

Visite de l'INSP

Pour introduire l'INSP

Il s'agit d'un laboratoire public, situé dans le quartier latin parisien (tous les chemins menant à Rome), au sein de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC). Il dépend du CNRS et donc de l'UPMC. C'est un important laboratoire de recherche (d'où le nom d'institut), composé de 200 personnes. On y trouve des (enseignants-)chercheurs (environ 90), des ingénieurs, chargés d'administration (environ 50), mais aussi d'un nombre important nombre de doctorants bien encadrés (environ 35 ; il faut noter que l'on a été invité à y faire notre thèse !) et des visiteurs.

L'INSP a différentes missions :

- **faire avancer les connaissances**, via la recherche fondamentale (on veut comprendre les mécanismes) ;
- **partager les connaissances**, auprès de la communauté scientifique, grâce aux congrès et publications scientifiques dans des revues internationales (en anglais !) ; mais aussi auprès du public, via la Fête de la science notamment.

L'INSP, comme son nom l'indique, s'occupe d'un domaine de recherche particulier : les **nanosciences**, à ne pas confondre avec les nanotechnologies. Le but est d'étudier et de comprendre les changements à l'échelle à atomique, pourquoi certains phénomènes se produisent quand on réduit les échelles. Cette recherche a diverses applications, dont, bien évidemment, les nanotechnologies, mais aussi les telecoms ou encore en science de la vie et de l'environnement.

Comme on l'a vu dans notre projet, pour pouvoir analyser un matériau, il faut utiliser une onde de longueur d'onde adaptée, c'est-à-dire de même ordre de grandeur. Mais si l'on prend des objets plus petits que la longueur d'onde, que se passe-t-il ? On observe de nouveaux phénomènes. Par exemple, certaines petites billes (des nanomatériaux) restituent par fluorescence les UV auxquelles elles sont soumises.

Il y a certains termes techniques :

- « top-down » : on part de quelque chose de « gros » pour aller au « petit ». Un « top-down » se fait dans une **salle blanche**, c'est-à-dire une salle propre, avec, pour donner un chiffre, moins de 1000 poussières par pied cube.
- « bottom-up » : on fabrique un objet ou un ensemble d'objets ayant tous les mêmes tailles et caractéristiques. Cette fois-ci, on a besoin **d'ultra-vide**. On « jette » des molécules sur les matériaux. On fabrique ainsi des matériaux plan par plan.

Pour voir la matière, nous avons à notre disposition différents intermédiaires, du plus simple (?) à quelque peu plus complexe :

Œil → loupe → microscope électronique (à balayage -pour voir la surface-, ou à transmission) → microscope à champ proche, à effet tunnel (on analyse le courant entre une pointe et un matériau) ou à force atomique (qui permet de voir et manipuler les atomes).

On dispose aussi d'autres outils, tels que les accélérateurs d'ions ou l'utilisation de l'optique ultra-rapide (sources laser femto seconde (10^{-15} s !)).

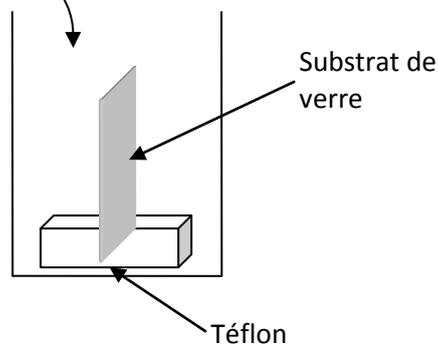
Le labo « opale »

On y analyse des **cristaux photoniques**, c'est-à-dire qu'ils ont une périodicité à 400-500 nm. Le but est de contrôler les propriétés d'émission des nanomatériaux en les mettant dans des cristaux photoniques. On s'intéresse à la direction de l'émission, mais aussi leur temps de vie.

Les **opales** sont des cristaux photoniques. On peut les comparer à des balles de ping-pong empilées, une balle s'intégrant dans le creux formé par les balles qui sont en dessous. C'est un **système auto-organisé**.

La synthèse des opales nécessite des billes de silice, de l'ordre de 200 à 400 nm de rayon, que les chercheurs de l'INSP fabriquent (par l'hydrolyse d'un précurseur) eux-mêmes (par souci de qualité), qui vont s'organiser afin de compenser le manque d'électrons. Il y a deux méthodes de synthèse : soit on place les billes de silice dans un solvant (de l'éthanol), que l'on laisse s'évaporer ; soit on fait la synthèse par sédimentation, procédé qui demande du temps (3 mois environ).

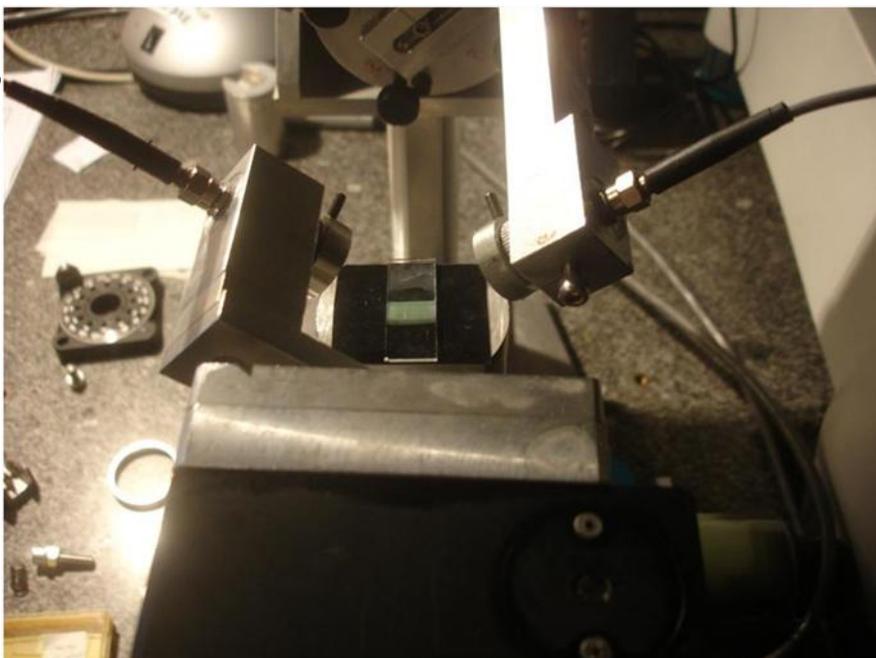
Billes + éthanol



On analyse ensuite l'opale synthétisée grâce à un AFM (microscope à force atomique). On a alors accès à la **structure cristallographique** du matériau, très organisée. La surface de l'opale est en outre uniforme, et si on change la direction de l'éclairage, la lumière renvoyée change de couleur, ceci étant dû au phénomène de diffraction.

On peut analyser ce que l'on appelle des **monodomains** (50 μ m de côté, bien organisés).

Spectromètre
fibré



Lampe
halogène

Dispositif permettant de mesurer le spectre de la lumière renvoyée

N.B. L'angle de l'émetteur par rapport à la normale est le même que l'angle du récepteur par rapport à la normale.

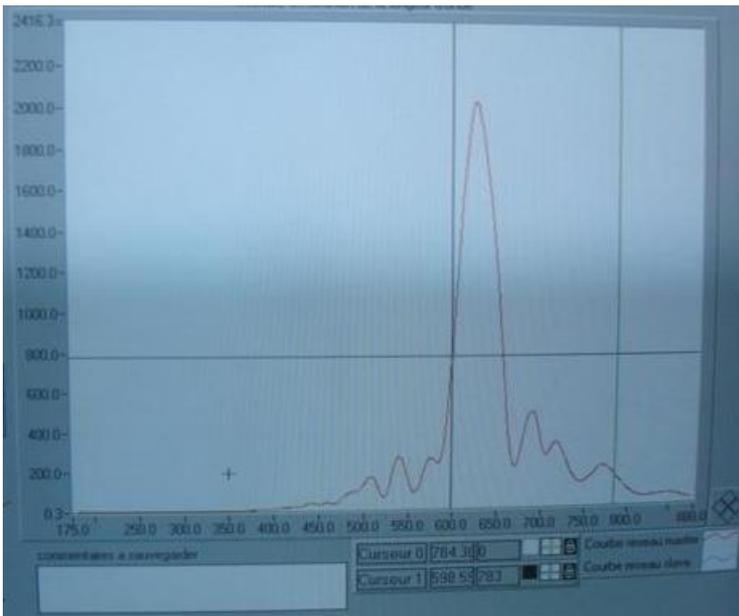
On peut modifier ces différents angles, et ainsi « déduire » de cette expérience la loi de Bragg.

On observe en effet des pics, dont l'abscisse (la longueur d'onde de l'onde renvoyée) est caractéristique d'un angle précis ; pics qui sont la **manifestation optique de la structure du matériau**.

Pour une opale donnée, l'angle 20° correspond un pic d'abscisse 600 nm ; 30° à 570 nm.

Pour des angles plus grands ($45-50^\circ$), si l'opale est suffisamment ordonnée, on constate même un **deuxième pic**, qui va se déplacer en fonction de la longueur d'onde.

Finalement, on voit le pic de Bragg et un deuxième pic de réflexion. On peut donc avoir diffraction sur deux autres plans : $(-1,1,1)$ et $(2,2,0)$.



On constate avant le pic de Bragg (dédoublé -double réflexion- ou non) la présence de franges (les petites oscillations avant le pic), qui proviennent des **interférences** (constructives) de la lumière réfléchi par les faces supérieure et inférieure de l'opale. L'écartement entre les franges donne par ailleurs la taille, l'épaisseur de l'opale.

Le deuxième pic dépend de l'angle que l'échantillon fait par rapport à la normale. Il apparaît tous les 60° .

Tout cela constitue une **méthode d'analyse optique des qualités cristallographiques** de l'opale.

On peut aussi diminuer l'émission en insérant à l'intérieur de chaque bille de silice un nano-cristal. On obtient alors des **nano-sources pour analyse quantique**, qui envoie un photon à la fois ;

Le labo « optique, acoustique »

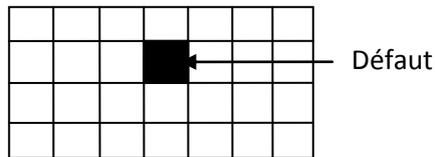
Nous avons ensuite visité un deuxième laboratoire, plus orienté acoustique et optique. Attention au laser, ça brûle les yeux !

On analyse des objets qui présentent une même périodicité. L'onde va sentir cette périodicité et la longueur d'onde va être modifiée.

On a besoin d'une onde élastique. Pour cela, on commence par générer des vibrations, que l'on engendre grâce à des lasers.

95% de la lumière est réfléchi ; 5% est absorbée. Cela se traduit par une augmentation de température. La dilatation va se relaxer, s'évacuer dans le système.

Comment l'onde élastique produit est-elle capable d'interagir avec des cristaux photoniques ? Prenons le cas d'un réseau parfaitement organisé, auquel on a inséré un défaut.



Les trous sont extrêmement réguliers, espacés d'une distance parfaitement définie.

Comment changer la fréquence de l'onde élastique ? L'impulsion du laser est brève (30 ps). Pour imprimer une fréquence, on projette l'image d'un réseau (1D) sur la surface de l'échantillon. Chaque trait va absorber, puis émettre des ondes élastiques : alternance zone dilatée, non dilatée, dilatée. On obtient ainsi une certaine longueur d'onde.

Une onde élastique est une vague. Un interféromètre permet de diviser une onde lumineuse en deux, et de les recombinaer. En fonction de la distance parcourue, les deux nouvelles ondes seront en plus ou moins en phase ou en opposition de phase. On observera donc des **interférences constructives ou destructives**, et des intensités lumineuses différentes.

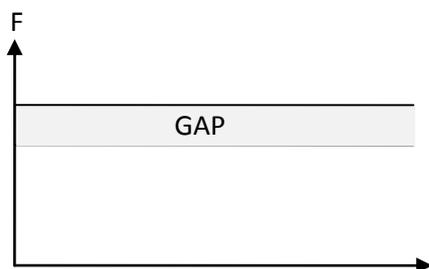
Le minimum détectable par cette méthode est de **10 pm**, mais les chercheurs espèrent gagner un facteur 2. On se focalise sur des tâches de l'ordre du μm , et on va sonder l'échantillon avec défaut.

On envoie donc l'onde élastique sur l'échantillon. On fait des mesures point par point (à chacun d'entre eux, l'onde arrive et part), et on obtient une figure en 3D, dont les axes sont le temps, l'espace et l'amplitude.

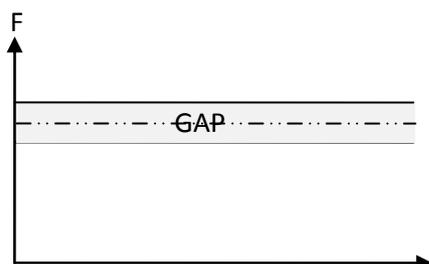
Néanmoins, certaines fréquences ne peuvent pas passer dans le système. On parle alors de **gap** : borne de fréquences qui ne peuvent pas passer dans le système.

Ex : Pour un échantillon donné :
 17MHz : l'onde arrive sur le système, puis revient
 12MHz : l'onde passe, ne revient pas.

Si on fait des mesures avec des fréquences qui sont dans le gap, l'onde pénètre et s'amortit de manière exponentielle. Une partie peut quand-même atteindre le cœur de l'échantillon.



Si le système est parfait. Pas de solution de propagation.



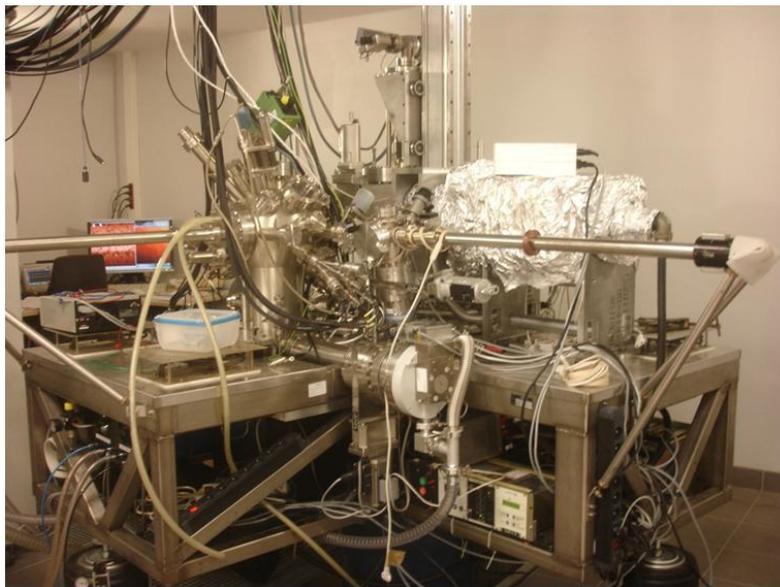
Avec des défauts, il y a des solutions de propagation dans le gap (trait pointillé). Mais la figure 3D est totalement différente : l'onde interfère avec elle-même.

L'onde va alors devenir stationnaire (ce qui permet des interactions entre la lumière et le son).
On espère que, si on met des traces de quelque chose de micrométrique, il va perturber les interactions.

Solution pour un avenir radieux :
Faire un laser avec du silicium : retraite paisible à Hawaï assurée !

Le labo « microscope à effet tunnel »

Direction le sous-sol de l'INSP pour voir un microscope à effet tunnel (MET). Premières réactions : c'est impressionnant et ça prend de la place ! Le sol et le plafond ont même été coupés !
Un tel appareil fonctionne sous **ultra vide**, à savoir 10^{-11} millibar. Un des éléments de ce microscope (le cryostat) est à une température de 0,3K.



Notons qu'une bonne semaine est nécessaire au réchauffement de ce dispositif, pour passer de 300mK à 300K.

Le but est de regarder les **mécanismes microscopiques** qui donnent certaines propriétés aux matériaux. Prenons l'exemple des supraconducteurs. Il existe des supraconducteurs conventionnels, qui, à une certaine température (4K) repoussent et n'ont plus de résistance électrique ; mais aussi des supraconducteurs de type nouveaux, qui ont les mêmes propriétés, mais à une température de 100K. Pourquoi ?

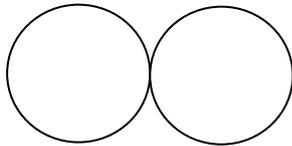
On veut faire des mesures extrêmement précises et analyser à l'échelle adaptée les **propriétés de l'atome**, dont la taille caractéristique est l'Angström ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$). On ne peut donc pas utiliser l'optique ; il n'y en a donc pas dans un MET.

Principe :

Une pointe métallique se rapproche au nanomètre près de la surface à étudier. Entre la pointe et l'échantillon, il y a du vide. A cette distance, on observe des **effets de la mécanique quantique** : même si les matériaux sont isolants, on peut faire passer un électron entre la pointe et la surface. L'effet tunnel n'existe que dans la mécanique quantique : même s'il n'a pas assez d'énergie cinétique, l'électron peut traverser le vide.

Le courant est **proportionnel à e^{-d}** , où d est la distance entre la pointe et la surface. Lorsque l'on déplace la pointe, on peut enregistrer des différences de tension.

Beaucoup de tension
↓
Peu de tension
↓

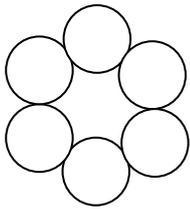


$$U = k \cdot e^{-d}$$

Cependant, on veut garder une tension constante : on fait donc aussi bouger la pointe en hauteur.

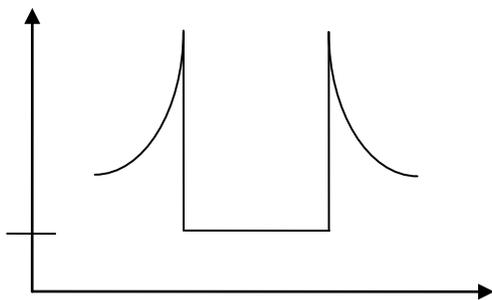
On peut ainsi **cartographier l'échantillon** et ses **propriétés électroniques**.

Le MET permet de voir **l'ordre atomique** à la surface et les propriétés électroniques à 10^{-10} .



Si on prend un motif circulaire (avec un trou au milieu) qui se répète (un réseau hexagonal par exemple -symétrie du cristal de silicium-), il peut y avoir un certain nombre de défauts, comme des dopants (autres types d'atomes) ou des absorba.

Sur un support, on veut faire croître des nanostructures pour analyser leurs propriétés supraconductrices. Pour cela, on réalise une **spectroscopie tunnel**.



Ce spectre d'excitation d'un matériau donné est la signature que tous les électrons du supraconducteur sont dans le même état quantique.

Le labo « propriétés optiques », ou comment rester 6h dans le noir, à la seule lumière d'un laser !

Le dernier labo que nous avons visité étudie les **propriétés optiques des nanomatériaux**. Ces nanomatériaux sont des **boîtes quantiques** : leurs propriétés électroniques sont quantiques. Si on prend un atome, l'énergie des électrons est quantifiée, d'où le nom « quantique ».

On crée un nanomatériau, où les états électroniques sont discrets. Si on les excite, ils émettent de la lumière quantifiée.

Le but est **d'obtenir un objet source de photon unique**. Il est important de noter qu'une lampe classique émet 10^{23} photons par seconde et que l'œil doit en recevoir 10 millions minimum pour voir, pour se rendre compte de l'ampleur de la recherche.

Pour étudier les propriétés optiques, il faut exciter les mono-objets avec des lasers.

On a pu le voir le montage ; il est assez impressionnant, avec tout un système d'optique (lentilles, miroir), posé sur des tables sur lesquelles il ne faut absolument pas s'appuyer, sous peine de modifier l'alignement du système, qui est primordial. Et finalement un faisceau laser qui a une puissance de 1 à 8W !

L'impulsion lumineuse du laser fournit de **l'énergie au nanomatériau**, qui va émettre des photons. On veut les détecter. Pour cela, on utilise soit la spectroscopie, soit un compteur de photons.

Ce dernier permet de savoir si l'on a affaire à une source de photon unique. Il enregistre en effet un signal START (un photon) et un signal STOP (un autre photon). Si le nanomatériau est bien une source de photon unique, il n'y a pas de coïncidence à $t=0$, ce que l'on nomme coïncidence à délai nul, c'est-à-dire que les signaux START et STOP ne sont pas instantanés. C'est une mise en évidence du **caractère corpusculaire de la lumière**.

[On peut d'autre part coder des informations sur un photon : c'est ce que l'on appelle des informations quantiques.

Cf. Ordinateur quantique : superposition de bits, de 0 et de 1.]

On peut se déplacer au dessus de l'échantillon : platine de Piezzo. On obtient des pics, chacun est la signature d'une boîte quantique, laquelle capte et renvoie des électrons.

<http://www.insp.jussieu.fr/>