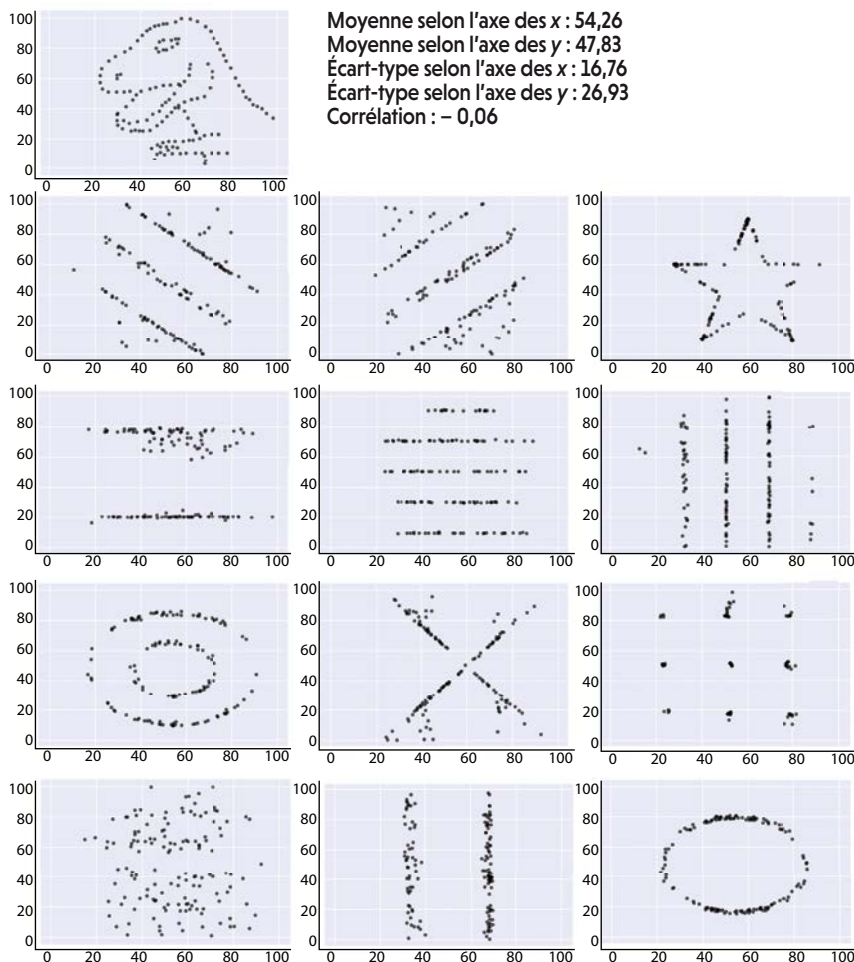


MÊMES PARAMÈTRES... ET POURTANT SI DIFFÉRENTS

4

Nous pensons en général que si des données ont des paramètres statistiques proches (moyennes, écarts-types, etc.), elles se ressemblent nécessairement. Les paramètres statistiques, pensons-nous, sont comme des versions compressées des séries de données. Justin Matejka et George Fitzmaurice prouvent graphiquement que c'est faux. À l'aide d'une méthode qui leur permet de créer facilement des séries ayant exactement les mêmes paramètres statistiques, ils ont notamment produit ces 13 schémas, utiles à tous ceux qui souhaitent prendre conscience de notre fragile compréhension intuitive du hasard et des statistiques.

Il s'agit de graphiques de séries de couples de nombres (x, y) , qui apparaissent très différents. Pourtant, d'une série à l'autre, les 5 paramètres suivants sont les mêmes : moyenne des x , écart-type des x , moyenne des y , écart-type des y , corrélation entre les x et les y . Lorsque la corrélation entre les x et les y est parfaite, ce type de schéma est une droite. (Voir J. Matejka et G. Fitzmaurice, « Same stats, different graphs : Generating datasets with varied appearance and identical statistics », *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1290-1294, ACM, 2017.)



> toujours en escadrille!... Certaines analyses tentent d'en identifier l'origine en parlant d'une « attente excessive d'étalement » (voir mon article « Notre vision du hasard est bien hasardeuse », *Pour la Science* n° 293, mars 2002) : notre intuition nous souffle à tort que, par exemple, les dates des accidents d'avion doivent être régulièrement espacées, alors que les statistiques nous montrent autre chose.

Cette attente excessive d'étalement a été clairement analysée dans les cas précis des accidents d'avions par Élise Janvresse et Thierry de la Rue, de l'université de Rouen (voir l'encadré 3 page 111).

DES SÉRIES TRÈS DIFFÉRENTES, MAIS AYANT LA MÊME STATISTIQUE

Notre bon sens est défaillant pour traiter les probabilités et nous sommes surpris dans des cas où il n'y a pas lieu de l'être. Utiliser le mot « coïncidence » n'explique rien ou alors cela introduit des idées étranges comme la synchronicité de Carl Gustav Jung ou les champs morphiques de Rupert Sheldrake, dont les scientifiques ont vainement cherché à prouver l'existence (voir par exemple www.sceptiques.qc.ca/dictionnaire/).

Cette faiblesse de notre esprit à percevoir correctement les probabilités a encore récemment été mise en évidence. On est tenté de penser que si des données ont des paramètres statistiques proches, elles doivent nécessairement se ressembler ; or Justin Matejka et George Fitzmaurice, de la société Autodesk Research à Toronto, ont créé délibérément des exemples magnifiques montrant que c'est faux.

Pour engendrer leurs séries, ils ont mis au point une technique qui leur permet de jouer facilement avec les formes des graphes créés. Ainsi, la figure de l'encadré 4 ci-contre visualise une collection de 13 séries de couples de nombres (x, y) qui, malgré leurs graphes très différents (chaque couple (x, y) représentant un point du plan), ont les mêmes 5 paramètres suivants : moyenne des x , écart-type des x , moyenne des y , écart-type des y , corrélation entre les x et les y .

SIMPLE ET INATTENDU

Toujours afin de comprendre et de classifier les situations où notre esprit s'étonne alors qu'il ne devrait pas, détaillons à présent un cas moins connu, car lié à une théorie assez récente. La mauvaise compréhension de ce qui est probable, car simple, conduit à percevoir certains événements comme étonnants alors qu'ils ne le sont pas, et donc à croire être en présence de coïncidences miraculeuses sans bonne explication, alors que la situation est banale.

La notion la plus générale de simplicité est celle qui provient de la théorie algorithmique de l'information. Comme nous n'en avons pas

BIBLIOGRAPHIE

T. Vigen, **Spurious Correlations**, Hachette Books, 2015.

F. Messerli, **Chocolate consumption, cognitive function, and Nobel laureates**, *The New England Journal of Medicine*, vol. 367(16), pp. 1562-1566, 2012.

S. Young et A. Karr, **Deming, data and observational studies**, *Significance*, vol. 8(3), pp. 116-120, 2011.

H. Zenil et J.-P. Delahaye, **On the algorithmic nature of the world**, dans G. Dodig-Crnkovic & M. Burgin (éds.), *Information and Computation*, World Scientific, 2010 (<https://arxiv.org/abs/0906.3554>).

H. White, **A reality check for data snooping**, *Econometrica*, vol. 68(5), pp. 1097-1126, 2000.

toujours une bonne compréhension, cela nous conduit à voir des choses complexes et inattendues quand il n'y a en fait que des choses simples. Cette théorie algorithmique de l'information, ou théorie de la complexité de Kolmogorov, mesure la complexité d'un objet par la taille du plus petit programme qui l'engendre. Elle s'applique aux objets numériques, ou susceptibles d'être représentés numériquement, tels que les images, les sons, les films, et à la plupart des objets du monde réel, si l'on ne prend en compte que leur apparence.

La théorie suggère que parmi les objets utilisant le même nombre de bits d'information (par exemple des images d'un million de pixels), les plus simples, c'est-à-dire ceux ayant la plus faible complexité de Kolmogorov, sont ceux qu'on rencontrera le plus fréquemment. Cela découle d'un théorème de Leonid Levin d'après lequel plus la complexité de Kolmogorov d'un objet ou d'une structure est élevée, moins il est probable que cet objet ou cette structure soit produite par une machine prise au hasard.

Si l'on pense que le monde physique est une sorte de grand système d'interactions menant une forme de calcul qui produit les objets et structures qu'on y rencontre, il est alors naturel de penser que les objets présents dans le monde y apparaissent avec une probabilité liée à leur mesure de Levin, et donc que les plus simples au sens de la complexité de Kolmogorov sont les plus fréquents. Des détails sur cette idée sont donnés dans un article d'Hector Zenil et moi-même (*voir la bibliographie*). Notons qu'il s'agit d'une idée conforme à l'intuition: dans une image numérique en noir et blanc représentant une photo prise du monde réel, on a plus de chances de rencontrer la série de 10 pixels blancs, *bbbbbbbbbb*, qui a une faible complexité de Kolmogorov, que la série précise *bmbmbmbmbb* dont la complexité de Kolmogorov est supérieure.

Une étoile est sphérique, comme le sont beaucoup de fruits. La section d'un tronc d'arbre est circulaire, comme le sont aussi les roues qui équipent nos véhicules. Une tige de blé est parfaitement rectiligne, comme les arêtes d'un cristal. La surface d'un lac est plane comme l'est, regardée de près, la peau de nombreux animaux. Tout cela correspond à des formes simples au sens de la théorie de Kolmogorov. Dans ces cas-là, nous ne cherchons donc pas à trouver une origine commune à deux objets sphériques, ou rectilignes, ou plans. Les formes simples n'ont pas nécessairement une origine commune, leur simplicité suffit à expliquer qu'on les retrouve partout. Jusqu'ici, tout va bien.

En revanche, certains objets ou formes que la théorie de la complexité de Kolmogorov identifie comme simples ne sont pas perçus comme tels par notre jugement immédiat. Une



Certains coquillages arborent à leur surface des motifs très semblables à la figure fractale dénommée triangle de Sierpiński, obtenue en enlevant d'un triangle un triangle central et en répétant indéfiniment l'opération (à droite). Ces motifs sont perçus comme complexes, alors qu'ils sont algorithmiquement simples.

structure comme celle du triangle de Sierpiński (*voir la figure ci-dessus*) nous apparaît complexe alors qu'elle ne l'est pas, puisque des programmes très courts l'engendrent. Si l'on rencontre souvent cette forme dans la nature, en particulier à la surface des coquillages, c'est parce que cette structure est simple, comme le sont une sphère ou un segment de droite.

Nous ne devons donc pas nous émerveiller de ces rencontres multiples sans lien, ni surtout imaginer qu'elles proviennent d'une sorte de fonctionnement secret de l'Univers qui resterait à comprendre. Comme pour la sphère, leur simplicité est l'explication de leur fréquente apparition.

Ce qui est vrai pour le tapis de Sierpiński l'est aussi pour la suite de Fibonacci, dont certains s'émerveillent à tort qu'on la rencontre si souvent. C'est encore vrai pour le nombre d'or, qui suscite une superstition numérolgique. Cela l'est encore d'une multitude de formes fractales qui sont simples et dont on ne doit donc pas s'étonner de les rencontrer. Il est normal que les objets de faible complexité de Kolmogorov se retrouvent partout. Rechercher une explication profonde à la présence multiple de la suite de Fibonacci dans toutes sortes d'objets naturels ou artificiels est aussi naïf que rechercher une explication commune à la présence de longs segments rectilignes dans les arbres, dans les tracés dessinés par les couches géologiques, les stalagmites ou dans le ciel quand une météorite pénètre l'atmosphère terrestre.

Nous percevons facilement la simplicité de certaines formes, mais pour d'autres, il nous faut réfléchir à la théorie qui permet de comprendre la simplicité. Si nous réussissons, nous serons moins enclins à vouloir expliquer ce que nous percevons comme des coïncidences. Ici, comme pour les doubles tirages identiques au Loto, ou les courbes parallèles montrant des corrélations illusoire, nous devons éviter de rechercher des causes communes à ce qui, logiquement, n'en a pas besoin. ■

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 nyctalopes 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

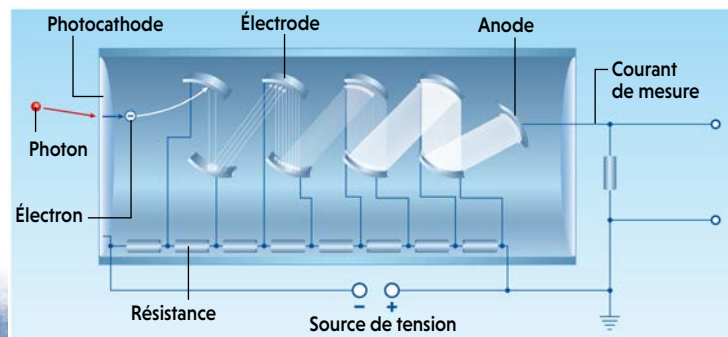
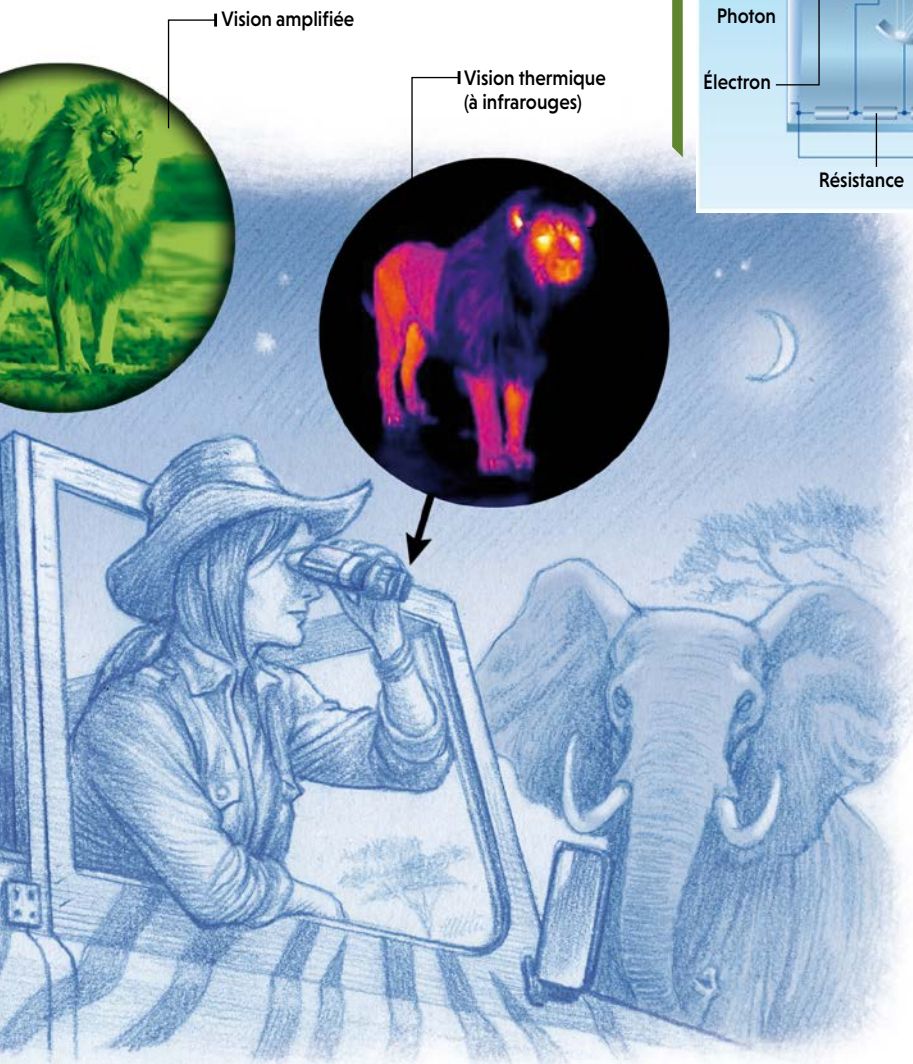


étape de ce processus en cascade implique la formation de molécules qui catalysent chacune plusieurs dizaines de réactions de l'étape suivante.

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.

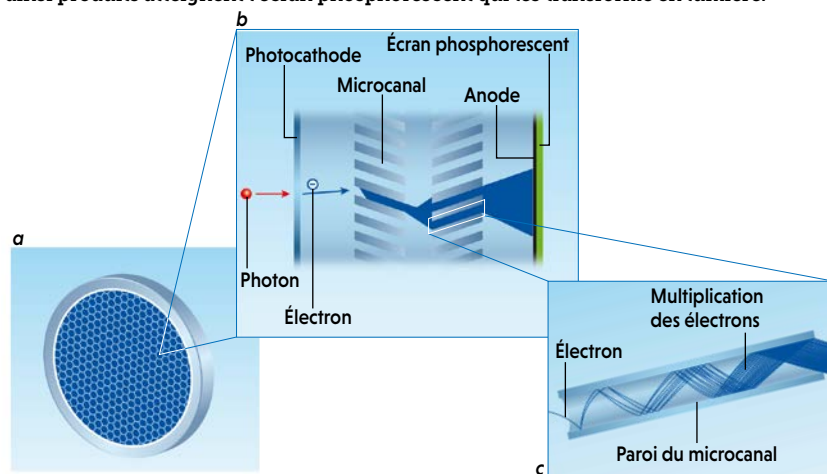
MINIATURISER LE PHOTOMULTIPLIEUR... ET LE MULTIPLIER!

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.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ

OFFRE
SPÉCIALE
40
ANS

FORMULE
INTÉGRALE
-46%



8,20€*

FORMULE
PASSION
-34%



6,50€*

FORMULE
DÉCOUVERTE
-33%



4,90€*

EN CADEAU AVEC VOTRE ABONNEMENT LE LIVRE "RELATIVITÉ ET QUANTA : UNE NOUVELLE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE..."

LHC, particules, trous noirs, cosmologie... Enfin un point clair et concis sur la dernière révolution scientifique ! Ces trois dernières années, les moissons scientifiques ont été exceptionnellement fructueuses, de la découverte du boson de Higgs à celles des ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux trous noirs massifs, et aux observations du fond cosmologique par le satellite Planck. L'humanité vient alors d'atteindre un nouveau palier dans la compréhension du monde quantique et du monde de la gravitation : nos bases théoriques, expérimentales et technologiques forment un socle scientifique solide pour aller plus loin et tenter de répondre aux nouvelles questions qui surgissent suite à ces découvertes... Enquête et mise au point sur une révolution en cours.

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ **OUI, JE M'ABONNE À POUR LA SCIENCE EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE, JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS.**

☐ **FORMULE INTÉGRALE**
12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996
+ Le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..."

8,20€
Par mois
-46%
IPV8E20K9

☐ **FORMULE PASSION**
12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries
+ Le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..."

6,50€
Par mois
-34%
PPV6E50K8

☐ **FORMULE DÉCOUVERTE**
12 n° de Pour la Science
+ Le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..."

4,90€
Par mois
-33%
DPV4E90K2

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____ @ _____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives et la valeur du livre. Vous pouvez également si vous le souhaitez acquérir séparément le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..." au prix de 10€, chaque n° de Pour la Science au tarif de 6,50€, notre n° spécial au tarif de 6,95€ et nos hors-séries au tarif de 7,50€. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/03/2018 en France métropolitaine uniquement et dans la limite des stocks disponibles. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélevement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre. Photos non contractuelles.

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

PAG17481P

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

IBAN _____

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse — 75014 Paris
N° ICS FR92ZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Merci de joindre impérativement un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire