils et constituent un gros aimant.

**Matière condensée** - Les atomes de la matière, dans l'état solide ou liquide.

**Molécule** - Assemblage d'atomes électriquement neutres; les atomes  $\gamma$  sont reliés entre eux par des liaisons chimiques. Exemple la molécule d'eau  $H_2O$ .

**Monochromatique** - Propriété d'un rayonnement qui ne comporte qu'une seule longueur d'onde. Exemple - la lumière bleue

**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).

**Pic de Bragg** - Quand un faisceau de neutrons ou de rayons X monochromatique est diffracté par un cristal, son intensité est fortement augmentée dans certaines directions - ce sont les pics de Bragg, caractéristiques du matériau cristallin.

**Polychromatique** - Rayonnement qui comporte plusieurs longueurs d'ondes (en général un spectre continu). Exemple - la lumière du soleil.

**Spectromètre** - Dispositif permettant d'envoyer un rayonnement sur un matériau et de recueillir le rayonnement diffusé sur un détecteur.

**Spin** - propriété intrinsèque d'une particule, comme la masse ou la charge électrique, et caractérisant son magnétisme. Le spin est le moment cinétique intrinsèque, comme si la particule était une minuscule boule en rotation. C'est une grandeur quantique, mais elle est souvent représentée par un vecteur, comme une boussole ou un petit aimant. Le spin des neutrons interagit avec les spins des atomes, ce qui permet de connaître leurs valeurs, orientations, arrangements et vibrations dans le matériau.

**Terre rare** - Les terres rares constituent un groupe de métaux aux propriétés voisines. Leur magnétisme provient de leur configuration électronique et des électrons non appariés de la couche 4f. Contrairement à ce que laisse penser leur appellation, tous ne sont pas rares.

**Conception** : Aurélie Bordenave dessinatrice, Claudia Decorse chimiste à l'ICMMO, Isabelle Mirebeau physicienne au LLB.

**Merci** à Julien Bobrof, Nicolas Martin, Séverine Martrenchard-Barra, Alain Menelle, Pierre Mirebeau, Sylvie Salamitou, Sylvain Petit, pour leurs encouragements et leur œil avisé.

Ce projet a été rendu possible grâce au financement du laboratoire Léon Brillouin.

Il a bénéficié d'une aide Investissement d'Avenir du LabEx Palm (ANR-10-LABX-0039-PALM).

**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 août 2020 par DFS+ Imprimerie numérique, à Aix-en-Provence.



NOUS DÉDIONS CETTE BD À TOUS LES CHERCHEURS, PHYSIENS ET CHIMISTES, EXPÉRIMENTATEURS ET THÉORICIENS, QUI ONT JOUÉ AVEC LES GLACES DE SPIN, LE MAGNÉTISME ET LA MATIÈRE CONDENSÉE; ET À TOUS LES ÉTUDIANTS QUI SE SONT LAISSÉS CONTAMINER PAR LA RECHERCHE.

IM. et CD.

## GLACE DE SPIN : L'EXPÉRIENCE

Un étudiant en Master découvre le monde de la recherche. Il aborde un sujet très pointu, les glaces de spin, des composés magnétiques doués d'une propriété mystérieuse, l'entropie, qui leur offre une multitude d'états possibles, comme les protons dans la glace.

Il fait pousser des cristaux, les étudie avec des rayons X, puis utilise les neutrons d'un réacteur nucléaire pour sonder ce magnétisme exotique. Il pose des questions, prend des initiatives, va de surprises en déceptions, et se laisse gagner par le virus du découvreur.

### POUR ALLER PLUS LOIN

#### Sur les glaces de spin

- *Spin ices in frustrated magnetic pyrochlores*  
S. T. Bramwell and M. J. P. Gingras,  
*Science* **294**, 1495 (2001).
- *Liquides et Glaces de spin*,  
R. Ballou et C. Lacroix,  
*Pour la Science*, **364** (2008).

#### Sur le réacteur Orphée

- BD *Diffusons les neutrons* (2018)
- Booklet *Le LLB au quotidien* (2019)  
éditées par le Laboratoire Léon Brillouin,  
accessibles sur : [www-llb.cea.fr](http://www-llb.cea.fr)

