

# Métaux polycristallins réels

## Un cristal ?

### Vitreux ou cristallin

*Si l'on refroidit un [métal](#) liquide, il y aura un moment où les forces d'attractions (l'interaction entre atomes) seront supérieures aux effets de l'agitation thermique. A ce moment les atomes de notre métal vont se lier les uns aux autres. Nous avons vu dans un [précédent article](#) la liaison d'atomes par l'interaction de leur nuage électronique, ce qui leur permettait de s'organiser en molécules. Dans le cas de métaux liquide qui se solidifient, les atomes s'arrangent (s'organisent) de proche en proche pour composer un corps solide, rigide.*

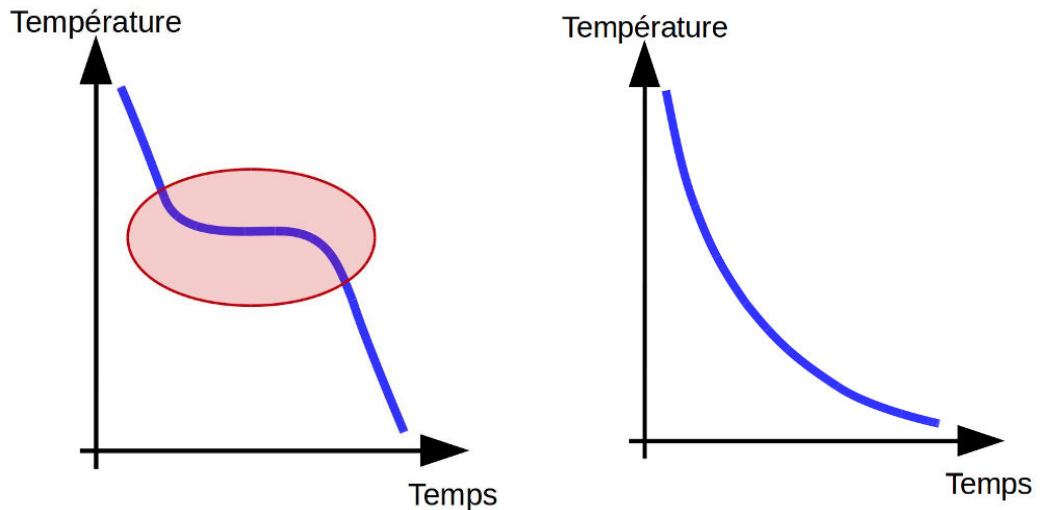
*Nous avons deux principaux états d'arrangement possibles :*

- *L'état cristallin*
- *L'état vitreux*

*Lors du passage de l'état liquide à l'état solide, la matière a deux chemins pour se solidifier pourrait-on dire. Le premier chemin : les atomes trouvent une place pouvant minimiser leur énergie, ceci dans un ordre à grande distance, ce qui oblige nos atomes à se déplacer dans le liquide. Cette solidification produit l'état cristallin. L'autre le liquide devient rapidement trop [visqueux](#) pour que les atomes se déplacent. Le métal liquide devient de plus en plus visqueux au fur et à mesure de son refroidissement. Cette augmentation de la viscosité diminue la possibilité aux atomes de se déplacer pour trouver une position de minimisation de l'énergie. Pour illustrer ce fait imaginons le cas suivant : Nous fabriquons un ruban très mince d'un métal quelconque, pour fixer les idées prenons une épaisseur de 0,1mm. Nous coulons notre métal liquide dans une forme peu profonde et que va-t-il se passer si l'on refroidit rapidement ce métal ? Les atomes n'auront pas le temps de se déplacer pour trouver une place bien précise afin de diminuer l'énergie de liaison. Ils seront figés sur*

place par l'augmentation brutale de la viscosité, c'est l'état vitreux (amorphe) pour ce matériau.

On remarque ce déplacement d'atomes lors du refroidissement par la variation de température de ce refroidissement :

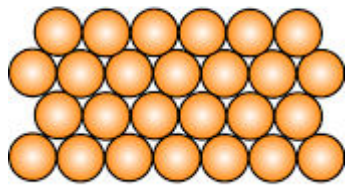


Comme le montre le diagramme de gauche, s'il apparaît une stabilisation de la température lors du refroidissement ceci signifie que le déplacement des atomes cherchant la place adéquate pour minimiser l'énergie du solide, "dégage" suffisamment d'énergie pour stabiliser la température de refroidissement. Le matériau une fois solidifié sera de type cristallin, c'est-à-dire que chaque atome aura une place bien précise dans l'espace et que cet arrangement sera régulier sur de longue distance. Dans le cas d'un refroidissement régulier (voir diagramme de gauche) la viscosité augmentera trop vite pour permettre la cristallisation de la matière, une fois solide, la matière sera sous forme vitreuse. On imagine aisément qu'entre les deux systèmes, nous pouvons avoir divers types de refroidissement.

Ce que l'on peut dire :

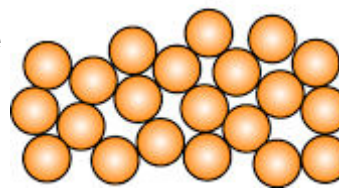
Généralement les métaux purs (un seul type d'atome) se refroidissent "naturellement" (refroidissement lent) selon le diagramme de gauche (matière cristalline) et que pour avoir un refroidissement du type de diagramme droite (matière vitreuse ou amorphe), il faut prendre le cas d'alliage de trois ou plus métaux. Attention, ce n'est pas une règle !

# crystal



# amorphe

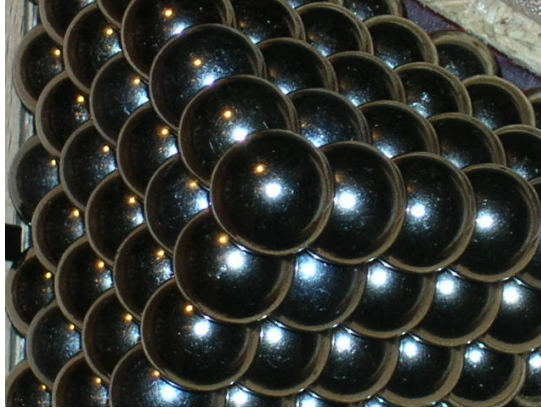
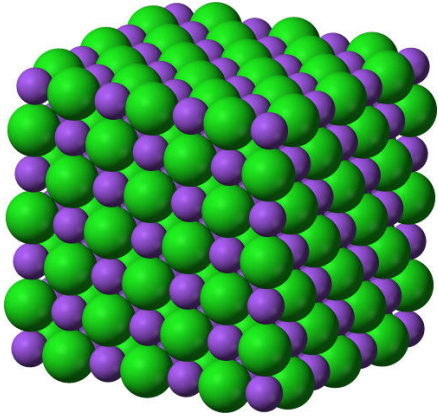
vitreux ou amorphe



## Alignement d'atomes

*Nous allons maintenant essayer de définir et de se représenter un cristal. C'est un alignement, un empilement d'atomes, comme des petites billes dans une boîte, les atomes cherchent la meilleure position pour remplir l'espace. Un cristal est cet empilement avec tous les atomes dans le même alignement, pas de changement dans l'alignement. Les cristaux les plus connus sont les cristaux de roche (quartz), que l'on trouve dans les Alpes, les cristaux de glaces, le diamant ou les cristaux de neige.*





*La plupart de ces cristaux sont petits et souvent pas directement visible à l'œil humain. Les cristaux qui sont formés par un seul élément, tel le carbone pour le diamant, sont appelés monocristaux.*

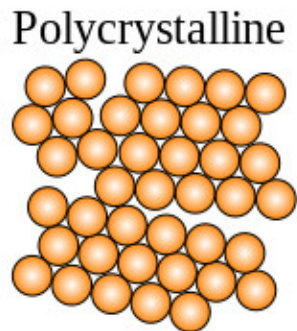
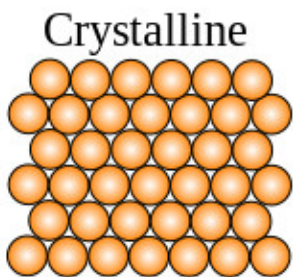
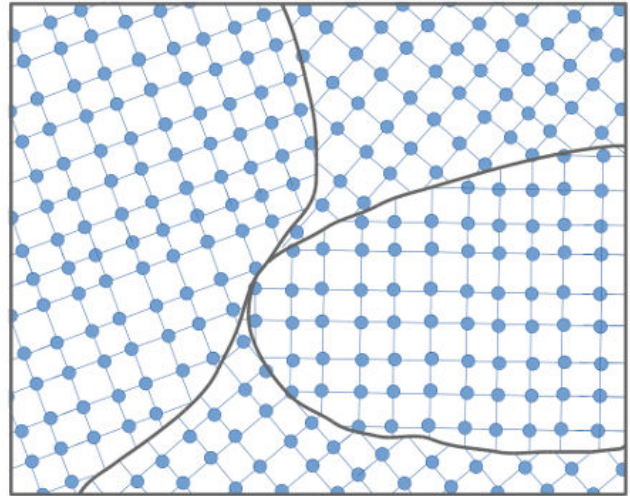
*Il y a des exceptions, comme ces cristaux géants de NAICA. J'ai cru comprendre que ces cristaux sont malheureusement pas très stables et que les conditions de création et de maintien sont tellement particulières, qu'il est nécessaire de noyer à nouveau ces grottes pour préserver ces géants.*

## Les polycristaux

### Pourquoi des polycristaux ?

*Lorsque un métal liquide se refroidit, des cristaux se forment un peu partout dans la masse liquide, ces germes, ces cristaux s'agrandissent, mais ils peuvent rencontrer divers obstacles. Il faut imaginer cela dans le volume, les premiers atomes s'arrangent entre eux, de proche en proche ils "acceptent" de nouveaux venus dans leur structure naissante. Déjà un autre cristal tente lui aussi de grandir, et lorsque ces deux cristaux qui s'étendent entre en contact, leurs extensions réciproques stoppent bien évidemment. Le cas le plus fréquent, c'est que l'orientation des deux cristaux n'est pas la même, donc ces cristaux ne fusionnent pas, simplement leur évolution s'arrête. L'autre cas, par hasard l'orientation des deux cristaux est la même, voire très proche, ils fusionnent, leurs atomes ne forment qu'un seul cristal. Pour chaque petit embryon de cristal, l'aventure de l'expansion s'arrête relativement vite, soit par rencontre avec un autre cristal, soit par la surface, soit par une partie encore*

*trop liquide (trop chaude), soit le bord du récipient. Voici quelques vues schématiques d'une jonction de deux cristaux (vues dans le plan)*



## Les grains

*Il n'est pas évident en regardant une pièce en acier (fer+carbone) d'imaginer que sa structure est cristalline. C'est parce qu'elle est composée, non pas d'un grand cristal comme dans le cas des diamants, mais d'une grande quantité de petits cristaux les uns à cotés des autres. Ces cristaux sont très petits et pas visible à l'œil humain. En fait pratiquement tous les métaux ont une structure cristalline composée d'une multitude de petits cristaux côte à côte, c'est pour cela que l'on parle de polycristaux.*

*Un cas un peu particulier, la galvanisation, c'est le recouvrement d'une pièce avec du zinc, on peut parfois observer facilement ces cristaux car ils sont grands (>10mm).*





*Si l'on veut observer les cristaux d'un métal, soit observer sa structure polycristalline, il faut grossir entre 100 et 500 fois, voici deux résultats en provenance de [Wikipédia](#) et [Wikimédia](#)*

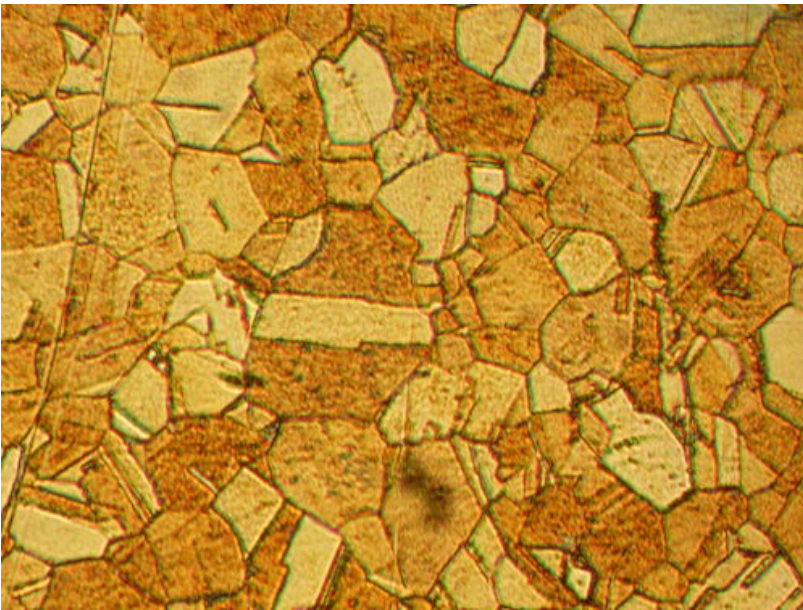
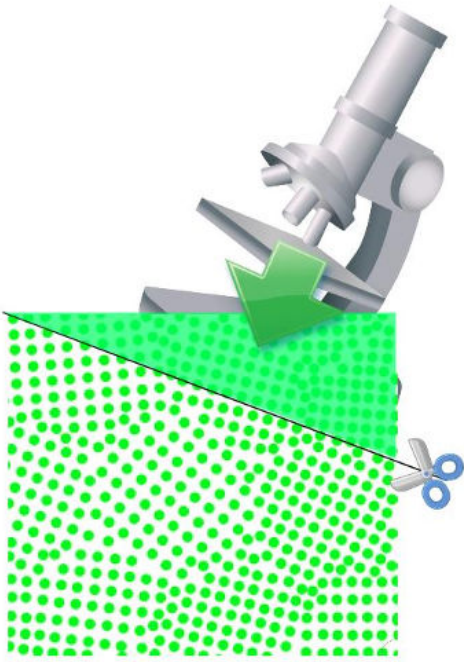




Fig. 4. — Wrought iron. Transverse section.  
Magnification not stated. (Guillet.)

Comment interpréter ces photos ?

*La photo jaune est une structure de laiton (alliage CuZn) où l'on remarque nettement beaucoup de zones, comme un puzzle. Chaque pièce de ce puzzle représente ce que l'on appelle un grain. Chaque grain est en fait un cristal coupé et dont on voit que la face visible. Les différences de teinte proviennent des orientations différentes des cristaux qui réfléchissent la lumière. Chaque cristal a une orientation différente de ses voisins. Les traits délimitant les grains s'appellent naturellement des joints de grains. Il ne faut pas oublier que la photo montre un plan 2D d'une structure tridimensionnelle!*



*Dans le cas de la photo de droite en noir et blanc, c'est de l'"acier" fabriqué à l'ancienne (1800). Les zones noires sont des impuretés (des résidus non souhaités) et l'on voit bien "les pièces du puzzle", les joints des grains qui sépare les cristaux. Une remarque, pour la réalisation de ces photos de micrographie (fort grossissement) on a sélectivement attaqué la surface pour mieux contraster les zone grain (cristaux) des joints de grain.*

## Les défauts des cristaux

*Nous avons vu et compris ce qu'est un cristal : un empilement régulier à longue distance d'atomes. Est-il possible, dans cette structure ordonnée et régulière, que des défauts apparaissent ? Bien sûr et ils sont de plusieurs types :*

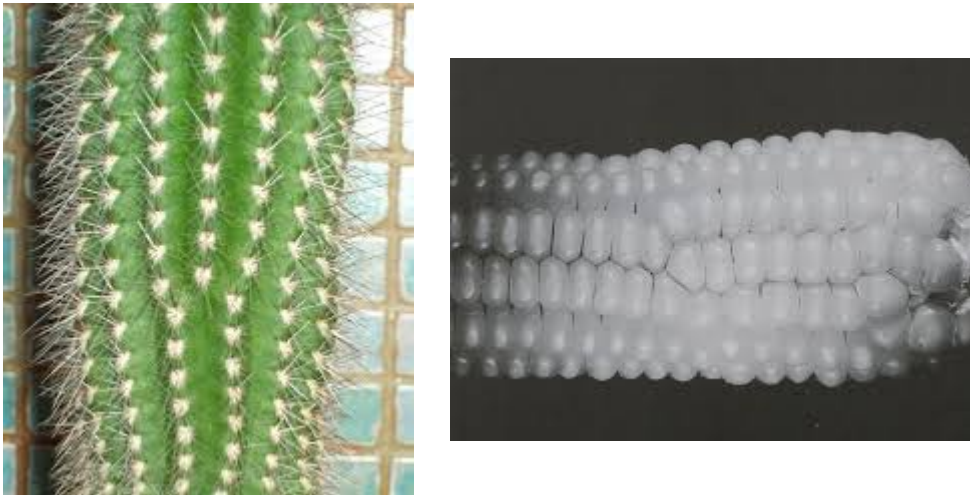
- *les dislocations*
- *les défauts ponctuels*
- *les phonons*

## Les dislocations

*Ce sont des défauts dans la structure générale du cristal, plus qu'un long discours voici*

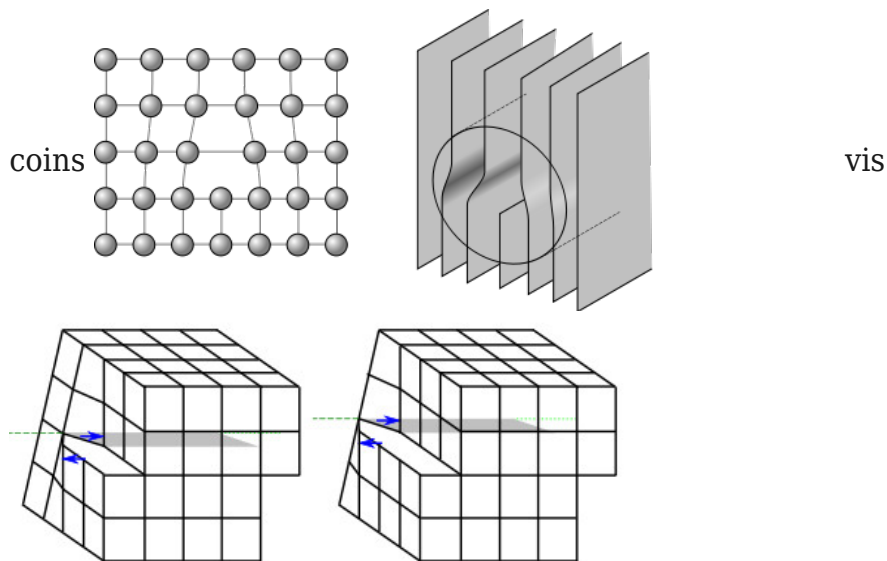


deux illustrations de ce qu'est une dislocation pour une structure régulière.



En fait dans les réseaux cristallins, on peut dire qu'il y a deux types de dislocations

- les coins
- les vis

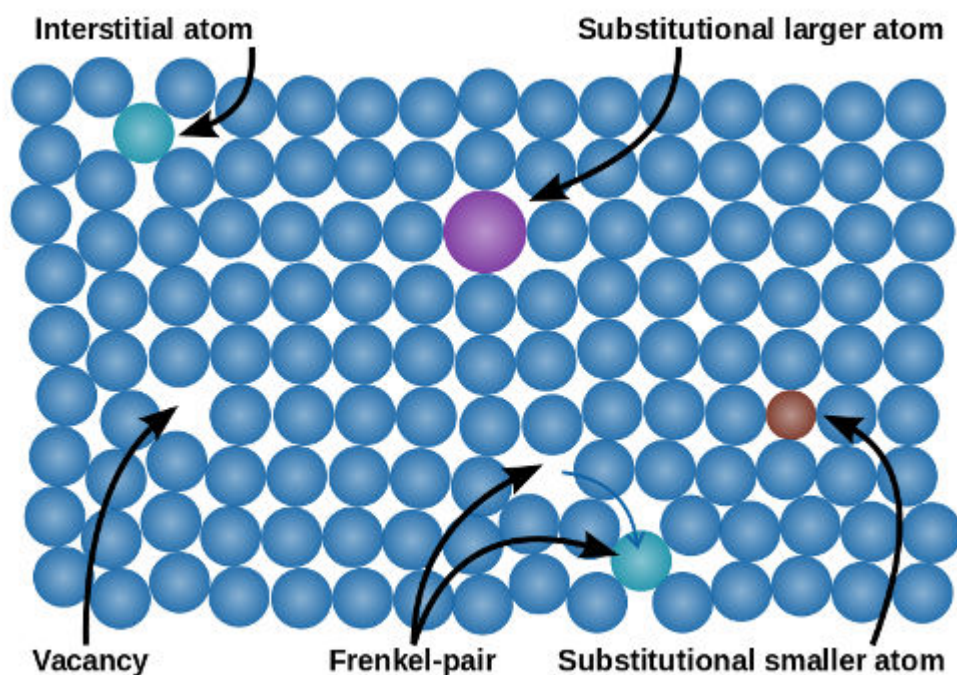


Pour quoi ses défauts sont-ils importants ? Anciennement, avant de pouvoir voir l'agencement des cristaux, les physiciens avaient bien remarqué que les déformations des métaux demandaient des efforts bien inférieurs aux efforts prédit par la théorie. Pour expliquer ces capacités mécaniques inférieures aux calculs, on supposa l'existence de ces dislocations. Le déplacement (on peut le visualiser sur la vue dislocation vis) des défauts expliquent les "pertes" de tenue des pièces mécaniques par rapport à la théorie d'un cristal homogène et sans défauts. Ces dislocations forment des réseaux dans les cristaux métalliques, leur densité peut être très grande suivant l'histoire du matériau. Ils influencent

directement les caractéristiques mécaniques des pièces.

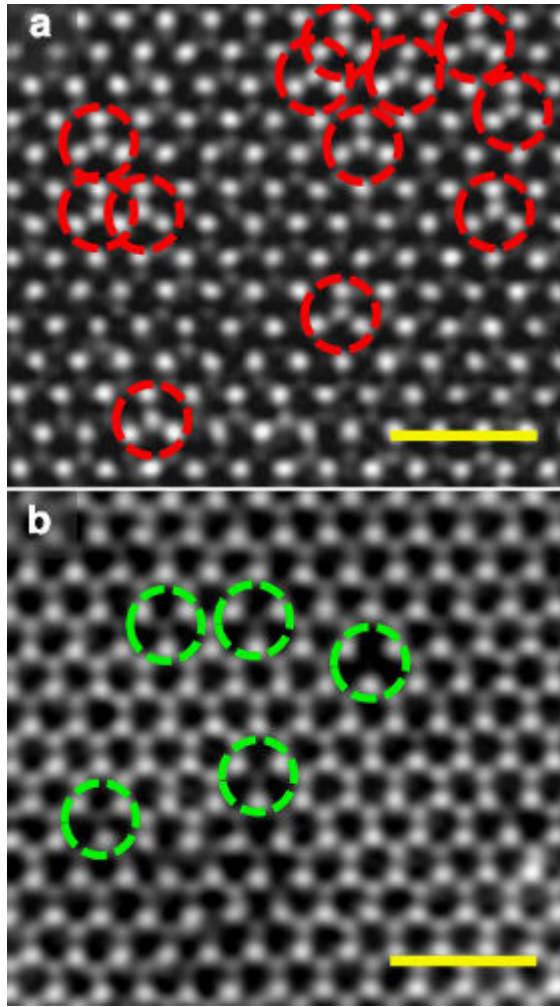
## Les défauts ponctuels

Si se sont les plus faciles à imaginer, ce sont aussi les plus difficiles à voir. C'est un atome manquant dans le réseau du cristal, c'est un atome coincé dans le réseau, c'est un atome d'un autre élément qui s'est substitué dans le cristal. Voici quelques illustrations de ces défauts



vue au microscope

électronique



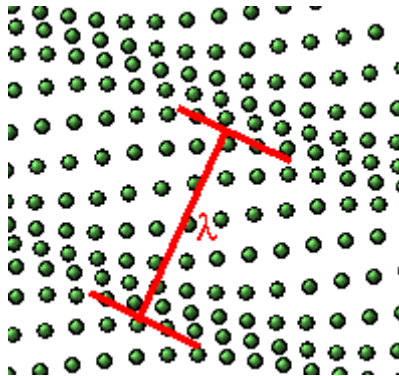
Pourquoi ces défauts ont-ils une grosse influence sur les caractéristiques mécaniques des pièces ? voir le chapitre ci-dessous 😊

## Les phonons

Le phonon n'est pas un défaut en soi, mais plutôt il joue le rôle du "porteur de défauts", du propagateur. C'est une pseudo-particule qui est le messenger d'une onde élastique comme le serait le photon pour l'onde électro-magnétique. Lorsque votre matériau se trouve au-dessus du zéro absolu, il y a de l'agitation thermique. Ce qui revient à dire que pour notre cristal, chaque atome vibre, mais un cristal ce sont des atomes liés entre eux par les interactions de leur nuage électronique, un peu comme des billes liées entre elles par des ressorts. Lorsqu'une bille de l'ensemble bouge, elle exerce des forces sur ses voisines qui se mettent à vibrer également. C'est pareil pour le cristal, lorsque la température augmente, les atomes vibrent et s'influencent les uns les autres. En fait chaque atome ne peut vibrer individuellement, ils se coordonnent entre eux et nous voyons apparaître une onde au

niveau du réseau, c'est un défaut du cristal parfait. L'énergie que dégage cette onde est décrite par un état quantique qui un phonon, une quantité d'énergie en quelque sorte. Cette énergie est disponible pour diffuser les défauts, pour le transport de l'énergie thermique (nota: les électrons peuvent transporter plus d'énergie que les phonons, mais dans le cas d'un isolant électrique, il ne reste plus que les phonons pour le transport calorifique.). Ces ondes facilitent le mouvement des atomes dans le cristal, donc le mouvement des défauts, c'est en ceci que se sont des propagateurs.

"représentation d'un phonon"



## Conclusion

Les matériaux polycristallins (presque tous les métaux) sont très répandus dans les objets qui nous entourent. Par ce tour d'horizon de la structure interne des matériaux, j'espère qu'une meilleure compréhension des métaux vous permettra d'appréhender plus simplement leurs caractéristiques mécaniques et vous regarderez différemment tous ces objets qui peuplent notre univers.