

ÉLECTRONS, PHONONS ET DIFFUSION DE LA CHALEUR

La loi de Fourier est une relation empirique et quantitative qui stipule qu'en tout point d'un solide, le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température. Mais par quels mécanismes la chaleur se transmet-elle d'un endroit à un autre? Dans la plupart des solides cristallins, où les atomes et les molécules ne font que s'agiter autour de leurs positions d'équilibre, sans pouvoir se déplacer, deux véhicules de chaleur sont en jeu à l'échelle microscopique: les électrons libres du matériau et ses phonons.

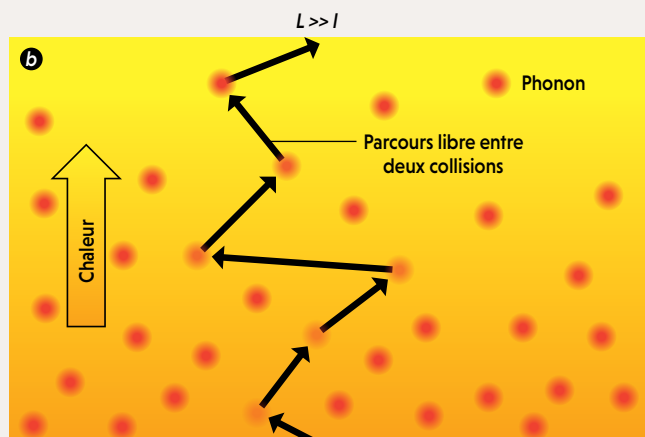
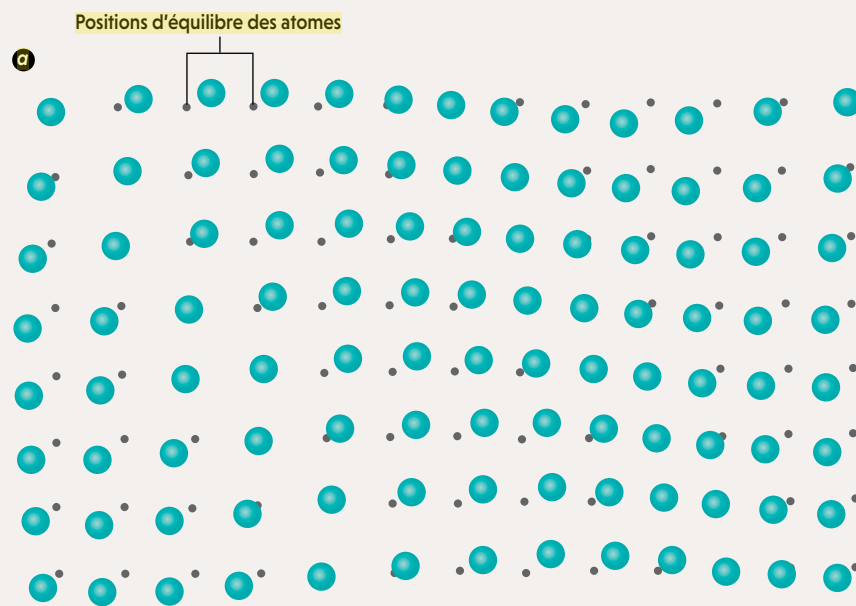
Commençons par les électrons. Ils véhiculent bien sûr le courant électrique dans les matériaux conducteurs, mais, par leurs mouvements et les collisions qui s'ensuivent, ils transmettent aussi de l'énergie sous forme de chaleur. Les électrons libres sont même les principaux porteurs de chaleur dans les métaux à température ambiante. Toutefois, leur contribution ne suffit

pas à rendre compte pleinement de la conduction thermique, en particulier aux basses températures.

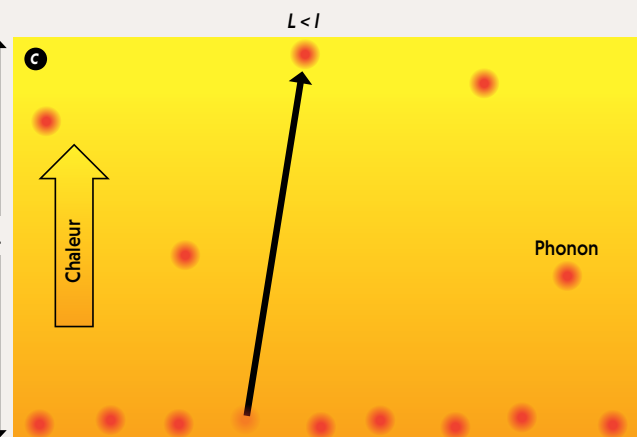
D'autres porteurs de chaleur interviennent: les phonons. Au sein d'un isolant électrique (un matériau «diélectrique»), qui est dépourvu d'électrons libres, les phonons sont même les seuls porteurs de chaleur. De quoi s'agit-il? La matière solide est constituée d'atomes qui, à température absolue non nulle, sont en continuelle vibration autour de leurs positions d'équilibre. C'est ce qui constitue l'agitation thermique. Ces vibrations se couplent d'un atome à l'autre du réseau et donnent ainsi lieu à des ondes de vibration qui se propagent au sein du réseau cristallin (voir la figure a). Or les lois de la physique

quantique montrent que l'énergie et la quantité de mouvement portées par les vibrations du réseau cristallin ne peuvent pas prendre n'importe quelles valeurs: ces grandeurs sont «quantifiées». Au sein du réseau cristallin, les échanges d'énergie et de quantité de mouvement dus aux vibrations se font donc comme si ces grandeurs étaient véhiculées par des particules d'énergie et de quantité de mouvement bien déterminées. On leur associe par conséquent des «quasiparticules» nommées phonons (ce nom provient du grec *φωνη* qui signifie «voix», car les phonons sont aussi responsables de la propagation du son dans les solides).

Comme toute particule, les phonons ont une quantité de mouvement p , une



Dans un réseau cristallin, des ondes de vibration des atomes (ou des molécules) autour de leurs positions d'équilibre se propagent. Le schéma a représente un instantané d'une telle onde. L'énergie de ces ondes est quantifiée: elle est véhiculée par des «phonons», entités qui se comportent de façon analogue à une particule. Lorsque le libre parcours moyen (distance



moyenne entre deux collisions successives) des phonons, l , est très inférieur à la distance L sur laquelle ils se propagent, la conduction de la chaleur est de nature diffusif et suit la loi de Fourier (b). En revanche, quand le libre parcours moyen l est supérieur à L , le régime de conduction est dit balistique et n'obéit plus à la loi de Fourier (c).