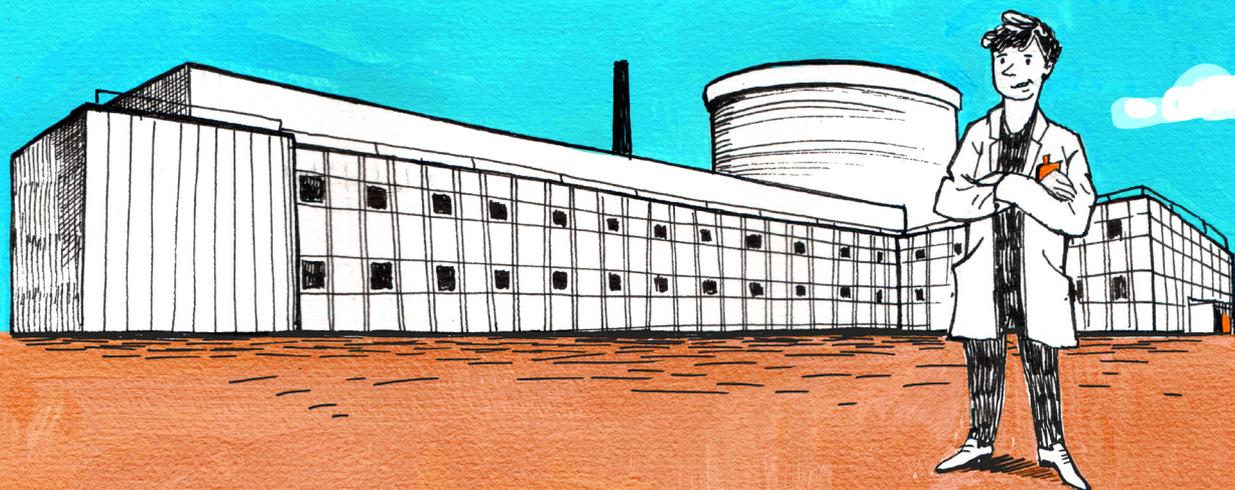


# DIFFUSONS LES NEUTRONS

ORPHÉE,  
RÉACTEUR NUCLÉAIRE  
DE RECHERCHE À SACLAY



*Laboratoire Léon Brillouin*

# Édito

Le réacteur de neutrons Orphée, né en 1980 sur le plateau de Saclay, va fermer fin 2019. Ce sera le dernier réacteur de recherche construit sur le sol français pour diffuser les neutrons. Un autre type de source de neutrons se profile à l'horizon, l'ESS ou « European Spallation Source » basé en Suède. Une source nationale compacte, SONATE, est à l'étude.

Le paysage de la recherche française utilisant les neutrons (1500 utilisateurs sur environ 6000 pour toute l'Europe) va donc profondément changer dans les prochaines années. La communauté française devra se restructurer, faire appel à de nouveaux talents, imaginer de nouveaux modes de fonctionnement. Le temps de faisceau disponible va chuter fortement. Il n'y aura sans doute plus de source nationale pendant une décennie.

Les neutrons sont un outil irremplaçable d'étude de la matière, solide ou liquide. Ils pénètrent bien la matière, sont sensibles aux atomes légers, « voient » leur magnétisme. Ondes et particules en même temps, ils sondent les distances entre atomes et leurs mouvements. Avec la fermeture des différents réacteurs européens, cet outil va se faire rare avant que les nouvelles sources ne prennent le relais.

Dans ce contexte, nous avons voulu évoquer le fonctionnement d'Orphée et le travail au quotidien des chercheurs et techniciens qui depuis près de 40 ans, œuvrent sur l'instrument. Orphée, réacteur de moyenne puissance, a été le lieu de petits miracles grâce auxquels des équipes de taille modeste, scientifiques ou techniques, ont obtenu des résultats majeurs. Il a aussi formé des milliers d'étudiants et de chercheurs invités.

Alain Menelle  
Adjoint à la direction  
du Laboratoire Léon Brillouin

Sécurité oblige, la vie d'un chercheur ou d'un technicien en TGI (Très Grand Instrument) est peu connue du public. La plupart des habitants du plateau de Saclay n'ont pas la moindre idée de ce qui se passe à l'intérieur du réacteur. Notre métier a ses exigences, -les astreintes, le travail en temps limité, la forte sélection des projets-, amplement compensées par la joie de découvertes originales ou de réalisations innovantes.

Ce quotidien d'Orphée, nous l'avons évoqué par le biais d'une bande dessinée. Imaginez-vous, visiteur de la fête de la Science, découvrir le pays-Orphée et discuter avec quelques-uns de ses habitants. Ils parlent une sorte de langue étrangère, leur propre jargon scientifique, qu'il vous faut traduire avec les mots de tous les jours\*.

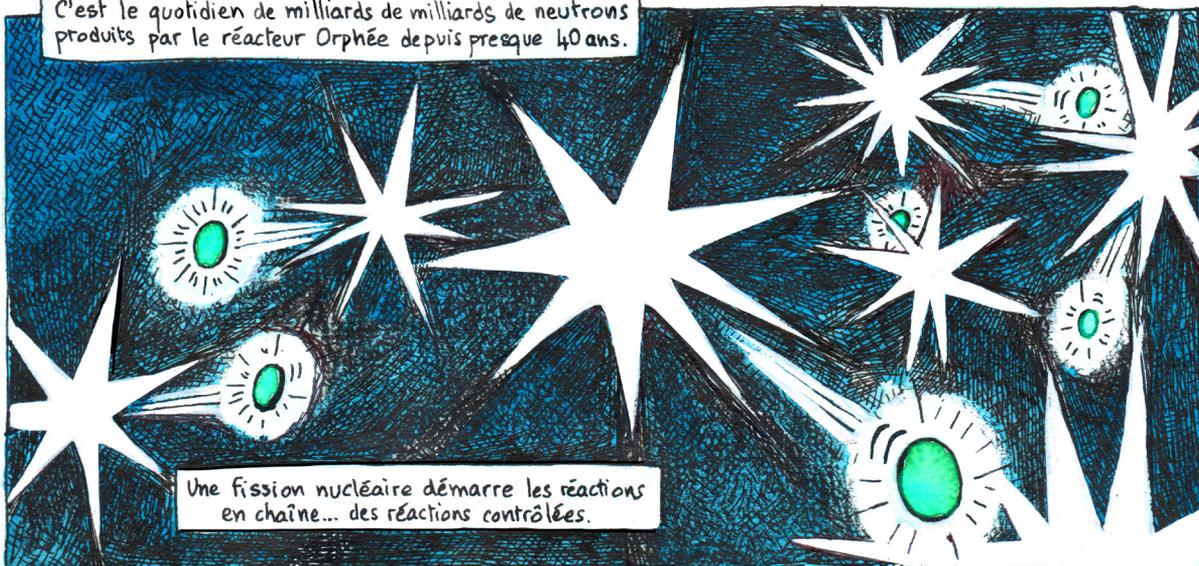
Aurélié Bordenave, dessinatrice scientifique, s'est prêtée au jeu. Elle a passé 2 jours dans le réacteur (rassurez-vous, on l'a laissée sortir entre les deux!). Elle a posé des questions, enregistré les réponses, collectionné les anecdotes, mis la main à la pâte (c'est lourd, la porte d'un sas). Elle nous a livré sa vision, que nous vous offrons aujourd'hui. Avec de superbes dessins, bien plus parlants qu'un discours.

Cette vision, forcément partielle, ponctuelle, subjective, ne prétend pas épuiser toute la richesse de l'histoire d'Orphée, qui demeure une exceptionnelle aventure humaine et scientifique. Des historiens ou des journalistes s'y mettront peut-être un jour. En attendant, nous espérons qu'elle vous fera sentir la richesse et la beauté de ce métier. Et qui sait, peut-être fera-t-elle surgir des vocations ?

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

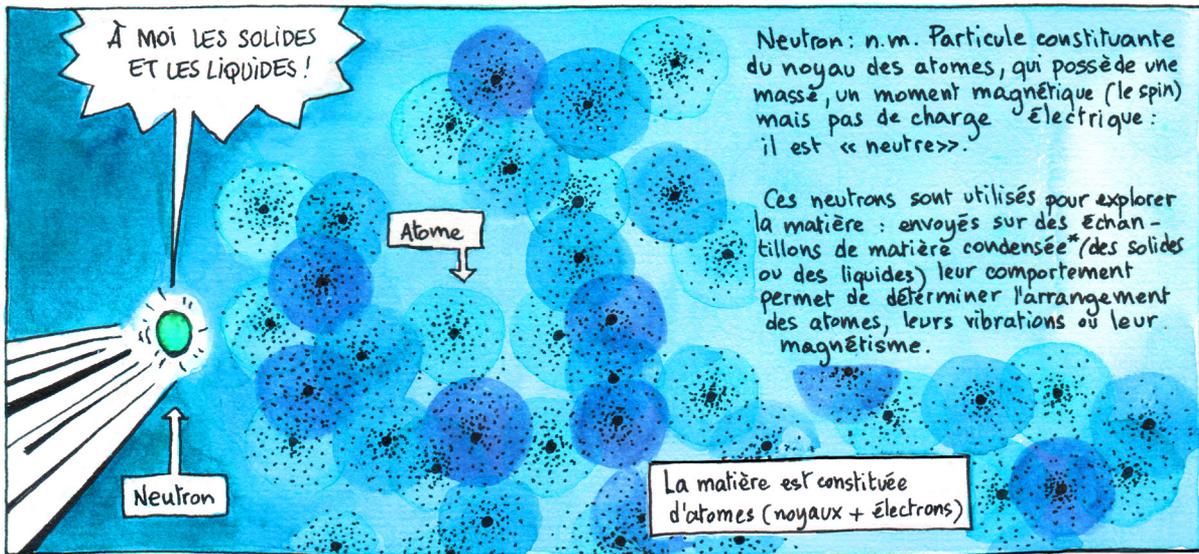
\*Si vous êtes malgré tout largués par le langage, il existe des bouées de sauvetage dans le glossaire !

C'est le quotidien de milliards de milliards de neutrons produits par le réacteur Orphée depuis presque 40 ans.



Une fission nucléaire démarre les réactions en chaîne... des réactions contrôlées.

À MOI LES SOLIDES ET LES LIQUIDES !



Neutron: n.m. Particule constituante du noyau des atomes, qui possède une masse, un moment magnétique (le spin) mais pas de charge électrique: il est « neutre ».

Ces neutrons sont utilisés pour explorer la matière: envoyés sur des échantillons de matière condensée\* (des solides ou des liquides) leur comportement permet de déterminer l'arrangement des atomes, leurs vibrations ou leur magnétisme.

La matière est constituée d'atomes (noyaux + électrons)

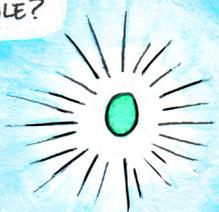
QU'ARRIVE-T-IL AU NEUTRON UNE FOIS DÉTECTÉ ?

EST-CE UNE ONDE OU UNE PARTICULE ?

QUELLES INFORMATIONS PERMET-IL D'OBTENIR ?

COMMENT DISPARAIT-IL ?

CE N'EST PAS DANGEREUX ?



COMMENT OBTIEN-ON LES INFORMATIONS RECHERCHÉES ?

NOTRE SOURCE NATIONALE DE NEUTRONS, UTILISÉE POUR LA RECHERCHE EN MATIÈRE CONDENSÉE\*, A ÉTÉ CONSTRUITE EN 1980

Aurélie, une dessinatrice en visite au LLB



... À L'ÉPOQUE, LES TECHNIQUES DE DIFFRACTION ET DE DIFFUSION NEUTRONIQUES SONT PARVENUES À MATURITÉ, ELLES INTÉRESSENT NOMBRE DE CHERCHEURS, EN 1974, LE LABO EST CRÉÉ POUR COUVRIR LES BESOINS NATIONAUX EN RECHERCHE FONDAMENTALE ET FORMER LES CHERCHEURS



TOUT EN DÉVELOPPANT SES PROPRES PROGRAMMES DE RECHERCHE, LE LABORATOIRE LÉON BRILLOUIN (LLB) MET SES SPECTROMÈTRES\* À NEUTRONS À LA DISPOSITION DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE ; PRÈS DE 30% DES UTILISATEURS SONT ÉTRANGERS.

## HALL DES GUIDES

REGARDONS UN PEU CE QU'IL S'Y PASSE

TIENS J'APERÇOIS UN COLLÈGUE QUI UTILISE LA BABYLINE\*

LES NEUTRONS FROIDS SONT PLUS FACILES À GUIDER

DANS CE HALL, LES NEUTRONS SONT ENVOYÉS VIA LES GUIDES. ON LES UTILISE POUR FAIRE DES EXPÉRIENCES. CHACUNE SE FAIT SUR UN APPAREIL APPELÉ SPECTROMÈTRE\*

Coupe horizontale du réacteur

HALL RÉACTEUR

HALL DES GUIDES

Le cœur du réacteur où ont lieu les réactions en chaîne qui produisent les neutrons

cuve à eau lourde : permet de refroidir et de ralentir les neutrons

À QUELQUES CENTIMÈTRES DU CŒUR, LES NEUTRONS THERMALISÉS\* SE COMPORTENT EXACTEMENT COMME UN GAZ ENFERMÉ À L'INTÉRIEUR D'UNE BAUDRUCHE.

ON LES PRÉLÈVE AVEC LES « DOIGTS DE GANTS » QUI TRAVERSENT LA PAROI VERS LES DEUX HALLS.



LES TUBES CREUX SONT « PLEINS DE VIDE » C'EST CE QUI LEUR PERMET DE CAPTER LES NEUTRONS ENSUITE GUIDÉS VERS LES EXPÉRIENCES.

À L'ÉCHELLE D'UN ÊTRE HUMAIN, UN DOIGT DE GANT EST GÉANT!



À CET ENDROIT L'ENCEINTE CONTENANT LE RÉACTEUR ORPHÉE ET LA PISCINE QUI SERT À REFFROIDIR SON CŒUR ; INDISPENSABLE PUISQUE LA RÉACTION EN CHAÎNE DÉGAGE DE LA CHALEUR

POUR LES EXPÉRIENCES AVEC LES NEUTRONS A TEMPÉRATURE AMBIANTE (THERMIQUES) ON EST INSTALLÉ DANS LE HALL DU RÉACTEUR

UN RÉACTEUR, C'EST COMME UN AVION. LE PILOTE FAIT LE DÉMARRAGE ET L'ARRÊT ; LE RESTE DU TEMPS IL FONCTIONNE EN AUTOMATIQUE ; LE PILOTE NE FAIT QUE SURVEILLER.

**HALL DU RÉACTEUR**

LA SALE DE CONTRÔLE SE SITUE AU PREMIER ÉTAGE. ELLE A DES AIRS DE FILMS DE SCIENCE-FICTION



UN ÊTRE HUMAIN À L'ÉCHELLE

ACCÈS RÉGLEMENTÉ  
BADGE OBLIGATOIRE

ALLONS VOUS PRÉSENTER LES MANIPS'...

OUI, C'EST LE CŒUR DE NOTRE SUJET!



SELON L'EXPÉRIENCE ENVISAGÉE, ON A BESOIN DE NEUTRONS AUX CARACTÉRISTIQUES PRÉCISES. ON UTILISE UN OUTIL POUR LES SÉLECTIONNER: LE MONOCHROMATEUR\*

Alain, physicien

Un monochromateur\* est une sorte de miroir: sa fonctionne exactement comme un prisme

Flux incident

Flux de neutrons déviés

ON SÉLECTIONNE LES NEUTRONS SELON LEUR « COULEUR », C'EST-À-DIRE LEUR ÉNERGIE

LES NEUTRONS ISSUS DE LA RÉACTION EN CHAÎNE SONT BEAUCOUP TROP ÉNERGÉTIQUES, DE L'ORDRE DU MeV\*

À LEUR SORTIE DE LA CUVE À EAU LOURDE, ILS SONT THERMALISÉS\* À UNE ÉNERGIE FAIBLE 25 meV\* ENVIRON, SOIT UNE ÉNERGIE COMPARABLE À CELLE DES EXCITATIONS\* DANS LES SOLIDES: PARFAIT POUR CE QU'ON VEUT ANALYSER

POUR MIEUX COMPRENDRE LA MATIÈRE, IL FAUT CONNAÎTRE...

... COMMENT LES ATOMES\* SONT ORGANISÉS (LA STRUCTURE)

OU

OU

... COMMENT ILS BOUGENT (LES EXCITATIONS\*)

DANS LE SOLIDE, LES ATOMES\* SONT COMME LIÉS ENTRE EUX PAR DES PETITS RESSORTS. ILS VIBRENT SPONTANÉMENT QUAND ON LES CHAUFFE. SI UN NEUTRON IMPACTE UN ATOME, IL GAGNE OU PERD DE L'ÉNERGIE, ET LA VIBRATION SE PROPAGE SUR LES ATOMES SUIVANTS.

Dans les solides cristallins\* (par ex. le quartz) les atomes vibrent autour de leur position d'équilibre.

Dans les liquides, les atomes se déplacent en conservant les distances entre voisins

Le verre (un liquide gelé) fait partie des solides amorphes

Les cristaux liquides une sous-partie de la molécule\* peut être orientée

Les polymères sont de longues molécules, l'ADN en est un.

# DIFFUSION INÉLASTIQUE

On mesure les énergies gagnées ou perdués par les neutrons qui impactent l'échantillon, pour en déduire comment les atomes\* vibrent.

FLUX DE NEUTRONS INCIDENTS

ÉCHANTILLON

MONOCHROMATEUR

ANALYSEUR

DÉTECTEUR

AVEC CES RÉSULTATS, ON EN DÉDUIT COMMENT VIBRENT LES ATOMES!

NOUS UTILISONS PLUSIEURS TECHNIQUES POUR EXPLORER LA MATIÈRE.

ON VA VOUS EN DÉCRIRE TROIS EN VOUS MONTRANT DES SCHEMAS DES SPECTROMÈTRES\* EN VUE DE DESSUS ET UN EXEMPLE DE SPECTRE ASSOCIÉ, CE QU'ON OBTIENT ET QUI NOUS PERMET DE LIRE LE RÉSULTAT.

Isabelle, physicienne

ICI ON APERÇOIT LE PIC ÉLASTIQUE : LES NEUTRONS QUI N'ONT PAS CHANGÉ D'ÉNERGIE

comptage

Énergie

DE PART ET D'AUTRE CE SONT DES PICS INÉLASTIQUES : LES NEUTRONS QUI ONT GAGNÉ OU PERDU DE L'ÉNERGIE

# DIFFRACTION

FLUX DE NEUTRONS GUIDÉS DEPUIS LE RÉACTEUR

GUIDE À NEUTRONS FROIDS

MONOCHROMATEUR

ÉCHANTILLON DANS SON ENVIRONNEMENT (FOUR, CRYSTAT...)

DÉTECTEUR

ON COMPTE LES NEUTRONS DIFFRACTÉS PAR L'ÉCHANTILLON EN FONCTION DE LEUR POSITION DANS LE DÉTECTEUR (L'ANGLE DE DIFFRACTION).

DANS UN CRISTAL\*, OÙ LES ATOMES\* SONT BIEN RANGÉS, ON VOIT DES PICS À CERTAINS ENDROITS DU DÉTECTEUR\*.

CE SONT LES « PICS DE BRAGG » ILS NOUS PERMETTENT DE SAVOIR COMMENT LES ATOMES SONT ORGANISÉS LOCALEMENT, ET COMMENT CETTE STRUCTURE SE REPRODUIT DANS L'ESPACE.

intensité

angle de diffraction

# DIFFUSION DE NEUTRONS AUX PETITS ANGLES

SÉLECTEUR DE VITESSE

ÉCHANTILLON

DÉTECTEUR

ON UTILISE DES NEUTRONS TRÈS LENTS. LE DÉTECTEUR\* EST TRÈS LOIN DE L'ÉCHANTILLON, JUSQU'À 20 MÈTRES. ON NE VOIT PLUS LES ATOMES MAIS DES OBJETS PLUS GROS : DES MOLÉCULES\* OU DES ENSEMBLES-DE-MOLÉCULES

CE DÉTECTEUR\* PERMET DE COLLECTER LES NEUTRONS DIFFUSÉS DANS DEUX DIMENSIONS, VERTICALE ET HORIZONTALE. DANS SON PLAN, LE SPECTRE D'UN CRISTAL\* LIQUIDE FORME UNE TÂCHE EN ANNEAU

ON VOUS EXPLIQUE  
POURQUOI...



# TOUT EST BON DANS LE NEUTRON

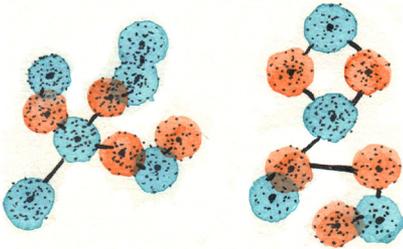
MÊME SI ELLE PRÊTE  
À SOUFRIR, CETTE FOR-  
MULE CIRCOLE BEAU-  
COUP ET EST TRÈS  
JUSTE!



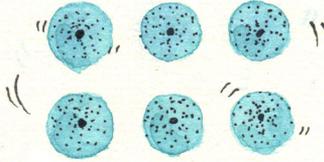
Nicolas, physicien

## LE NEUTRON PERMET DE DÉTERMINER:

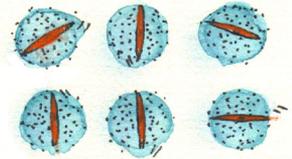
► L'organisation des atomes\*  
et la position de chacun.



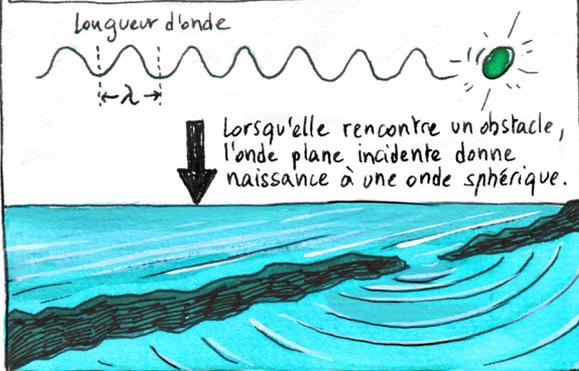
► Les mouvements individuels  
et collectifs des atomes\* et  
des molécules\*



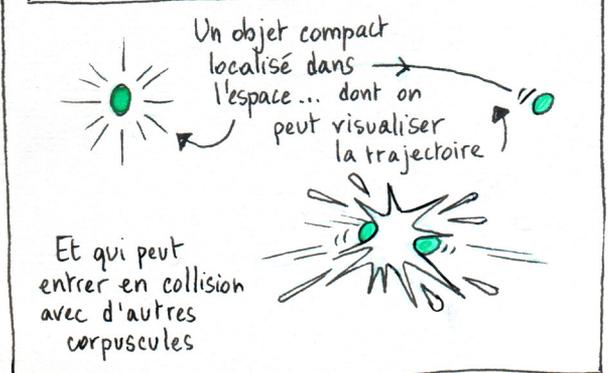
► L'orientation et la Force  
des petits aimants portés  
par les atomes\* dans les  
matériaux magnétiques.



Le neutron, à la fois une onde ...



... et une particule.



LE NEUTRON  
EST TRÈS PÉNÉTRANT,

IL EST NON  
DESTRUCTIF...



... ET SENSIBLE  
AU MAGNÉTISME!

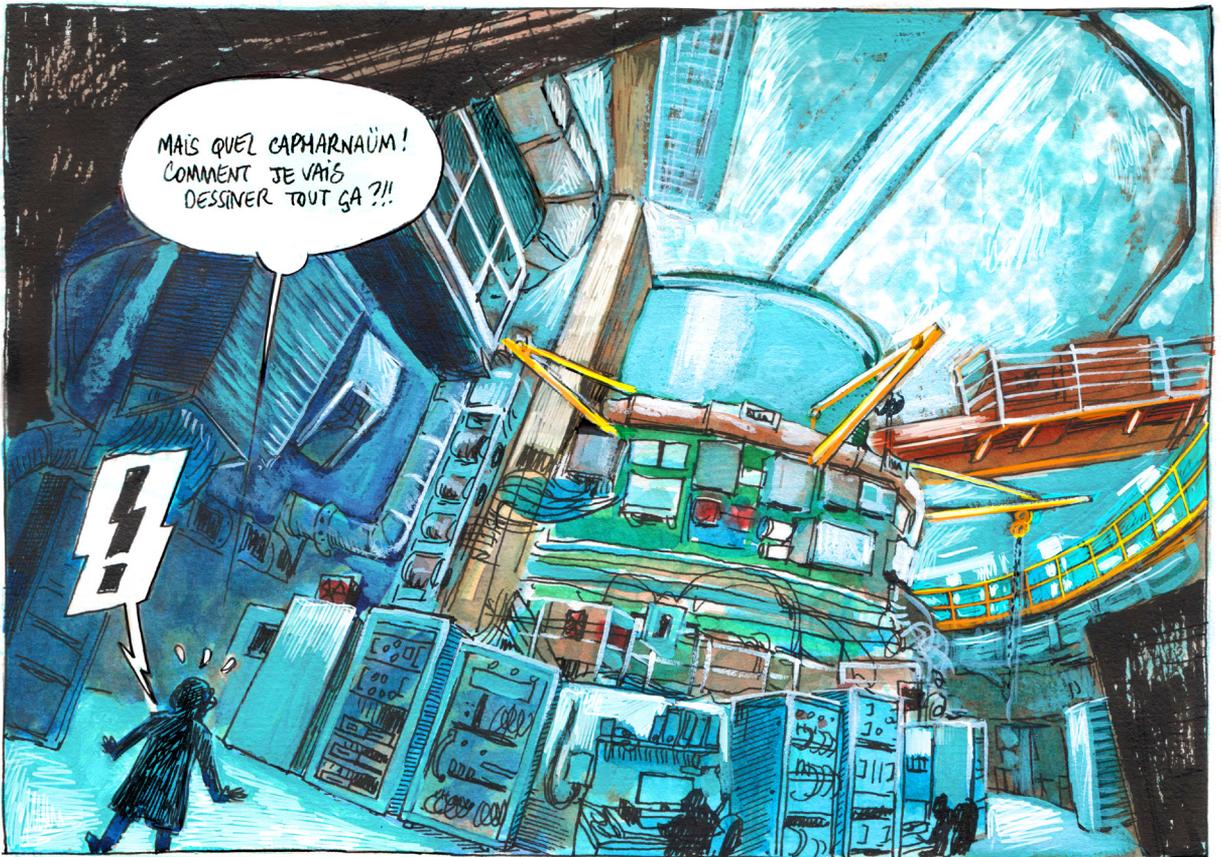
VRAIMENT  
TOUT À  
GARDER!



HEY VOUS ME SUIVEZ POUR  
VISITER LE HALL RÉACTEUR?







MAIS QUEL CAPHARNAÛM!  
COMMENT JE VAIS  
DESSINER TOUT ÇA ?!!



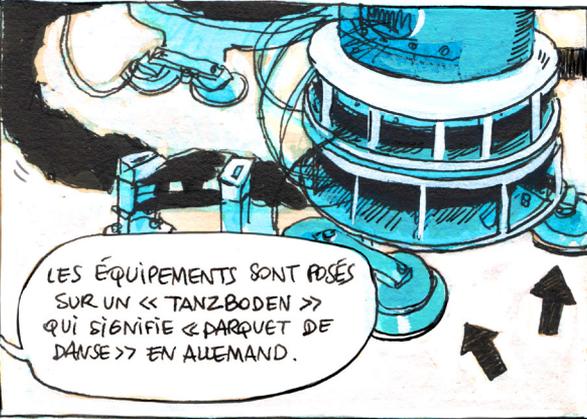
À L'INTÉRIEUR  
SE TROUVE LE  
MONOCHROMATEUR\*  
PROTÉGÉ PAR UN MUR  
D'UN MÈTRE  
D'ÉPAISSEUR ...



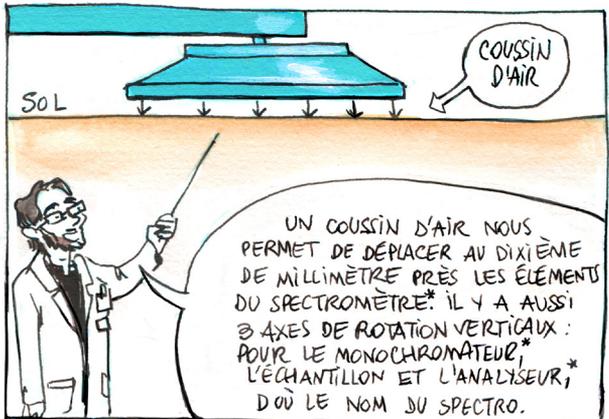
ICI ON PEUT CONTRÔLER  
L'ENVIRONNEMENT DE L'ÉCHANTILLON:  
SA TEMPÉRATURE PAR EXEMPLE ...

... OU SA PRESSION  
ÇA PEUT ÊTRE TRÈS  
CHAUD OU TRÈS  
FROID, DANS LE VIDE  
OU SOUS TRÈS  
FORTE PRESSION  
...

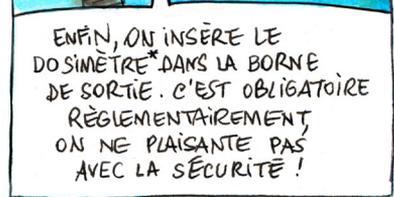
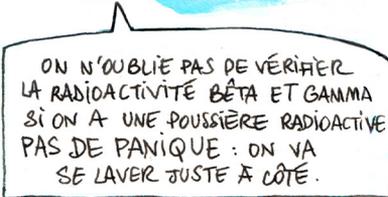
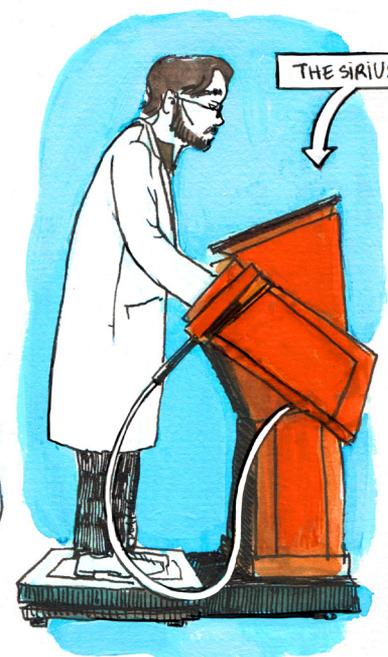
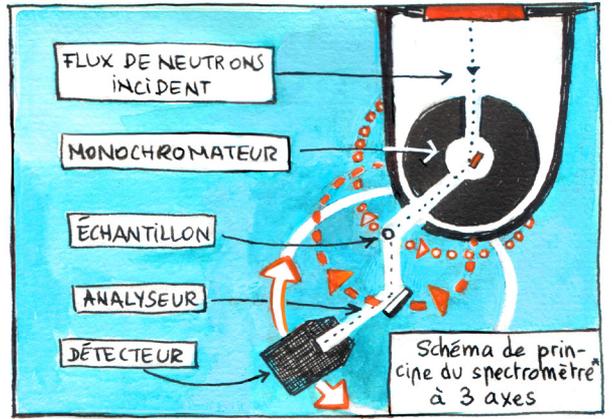
SUIVANT CE QU'ON VEUT  
MESURER. ET ENSUITE ON TROUVE  
L'ANALYSEUR ET PLUS LOIN LE DÉTECTEUR.

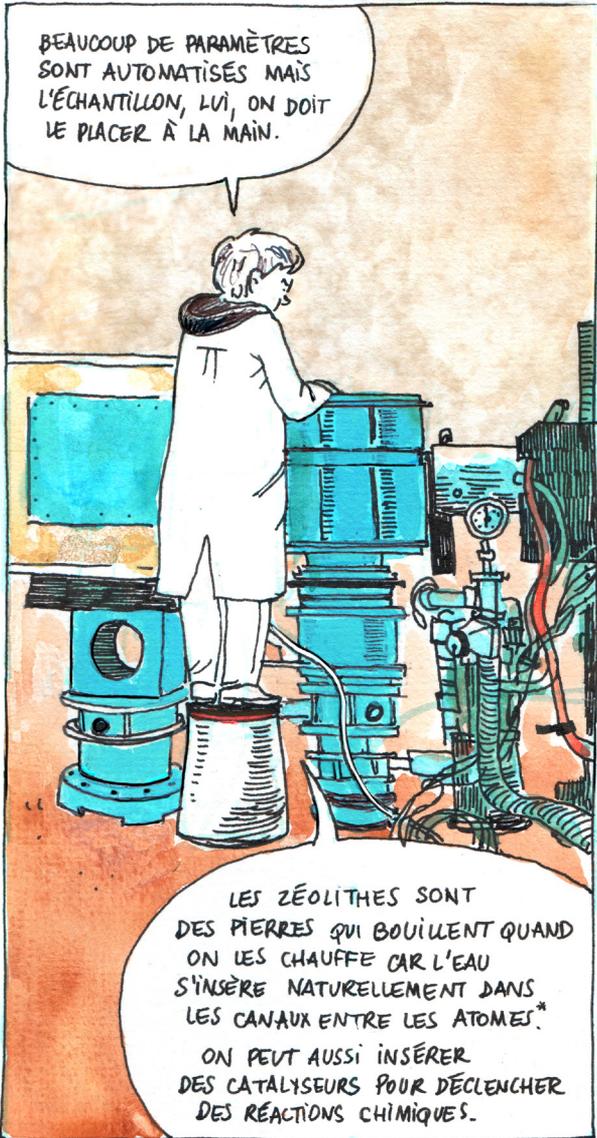
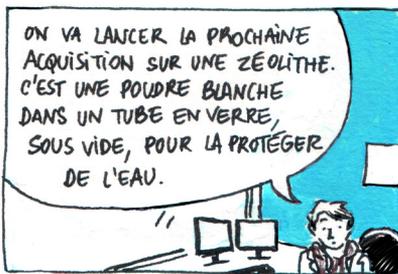


LES ÉQUIPEMENTS SONT POSÉS  
SUR UN « TANZBODEN »  
QUI SIGNIFIE « PARQUET DE  
DANSE » EN ALLEMAND.



UN COUSSIN D'AIR NOUS  
PERMET DE DÉPLACER AU DIXIÈME  
DE MILLIMÈTRE PRÈS LES ÉLÉMENTS  
DU SPECTROMÈTRE\*. IL Y A AUSSI  
3 AXES DE ROTATION VERTICAUX :  
POUR LE MONOCHROMATEUR\*,  
L'ÉCHANTILLON ET L'ANALYSEUR\*,  
D'OÙ LE NOM DU SPECTRO.







UN JOUR DE JUIN 2009, JE REVENAIS D'UNE CONFÉRENCE AU CANADA SUR LES AIMANTS FRUSTRÉS

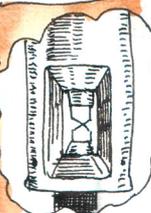
TIENS IGOR! J'AI ENTENDU PARLER D'UN AIMANT DONT LES SPINS\* N'ARRIVENT PAS À S'ORDONNER. ON APPELLE ÇA UN LIQUIDE DE SPIN\*.

ILS CONTINUENT À FLUCTUER JUSQU'À LA TEMPÉRATURE LA PLUS BASSE QU'ON AIT PU ATTEINDRE, À 0,05 DEGRÉ DU ZÉRO ABSOLU !

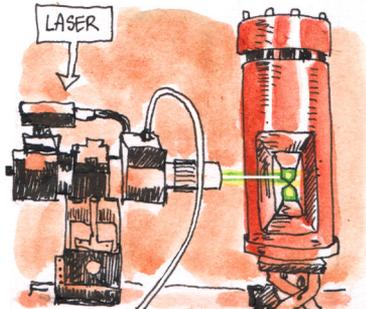
ON POURRAIT VOIR SI ON ARRIVE À L'ORDONNER SOUS TRÈS FORTE PRESSION, QU'EN PENSES-TU ?

Igor, physicien

TENTONS. JE VAIS EN METTRE QUELQUES MILLIGRAMMES DANS MA CELLULE DE PRESSION, ENTRE DEUX ENCLUMES EN SAPHIR.



JE VAIS AJOUTER UN PETIT RUBIS DANS LA CELLULE. ON MESURERA SA PRESSION AVEC UN LASER, ET ELLE NOUS DONNERA CELLE DE L'ÉCHANTILLON



Éclairé par un laser, le rubis devient fluorescent et on peut mesurer sa pression

Xavier, technicien



ON VA UTILISER LES FOCALISATEURS POUR CONCENTRER LE FAISCEAU DE NEUTRONS SUR LA CELLULE

ATTENTION JE VAIS MANIPULER LE PONT POUR INSTALLER LE CRYOSTAT



ENSUITE ON METTRA LA CELLULE DANS LE CRYOSTAT POUR BAISSER LA TEMPÉRATURE



JE TRANSFÈRE L'HÉLIUM LIQUIDE ET CE SERA PRÊT !

Philippe, technicien



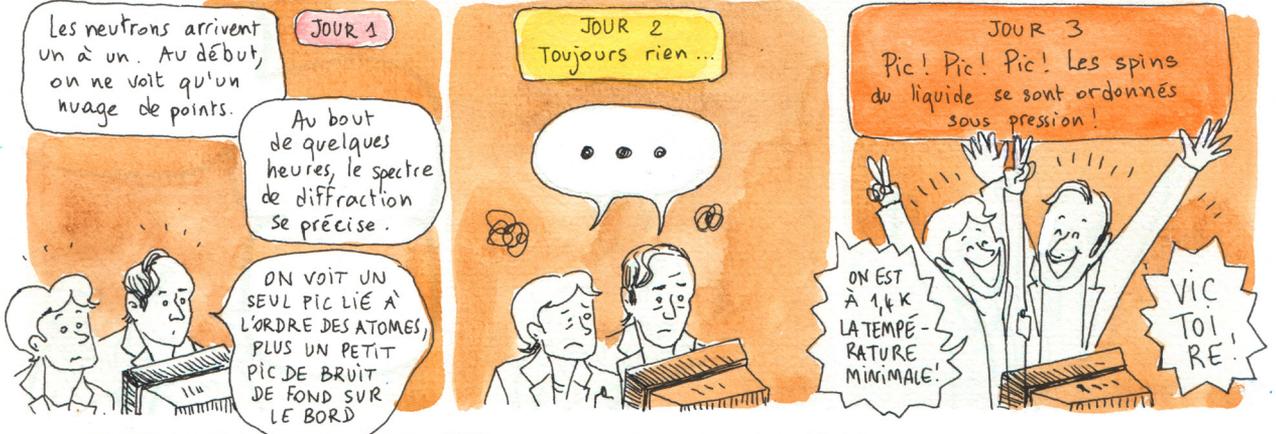
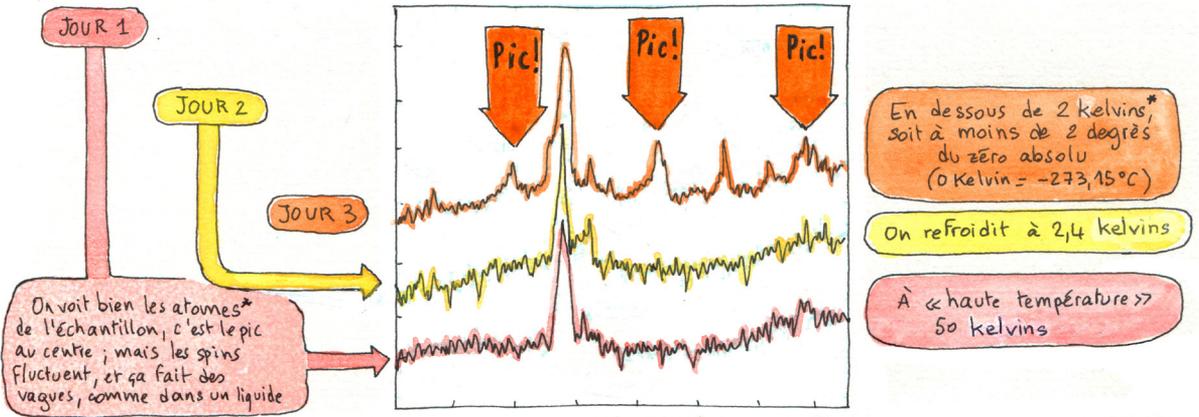
AVEC DES ENCLUMES EN DIAMANT, LES PRESSIONS DANS LA CELLULE PEUVENT ATTEINDRE DES DIZAINES DE GIGA PASCALS (DES CENTAINES DE MILLIERS DE FOIS LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE).

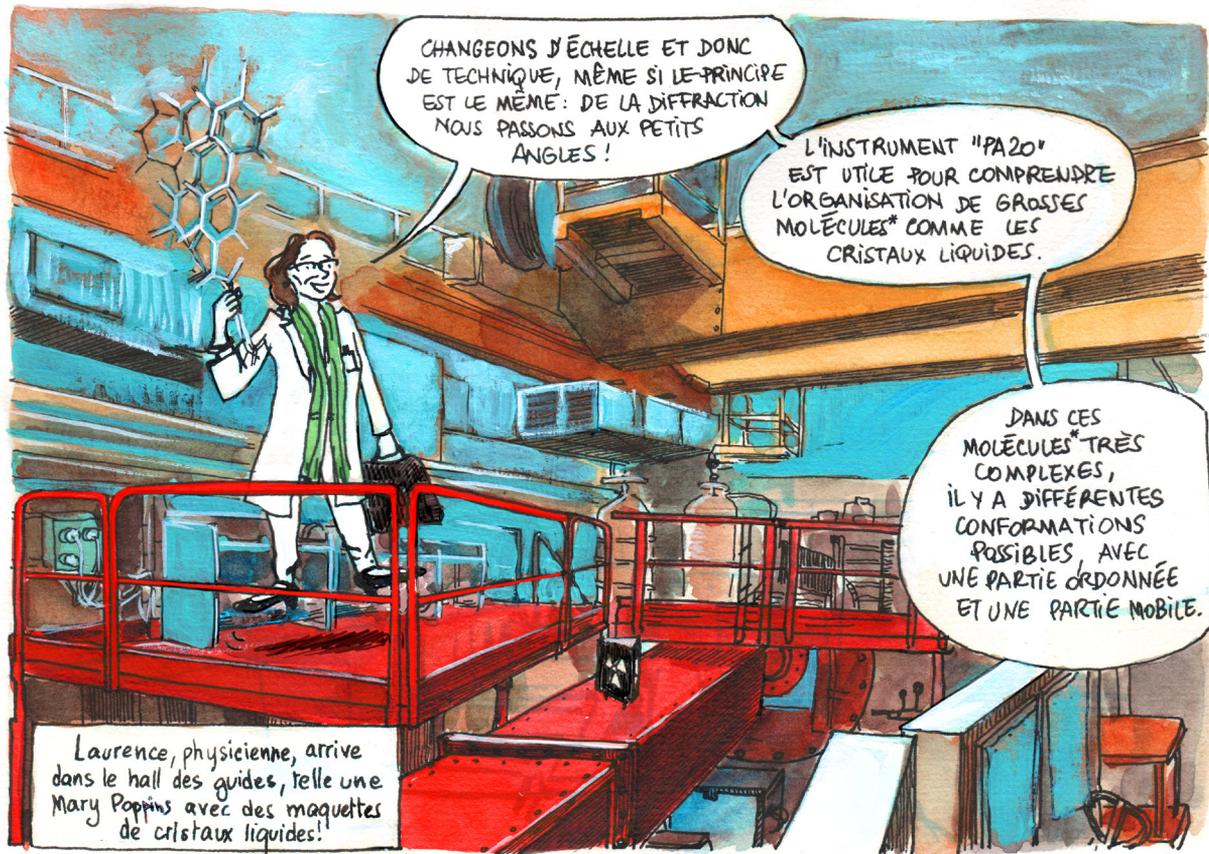
COMME L'ÉCHANTILLON ÉTAIT TOUT PETIT, IL A FALLU FOCALISER LES NEUTRONS POUR LES CONCENTRER SUR L'ESPACE ENTRE LES ENCLUMES



IGOR AVAIT INSTALLÉ DES PROTECTIONS EN CADMIUM\* POUR LIMITER LE BRUIT DE FOND







L'INSTRUMENT « PA20 » PORTE CE JOLI NOM POUR « PETITS ANGLES » AVEC UNE DISTANCE DE 20 MÈTRES ENTRE L'ÉCHANTILLON ET LE DÉTECTEUR\* À NEUTRONS. QUAND ON MESURE AUX PETITS ANGLES, ON REGARDE DES GROS OBJETS.

LES TÂCHES CORRESPONDENT À DES PICS D'INTENSITÉ. PLUS ELLES SONT INTENSES ET ÉTROITES, PLUS L'ORDRE RÉGNE DANS L'ÉCHANTILLON.

ON PEUT VISUALISER LES CRISTAUX LIQUIDES TRÈS BIEN ORDONNÉS

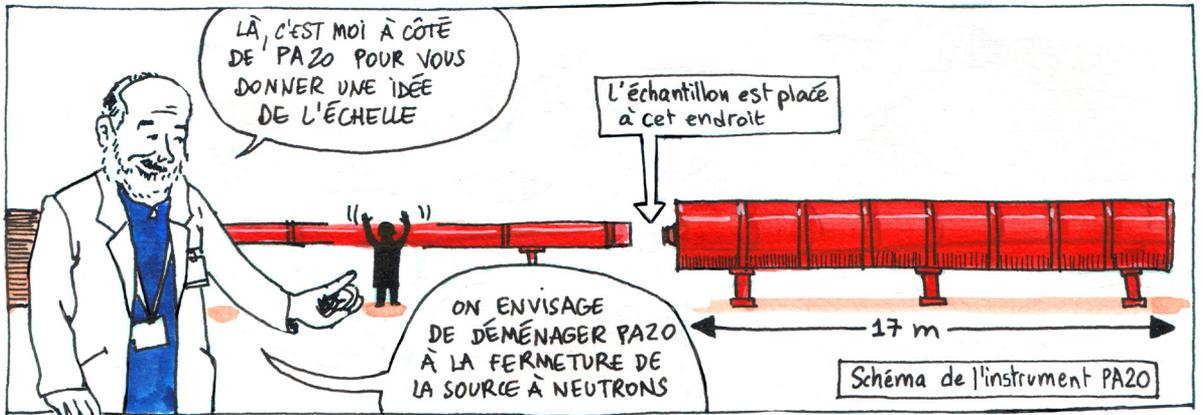
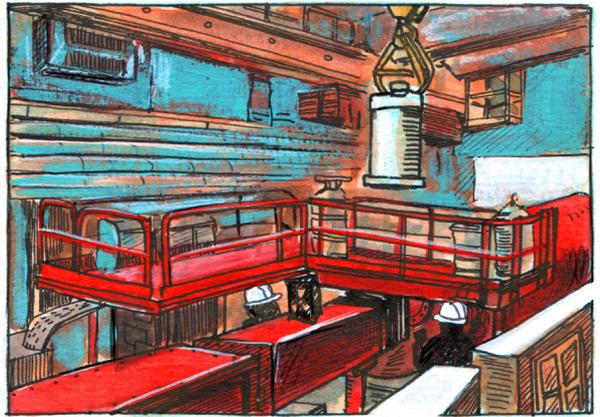
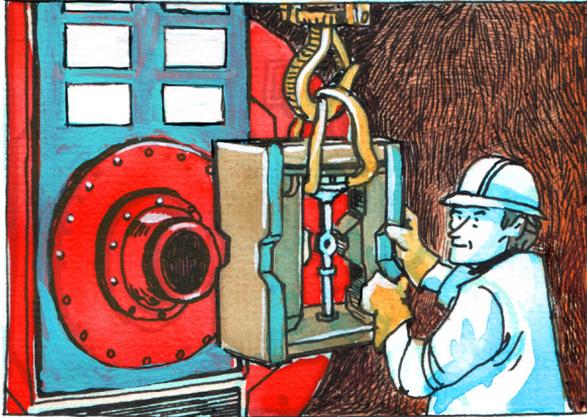
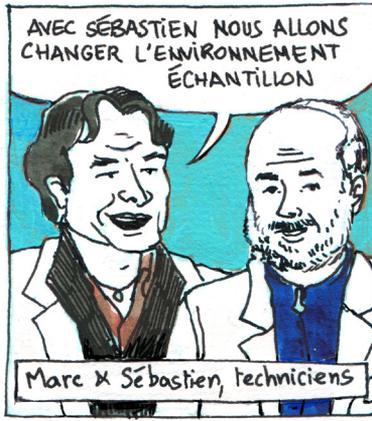
DANS L'ÉTAT LIQUIDE, LES CRISTAUX NE SONT PAS ORDONNÉS, CELA DONNE UN SPECTRE AVEC DES TÂCHES EN ANNEAU :

LES CRISTAUX LIQUIDES PEUVENT S'ORIENTER DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE, ÊTRE INFLUENCÉS PAR UN CHAMP ÉLECTRIQUE OU UN TRAITEMENT DE SURFACE..

LA DIFFUSION DE NEUTRONS AUX PETITS ANGLES PERMET AUSSI DE REGARDER DES MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES OÙ LES SPINS\* TOURNENT EN DÉCRIVANT LES HÉLICES DONT LE PAS EST TRÈS GRAND (DES MILLIERS D'ATOMES\*). CE SONT PEUT-ÊTRE LES FUTURES MÉMOIRES DE NOS ORDINATEURS

ALLONS VOIR LA MISE EN PLACE D'UNE NOUVELLE EXPÉRIENCE: C'EST UNE ÉQUIPE EUROPÉENNE QUI ÉTUDE CES COMPOSÉS. NICOLAS EST LEUR CONTACT ICI.

**MARC ON ARRIVE!**

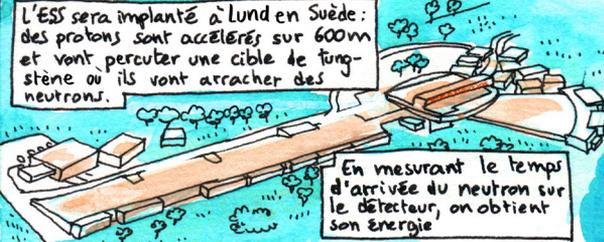


JE SUIS EN CHARGE DE MAGIC UN DES SPECTRO\* EN PARTIE FINANCÉ PAR LA FRANCE AU SEIN DE L'ESS. LES PREMIERS NEUTRONS SONT ATTENDUS POUR 2022



Xavier, ingénieur

L'ESS sera implanté à Lund en Suède: des protons sont accélérés sur 600m et vont percuter une cible de tungstène où ils vont arracher des neutrons.



En mesurant le temps d'arrivée du neutron sur le détecteur, on obtient son énergie

LUND

L'ESS émettra des neutrons pulsés - toutes les 70ms - ce qui permettra d'utiliser la plus grande partie des neutrons émis.



Pour rappel, avec un réacteur on utilise un monochromateur\* et donc on se prive de toutes les autres "couleurs" de neutrons.



C'EST UN ÉNORME TRAVAIL DE COLLABORATION INTERNATIONALE DE METTRE AU POINT LA SOURCE ET LES LIGNES



ESS 2019



MÊME SI LA FRANCE CONSTRUIT DES SPECTROS, ELLE N'Y AURA ACCÈS QUE SI ELLE EN PAYE LE FONCTIONNEMENT, ET LE TEMPS SERA TRÈS LIMITÉ



DE MON CÔTÉ, J'AI FAIT UN PETIT CALCUL ET EN GROS : LA FRANCE VA PASSER DE 5000 JOURS DE MANIP./AN (EN 2014) À 400 JOURS /AN AVEC SEULEMENT L'ESS.



Alain, physicien

POUR PALLIER CE MANQUE DE TEMPS, ON A POUR PROJET DE CONSTRUIRE UNE SOURCE NATIONALE SONATE, SUR LE MÊME PRINCIPE QUE L'ESS ...



... EN MOINS PUISSANTE ...



... POUR REDONNER DES NEUTRONS À LA FRANCE.

GARDER LA COMMUNAUTÉ ACTIVE,



Team neutrons

ET PRÉPARER LES CHERCHEURS À UTILISER L'ESS



PISCINE OLYMPIQUE

ENTRÉE Accès limité

COMME UN NAGEUR DE HAUT NIVEAU QUI AURAIT BESOIN D'UNE PISCINE MUNICIPALE AVANT D'UTILISER LA PISCINE OLYMPIQUE!



On peut prédire que après l'arrêt d'Orphée, on va perdre 40% du temps de neutrons français, et 90% quand le réacteur de Grenoble (ILL) s'arrêtera.



Projet SONATE

SONATE nous permettra de conserver une équipe nationale bien formée.



# Réacteurs et sources à spallation

À l'origine, les expériences de diffusion de neutrons se sont surtout faites dans de grandes installations basées sur des réacteurs nucléaires. Ces réacteurs fournissent un faisceau de neutrons continu à partir de la réaction en chaîne de fission des atomes d'uranium. Des neutrons de toutes énergies sont produits en continu, qu'il faut ensuite sélectionner pour les besoins de l'expérience. Un très faible pourcentage des neutrons produits est donc effectivement utilisé.

Depuis quelques années, la fermeture de ces installations a commencé. La fermeture d'Orphée à l'horizon 2019 succède à celle des réacteurs de Jülich et Geesthacht en Allemagne. Elle va coïncider avec l'arrêt du réacteur de Berlin, alors que l'avenir de l'Institut Laue Langevin de Grenoble, l'un des plus puissants réacteurs de recherche au monde mais aussi un des plus anciens, n'est pas assuré au-delà de 2028. À terme, la plupart des réacteurs d'Europe, à l'exception du réacteur de Munich, vont s'arrêter.

D'autres installations, plus chères, prennent maintenant le relais, les sources à spallation\*. Dans une telle source la production des neutrons n'est pas basée sur une réaction de fission nucléaire comme dans un réacteur, mais sur la réaction de spallation. Un accélérateur linéaire génère des pulses de protons qui vont bombarder une cible, lui arrachant des neutrons par collisions successives. Le faisceau de neutrons est donc pulsé pour travailler plus efficacement en utilisant la plus grande partie des neutrons émis. L'intervalle de temps

entre les pulses permet en effet de séparer les différentes énergies par la méthode de temps de vol\*. Cela implique des méthodes de travail et de traitement des données différentes, nécessitant de gros développements de la part de la communauté scientifique. Les gains conséquents promis par ces nouvelles sources ouvrent de nouvelles perspectives scientifiques.

Les sources à spallation sont pour l'instant peu nombreuses. Les plus importantes sont situées en Angleterre, aux États-Unis et au Japon. L'Europe se dote actuellement de la source la plus puissante du monde, l'ESS (*European Spallation Source*), en cours de construction à Lund en Suède. L'ESS utilise un faisceau de protons dont la vitesse est d'environ 88% de celle de la lumière, pour bombarder une cible en tungstène et produire des neutrons. Elle ne sera opérationnelle qu'en 2023 et au maximum de ses performances à l'horizon 2030.

Comment se préparer à une telle mutation ? Constituer un réseau de sources nationales semble une bonne stratégie. Ces sources basées sur un principe similaire à la spallation, mais de moindre flux et de coût plus modeste, n'ont pas l'ambition de concurrencer les sources à haut flux. Elles permettront cependant d'effectuer de nombreuses expériences, de former les futurs chercheurs et étudiants, et d'assurer une bonne préparation d'expériences plus ambitieuses à l'ESS.

La source SONATE, encore en gestation, se situe dans cette optique.



**Conception** : Aurélie Bordenave, dessinatrice et Isabelle Mirebeau, physicienne au LLB

**Participants** : Philippe Boutrouille, Marc Detrez, Xavier Fabrèges, Sébastien Gautrot, Igor Goncharenko, Xavier Guillou, Nicolas Martin, Alain Menelle, Isabelle Mirebeau, Paul Molina, Laurence Noirez, Florence Porcher, Yvan Sidis

**Merci** à Christiane Alba-Simionesco, Gregory Chaboussant, Eric Eliot, Béatrice Gillon, Alain Menelle, Sylvie Salamitou pour leurs encouragements et leur Ceil avisé.

Un projet rendu possible grâce au financement du Laboratoire Léon Brillouin (CEA-CNRS)

**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/>

Achevé d'imprimer et relié en octobre 2018 par DFS+ Imprimerie numérique, à Aix-en-Provence

# DIFFUSONS LES NEUTRONS

Orphée, réacteur nucléaire  
de recherche à Saclay

## QUE FAISONS-NOUS AU LABORATOIRE LÉON BRILLOUIN (LLB) ?

Nous étudions l'arrangement des atomes, leurs vibrations ou leur magnétisme dans les matériaux, en les bombardant par des neutrons.

### QU'EST-CE QU'UN NEUTRON ?

Une particule constituant le noyau des atomes, qui possède une masse, un moment magnétique (spin), mais pas de charge électrique: il est « neutre ».

### EST-CE UNE ONDE OU UNE PARTICULE ?

Les deux ! La longueur d'onde des neutrons utilisés dans les expériences est de l'ordre de grandeur des distances entre atomes (quelques  $10^8$  de milliardièmes de mètre).

### COMMENT PRODUISONS-NOUS LES NEUTRONS ?

Dans un réacteur nucléaire, par fission nucléaire, comme pour les centrales produisant de l'électricité.

### QU'EST-CE QUE LE PHÉNOMÈNE DE DIFFRACTION ?

C'est ce qui arrive au neutron qui rencontre un matériau et change de direction. La diffraction des neutrons nous renseigne sur l'organisation des atomes.

### ET LA DIFFUSION ?

Le neutron qui rencontre un matériau peut gagner ou perdre de l'énergie. C'est la diffusion inélastique. Elle nous renseigne sur les modes de vibration des atomes.

### QUELLE EST L'UNITÉ DE MESURE DE L'ÉNERGIE ? LE meV ? LE MeV ?

L'électron-volt (eV) est une unité de mesure d'énergie. Celle des neutrons émis dans le réacteur est de l'ordre du *million* d'électron-volt (ou MeV). Ces neutrons sont ensuite ralentis et leur énergie devient voisine de celle des vibrations atomiques, quelques *millièmes* d'électron-volts (meV).

### QUELLE EST LA VITESSE D'UN NEUTRON ?

Un neutron « thermique », dont l'énergie est de 25 meV, se déplace à la vitesse d'1.8 km/seconde. Le réacteur produit aussi des neutrons froids (plus lents) et chauds (plus rapides).

### EST-CE DANGEREUX ?

Les neutrons sont très pénétrants. Capturés par certains matériaux, ils peuvent les rendre radioactifs. Capturés par le corps humain, ils peuvent détruire les cellules ou provoquer des cancers. D'où la nécessité de s'en protéger. Mais on peut aussi utiliser les neutrons pour guérir des tumeurs cancéreuses.

### QUELLES SONT LES APPLICATIONS DANS LES USAGES DU QUOTIDIEN ?

Connaître la structure atomique des matériaux permet d'inventer de nouvelles fonctionnalités. Ceci concerne l'électronique, la biologie, la chimie, les polymères ou les cristaux liquides, le magnétisme. On peut aussi faire de l'imagerie de pièces pour l'industrie nucléaire ou aérospatiale, étudier la composition d'un vin ou comprendre la fusion du chocolat.

**Monochromateur** - Miroir réfléchissant une partie d'un faisceau de neutrons et permettant de sélectionner l'énergie (la vitesse, la longueur d'onde) du faisceau réfléchi.

**Pic de Bragg** - Quand un faisceau de neutrons monocinétique est diffracté par un cristal, son intensité est fortement augmentée dans certaines directions : ce sont les pics de Bragg, caractéristiques du cristal.

**Source à spallation** - Des particules (protons) percutent les atomes d'une cible à très haute vitesse et en arrachent ses constituants, produisant des neutrons.

**Spectromètre** - Instrument qui sélectionne un faisceau de neutrons, l'envoie sur l'échantillon à étudier et collecte les neutrons diffractés.

**Spin** - Propriété intrinsèque d'une particule, comme la masse ou la charge électrique, et caractérisant son magnétisme. C'est une grandeur quantique, mais dans la matière condensée, le spin des atomes magnétiques est souvent représenté classiquement 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 leur valeur, leur orientation, et leurs vibrations dans le matériau.

**Temps de vol** - On mesure le temps mis par le neutron diffusé par l'échantillon pour atteindre le détecteur situé à une distance connue. Ceci permet de connaître la vitesse, donc l'énergie des neutrons diffusés.

**Thermaliser** - Les neutrons sont thermalisés à la sortie du cœur du réacteur et perdent de l'énergie. L'énergie des neutrons thermiques est la température ambiante (300 K ou 25 degrés Celsius, soit environ 25 meV). Celle des neutrons froids, plus lents, est environ 2 meV ou 20 K. Celle des neutrons chauds, plus rapides, est environ 120 meV ou 1400 K.

**Analysateur** - Miroir identique au monochromateur (voir ce mot), permettant de déterminer l'énergie d'un neutron diffusé.

**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.

**Babyline** - Appareil permettant de détecter le rayonnement émis par un échantillon irradié

**Cadmium** - Métal absorbant les neutrons. Il permet de contrôler une réaction nucléaire, mais aussi de protéger les expériences du rayonnement ambiant.

**Cristal** - Solide dans lequel les atomes sont arrangés de façon périodique

**Détecteur** - Compteur détectant les neutrons. Il est placé après l'échantillon.

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

**Excitation** - Les atomes bougent, d'autant plus que leur température est élevée. Ceci caractérise les excitations.

**Kelvin** - Unité de mesure de la température notée K. Le zéro absolu (0 K) correspond à -273.15 degrés Celsius.

**Liquide de spin** - Matériau magnétique dans lequel les spins des atomes fluctuent, sans être complètement indépendants : les orientations des spins voisins se connaissent, comme les atomes dans un liquide, où les distances entre voisins sont conservées.

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

**Molécule** - Assemblage d'atomes électriquement neutres; les atomes y sont reliés entre eux par des liaisons chimiques.

