Les isolants topologiques en 2D

Une chercheuse raconte son expérience de doctorante.




BY NC SA

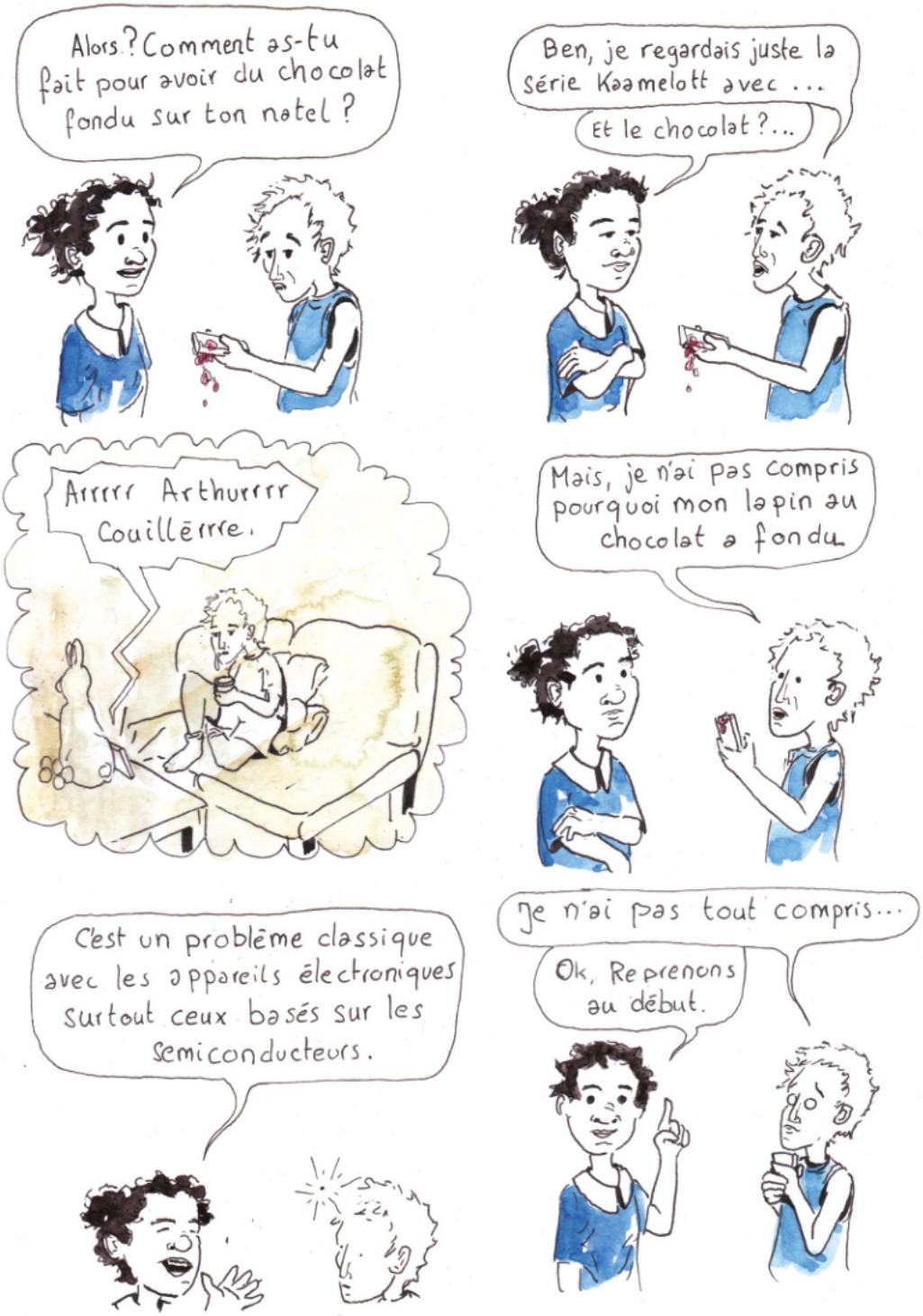
Genève, Juillet 2020

Ces quelques pages ont pour but de présenter un nouveau domaine de la physique des matériaux en termes simples, dans lequel j'ai effectué mon doctorat. Cette bande dessinée me permet ainsi de présenter une partie du travail accompli ces 4 dernières années durant ma thèse.

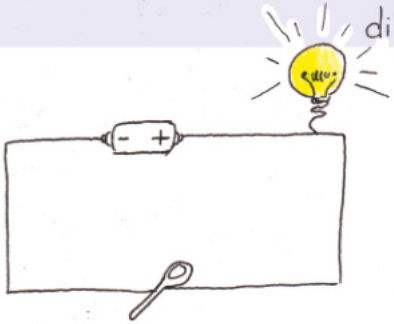
Thèse n°5474

Irène Cucchi

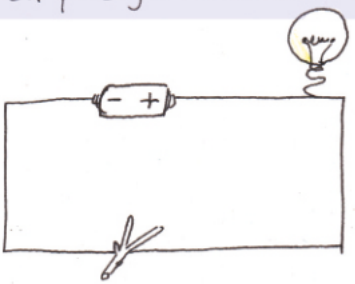
Dessin de Flavie Ndam


Alors ? Comment as-tu fait pour avoir du chocolat fondu sur ton natel ?
Ben, je regardais juste la série Kaamelott avec ...
Et le chocolat ?...
Arrrrr Arthurrrr Couillèrrre.
Mais, je n'ai pas compris pourquoi mon lapin au chocolat a fondu
C'est un problème classique avec les appareils électroniques surtout ceux basés sur les semiconducteurs.
Je n'ai pas tout compris...
Ok, Reprenons au début.

On sait depuis le XIXe s. que les matériaux réagissent très différemment au passage du courant.



cueillière en métal = conducteur

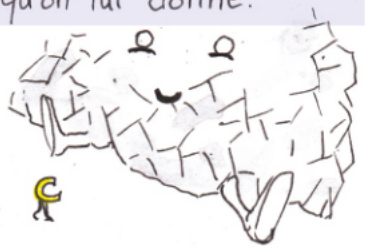


bout de bois = isolant

Le matériau de base pour les composés électroniques n'est ni un conducteur ni un isolant. Il se situe quelque part entre les deux. C'est un semiconducteur appelé silicium.



L'avantage est qu'il peut laisser passer le courant ou ne pas le laisser passer, en fonction de l'environnement qu'on lui donne.



Pour exemple, c'est sur ce principe que se fonde le transistor, et ton natel comprend beaucoup de transistors

Le problème c'est que lorsque le courant passe, beaucoup d'énergie est perdue sous forme de chaleur.

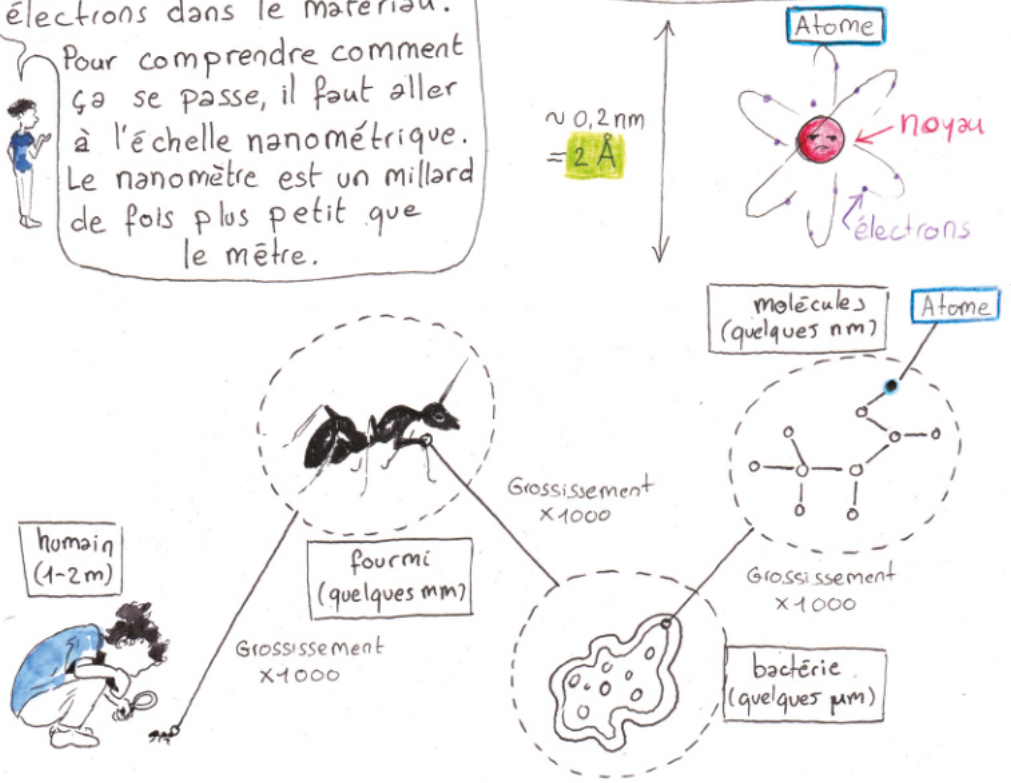




Et donc mon natel chauffe quand je regarde ma série et mon chocolat fond.

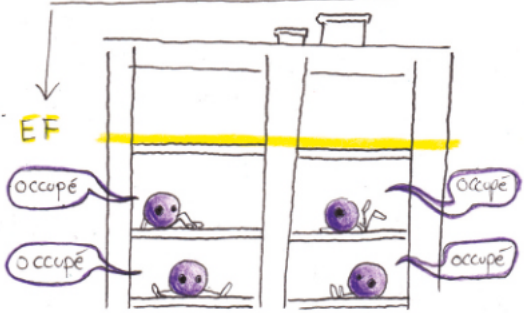
On s'est rendu compte que le passage du courant était relié au comportement des électrons dans le matériau. Pour comprendre comment ça se passe, il faut aller à l'échelle nanométrique. Le nanomètre est un millard de fois plus petit que le mètre.

À une si petite échelle, on doit utiliser les lois de la mécanique quantique.

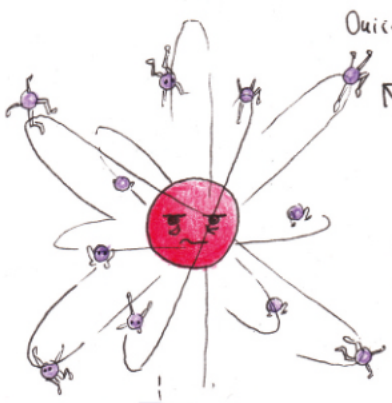


Dans un atome, les électrons sont organisés en niveaux autour du noyau. Chaque niveau a une énergie bien particulière. Plus l'énergie du niveau est basse, plus les électrons de ce niveau sont proches du noyau. Comme dans un immeuble, il n'y a pas d'électron entre les étages.

L'énergie à partir de laquelle il n'y a plus d'électrons, s'appelle "énergie de Fermi"

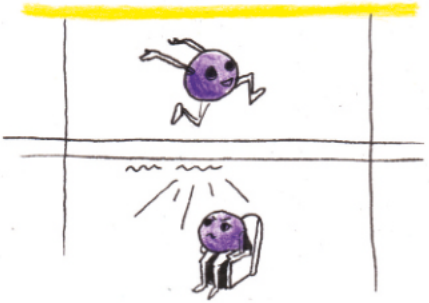


A priori, les électrons proches du noyau restent localisés autour de lui parce qu'il faudrait qu'on leur donne trop d'énergie pour qu'ils s'éloignent plus.



Un peu plus loin du noyau, les électrons près du niveau de Fermi ont des chances d'intéragir avec ce qui les entoure.

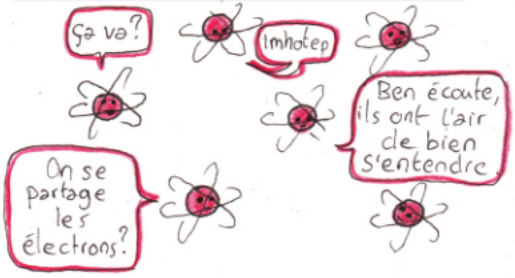
C'est pour cela qu'on s'intéresse en général à ce qui se passe près du niveau de Fermi.



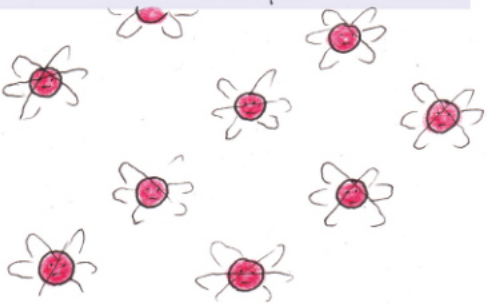
La physique de la matière condensée applique la mécanique quantique au cas où les atomes sont connectés entre eux.



Dans un métal, les atomes mettent leurs électrons en commun, ce qui facilite leurs déplacements

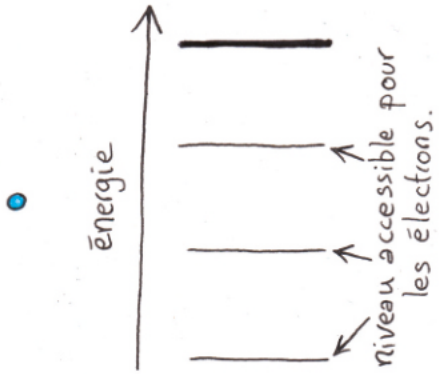


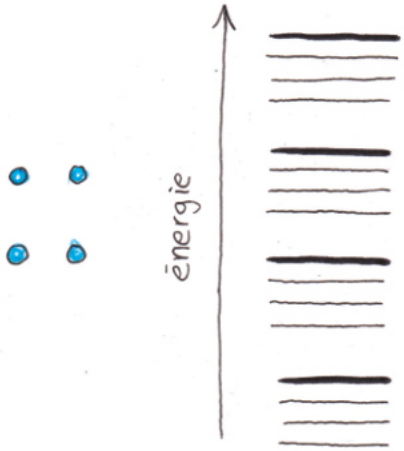
Dans un isolant, les électrons ont tendance à rester localisés autour de leur atome et le matériau ne conduit pas le courant.



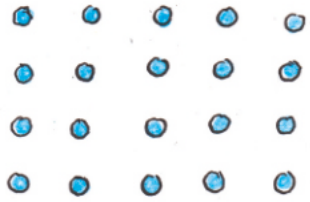
Voici ce qui se passe pour les électrons lorsque les atomes se rapprochent :

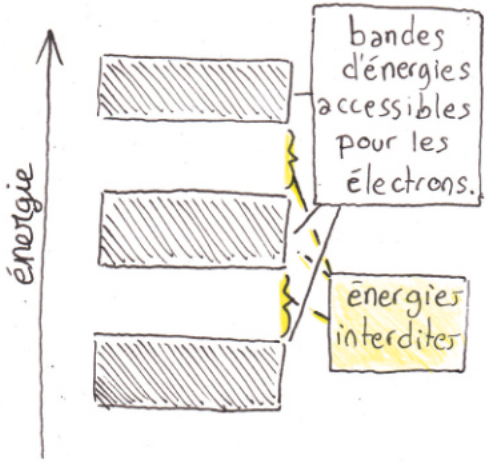
● = atome



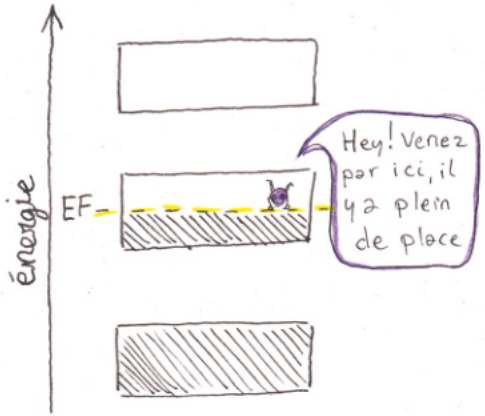


Quand on augmente le nombre d'atomes, les niveaux d'énergies se multiplient. Quand il y a beaucoup d'atomes proches les uns des autres, les niveaux forment des bandes d'énergie.

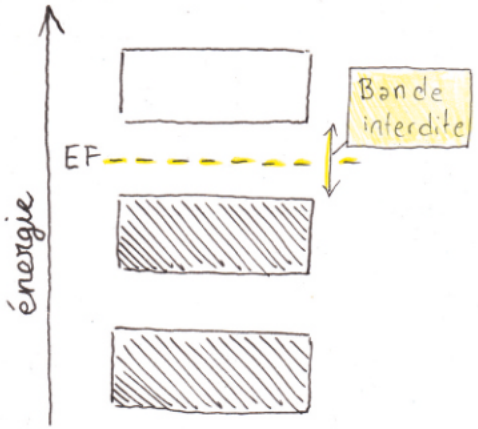




Quand le niveau de Fermi EF passe dans une bande d'énergie accessible pour les électrons, le matériau est un métal et conduit le courant.



Si le niveau de Fermi passe entre deux bandes d'énergies accessibles, le matériau est isolant.



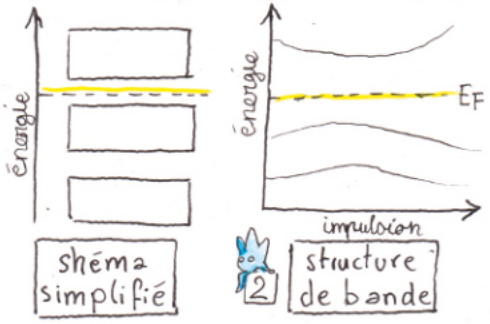
L'énergie que l'électron prendra effectivement dépendra de son impulsion.



impulsion classique

masse × vitesse

On appelle la relation entre l'énergie de l'électron et son impulsion sa structure de bande.

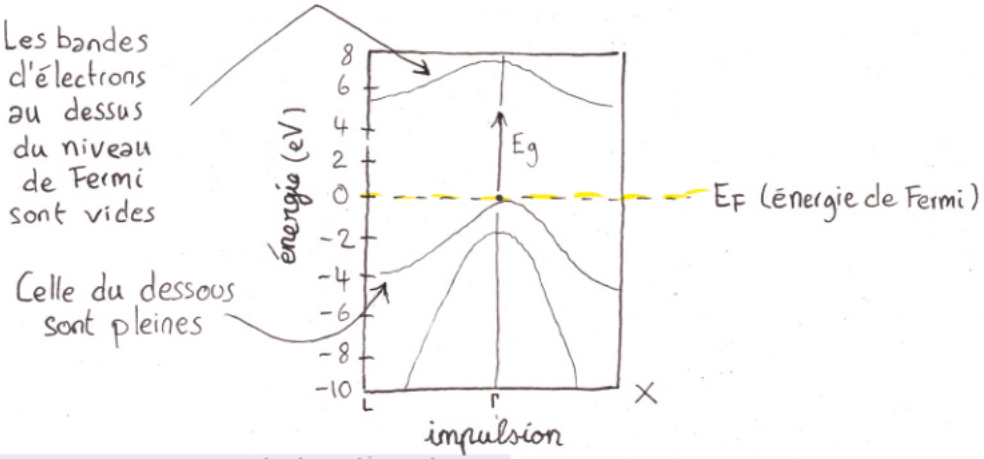


Connaître la structure de bande d'un matériau nous permet de connaître ses propriétés physiques. La structure de bande est en quelque sorte l'ADN du matériau.



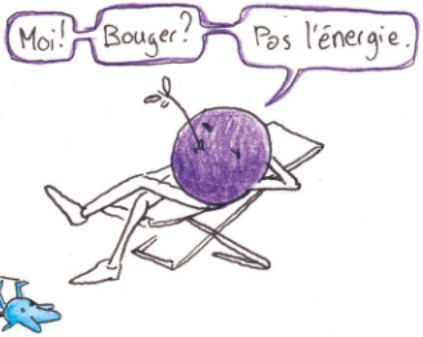
Prenons par exemple la structure de bande du diamant.



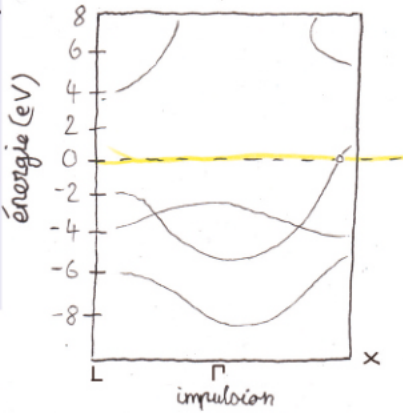


Chez le diamant, les bandes occupées et les bandes vides sont séparées par une énergie Eg. C'est le gap, l'énergie à payer pour que l'électron passe au dessus du niveau de Fermi et aille occuper une bande vide. Chez le diamant, on a Eg ∼ 5eV. C'est très grand, et c'est pour cette raison que le diamant est un matériau très isolant.

Dans ces matériaux, les électrons restent tranquillement autour de leur noyau.



L'or est un métal. On voit dans sa structure de bande que les bandes d'énergies coupent le niveau de Fermi.



Structure de bande de l'or

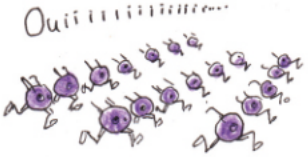
Comme le niveau de Fermi coupe une bande de l'or, il ne faut apporter que très peu d'énergie pour que les électrons se mettent en mouvement.



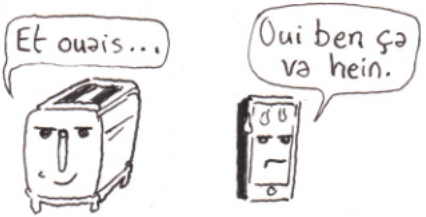
À ce moment-là l'électron sait qu'il n'a aucune excuse et doit se préparer pour le marathon.



Mais tout cela n'est pas bien organisé... Quand les électrons se mettent en mouvement, c'est la cohue ! Le matériau commence à avoir très chaud et perd beaucoup d'énergie.

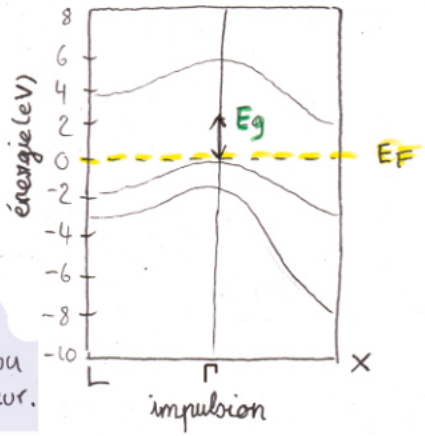


On arrive à tourner cet effet à notre avantage dans un toaster par exemple. Mais la plupart du temps, cette perte d'énergie est un problème.



Le silicium avec lequel on fabrique la plupart des composants électroniques, est-ce qu'on appelle un semiconducteur.

On voit dans la structure de bande qu'aucune de ses bandes ne coupe le niveau de Fermi. Mais son faible gap E_g ($\sim$ 1ev) nous permet d'influencer le matériau pour le rendre isolant ou conducteur.



La physique de la matière condensée en général et la connaissance de la structure de bande des matériaux en particulier, nous ont permis de faire des progrès considérables.

Mais pour l'instant, on n'a pas vraiment réussi à régler le problème de la perte d'énergie électrique sous forme de chaleur.



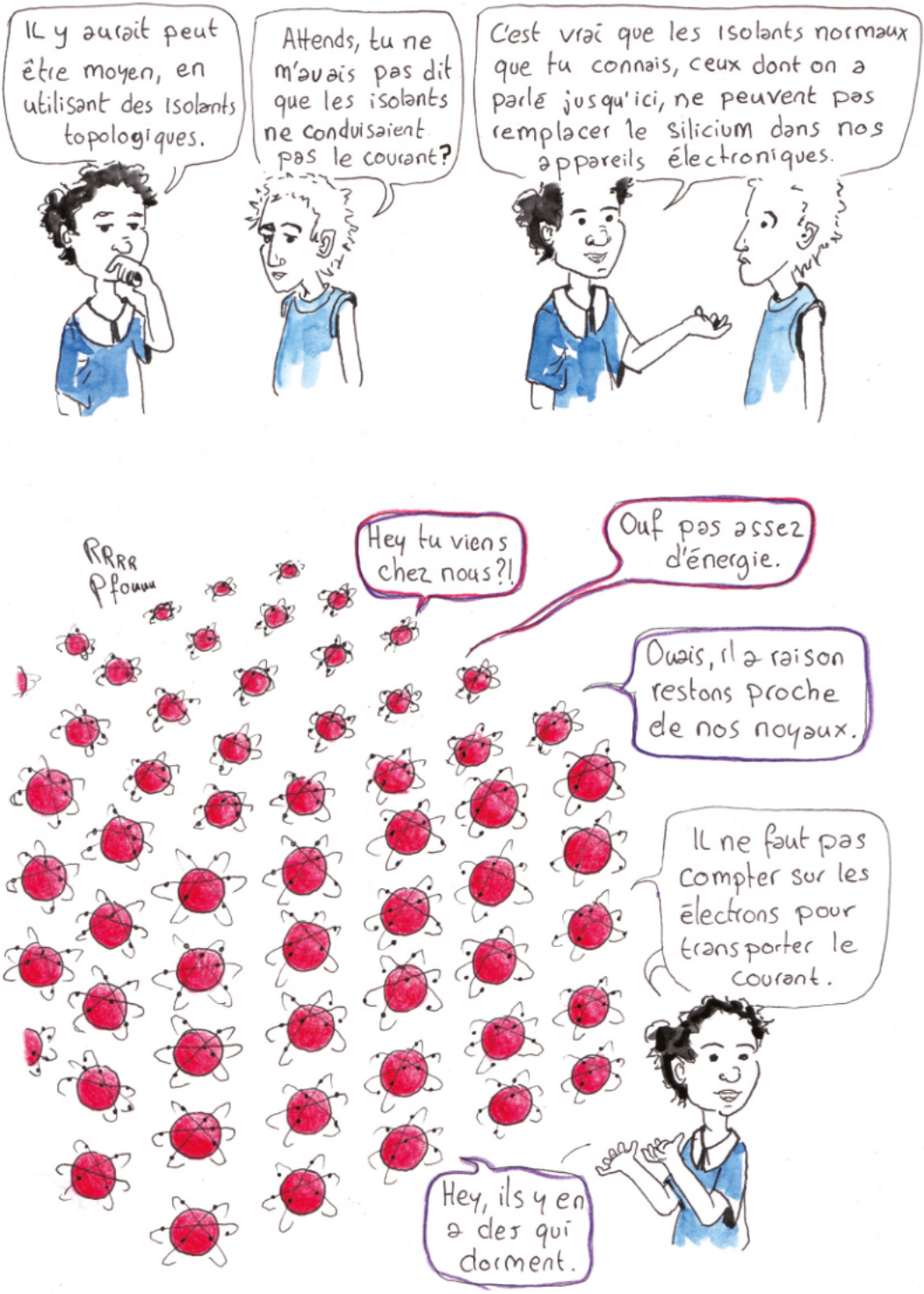


C'est en partie à cause de cette inefficacité que le secteur des nouvelles technologies représente à lui seul près de 4% de nos émissions de gaz à effet de serre.

Ah bon mince ça me donne mauvaise conscience ça...

Il n'y a pas moyen d'être plus efficace?




Il y aurait peut être moyen, en utilisant des isolants topologiques.
Attends, tu ne m'avais pas dit que les isolants ne conduisaient pas le courant?
C'est vrai que les isolants normaux que tu connais, ceux dont on a parlé jusqu'ici, ne peuvent pas remplacer le silicium dans nos appareils électroniques.
RRRR Pfouuu
Hey tu viens chez nous?!
Ouf pas assez d'énergie.
Ouais, il a raison restons proche de nos noyaux.
Il ne faut pas compter sur les électrons pour transporter le courant.
Hey, ils y en a des qui dorment.

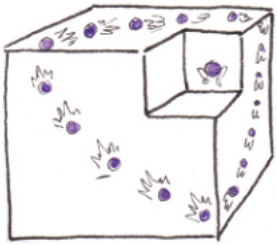
Mais les chercheurs ont trouvé, il y a environ 15 ans qu'il existait d'autres isolants appelés isolants topologiques (prix nobel de physique de 2016)

On les appelle "isolants" parce qu'il y a un gap dans leur structure de bande. Mais ce sont isolants un peu spéciaux.





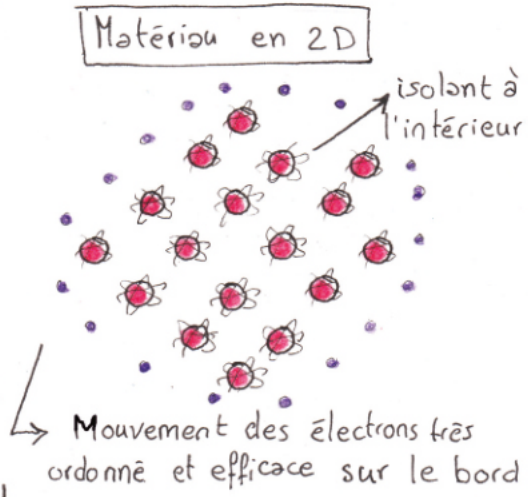
À l'intérieur du matériau, le courant ne passe pas.



Mais sur le bord, les électrons conduisent très bien le courant parce que leur mouvement n'est pas entravé par les noyaux du réseau ou d'autres électrons.

Si bien que dans ce bord conducteur, il y a très peu de pertes sous forme de chaleur.

Ce qui est intéressant, c'est qu'on peut aussi modifier l'environnement de l'isolant topologique pour qu'il devienne un isolant normal et ainsi ne transporte plus du tout le courant.



Plus le matériau est isolant à l'intérieur (plus le gap est grand) et plus le mouvement des électrons sur le bord sera protégé. 4

Des matériaux en 2D, c'est possible ça?

Ben au début, on pensait que ce n'était pas possible. Mais des chercheurs ont trouvé récemment qu'il était possible d'obtenir des matériaux en 2D (prix nobel de Physique en 2010)

En comparant ces matériaux à un livre.



C'est comme si on en arrachait les pages.

Pour arriver à une seule feuille de papier.



Dans la réalité, les "feuilles" du matériau collent entre elles, comme dans la pâte feuilletée cuite.

Alors, ça vient cette monocouche?

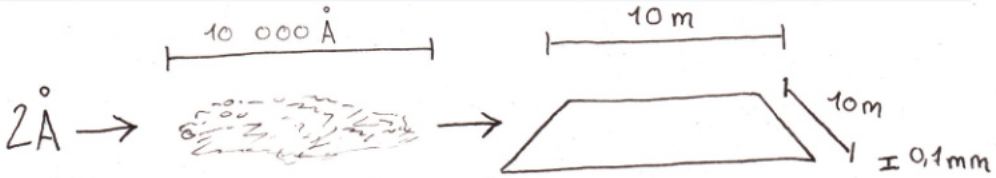
Ça arrive, ça arrive.

Marche pas ce truc...

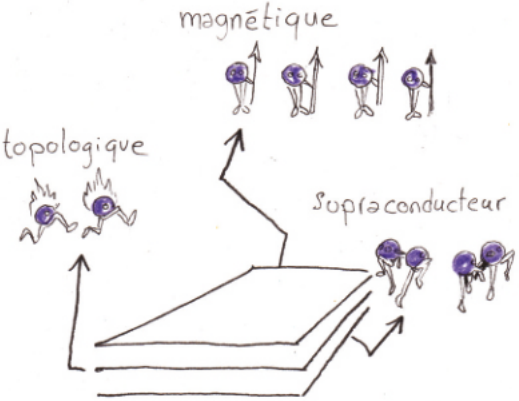
Cette technique s'appelle l'exfoliation

5

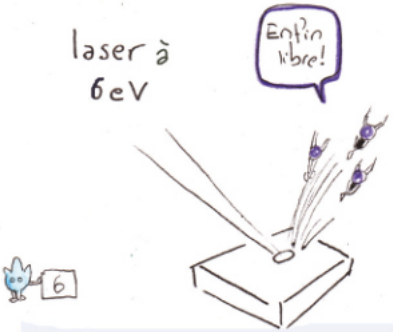
L'épaisseur de ces matériaux dits "2D" est de quelques Å, alors que leur longueur et leur largeur peut dépasser la dizaine de milliers d'Å ! En gardant le même rapport de taille, une feuille de papier, d'épaisseur 0,1mm, aurait des dimensions latérales de plus de 10 m.



Ce qui est pratique, c'est qu'on peut empiler des matériaux 2D différents encore plus facilement que des legos, et ainsi combiner les propriétés physiques que l'on veut.



Pour l'instant, on ne connaît pas beaucoup d'isolants topologiques, on part donc à leur recherche Mais pour être sûr d'en tenir un, il faut le caractériser par sa structure de bande. La technique permettant cette caractérisation s'appelle la photoémission résolue en angle (ARPES).

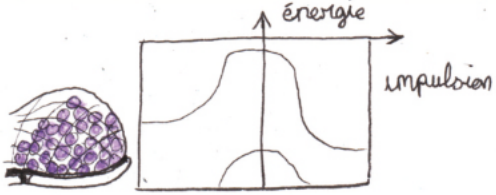


Pour ça on va fournir de l'énergie aux électrons sous forme de lumière.

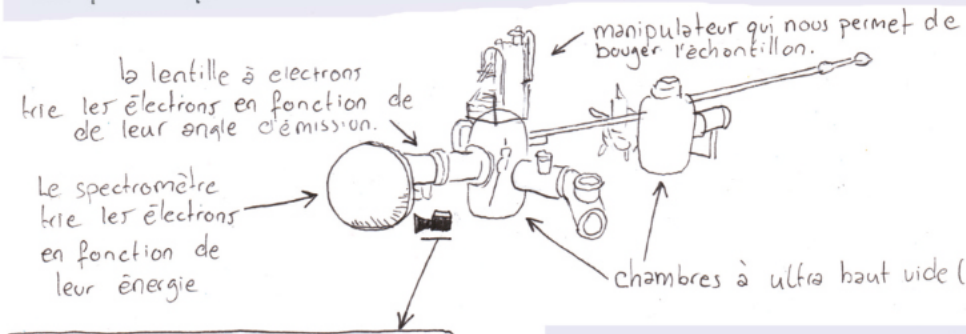
On fournit tellement d'énergie que les électrons sortent du matériau. On les intercepte alors et on mesure la vitesse avec laquelle ils sont sortis du matériau et leur direction d'émission.

Grâce à cette mesure, on obtient directement la structure de bande du matériau !
Maintenant qu'on connaît ses caractéristiques physiques, on le tient !

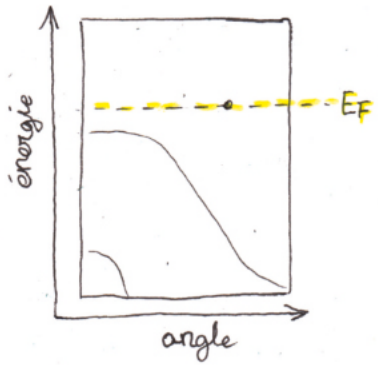




Tout ça se fait dans une machine assez compliquée dans laquelle il a fallu retirer la plupart des molécules d'air pour éviter qu'elles influencent la trajectoire des électrons et pour qu'elles n'endommagent pas la surface mesurée.



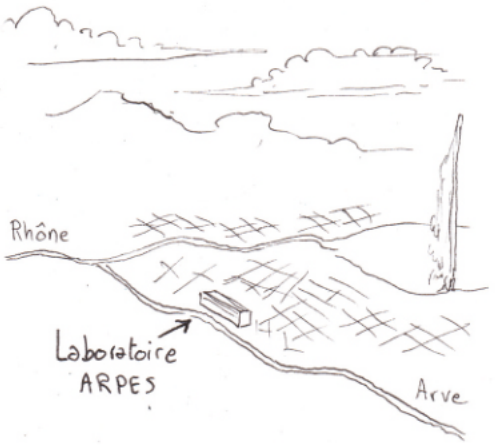
Résultat donné par la caméra.



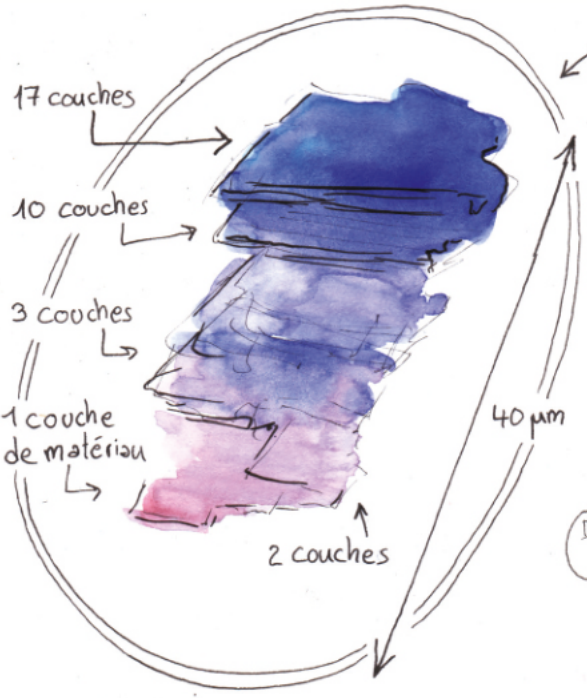
$P = 10^{-11}$ mbar

1 00 000 000 000 000 fois moins de molécules que dans l'air dans un volume donné. Dans ces chambres, on peut chauffer les cristaux, les casser ou les bombarder d'atomes. Mais l'exfoliation est difficile.

Aujourd'hui, les chercheurs travaillent beaucoup pour comprendre quels matériaux peuvent être des isolants topologiques. Allons par exemple dans le laboratoire ARPES de l'université de Genève. J'y ai passé les quatre dernières années à étudier les propriétés topologiques des matériaux 2D.



Quand on exfolie un matériau pour arriver à un matériau 2D, on aboutit typiquement à un feuillet avec plusieurs épaisseurs différentes, avec des dimensions latérales de quelques micromètres.



Spot typique dans une expérience ARPES 50 µm de diamètre.

Gr, chaque épaisseur donnera un signal ARPES différent. Si on ne fait rien pour réduire le spot de lumière, le signal ARPES sera illisible.



Si l'outil utilisé n'est pas adapté, on n'obtient pas le résultat qu'on veut.

Dans le laboratoire ARPES de l'université de Genève, l'avancée technique qui m'a permis de faire la mesure est l'ajout d'une lentille optique dans la chambre à vide.





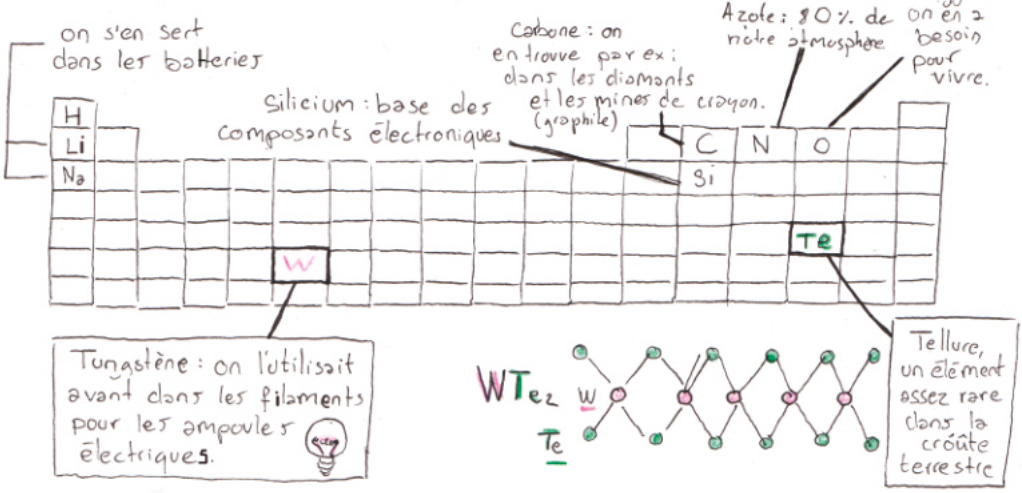
Vue de la chambre à vide de dessus.

Des théoriciens ont prédit que le WTe_2 serait peut être un isolant topologique en 2D.



L'ajout de la lentille si proche de l'échantillon permet de réduire beaucoup le diamètre du spot de lumière.

Situons le dans le tableau périodique.



Avec un autre materiau tel que le WS_2 ou le graphite, On aurait pu exfolier tranquillement le matériau à l'air, et le mettre dans la chambre à vide, un moment puis le mesurer.

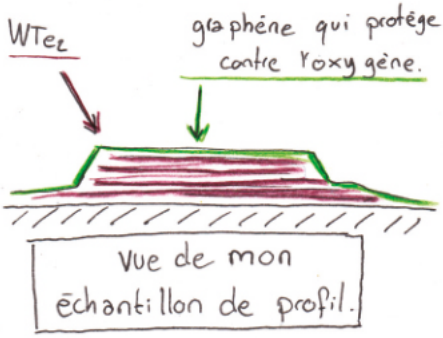
7



Le problème du WTe_2, c'est qu'il s'oxyde dès qu'il est en contact avec l'air.



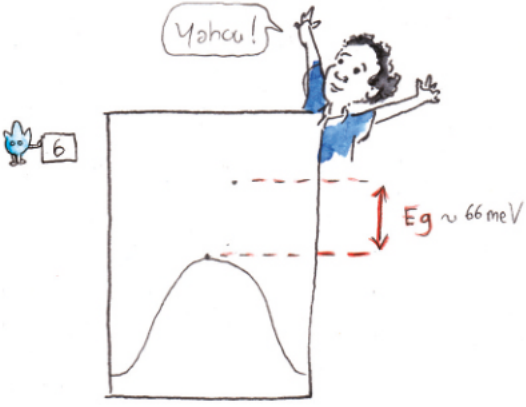
Il a fallu trouver quelque chose pour le protéger.
On a choisi une technique qui s'appelle l'encapsulation et qui consiste à empiler un matériau sur un autre.



Un tel design pour mon échantillon et le diamètre de 2µ du spot de lumière m'ont permis de mesurer la structure de bande.

Dans la monocouche, le gap, que j'ai trouvé (66meV) fait du WTe_2 l'isolant topologique en 2D le plus robuste connu à ce jour.

3 4



Et ce n'est pas tout! Cette technique qui consiste à encapsuler, pour protéger, est transposable pour d'autres matériaux 2D sensibles à l'air. Elle continue donc à être utilisée au labo et nous permet d'en savoir toujours plus sur ceux-ci



D'ailleurs, la recherche continue...

Eh les gars! 66 meV c'est pas mal, mais on peut mieux faire! Moi je prédis un isolant topologique en 2D avec un gap de 500 me V. Il s'appelle le Pt_2HgSe_3.



Super, je vais voir ce que je peux faire!



Si on arrivait à maîtriser ces matériaux topologiques, on pourrait faire des appareils électroniques plus efficaces, se réchauffant moins vite et consommant moins d'énergie.



Trop cool! Comme ça je n'aurai plus aucun remords à jouer en ligne et je ne ferai plus fondre de chocolat en regardant la nouvelle série sortie sur...



Attends, Attends, On est loin d'avoir résolu tous les problèmes!



Déjà, on n'arrive pas à produire ces matériaux à échelle industrielle.

Bon, ça c'est soluble comme problème, non?

Ben, il nous faudrait encore quelques années de recherche et puis ensuite pas mal d'années de développement, sans compter toutes les machines dans les usines à remplacer.

D'accord, c'est pas pour demain. Et ensuite?



Ensuite, il faut penser à la disponibilité de la ressource. On peut avoir le meilleur isolant topologique de l'univers, s'il est en quantité très faible sur la Terre, on ne pourra pas généraliser son utilisation.

Ou alors, on l'utilise pour des applications de niche?



Oui, il semblerait que l'utilisation des isolants topologiques soit restreinte à des applications de niche pour l'instant. Surtout qu'ils restent isolants topologiques à température très basse, en dessous de $-180\,C°$. Ce qui est difficile à exploiter.

On a surmonté des obstacles, il nous reste des défis à relever. C'est pour ça que la recherche est si intéressante !

Même dans de l'azote liquide?

Si, dans de l'azote liquide, ça pourrait marcher.





Dans un matériau, on s'intéresse aux électrons proches du niveau de Fermi.



La relation entre l'énergie de l'électron et son impulsion s'appelle la structure de bande.



Dans une structure de bande, le gap est l'énergie qui sépare les bandes occupées des bandes vides. Si le gap est très grand, alors le matériau est très isolant.



Dans un isolant topologique, l'intérieur du matériau est isolant alors que le mouvement des électrons sur le bord est protégé. Plus le matériau est isolant à l'intérieur, plus le mouvement des électrons sur le bord sera protégé.



La technique permettant de séparer les "feuilles" du matériau pour arriver à un matériau 2D s'appelle l'exfoliation.



L'ARPES est une technique permettant de mesurer la structure de bande d'un matériau.



L'ARPES a besoin d'une surface propre, et se pratique pour cette raison dans une chambre à Ultra Haut Vide, dans laquelle l'exfoliation est très difficile.

Un grand merci à Christophe Berthod, Guillaume Bertali, Margherita Boselli, Karina Cucchi, Louis Forel, Olivier Gaumer, et Céline Lichtensteiger, qui ont pris le temps de relire et de corriger les versions successives de cette BD.

Nous remercions pour son soutien le Département de Physique de la Matière Quantique de l'Université de Genève.

Irène Cucchi

Flavie Ndam

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département de physique de la matière quantique