

À travers le miroir

Les métaux font de bons miroirs : ils contiennent une myriade de petites antennes, les électrons libres, qui réémettent le signal reçu.

Quand Narcisse vit son reflet dans la fontaine, il s'admira si longtemps, qu'il tomba dans l'eau et se noya. La réflexion lui avait coûté la vie... Pendant l'Antiquité, d'habiles artisans polirent avec soin des miroirs en argent ou en bronze massifs. Cette technique perdura jusqu'à ce qu'on apprenne enfin à déposer une couche métallique sur le verre, au XIV^e siècle.

Les métaux, tous de bons conducteurs électriques, sont aussi de bons réflecteurs. Pourquoi? Parce qu'ils contiennent un grand nombre d'« électrons libres ». Les électrons libres d'un morceau de métal plongé dans un champ électrique statique subissent une force, qui les met en mouvement. Si le métal fait partie d'un circuit électrique, un courant en résulte ; si le métal est isolé, les électrons libres sont confinés à l'intérieur de son volume et ceux qui parviennent en surface s'y accumulent et créent un champ électrique jusqu'à ce que, à l'intérieur du matériau, ce champ créé par les électrons compense le champ électrique statique.

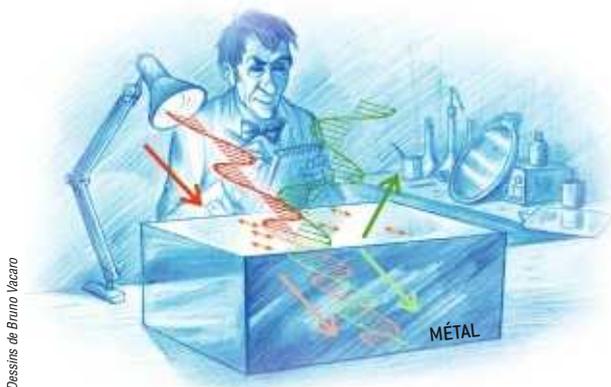
Un phénomène analogue se produit quand un métal reçoit de la lumière. Cette onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propagent et oscillent de concert. Le champ électrique de l'onde fait osciller les électrons libres qu'il rencontre à la surface. Or, l'accélération de toute charge électrique se traduit par l'émission d'une onde électromagnétique. Ainsi, les électrons libres

superficiels se comportent comme de minuscules antennes qui reçoivent et réémettent la lumière. À l'intérieur du métal, l'onde électromagnétique réémise compense l'onde incidente, de sorte que, comme avec un champ statique, le champ électrique total s'annule : le métal n'est pas transparent. En émettant vers l'extérieur, les électrons libres superficiels réfléchissent l'onde incidente. Si la surface du métal est plane, le signal émis par l'ensemble des électrons oscillants est le symétrique, par rapport à l'interface, du signal incident, « son image » obtenue par interférence constructive des émissions électroniques individuelles.

Les vibrations des électrons

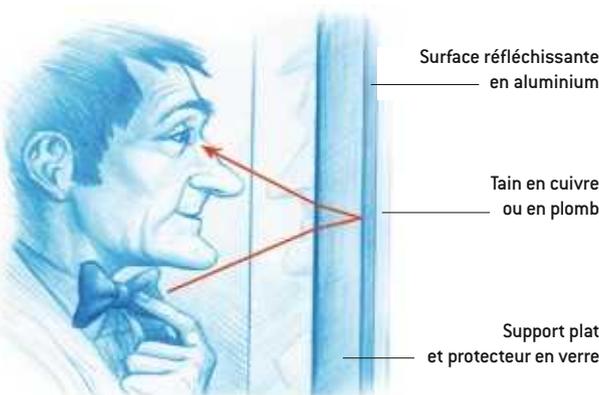
Les meilleurs conducteurs ne font pas pour autant les miroirs les plus fidèles. Plus conducteur que l'argent, l'or réfléchit mal le bleu, d'où sa couleur jaune. Le phénomène est général : les conducteurs ne réfléchissent que les ondes de fréquences inférieures à une limite spécifique, liée à la façon dont les électrons peuvent osciller au sein du métal. À l'équilibre, les électrons libres sont répartis uniformément dans tout le volume métallique où leurs charges négatives compensent partout les charges positives des ions du cristal. Ainsi, les intenses forces électrostatiques qu'elles exercent les unes sur les autres se compensent.

Si l'on déplace légèrement quelques électrons libres au sein du matériau, le déséquilibre local de charge induit des forces électriques qui « rappellent » les électrons vers la position d'équilibre. Les électrons, comme la masse d'un pendule, oscillent à une fréquence caractéristique du matériau, la fréquence de coupure nommée aussi « fréquence de plasma ». Tant que la fréquence lumineuse est inférieure à cette fréquence, le champ électrique de l'onde force les électrons libres à osciller. En revanche, ceux-ci ne réagissent plus quand la fréquence excède la fréquence

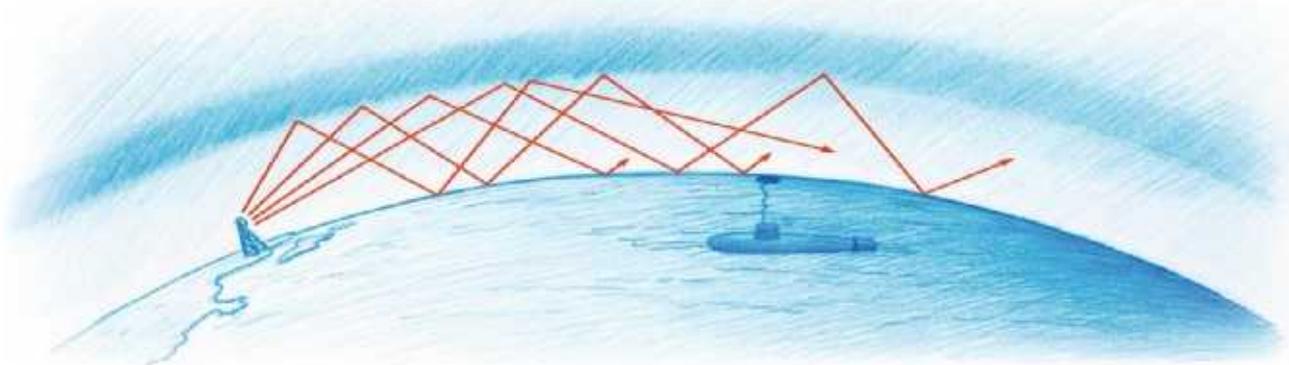


Dessins de Bruno Vacaro

Une onde lumineuse (en rouge) fait vibrer les électrons libres de la surface de métal (petites flèches orange). À faible fréquence, l'onde émise (en vert) par la combinaison des électrons compense exactement l'onde incidente dans le matériau, aucune lumière ne se propage dans le métal. À plus haute fréquence, les électrons



ne peuvent plus suivre les variations du champ électromagnétique de l'onde lumineuse et une partie haute fréquence de la lumière traverse le métal. Les miroirs du commerce comportent une couche réfléchissante d'aluminium insérée entre une couche transparente de verre parfaitement plate et une couche opaque métallique.



de coupure et alors la propagation de l'onde se poursuit à travers le matériau, car elle n'est plus réfléchi par les vibrations des électrons libres : à ces fréquences élevées, le matériau est transparent.

Lord Rayleigh a montré, en 1906, que la fréquence de coupure est proportionnelle à la racine carrée de la densité des électrons libres. Dans l'ionosphère située entre 60 et 300 kilomètres d'altitude, les molécules d'air sont ionisées, la densité électronique y varie de 100 millions à 1 million d'électrons par centimètre cube et la fréquence de coupure de 600 kilohertz à 60 mégahertz. La lumière visible, dont les fréquences sont beaucoup plus grandes, traverse facilement l'ionosphère. En revanche, les ondes radio de fréquences inférieures à 60 mégahertz s'y réfléchissent comme sur un miroir et rebondissent tout autour de la planète : c'est ce qui nous permet d'écouter la radio en ondes courtes. La Marine exploite cette propriété pour communiquer avec ses sous-marins stratégiques qui doivent recevoir les ordres nucléaires à l'aide d'antennes qui opèrent à quelques dizaines de kilohertz.

La fréquence de coupure

Seuls les milieux qui présentent des densités électroniques très élevées, tels les métaux, réfléchissent dans le visible. L'argent et plusieurs autres métaux courants, tels l'aluminium ou l'étain, contiennent environ 10^{23} électrons libres par centimètre cube, ce qui leur confère une fréquence de coupure dans l'ultraviolet. Ces métaux réfléchissent parfaitement toute la lumière visible. Partout où ils sont polis, ils prennent un aspect brillant : l'éclat métallique.

Les métaux qui présentent la même densité d'électrons libres que l'argent devraient faire aussi de bons miroirs dans le visible. Cependant, certains d'entre eux, tels l'or ou le cuivre, renferment, en plus de leurs électrons libres, de très nombreux « électrons quasi libres ». Ces électrons faiblement liés aux noyaux du cristal métallique interagissent aussi avec la lumière, ce qui abaisse la fréquence de coupure. Ainsi, dans le cas de l'or ou du cuivre, celle-ci se trouve au milieu du spectre visible. De fréquences plus élevées, les ondes de longueurs d'onde courtes (bleu, violet) sont transmises vers l'intérieur du métal où elles sont progressivement absorbées. Éclairés en lumière blanche, ces métaux prennent les couleurs chaudes des grandes longueurs d'onde (jaune orangé) qui sont réfléchies. Toutefois, s'il jaunait la lumière visible, l'or réfléchirait 99 pour

La Marine communique avec ses sous-marins en mission à l'aide d'ondes de basses fréquences qui se réfléchissent sur l'ionosphère, la terre ou la mer, parce que ces milieux sont conducteurs. Les sous-marins reçoivent les messages en faisant remonter à la surface une antenne flottante.

cent du rayonnement infrarouge. Cette propriété a été mise à profit pour concevoir les casques des astronautes des missions *Apollo*. Le mince film d'or qui les recouvrait renvoyait la quasi-totalité du rayonnement infrarouge, ce qui limitait l'échauffement de l'intérieur du casque. Ce film était aussi assez mince pour être transparent dans le visible : ces astronautes se présentaient à la Lune derrière un miroir sans tain.

Quelle épaisseur d'argent ou d'aluminium déposer pour faire un miroir ? Si ces métaux étaient des conducteurs parfaits, cette épaisseur serait nulle. Toutefois, ce sont des conducteurs réels : le mouvement des électrons libres y est freiné par des collisions avec les défauts ou les impuretés du réseau cristallin. Causes de la résistance électrique, ces frictions microscopiques limitent aussi l'amplitude des mouvements des premiers électrons que rencontre l'onde, et le champ qu'ils émettent ne compense pas complètement l'onde incidente, qui pénètre donc dans le métal. Les électrons plus profonds participent aussi à la réflexion.

Plus la résistance électrique est grande, moins les électrons sont efficaces et plus la lumière pénètre profondément. Nommée « épaisseur de peau », la profondeur maximale de pénétration de l'onde est proportionnelle à la racine carrée du produit de la résistivité du métal par la longueur d'onde. Dans le cas des fréquences de la lumière visible (de l'ordre de $5 \cdot 10^{14}$ hertz) et pour un très bon conducteur comme l'argent ou le cuivre, cette épaisseur est de l'ordre de trois nanomètres, soit quelques dizaines de distances interatomiques. Ainsi des couches d'argent épaisses d'un vingtième de micromètre suffisent pour obtenir un bon miroir.

Avec un piètre conducteur comme l'eau de mer et les grandes longueurs d'onde, l'épaisseur de peau atteint une quinzaine de mètres. C'est heureux pour les sous-mariniens qui peuvent capter les messages qui leur sont destinés sans trop s'approcher de la surface. Si, par précaution, ils souhaitent rester en profondeur, il leur suffit de faire remonter une antenne flottante.

Eugene HECHT, *Optics, quatrième édition, Addison-Wesley, 2002.*

Paul COMBES, *Micro-ondes, Dunod, 1997.*