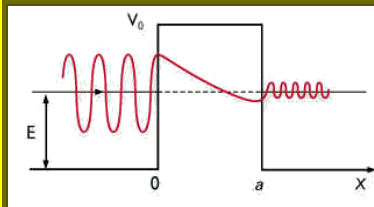
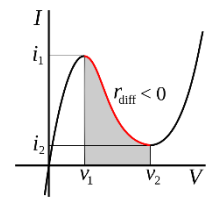


La mécanique ondulatoire permet de déterminer par le calcul les niveaux d'énergie obtenus par Bohr pour l'atome d'hydrogène. De la même manière, elle permet de prédire l'effet tunnel : une particule quantique peut passer à travers une barrière de potentiel (à condition que cette barrière soit d'épaisseur faible, en dessous du nanomètre pour les électrons). Ce phénomène permit à G. Gamov d'expliquer en 1928 la désintégration alpha : les noyaux lourds peuvent émettre spontanément des particules alpha (noyau d'hélium ionisé constitué de 2 protons et 2 neutrons). En effet, alors même que des énergies gigantesques seraient nécessaires pour vaincre l'attraction du noyau, on détecte tout de même ce phénomène. En fait, cette émission est possible par effet tunnel, ne nécessitant pas ces énergies énormes. Une loi exponentielle est trouvée théoriquement, et effectivement vérifiée expérimentalement pour un très grand nombre de noyaux. C'est grâce à la propriété ondulatoire des particules (Louis De Broglie) associée aux relations d'incertitude d'Heisenberg que l'effet tunnel est possible.

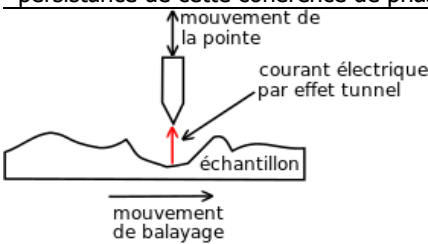


Imaginez un électron qui arrive sur un obstacle (barrière de potentiel). Si cet électron est décrit par une onde, comme pour la musique de votre voisin, il y a une petite partie cette onde qui va passer de l'autre côté de l'obstacle (voir ci-contre). Cette onde décrit une probabilité de trouver l'électron à un endroit donné. Donc ça veut dire qu'il y a une petite probabilité que l'électron traverse l'obstacle. On parle de l'effet tunnel, car tout se passe comme si une fois de temps en temps, un petit tunnel se créait dans le mur pour laisser passer notre électron.

Diode à effet tunnel : Elle est découverte en 1958 par **Léo Esaki**. Il s'agit d'une diode PN fortement dopée présentant une résistance différentielle négative produite par l'effet tunnel. La diode tunnel offre de grandes perspectives dans le domaine des oscillateurs UHF / SHF (Ultra / Super Hautes Fréquences), par exemple la fréquence utilisée dans les fours à micro-ondes. Cependant, depuis sa découverte, les progrès des semi-conducteurs classiques permettent à ceux-ci de dépasser la diode tunnel avec les techniques conventionnelles. L'intégration d'une diode à effet tunnel dans une diode laser peut améliorer les performances du laser. On parlera alors de jonction tunnel.

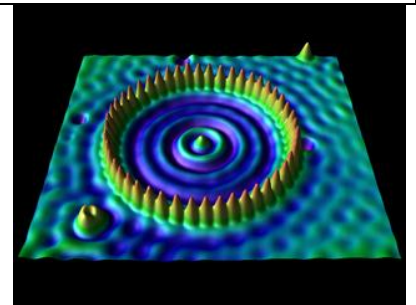


Effet Josephson : Cet effet se manifeste par l'apparition d'un courant entre deux matériaux supraconducteurs séparés par une couche faite d'un matériau isolant ou métallique non supraconducteur. On en distingue deux types : continu et alternatif. Ces deux effets ont été prédits par **Brian David Josephson** en 1962 à partir de la théorie BCS (explication de la supraconduction par les paires de Cooper). Ces travaux lui ont valu le prix Nobel de physique en 1973, avec Leo Esaki et Ivar Giaever. Bien que les paires de Cooper ne puissent pas exister dans un isolant ou un métal non supraconducteur, si la couche qui sépare les deux supraconducteurs est suffisamment mince, elles peuvent la traverser par effet tunnel et garder leur cohérence de phase. C'est la persistance de cette cohérence de phase qui donne lieu à l'effet Josephson.



La plus belle application est certainement le microscope à effet tunnel.

En approchant une pointe conductrice taillée très finement (quelques atomes seulement) à proximité ($\sim 5 \text{ \AA}$) d'une surface conductrice, et en imposant une différence de potentiel de quelques V, on mesure un courant de quelques nA. Le nombre d'électrons qui passent à

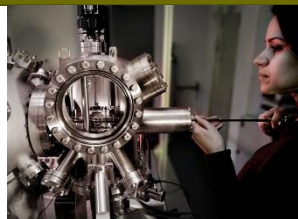
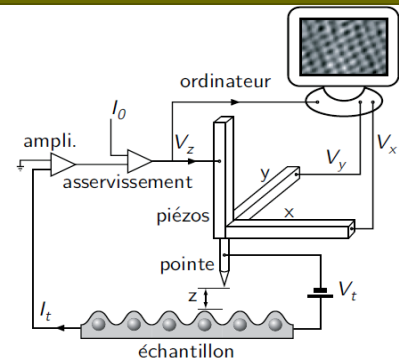


Atomes de cuivre confinés à l'intérieur d'un enclos quantique de 48 atomes de fer (14 nm). Les électrons se comportent comme des ondes.

travers la barrière de potentiel (ici : c'est le vide entre les deux électrodes conductrices) diminue de manière exponentielle avec la largeur de la barrière. En analysant le signal d'erreur d'un asservissement sur le courant passant dans le circuit, on peut avoir accès à une cartographie très précise de la surface mesurée (résolution de l'ordre de $0,1 \text{ \AA}$ en vertical, et de l'ordre de 5 \AA en horizontal). Attention, tout cela doit se passer dans une atmosphère neutre (diazote, hélium) ou dans un vide poussé.

Les difficultés de réalisation d'un microscope à effet tunnel :

- ✦ Réalisation de la pointe (tungstène, platine) : par électroérosion.
- ✦ Déplacement de la pointe : grossier par moteur pas-à-pas, fin par piézo-céramiques qui se déforment sous l'effet des tensions V_x , V_y et V_z .
- ✦ Régulation de la position Z de la pointe : par mesure du courant tunnel I_t de quelques nA qui agit sur V_z .
- ✦ Conversion des mesures en image : par ordinateur.
- ✦ Éviter toute vibration, vibration du bâtiment, petit tremblement de terre, ondes sonores : système d'amortissement à grande inertie avec ressorts suivis de deux amortisseurs pneumatiques
- ✦ L'échantillon doit conduire l'électricité.



Le microscope à effet tunnel est une technique développée dans les laboratoires d'IBM à Zurich par Gerd Binnig (allemand) et Heinrich Rohrer (suisse), prix Nobel de Physique en 1986. Il permet à la fois l'imagerie d'une surface conductrice (topographie) et la mesure de ses propriétés électroniques (spectroscopie), plus précisément de sa densité d'états locale. Le microscope à effet tunnel a précédé tous les autres microscopes en champ proche, plus modernes, comme le microscope à force atomique (AFM) et le microscope optique en champ proche.