

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie,
à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

VOIR LA NUIT COMME EN PLEIN JOUR

**Bien voir quand il y a très peu de lumière est possible...
à condition de s'équiper d'appareils de vision nocturne,
des systèmes amplificateurs qui transforment
chaque photon en une cascade d'électrons.**

Lorsque la nuit tombe et que nous peinons à distinguer quoi que ce soit, les lynx, chouettes et autres animaux noctalopes voient, eux, parfaitement leur environnement. Leurs yeux sont capables de tirer profit du peu de lumière qui reste. Mais nous autres humains sommes capables de les imiter, grâce à des lunettes, jumelles ou caméras ultrasensibles qui exploitent, à l'aide de systèmes électroniques, le moindre photon disponible.

UN ŒIL TRÈS SENSIBLE

Afin de comprendre comment fonctionnent ces appareils, faisons d'abord un détour par le mécanisme de la vision humaine (ou animale). En pleine nuit, lorsque notre œil est parfaitement habitué à l'obscurité et que nous observons le ciel par une nuit sans lune, il suffit qu'un seul photon atteigne notre rétine pour produire un signal nerveux interprétable par notre cerveau. Cette sensibilité nous permet de deviner la présence d'étoiles très peu brillantes dans le ciel et, plus généralement, la présence d'une source lumineuse très faible. Mais elle est

insuffisante pour distinguer des objets plongés dans la pénombre, par exemple.

Ce contraste entre une haute sensibilité à la lumière et l'incapacité de distinguer les formes dans l'obscurité profonde tient à la physiologie des yeux humains, plutôt adaptés à la vision de jour et en couleur.

La partie centrale de notre rétine est couverte de cônes, des photorécepteurs dont la déclinaison en trois types est à l'origine de notre vision trichromatique des couleurs. Tout le reste est tapissé de bâtonnets, d'un seul type, qui conduisent à une vision monochrome. Comme la surface de collecte des bâtonnets est bien plus grande que celle des cônes, ce sont eux qui assurent notre vision en situation de faible intensité lumineuse.

Le fonctionnement de ces bâtonnets est instructif. Quand un photon incident est absorbé par la rhodopsine, un pigment photosensible présent dans la cellule bâtonnet, il entraîne dans 70 % des cas le changement de conformation d'une molécule, lequel déclenche des réactions en chaîne qui vont conduire à la fermeture d'un grand nombre de canaux ioniques de la paroi cellulaire. Chaque

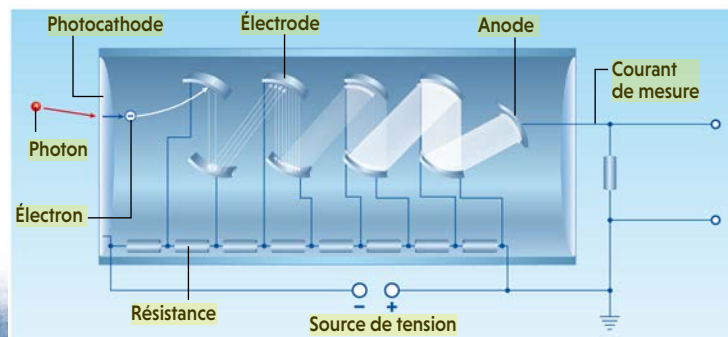
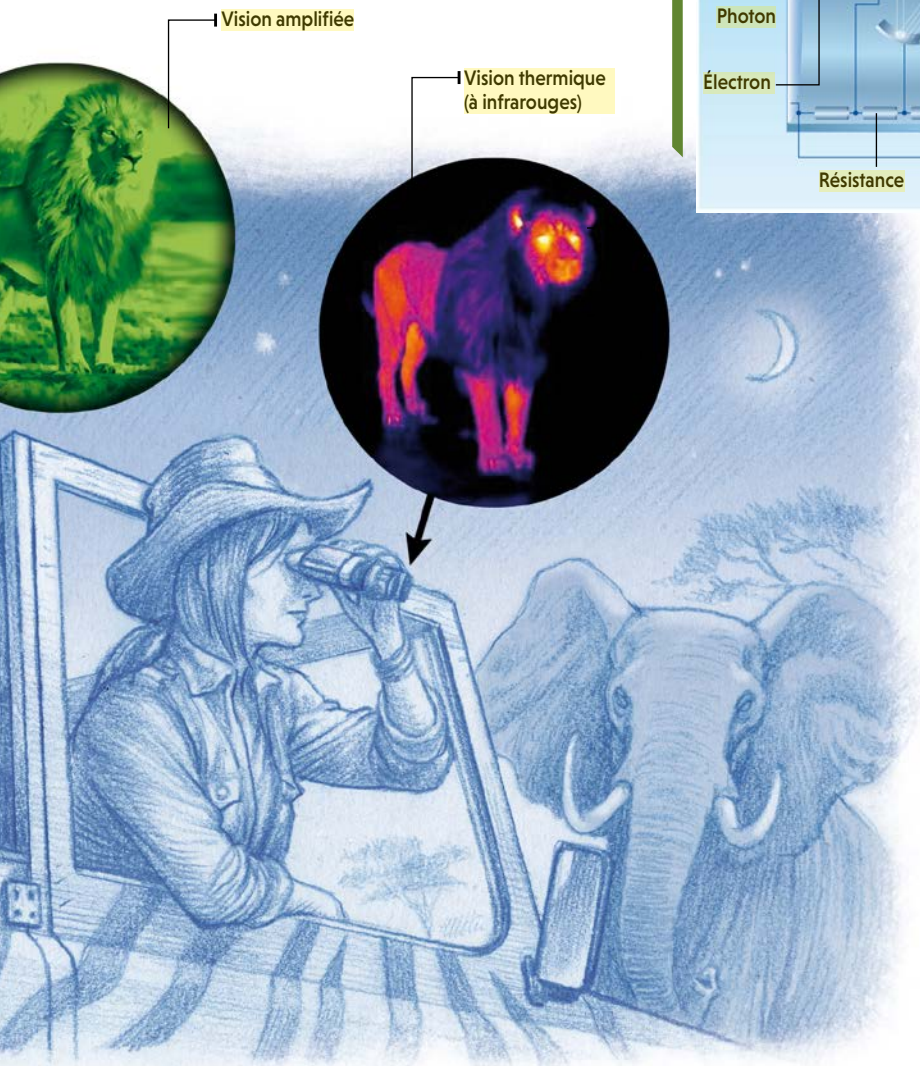


étape de ce processus en cascade implique la formation de molécules qui catalysent chacune plusieurs dizaines de réactions de l'étape suivante.

L'arrivée d'un seul photon bloque ainsi le passage, à travers la paroi de la cellule réceptrice, de près de 100 millions d'ions en une fraction de seconde. C'est assez pour donner naissance à un signal nerveux d'une intensité électrique d'environ un demi-picoampère (soit $0,5 \times 10^{-12}$ ampère).

CONVERTIR LES PHOTONS PAR EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

En s'inspirant de ces mécanismes, ne serait-il pas possible de réaliser un dispositif qui traduise l'arrivée d'un photon en



MULTIPLIER LES ÉLECTRONS

Dans un tube photomultiplicateur classique, chaque photon incident qui frappe la photocathode est converti, par effet photoélectrique, en un électron. Ce dernier est accéléré par la différence de potentiel avec l'électrode suivante et, lorsqu'il atteint celle-ci, déclenche l'éjection d'électrons supplémentaires. Et ainsi de suite, les électrons sont multipliés en cascade, jusqu'à une anode qui recueille un nombre d'électrons suffisant pour constituer un signal électrique mesurable.

Avec des jumelles à vision amplifiée, toute la scène observée est visible. Ce n'est pas le cas avec un appareil à infrarouges, qui ne visualise (en fausses couleurs) que des contrastes de température.

un signal électrique mesurable? C'est exactement ce que fait un photomultiplicateur. La première étape est de convertir le photon incident en un électron. À cette fin, on dispose de l'effet photoélectrique: lorsqu'un photon arrive sur une plaque métallique, il peut être absorbé et éjecter un électron du matériau si l'énergie du photon est supérieure à un seuil, nommé travail de sortie, qui quantifie la force du lien entre les électrons libres du métal et le réseau cristallin de ce dernier.

Pour de l'aluminium ou du zinc, ce seuil est de l'ordre de 4 électronvolts, ce qui correspond à de la lumière ultraviolette. Si l'on veut détecter de la lumière visible (de l'ordre de 2 électronvolts par

photon), il faut trouver des matériaux ayant un travail de sortie plus faible. Le premier matériau utilisé à cette fin était, en 1929, un composé d'argent, d'oxygène et de césium (Ag-O-Cs). Il permet de détecter la lumière de longueur d'onde comprise entre 300 nanomètres et 1200 nanomètres, soit tout le spectre visible ainsi que le proche infrarouge.

On a depuis développé de nombreux matériaux adaptés à différentes parties du spectre. La plupart font appel à des atomes alcalins (sodium, potassium, césium...) ou à des semi-conducteurs (tellure, indium, arsenic, gallium...). En pratique, on dépose une mince couche de ces matériaux sur la paroi en verre d'une cellule à vide.

Que faire alors de cet unique électron arraché au métal et qui se déplace désormais dans le vide? On l'accélère et on le précipite sur une première électrode. Avec une tension accélératrice de l'ordre d'une centaine de volts, il acquiert suffisamment d'énergie (environ 100 électronvolts...) pour que l'impact sur l'électrode arrache 5 électrons à cette dernière. On répète alors le processus: ces électrons sont de nouveau accélérés vers ➤

Les auteurs ont récemment publié:
En avant la physique!, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



une seconde électrode et produisent chacun 5 nouveaux électrons. Et ainsi de suite une dizaine de fois. Dans un photomultiplicateur à 12 étages, le nombre final d'électrons est de l'ordre de 5^{12} , soit 10^8 , le même ordre de grandeur que la charge électrique mobilisée dans l'absorption d'un photon par une cellule rétinienne. Cette charge est suffisante pour être transportée et traitée électroniquement.

La solution semble donc acquise... à condition de ne pas se préoccuper de l'encombrement d'un photomultiplicateur, qui fait quelques centimètres de long et de large. Et tout cela pour l'équivalent d'un seul pixel! Heureusement, depuis les années 1970, il existe bien plus petit: les galettes de microcanaux, qui équivalent à des réseaux de photomultiplicateurs de taille micrométrique.

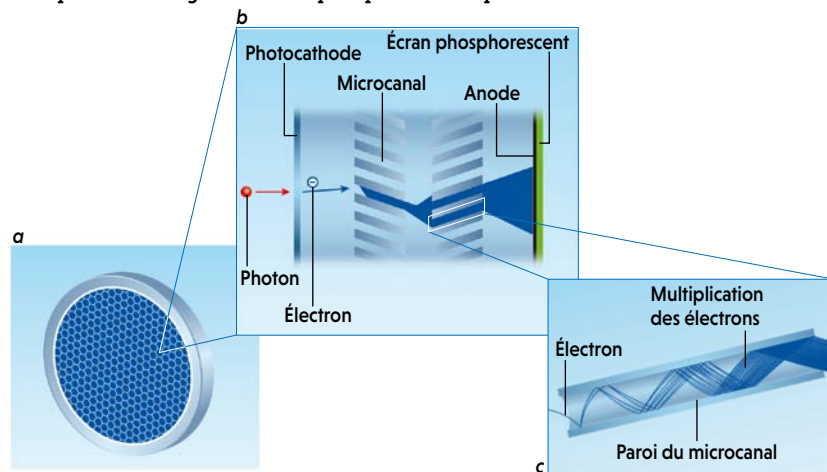
MINIATURISER LE PHOTOMULTIPLIEUR... ET LE MULTIPLIER!

Ces galettes sont constituées d'un matériau de résistance électrique élevée, épais de 2 millimètres et percé en biais d'un réseau de canaux microscopiques. Ceux-ci ont un diamètre d'une dizaine de micromètres et sont distants les uns des autres d'une quinzaine de micromètres. Les deux faces de la galette sont alors portées à une différence de potentiel de plus de 1000 volts. Étant donné la forte résistance électrique du matériau, le courant électrique qui circule le long de la paroi de chaque microcanal est très faible, et le potentiel électrique y augmente linéairement d'une extrémité à l'autre.

C'est pourquoi le microcanal se comporte comme la version continue des étages d'un photomultiplicateur. Lorsqu'un électron arrive perpendiculairement sur la face avant de la galette, il a de bonnes chances de s'engouffrer dans un microcanal. Comme celui-ci est percé en biais, l'électron frappe forcément la paroi en début du canal. S'il a été préalablement accéléré, son énergie est suffisante pour qu'il arrache plusieurs électrons. Ces derniers, en raison de l'intense champ électrique régnant dans le canal, prennent de la vitesse et viennent frapper la paroi un peu plus loin. Chacun d'eux arrache à son tour plusieurs électrons; et ainsi de suite. On retrouve le mécanisme de photomultiplication, avec un gain de l'ordre de 10 000 entre l'entrée et la sortie. En plaçant deux galettes l'une après l'autre, on peut atteindre un gain total de 100 millions sur une épaisseur de quelques millimètres.

LES GALETTES DE MICROCANNAUX

Ces dispositifs (a), dont la taille avoisine celle d'une pièce de monnaie pour une épaisseur d'à peine quelques millimètres, sont percés de plusieurs millions de canaux microscopiques. Ceux-ci sont répartis en deux couches parallèles et sont orientés de biais par rapport à l'axe de la galette (b). Chaque microcanal, où la tension électrique sur les parois augmente linéairement d'une extrémité à l'autre, se comporte comme la version continue d'un tube photomultiplicateur (c). Le photon incident est converti par effet photoélectrique en un électron; ce dernier pénètre dans un microcanal dont il heurte la paroi et subit ainsi une multiplication (qui se poursuit dans la seconde couche de microcanaux); l'ensemble des électrons ainsi produits atteignent l'écran phosphorescent qui les transforme en lumière.



Pour compléter le dispositif, il suffit de placer en avant de cette galette un matériau qui émet des électrons par effet photoélectrique, et à l'arrière un mince écran de phosphore qui émet de la lumière là où frappent des électrons. Les électrons étant canalisés par les microcanaux, l'image lumineuse formée sur l'écran phosphorescent est la copie amplifiée de l'image incidente. Les lunettes, caméras et autres jumelles de vision nocturne sont ainsi composées d'un objectif, qui forme une image sur la face avant du dispositif d'amplification lumineuse, et d'un oculaire, qui permet de visualiser l'image formée sur l'écran de phosphore.

Évidemment, avec ces mécanismes, on obtient toujours une vision nocturne monochrome. Mais ce défaut n'est peut-être pas définitif: la société française Photonis commercialise depuis peu des caméras munies d'un nouveau type de capteur à base de CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*, des composants de même type que ceux des appareils photo), où un quart des pixels servent à mesurer la couleur tandis que les trois autres quarts fournissent l'image. Un algorithme reconstitue alors une image colorisée. La contrepartie est que la sensibilité des capteurs à CMOS n'égale pas encore celle des galettes de microcanaux: ces caméras ne sont pas faites pour des nuits trop noires. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. G. Wright,
The Photomultiplier Handbook, Oxford University Press, 2017.

M. Lampton,
L'intensificateur d'images à microcanaux,
Pour la Science, n° 51,
pp. 46-57, janvier 1982.