

d'induire un courant constant, une différence de potentiel, pourtant continue, engendre un courant alternatif ! Cette prévision étonnante n'a été expérimentalement testée que récemment, quand on a étudié le mouvement des électrons dans des matériaux semi-conducteurs nommés super-réseaux, ou le mouvement d'atomes piégés par de la lumière.

## Des ondes dans un cristal

Pour comprendre la nature de ce comportement surprenant, nommé aujourd'hui oscillations de Bloch, conservons l'idée que le matériau est périodique. Cette propriété joue un rôle crucial lors de l'interaction du réseau cristallin avec l'onde. L'analogie d'une vague qui arrive sur une digue percée de trous

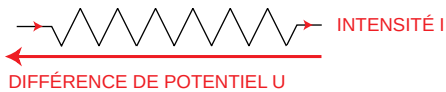
à intervalles périodiques aide à comprendre le phénomène. Les ouvertures dans la digue sont des sources d'ondes qui interfèrent, de sorte que, pour certaines directions seulement, derrière la digue, les contributions de toutes les vagues sont en phase et s'ajoutent.

En cristallographie, on utilise cet effet de «diffraction de Bragg» pour étudier la structure des matériaux : les ondes utilisées sont alors souvent des rayons X (voir la figure 5). Dans le cas de la conduction électrique dans un cristal, les ondes ne sont pas électromagnétiques ; ce sont des ondes de matière. Comme pour les vagues ou pour la lumière, ces ondes sont diffractées par le réseau ionique pour des vitesses et des directions particulières.

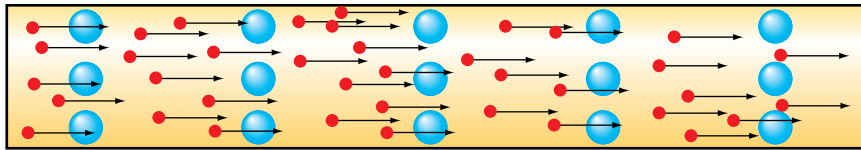
Plus précisément, imaginons un électron délocalisé sur tout le cristal et accéléré par une force électrique  $qE$ , où  $q$  est la charge de l'électron et  $E$  l'intensité du champ électrique (dans toute la suite de l'article, on se limitera à un mouvement à une seule dimension ; d'ailleurs, ce sont des oscillations de Bloch à une dimension que nous avons détectées). Initialement immobile, l'électron est mis en mouvement dans le sens opposé à celui du champ électrique (parce que sa charge électrique est négative). Sa vitesse augmente, de sorte que sa longueur d'onde diminue (le physicien français Louis de Broglie a montré qu'à un électron est associée une onde dont la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la vitesse). Vient alors un stade où l'onde électronique est diffractée par le réseau cristallin : ses interférences constructives engendrent sa réflexion. La force électrique continue d'agir sur les électrons, mais elle est alors opposée au mouvement ; elle ralentit donc les électrons, les immobilise, puis les accélère dans la direction opposée, et ainsi de suite (voir la figure 7). Ce mouvement se répète périodiquement, et la période de cette oscillation est égale à  $h/Fd$ , où  $h$  est la constante de Planck,  $F$  la force appliquée et  $d$  le pas du réseau périodique (ici, la force  $F$  est la force électrique  $qE$ ).

Si notre perception de la conductivité électrique reste dominée par la loi d'Ohm, c'est que ce mouvement oscillant ne se manifeste pas : dans un cristal usuel, la dynamique des électrons n'est pas seulement gouvernée par la diffraction par le réseau cristallin, mais aussi par des diffusions sur des impuretés ou sur des défauts du cristal. Ceux-ci sont si nombreux que

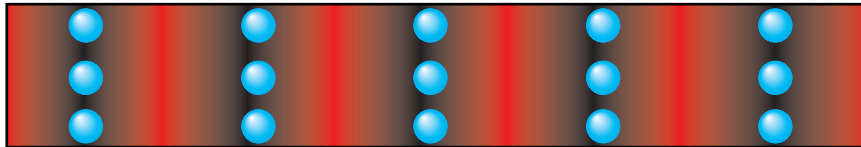
### PHYSIQUE CLASSIQUE



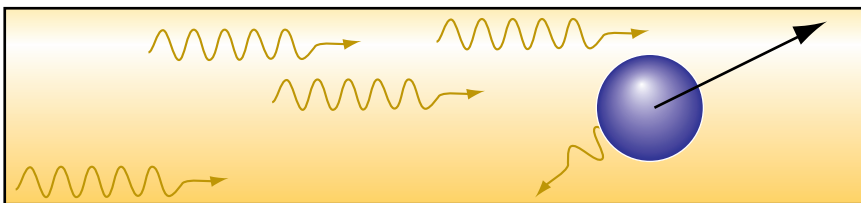
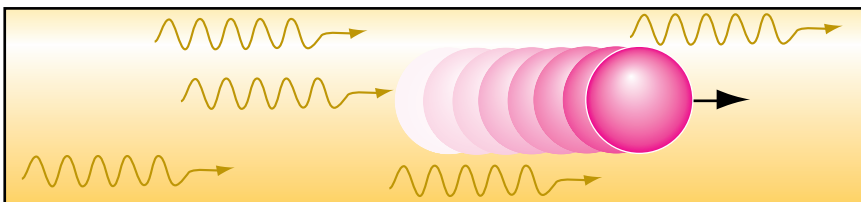
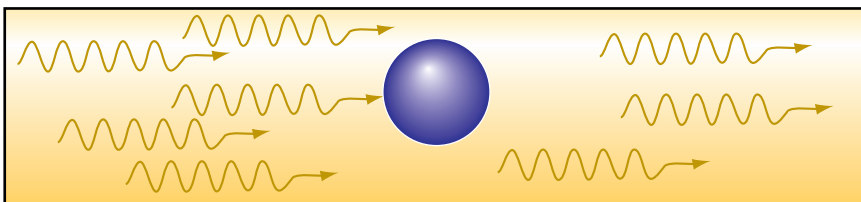
$$\text{LOI D'OHM} \\ U = RI$$



### PHYSIQUE QUANTIQUE



3. LA LOI D'OHM stipule que l'intensité d'un courant électrique dans un conducteur cristallin est proportionnelle à la différence de potentiel appliqué. Cette relation suppose que les électrons sont des particules qui se déplacent toutes dans le même sens, sous l'action des forces électriques. Toutefois le physicien Félix Bloch, utilisant la physique quantique, a déterminé que chaque électron est délocalisé dans tout le conducteur, avec une probabilité de présence supérieure entre les noyaux d'atomes (en rouge sur le schéma inférieur). Il a prévu que les électrons oscillent, leur ensemble créant un courant alternatif, quand on applique une différence de potentiel pourtant continue aux bornes du cristal : un cristal parfait ne conduit donc pas le courant électrique.



4. LA PRESSION DE RADIATION D'UN FAISCEAU LASER pousse les atomes dans son sens de propagation. Un atome absorbe un photon et recule en raison de la conservation de la quantité de mouvement. Après un bref instant, il réémet ce photon dans n'importe quelle direction et recule à nouveau. Puis il absorbera à nouveau un photon, et ainsi de suite. En moyenne, l'atome est accéléré dans le sens du faisceau.

chaque électron n'effectue qu'une partie infime de l'oscillation avant d'entrer en collision. Il se comporte alors comme un électron libre qui, entre deux chocs, se déplace en ligne droite dans la direction du champ électrique. Globalement tous les électrons bougent dans le même sens, induisant un courant électrique constant.

Dans les échantillons étudiés en laboratoire, on observe que la durée moyenne d'évolution libre, entre deux chocs successifs, nommée temps de relaxation, est considérablement plus courte que la période d'oscillation : avec des champs électriques de quelques dizaines de volts par mètre, la période de Bloch dans un métal est de l'ordre du millionième de seconde, et le temps de relaxation est dix millions de fois inférieur.

C'est la raison pour laquelle, pendant plus de 50 ans, les oscillations de Bloch sont restées inobservées. Décrites dans tous les manuels de physique des solides, ces oscillations semblaient ne devoir rester qu'une expérience de pensée.

## Les super-réseaux

Comme souvent en physique, l'apparition de nouveaux dispositifs expérimentaux a conduit au but : ici, l'observation des oscillations prédites. Le premier progrès est venu de la physique des semi-conducteurs : ce fut la mise au point des « super-réseaux ». Dans ces systèmes, ce sont toujours des électrons qui oscillent, mais avec des périodes de l'ordre de la picoseconde (un millième de milliardième de seconde), bien plus courtes que dans les solides cristallins.

D'autre part, les progrès réalisés dans le domaine du refroidissement et de la manipulation d'atomes par laser ont engendré de nouveaux systèmes expérimentaux qui permettent d'aborder les problèmes de transport dans les potentiels périodiques. Dans les systèmes atomiques, les processus de relaxation peuvent être rendus négligeables, et les périodes de Bloch sont bien plus longues, supérieures à la milliseconde.

Les super-réseaux, tout d'abord, sont apparus dans les années 1970 : les physiciens du solide ont appris à utiliser des techniques d'évaporation sous vide pour déposer des couches atomiques spécifiques sur un support, et réaliser des structures de composition périodique dont ils savent régler le pas. Les pas obtenus sont d'une dizaine de nanomètres,

soit 100 fois supérieurs à la maille d'un réseau cristallin.

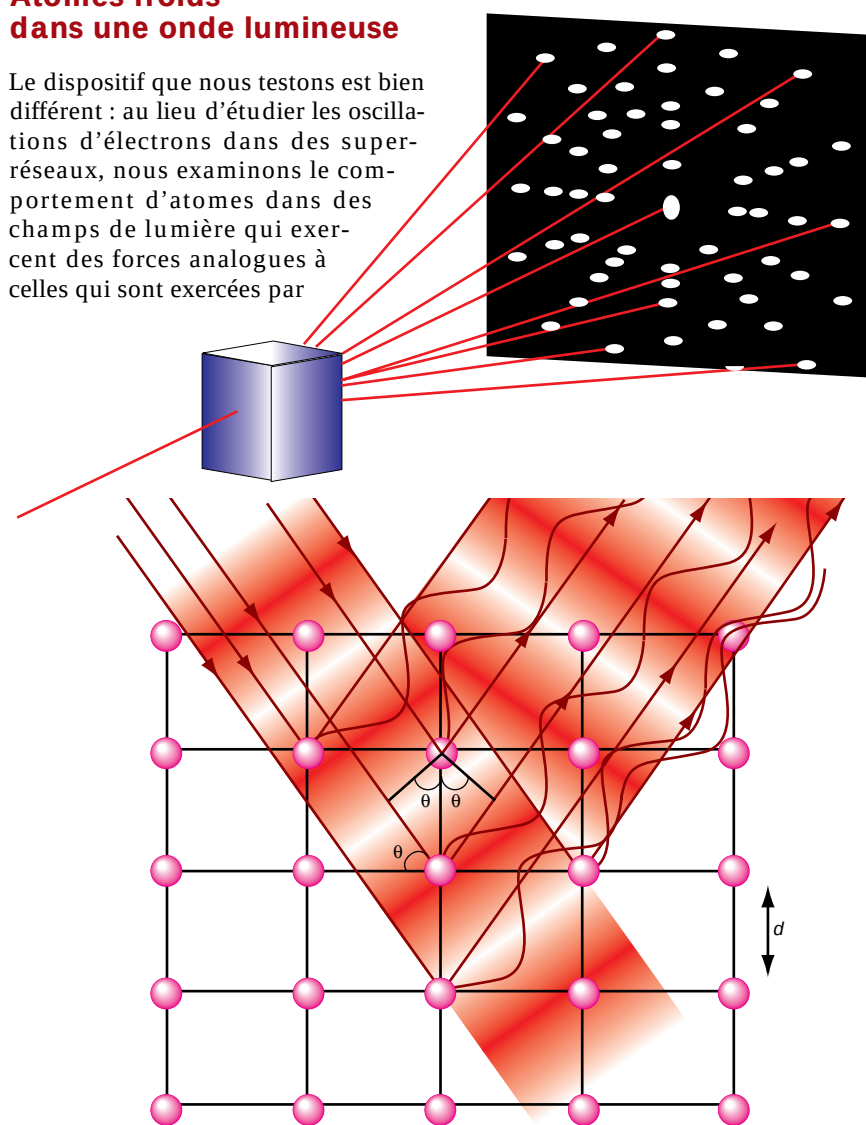
Dans les super-réseaux, les champs électriques peuvent être considérables (plusieurs centaines de millions de volts par mètre). De ce fait, la période des oscillations de Bloch (inversement proportionnelle à la force électrique et au pas du réseau) est réduite au point qu'elle devient alors inférieure au temps de relaxation, ce qui laisse apparaître le comportement oscillant. En 1992, les oscillations de Bloch électroniques ont été ainsi observées à une fréquence de plusieurs térahertz (milliers de milliards de hertz). Des études récentes ont précisé les observations.

## Atomes froids dans une onde lumineuse

Le dispositif que nous testons est bien différent : au lieu d'étudier les oscillations d'électrons dans des super-réseaux, nous examinons le comportement d'atomes dans des champs de lumière qui exercent des forces analogues à celles qui sont exercées par

le réseau cristallin sur les électrons. Nous produisons des atomes ultrafroids dans des puits de lumière à l'aide de techniques de refroidissement d'atomes mises au point depuis une quinzaine d'années par Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William Phillips (ce travail leur a valu le prix Nobel de physique en 1997).

Dans les expériences de refroidissement laser, on utilise des photons (ou grains de lumière) pour exercer des forces sur les atomes : lorsqu'un atome absorbe ou émet un photon, sa vitesse est modifiée (d'une valeur nommée vitesse de recul), de sorte que la quantité de mouvement totale est conservée. Dans le cas d'atomes de césium



**5. DES ONDES LUMINEUSES** sont diffractées par un réseau régulier (en haut). William Henry Bragg et William Lawrence Bragg ont calculé pourquoi un cristal irradié par des rayons X ne diffracte que dans des directions particulières : la diffraction n'a lieu que pour les directions telles que les ondes réémises sont en phase. Comme la différence de marche entre deux rayons lumineux réémis par des plans successifs du réseau est égale à  $2d \sin \theta$ , la diffraction n'a lieu que pour les angles  $\theta$  tels que  $2d \sin \theta$  soit égal à un multiple entier de longueurs d'onde. Cet effet se retrouve pour des ondes de matière piégées dans un réseau de lumière.