POUR LA SCIENCE
INVISIBLE ! Quand la science dépasse la fiction
Numéro hors-série n° 112

Pour la Science

HORS-SÉRIE

La science expliquée par ceux qui la font

n° 112
L 13264 - 112 H - F: 7,90 € - RD
08.21/09.21

Roland Lehoucq
Gérald Bronner
Sophie Beltran-Bech
Marc-André Selosse



Quand la science dépasse la fiction



INVISIBLE !

Les vraies capes d'invisibilité

Comment disparaître sur internet ?

Les animaux invisibles... ou presque

L'histoire de l'encre sympathique

Édition française de Scientific American - BEL. : 9,40 € - CH : 17,10 CHF – LUX. : 8,95 € - CAN. : 13,20 $CA

AVEZ-VOUS



DES RESSOURCES QUE L'ON ÉCONOMISE QUAND ON RECYCLE ?

EN 2018, 1,3 MILLION DE TONNES
DE PAPIERS ONT ÉTÉ RECYCLÉES.
CE SONT 25 MILLIARDS DE LITRES D'EAU
ÉCONOMISÉS, L'ÉQUIVALENT
DE 8000 PISCINES OLYMPIQUES. ET ÇA,
C'EST GRÂCE À VOTRE GESTE DE TRI.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

Pour la Science HORS-SÉRIE

L'invisible et le visible

par **Loïc Mangin**
Rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

Le 18 mai 2021, la sculpture *Io sono* («Je suis»), de l'Italien Salvatore Garau, s'est vendue 15 000 euros. Particularité de l'œuvre ? Elle est invisible et n'existe que parce que son créateur, revendiqué artiste du vide, l'a décrété. Son *Bouddha en contemplation*, fait du même «matériau», avait été exposé sur la place de la Scala, à Milan. Quel est le message ? Selon l'artiste, ses sculptures invisibles sont une «parfaite métaphore de l'époque pleine de vide où nous vivons». À l'opposé du vide ainsi mis en lumière, l'invisible est un sujet cette fois très concret, et actif, qui traverse les sciences contemporaines, de la biologie à la physique quantique en passant par la sociologie et l'informatique, et les articles de ce *Hors-Série* en sont la preuve.

Et s'il est une chose qui n'est pas invisible dans ce numéro, ce sont bien les changements opérés dans sa présentation ! Tout a été repensé en profondeur pour rendre encore plus agréable la lecture sans perdre de vue l'essentiel, la rigueur du contenu. Nous espérons bien que, contrairement à ce que disait Saint-Exupéry, l'essentiel ne sera pas invisible pour vos yeux !

Ont contribué à ce numéro



Roland Lehoucq
Astrophysicien au CEA et président du festival Les Utopiales depuis 2012, il œuvre au rapprochement de l'art et de la science. Son dernier ouvrage, *Pourquoi le Soleil brille*, a paru chez Humensciences en 2020.



Marc-André Selosse
Professeur du Muséum national d'histoire naturelle à Paris, ses travaux portent sur les interactions dans le monde végétal. Il a publié *Les Goûts et les couleurs du monde* chez Actes Sud, en 2019.



Gérald Bronner
Professeur de sociologie à l'université de Paris, il s'intéresse aux ressorts de nos croyances et aux mécanismes de notre attention. Son dernier ouvrage, *Apocalypse cognitive*, a paru aux PUF en 2021.



Sophie Beltran-Bech
Maîtresse de conférences à l'université de Poitiers, dans le laboratoire Écologie et biologie des interactions, elle étudie les liens entre hôtes et parasites et leur dynamique.

SOMMAIRE

INVISIBLE !

Quand la science dépasse la fiction

01

L'invisibilité au laboratoire

p. 6 Grand témoin
Roland Lehoucq

> Dans les œuvres de fiction, l'invisibilité a toujours un coût, un prix à payer

p. 14 La folle histoire de l'encre sympathique
Kristie Macrakis
L'encre invisible eut un âge d'or, et n'a pas dit son dernier mot.

p. 22 Invisibilité en vue !
Gregory Gbur
La cape d'invisibilité de Harry Potter inspire les physiciens.

p. 30 L'informatique passe-muraille
Natalie Wolchover
L'imagerie dite « hors ligne de visée » voit derrière les murs.

p. 38 Les failles de la furtivité
François Delaveau et François Pipon
Des radars indétectables repèrent même les avions furtifs.

p. 46 Un terrain de jeu pour la SF
Roland Lehoucq et J. Sébastien Steyer
Les artistes adorent jouer avec l'idée d'invisibilité.

02

Vivre en toute discrétion

p. 52 Pour vivre heureux vivons cachés
Sophie Beltran-Bech
Des parasites sont invisibles pour le système immunitaire.

PORTFOLIO

p. 60 La ménagerie de verre
De nombreux animaux sont transparents. Ou presque…

p. 68 Se faire invisible, ou presque
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik
Pour être invisible, la transparence ne suffit pas.

PORTFOLIO

p. 74 Où est Charlie ?
Beaucoup d'animaux se fondent très bien dans le décor.

p. 82 L'essentiel est invisible pour nos yeux
Marc-André Selosse, Pierre Thomas et Bénédicte Ménez
Les microbes invisibles rendent la Terre habitable pour nous.

03

Les ambiguïtés de l'invisibilité

p. 92 Le miroir de L'Homme invisible
Sebastian Dieguez
H. G. Wells interroge la morale et nos réactions face au surnaturel.

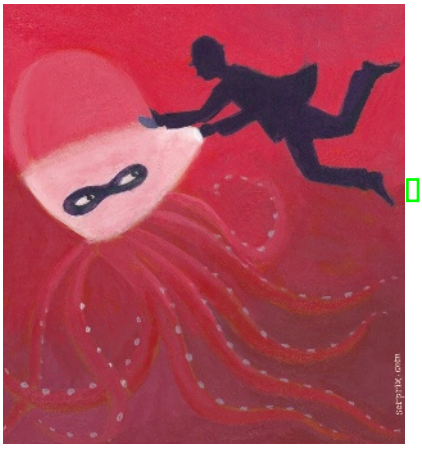
p. 100 Anonymat garanti
Tristan Allard, Louis Béziaud et Sébastien Gambs
Comment protéger au mieux les données personnelles ?

p. 108 Se masquer pour faire le mal
Gérald Bronner
Pourquoi l'anonymat favorise-t-il la violence sur internet ?

p. 112 S'effacer dans le monde quantique
Seth Lloyd
Surfer sur le web quantique sans laisser de traces.

p. 120 Les incontournables
Des livres, des expositions, des podcasts… Les coups de cœur de la rédaction.







Dans la fiction, l'invisibilité a toujours un coût

Roland Lehoucq
est astrophysicien
au service d'astrophysique
du CEA de Saclay.



La nuit n'est nuit que pour nous

René Barjavel

Commençons par la fiction, l'une de vos spécialités, où l'invisibilité est au cœur de nombreux ouvrages. Que peut-on en dire ?

D'abord, elle n'est pas si fréquente. C'est juste qu'elle est présente dans des titres phares : *L'Homme invisible*, *Le Seigneur des anneaux*, *Harry Potter*… Ensuite, une tendance qui se dégage est que l'invisibilité a un coût. Le héros de *L'Homme invisible* est tué à la fin du roman. Dans *Le Seigneur des anneaux*, on comprend que la seule façon de se débarrasser de l'anneau de Sauron, source d'invisibilité et de tous les malheurs, est que le porteur se jette volontairement avec lui dans le mont Destin, le volcan où il a été forgé. Ce sera le sort de Gollum… D'ailleurs, dans le roman, cet anneau est confié à des Hobbits, supposés trop « benêts » pour penser à mal, même dotés de ce puissant objet maléfique. Quant à *Harry Potter*, le jeune magicien ne récupère la cape d'invisibilité que parce que son père est mort.

Cette idée de prix à payer pour l'invisibilité remonte à la légende de Gygès, racontée par Platon dans *La République* : grâce à un anneau qu'il découvre, le berger Gygès peut devenir invisible. Que fait-il grâce à ce pouvoir ? Il tue Candaule, le roi de Lydie, devient tyran à la place du tyran, épouse la reine et aurait même inventé la monnaie pour remplacer le troc. Une des interprétations est que la morale et le sens de la justice trouvent leur source dans le regard des autres. Dans ces conditions, l'invisibilité est-elle si souhaitable ?

En admettant qu'elle le soit, qu'est-ce que signifie « être invisible » ?

Une chose ou un individu est invisible quand un observateur ou une machine externe n'en reçoit aucune information sous quelque forme que ce soit. On pense souvent à la lumière, mais on peut aussi penser à la lumière acoustique ou même chimique dans le cas des odeurs.

Voir un objet, c'est donc en recevoir de l'information et cela se fait de deux façons. Soit il émet directement un signal interprétable, comme un son, soit il réagit à un signal émis en le perturbant, par exemple en réfléchissant de la lumière, et est trahi par cet écho au sens large. Il y a donc nécessairement une interaction, et l'invisibilité advient quand celle-ci est impossible : un objet n'émettant que des infrarouges



m'est invisible si je n'ai aucun détecteur adapté à ce type de lumière ou bien si ce rayonnement est intercepté par un obstacle qui s'interpose. Autre exemple, les avions dits « furtifs » aux formes anguleuses sont difficilement détectables, car soit ils renvoient les ondes radars dans diverses directions sauf celle de l'observateur, soit ils les absorbent. Dans certains cas sur lesquels nous reviendrons, le signal est amené à contourner un objet et à reprendre sa course comme si de rien n'était. Là encore, pas d'interaction, pas de « visibilité ».

L'invisibilité est donc autant une affaire d'émetteur que de récepteur ?

Exactement. En les plaçant dans une sorte de matrice, un tableau à double entrée, avec d'un côté, l'émetteur émet ou pas, et de l'autre, le récepteur reçoit ou pas, on constate que parmi les quatre configurations possibles, une seule (« le premier émet, le second reçoit ») correspond à la visibilité, les trois autres conduisant à l'invisibilité.

De là, plusieurs situations donnent à… réfléchir. Ainsi, avec la lumière visible, par exemple, le principe du retour inverse s'applique : si la lumière va d'un point A à un point B, elle peut tout autant faire le trajet inverse. Conséquence : si vous voyez, vous pouvez être vu. Et un humain complètement invisible, rétines comprises, serait aveugle. C'est pour cette raison que chez les animaux marins transparents et du coup quasi invisibles, comme les méduses, l'œil (au moins) ne l'est pas.

Quelle est d'ailleurs la différence entre invisible et transparent ?

Un objet ou un animal transparent est traversé par la lumière, mais pas forcément avec un coefficient de transmission égal à 1. En d'autres termes, une partie, souvent minime, de la lumière est absorbée et surtout réfléchie. Une vitre bien propre transmet jusqu'à 95 % de la lumière, mais les 5 % restants qui rebondissent sur la surface suffisent à trahir le verre. L'invisibilité correspondrait à une transparence idéale : 100 % de transmission, 0 % de réflexion et d'absorption. Cela revient à dire que la lumière se propage dans l'objet exactement comme elle le fait dans le milieu où il se trouve : ils ont le même indice optique (ou indice de réfraction).

Les méduses dont nous parlions ne sont pas complètement transparentes, car leur indice optique n'est pas exactement égal à celui de l'eau : elles réfléchissent un peu la lumière. Et pour reprendre l'idée d'alliance entre émetteur et récepteur, certains prédateurs, notamment

© Yurii F/GettyImages

les poulpes, repèrent plutôt les méduses par la modification de la polarisation de la lumière qui les traverse, une information à laquelle nous humains sommes complètement insensibles. [La polarisation correspond à l'évolution de l'angle du plan de propagation des champs électrique et magnétique d'une onde lumineuse le long de sa trajectoire, ndlr.]

Chez les méduses et chez l'« homme invisible », outre les yeux, d'autres organes ne peuvent rester invisibles, ce sont ceux dédiés à la digestion. Un estomac invisible, mais plein, ça se voit !

Une solution serait alors de s'entourer de métamatériaux. Pouvez-vous rappeler ce dont il s'agit ?

Le principe, assez astucieux, consiste à dévier la lumière, ou d'autres types d'ondes, et à faire en sorte qu'elles évitent un certain volume. C'est une sorte de mirage ! Imaginons dans ce volume une boîte, et à l'extérieur deux individus, l'un d'un côté qui l'éclaire et l'autre, à l'opposé, qui regarde le précédent. Avec une boîte normale, les deux observateurs la repèrent facilement, que ce soit par la réflexion, la diffusion ou l'obstruction des rayons lumineux. Avec une boîte cernée de métamatériaux : celui qui éclaire voit son faisceau lumineux partir éclairer l'observateur, et celui-ci ne voit qu'un faisceau lumineux émis par une lampe exactement comme s'il avait été tout droit. Les deux personnages ne peuvent que conclure à l'absence d'objet entre eux deux. Une telle boîte est idéale pour jouer à cache-cache !

Est-ce absurde de comparer cette déviation de la lumière au phénomène des lentilles gravitationnelles ?

Même si l'histoire a emprunté d'autres chemins, le rapprochement entre gravitation et électromagnétisme est pertinent. En relativité générale, la géométrie de l'espace-temps est imposée par la distribution de masse et d'énergie. Le mouvement naturel suit une géodésique de l'espace-temps : c'est une ligne droite en l'absence de toute masse et une orbite dans le voisinage du Soleil par exemple. À partir des équations d'Einstein, on peut ainsi, connaissant les caractéristiques de notre étoile, calculer les orbites des planètes. L'inverse est tout aussi possible : déterminer la distribution de masses de façon à obtenir une géométrie particulière, par exemple celle correspondant à un trou de ver, c'est-à-dire un « tunnel » entre deux régions distinctes de l'espace-temps.

Transposées à la lumière, les équations d'Einstein deviennent celles de Maxwell et la relativité générale, la théorie de l'électromagnétisme. La question du trou de ver est alors : dans un milieu, non homogène et non isotope, peut-on imaginer une distribution d'indices optiques de façon que tous les rayons lumineux évitent totalement une zone de l'espace ? En un mot, une cape d'invisibilité est-elle possible ? C'est l'objet de l'électromagnétisme transformationnel.

Pour le trou de ver, les solutions, compatibles avec les équations de la relativité générale, requièrent des masses « classiques »,

concentrées et compactes, mais aussi une matière exotique dotée d'une énergie de masse négative. Problème, on n'en connaît aucune. La situation est tout autre en électromagnétisme : la cape d'invisibilité nécessite des matériaux à indice optique positif et d'autres à indice optique négatif. Cette fois, pas de difficulté théorique, car les métamatériaux sont précisément des matériaux à indice optique négatif, c'est-à-dire dans lesquels la réfraction ne suit pas les lois de Descartes.

De tels matériaux à indice optique négatif ont été théorisés à la fin des années 1960 par le physicien russe Victor Veselago. John Pendry, de l'Imperial College, à Londres, fut le premier à en fabriquer en 2006. Il s'agissait de structures périodiques formées d'anneaux et de fils métalliques. Les métamatériaux, dont la caractéristique essentielle est la périodicité, étaient nés.

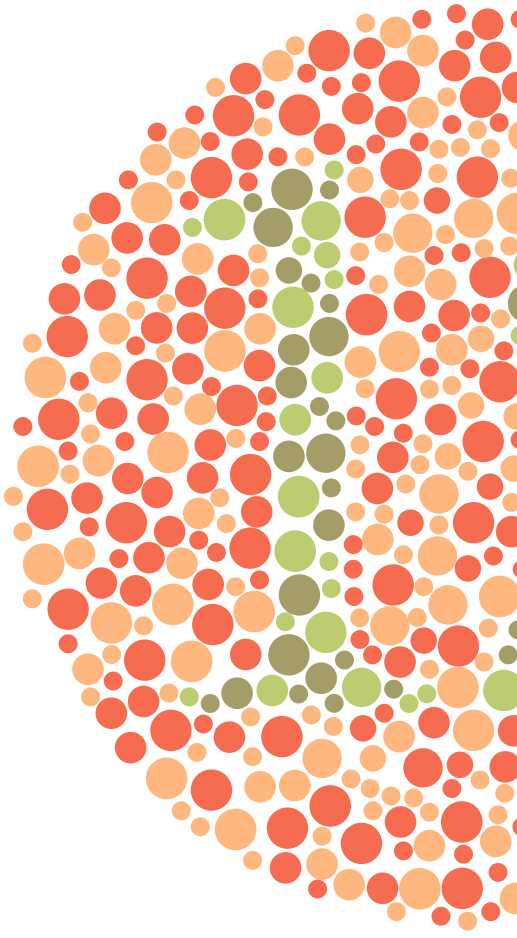
Quels sont leurs avantages ?

D'abord, ils fonctionnent dans toutes les directions ! Par rapport à divers stratagèmes d'optique géométrique développés par des magiciens à partir de jeux de miroirs pour escamoter des parties d'une scène, c'est un progrès. Par contre, ils ne sont efficaces que pour une gamme étroite de longueurs d'onde, définie par la périodicité de la structure : ils sont assez monochromatiques. Par exemple, les premiers métamatériaux ont été conçus pour les microondes, et aucune autre onde électromagnétique. C'est quand même un peu embêtant… bien que dans le domaine des ondes acoustiques, des structures similaires métamatériaux ont fait la preuve de leur intérêt pour protéger un bâtiment des séismes.

En admettant que l'on puisse concevoir des métamatériaux à maille de plus en plus fine, et donc se rapprocher des longueurs d'onde de la lumière visible, une difficulté théorique subsistera : un objet invisible en bleu ne le sera plus dans le rouge. On ne peut pas vraiment parler d'invisibilité totale, même si le gain possible en discrétion et en furtivité présente des avantages.

Sont-ce toujours des invisibilités ?

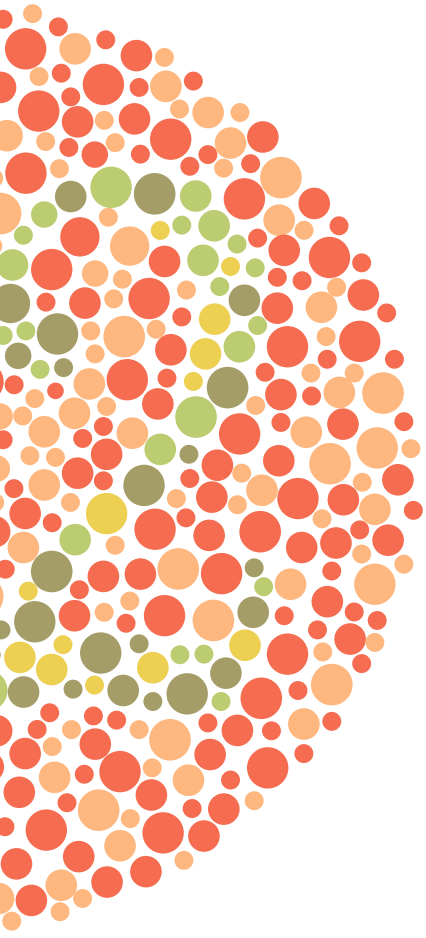
Oui, mais d'un autre ordre, car outre l'invisibilité concrète et complète, on peut aussi évoquer l'invisibilité liée à un contraste



affaibli. Ainsi, le caméléon est difficilement visible, car il se fond dans le décor et diminue au maximum le contraste de son corps avec la jungle ambiante. Ici, émetteur et récepteur jouent à parts égales dans l'invisibilité. Celle liée au daltonisme ne relève quant à elle que du récepteur. En effet, les daltoniens, qui n'ont que deux types de photorécepteurs aux couleurs au lieu de trois chez les individus normaux, ne voient pas les chiffres colorés se détacher du fond d'une autre couleur sur les planches du test d'Ishihara *(voir la figure ci-dessus)*. De même, un tigre, pourtant d'un orange soutenu, n'apparaîtra pas clairement aux yeux d'une proie, comme un cervidé, car ses yeux ne sont pas sensibles aux mêmes couleurs que nous. Ici, les rayures du fauve ajoutent à la confusion en créant des effets de moirés au milieu de la végétation.

Dernier exemple, le crotale peut difficilement chasser en plein jour dans les déserts arides qu'il habite, car ses capteurs sensibles aux infrarouges ne distinguent pas ceux (avec des longueurs d'onde de l'ordre de 10 micromètres) émis par les animaux à sang chaud qu'il traque de ceux renvoyés par le décor chauffé

© eveleen/shutterstock.com



par le Soleil. Mais une fois la nuit venue, la température des rochers diminue, mais pas celle des petits rongeurs qui finiront au menu du serpent grâce à un meilleur contraste de leurs infrarouges. Notons aussi que le crotale est un animal à « sang froid », ce qui lui évite d'être ébloui par ses propres infrarouges !

L'invisibilité liée au récepteur ne peut-elle pas aussi résulter d'un éblouissement ?

C'est effectivement le cas des exoplanètes. Elles sont invisibles, car nos instruments sont éblouis. Ces astres diffusent bien la lumière de leur étoile, mais elle est noyée dans celle un milliard de fois plus intense qui en vient directement.

Plus largement, l'astronomie et l'astrophysique sont un peu le domaine de l'invisible par excellence. Une partie des neutrinos solaires sont restés des particules invisibles, et néanmoins postulées par la théorie, jusqu'à ce qu'on les détecte finalement. La matière noire qui explique notamment la dynamique des galaxies devrait s'appeler la « matière invisible ». L'énergie sombre, à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers, est tout aussi invisible.

De même, le paradoxe de la nuit noire n'est un paradoxe uniquement parce que nos yeux sont aveugles à l'incandescence refroidie des premiers temps de l'Univers, c'est-à-dire le fond diffus cosmologique.

Pouvez-vous détailler cet exemple ?

L'idée, simplifiée, est qu'avec un Univers uniformément rempli d'étoiles éternelles, le ciel devrait apparaître incandescent dans toutes les directions. Ce n'est manifestement pas le cas… La solution est d'abord fondée sur le fait que les étoiles n'ont pas toujours existé et que leur lumière a une vitesse finie. Mais le ciel a bel et bien été uniformément lumineux, à une époque où, bien avant la formation des étoiles, la matière très chaude (à environ 3000 kelvins, soit plus de 2700 °C) et ionisée s'est recombinée en atomes neutres. La lumière libérée à ce moment est toujours là, mais sous l'effet de l'expansion de l'Univers, elle a rougi et s'est diluée. De fait, le ciel est toujours incandescent, mais seuls des capteurs comme ceux du satellite Planck y sont sensibles. Comme le disait René Barjavel : « La nuit n'est nuit que pour nous, ce sont nos yeux qui sont obscurs. »

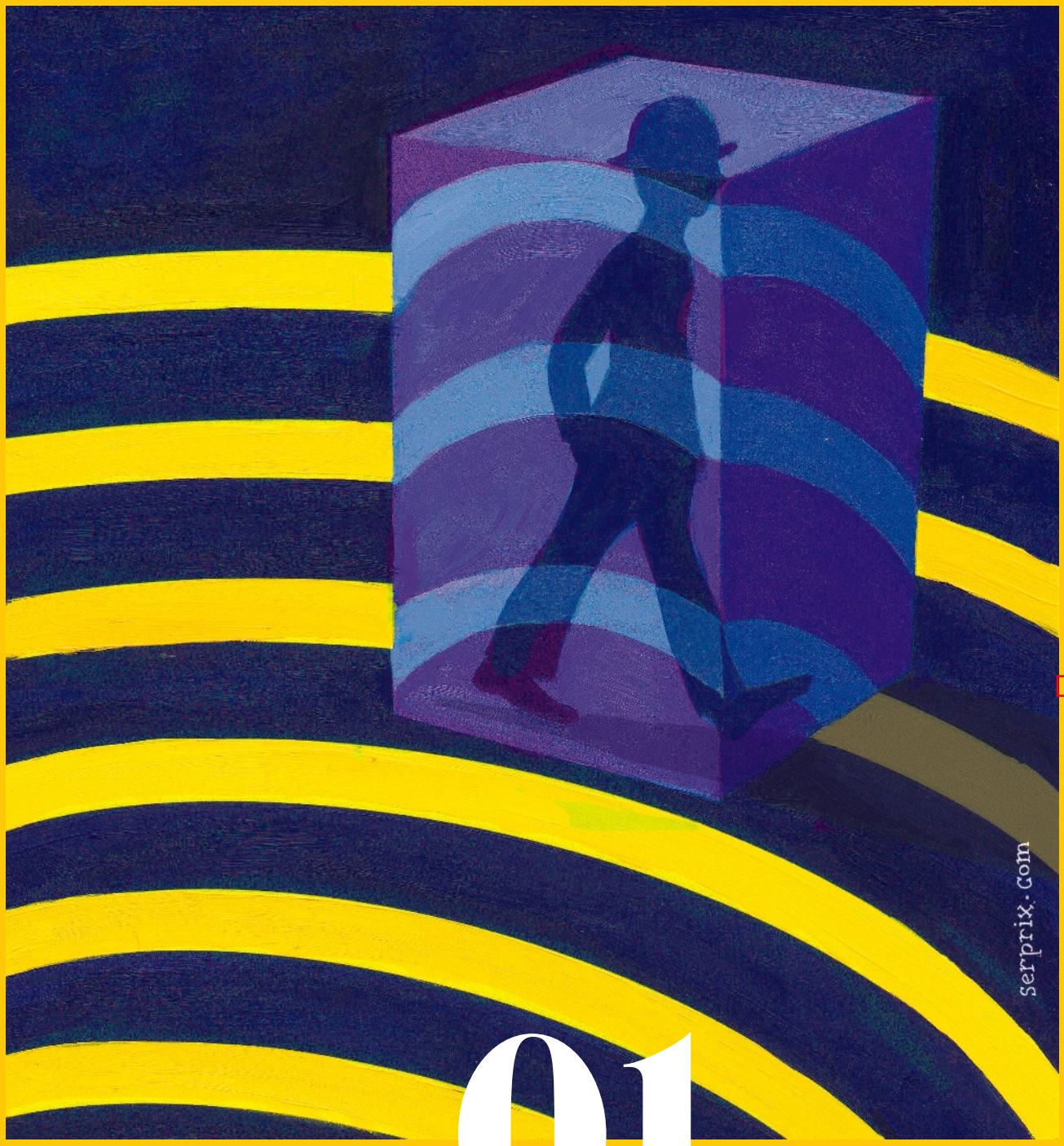
Au-delà du récepteur, l'analyse et le traitement du signal ne sont-ils pas parfois impliqués dans l'invisibilité ?

Ça commence par notre propre cerveau ! La célèbre expérience de Christopher Chabris et Daniel Simons, de l'université Harvard, en 1999, le montre. Des participants sont invités à regarder un match de basket et à compter les passes. Trop occupés par cette tâche, environ la moitié des participants ne voient pas un comparse déguisé en gorille traverser le terrain en gesticulant ! Les yeux fonctionnent bien, le contraste est assurément fort, mais le gorille reste invisible.

Si l'on n'y prend garde, cette « cécité attentionnelle » se retrouve aussi dans des algorithmes d'intelligence dite « artificielle » pour lesquels certaines choses sont littéralement invisibles, car pas prévues par le programmeur, involontairement ou non… Là encore, l'invisibilité est-elle souhaitable dans de telles conditions ?

L'invisibilité au laboratoire

L'invisibilité, depuis la nuit des temps, est un fantasme de l'humanité. Support à la réflexion philosophique durant l'Antiquité, elle est dans nombre de fictions un pouvoir, souvent maudit, des héros. Dès lors, pas étonnant que les scientifiques cherchent à l'atteindre… par tous les chemins possibles. Cela commence par une innocente encre sympathique et se poursuit jusqu'aux avions de chasse les plus sophistiqués conçus, en théorie, pour échapper à toute détection radar. Entre les deux, les physiciens explorent les propriétés de nouveaux matériaux destinés à soustraire qui un immeuble qui une plateforme pétrolière aux ondes dangereuses. Et ça fonctionne !



01

L'encre sympathique eut un âge d'or au temps de l'alchimie. Un peu oubliée aujourd'hui, elle n'a pourtant pas encore dit son dernier mot.

La folle histoire de l'encre sympathique

Kristie Macrakis

© Maisei Raman/shutterstock.com



À l'heure où internet est une mine d'or pour trouver de quoi occuper les enfants, l'une des activités qui rencontrent un franc succès est la recette pour fabriquer de l'« encre invisible ». De fait, rien de plus simple : du jus de citron, une bougie et le tour est joué. Cet innocent passe-temps est l'avatar des techniques d'écritures secrètes qui ont longtemps fait partie à la fois des jeux de magie et des intrigues internationales.

C'est une longue histoire riche et méconnue qui continue d'être écrite, nous le verrons. Elle commence avec la découverte d'une encre apparaissant et disparaissant mystérieusement et culmine à la fin du Siècle des lumières. Durant cette période de fermentation intellectuelle, le développement de la magie de scène a coïncidé avec un renouveau de la magie naturelle – une tradition occulte qui recherchait le pouvoir des sources naturelles comme les plantes ou les astres – et une demande croissante de démonstrations scientifiques publiques. C'est sur ce fond de bouillon de sorcière que l'encre invisible a fleuri.

L'un des berceaux de l'encre invisible est situé en Allemagne, à Schneeberg plus précisément, en Saxe, à l'est du pays. Jusqu'au XVIe siècle, la ville était connue comme une cité minière d'argent, mais quand les exploitants eurent épuisé les veines connues de ce métal, ils s'intéressèrent au cobalt, dont la demande était grande pour colorer le verre et d'autres produits. Les mineurs ont extrait des centaines de tonnes de cobalt de la montagne. Et si l'exploitation de l'argent apporta la richesse à la ville, le cobalt produisit des merveilles bien plus exotiques – dont l'encre invisible.

En bref

> Au XVIe siècle, les recettes d'encres invisibles faisaient partie de la « littérature des secrets », au même titre que l'alchimie et la médecine par les plantes.

> La découverte des propriétés du cobalt minéral, qui, en solution, change de couleur à la chaleur, a lancé les savants des Lumières sur l'étude des encres sympathiques.

> Très populaire, elle devint un outil de choix pour faire découvrir la magie de la chimie.

> Aujourd'hui encore, des chercheurs travaillent sur les encres invisibles.

Le XVIe siècle avait été l'âge d'or de la « littérature des secrets », celle des recueils rassemblant des recettes concernant la métallurgie, la teinture, l'alchimie, les plantes, la magie, la cosmétologie… Certains ouvrages contenaient des pistes pour créer de l'encre invisible, écrites comme une recette de cuisine, avec des ingrédients simples et accessibles. Par exemple, une recette suggérait de plonger dans l'eau une lettre écrite à l'alun (un sel minéral), ce qui ferait virer les écrits du blanc au noir ; une autre conseillait de frotter de la poudre sur du lait de figuier pour le rendre visible.

LA MYSTÉRIEUSE DJW

Le cobalt donna un nouvel élan à l'encre invisible. En 1705, une mystérieuse alchimiste allemande semble avoir été la première personne à identifier l'alliage de cobalt et de bismuth comme une substance précieuse pour fabriquer de l'encre invisible. Cette alchimiste fut aussi l'autrice anonyme de trois ouvrages, dont l'un (*La Clé du cabinet de la chambre du trésor secret de la nature*) incluait une discussion sur la modification des couleurs de l'alliage. Trois initiales, DJW, sont les seules informations disponibles, mais des recherches suggèrent qu'il s'agissait d'une certaine Dorothea Juliana Walchin (ou Wallich ou Wallichin), dont on ne sait pas grand-chose.

Elle aurait découvert du cobalt minéral (qui apparaît rouge en solution) que l'on supposait être la matière première à partir de laquelle tous les autres éléments étaient constitués – le Graal des alchimistes. Le cobalt

LA CHIMIE DES ENCRES INVISIBLES

Comment fonctionnent les encres invisibles ? Voici quelques-uns des mécanismes les plus courants. Commençons par le chlorure de cobalt de Jean Hellot. En solution, les molécules d'eau remplacent les ions chlorure et forment un complexe avec le cobalt, créant l'ion hexaaquacobalt(II) rose pâle. Cette couleur ne se voit pas à l'œil nu lorsque la solution a séché sur du papier. Toutefois, quand le complexe est chauffé, les molécules d'eau migrent : les ions chlorure interagissent plus fortement avec le cobalt, et la structure prend une forme anhydre, d'un bleu intense. La réaction est réversible.

Le jus de citron est une encre invisible classique que la chaleur révèle. Le procédé, qui revient à une dégradation thermique accélérée de la cellulose du papier, est étonnamment complexe. Les acides du jus de citron aident à démarrer des réactions qui enlèvent les molécules d'eau et créent des radicaux libres – des molécules chargées très réactives. Ces réactions carbonisent le papier, produisant un mélange de matériaux bruns.

Avant l'introduction des colorants synthétiques, des tanins, extraits des galles de certains chênes, étaient combinés avec des sels de fer pour fabriquer de l'encre noire. Le jus de ces galles a aussi été utilisé comme encre invisible révélée à l'aide de sels de fer. Le principal composant de l'extrait, l'acide tannique, est un sucre lié à cinq unités d'acide digallique. Au sein de la molécule d'acide tannique, un atome de fer peut former un complexe en de multiples endroits. Quand les tanins sont combinés avec des sels de fer, ces complexes modifient les niveaux d'énergie électronique de l'acide tannique, brun pâle, intensifiant ses propriétés d'absorption de la lumière et formant ainsi une molécule très colorée. Comme un atome de fer peut se lier à six autres atomes, chaque atome de fer peut former un complexe avec plus d'une molécule d'acide tannique. De plus, chaque molécule d'acide tannique peut aussi accepter plus d'un atome de fer. Ainsi, on obtient un mélange de colorants constitués de polymères de structure assez simple, mais de poids moléculaire élevé, lequel produit une intense couleur noire.

Jason Lye,
Lyco Works Inc., Atlanta



Du jus de citron a été utilisé pour écrire les informations sur cette invitation à un événement de Burning Man, une série de rencontres culturelles qui se tient chaque année dans le Nevada. Le destinataire a dû la chauffer pour la déchiffrer.

© Kyle Chaplin

À la fin du XVIIe siècle, le Britannique Robert Boyle, le père de la chimie moderne, utilisait de l'encre invisible pour consigner ses secrets

minéral avait aussi de remarquables qualités visuelles : à la chaleur, sa couleur changeait du rosé au vert tendre et au bleu ciel. Quand le cobalt était préparé sous la forme d'une solution utilisable pour écrire, sa teinte était claire, mais il produisait une belle couleur bleu-vert quand il était chauffé. Les écrits disparaissaient quand ils étaient refroidis.

JEAN HELLOT ENTRE EN SCÈNE

Pour Jean Hellot, un chimiste français qui, durant le XVIIIe siècle, s'investit plus que tout autre dans les recherches sur l'encre invisible et sa promotion, on devait plutôt la découverte des qualités magiques du cobalt à un artiste allemand, tout aussi inconnu que DJW. Durant l'été 1736, cet anonyme aurait exposé à l'Académie royale des sciences, à Paris, la magie du cobalt. Après un voyage dans les montagnes de la Saxe, Jean Hellot s'enticha des curieuses propriétés du minerai extrait là-bas, contenant du bismuth, du cobalt, du fer... À la fin de l'été, il avait écrit un article sur l'encre de cobalt pour le journal de l'Académie.

Des savants allemands protestèrent en refusant d'attribuer à Jean Hellot la paternité de la découverte de cette substance. Selon eux, un certain professeur Teichmeyer, de Jena, avait montré la même encre de cobalt à ses étudiants six ans plus tôt. Bien sûr, il y avait aussi cette mystérieuse femme allemande, qui avait décrit des activités similaires en 1705. La fierté nationaliste ajouta à cette querelle de propriété. Les Allemands s'irritèrent plus encore quand l'encre de cobalt devint connue sous le nom d'« encre sympathique de Hellot »...

Pourquoi ce nom ? Les expérimentateurs de l'époque décrivaient les encres, spécialement celles constituées de multiples substances, comme fonctionnant par « sympathie ». Et peu à peu, le terme « encre sympathique » devint synonyme de l'encre invisible.

On sait aujourd'hui que dès la seconde moitié du XVIIe siècle, un savant italien, Giambattista Della Porta, avait écrit sur l'encre invisible. Il avait observé que certaines encres se développent à la chaleur, d'autres sous l'application de « matière glutineuse » (c'est-à-dire visqueuse comme le gluten), et d'autres encore sous l'application d'une « liqueur » qui ne fonctionne qu'associée à un certain produit chimique. Cette liqueur qui nécessitait un révélateur spécifique – un réactif – était le plus sûr des procédés. Robert Boyle, le père de la chimie moderne, l'utilisait pour consigner ses secrets à la fin du XVIIe siècle.

Jean Hellot développa un système complet de classification des trois types de révélateurs décrits par Giambattista Della Porta : tous avaient en commun d'être irréversibles. Jean Hellot ajouta deux nouvelles classes de son cru. Dans la première, l'air révélait certains colorants ; la seconde rassemblait des encres qui apparaissaient et disparaissaient spontanément. Et cette fois, le phénomène était réversible : les messages ou motifs révélés pouvaient à nouveau disparaître.

Le Français testa différents minéraux et solutions pour obtenir son encre sympathique. À l'époque, impossible d'acheter une solution de chlorure de cobalt : il fallait la fabriquer. Jean Hellot acheta le minerai à divers apothicaires locaux ou reçut des échantillons de cobalt de ses amis savants dans différents pays. Le chimiste





→ Les pare-feu à paysage changeant – une déclinaison de l'encre sympathique – furent à la mode à Paris au milieu du XVIIIe et au XIXe siècles. Un paysage d'hiver avec des branches dénudées était peint à l'encre de Chine sur un pare-feu. Puis une solution de chlorure de cobalt était utilisée pour créer des feuillages luxuriants, et de l'acétate de cobalt pour le ciel. Invisible dans le froid *(en haut)*, le cobalt se teintait sous l'effet de la chaleur ; la végétation verdoyait alors *(en bas)*. Quand la température diminuait, la scène hivernale réapparaissait.

fut si enchanté par la variété des couleurs qu'offrait le cobalt qu'il imagina d'utiliser les encres et colorants obtenus pour peindre des paysages d'hiver qui se transformeraient en scènes printanières sous l'effet de la chaleur. L'idée fut un succès et, bientôt, les pare-feu à paysage changeant firent fureur à Paris, déclinés au XIXe siècle sous la forme de modèles portatifs *(voir ci-contre)*.

AVIS DE PLUIE

Plus tard, au XIXe siècle, les chimistes se sont aperçus que le changement de couleur associé aux composés à base de cobalt dépendait non seulement de la chaleur, mais aussi de l'humidité de l'air. Le changement du papier du bleu ou vert au rose indique une forte humidité. Cette découverte conduisit à la création de poupées et d'arrangements floraux doublés d'indicateurs météorologiques, car imprégnés de chlorure de cobalt : ils viraient du bleu au rose lorsque l'humidité, donc le risque de pluie, augmentait.

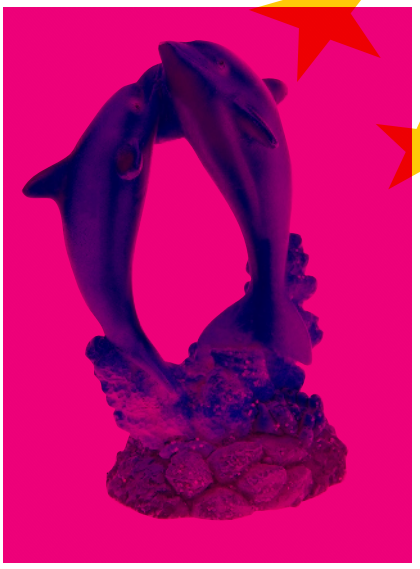
Le mécanisme à l'origine du phénomène, cependant, resta longtemps une énigme. Jean Hellot pensait que le changement de couleur était inexplicable scientifiquement. D'autres l'attribuaient à l'effet de la chaleur et du froid. À la fin du XVIIIe siècle, enfin, Edward Delaval, un chimiste anglais, postula que le sel attirait l'humidité de l'air quand il était froid et la repoussait quand il était chauffé. Cette théorie est celle qui se rapproche le plus des explications modernes *(voir l'encadré page 17)*.

L'impact de l'encre sympathique de Jean Hellot dépassa de loin le cercle des chimistes. À la fin du Siècle des lumières, la science s'était répandue des laboratoires privés et des

© American Scientist







sociétés royales à la presse populaire et à la culture urbaine. Salons philosophiques, cafés et musées se multipliaient dans les rues de Paris, et ces nouvelles institutions de science populaire s'animaient de conférences, d'expériences, de démonstrations de science. L'encre invisible s'accordait parfaitement avec ces passe-temps.

UN TOUR DE MAGIE

Ceux-ci n'étaient d'ailleurs pas sans danger... En 1736, Jean-Jacques Rousseau faillit mourir et resta aveugle pendant plus de six semaines en essayant de produire de l'encre sympathique en s'inspirant des expériences d'un professeur de physique et avec l'aide des *Récréations mathématiques* de Jacques Ozanam, un mathématicien français du siècle précédent.

Mais la science qui attirait le plus dans le Paris de cette époque s'écartait du courant académique et flirtait avec ce qu'on appellerait aujourd'hui la « pseudoscience ». Franz Mesmer envoûtait les Parisiens avec ses expériences sur le magnétisme animal ; Jean Nollet électrisait les spectateurs dans des présentations où une charge se propageait à travers une rangée de personnes. En un mot, la science enivrait.

Devenue une part de la culture populaire, la science fournissait à la fois du divertissement et une éducation générale. Des magiciens scientifiques menaient la danse, à commencer par Henri Decremps, professeur et présentateur d'amusements physiques, et l'Italien Giuseppe Pinetti, surnommé le Professeur de magie naturelle. Tous deux firent des tournées à Paris et à Londres, présentant des « amusements physiques et différentes expériences divertissantes ». Mais Decremps mettait un point d'honneur à démasquer les charlatans ; il expliqua les expériences de Giuseppe Pinetti comme de simples astuces, ce qui ruina la carrière de l'Italien à Paris.

L'encre sympathique faisait partie des secrets que Henri Decremps révéla. Dès lors, tout un chacun put, chez lui, s'amuser avec plusieurs sortes d'encres sympathiques révélées par un liquide, de l'air, de la poudre ou du feu. Les magiciens, cependant, détournèrent ces procédés de façon à donner l'impression d'avoir des pouvoirs extraordinaires.

La fin du XVIIIe siècle vit un regain d'intérêt pour la magie naturelle qui coïncida avec l'invention des cabinets de chimie, des caisses pleines de fournitures pour amateurs. Des ouvrages comme *Conversations on Chemistry* (1805), de Jane Marcet, ou *Chemical Recreations* de John Griffin, publiés au milieu du XIXe siècle, contribuèrent à populariser la chimie. Dans ce dernier ouvrage, l'auteur consigne les descriptions de l'encre sympathique de Hellot et quelques histoires associées. Sa compagnie, J. J. Griffin and Sons, se mit à fabriquer et à vendre onze sortes de cabinets de chimie, dominant le marché pour quelque cinquante ans, jusqu'à la Première Guerre mondiale.

Cette popularité de la chimie coïncida avec un engouement, au milieu du XIXe siècle, pour les spectacles de magie dans les salons privés. Les chimistes encourageaient les prestidigitateurs à intégrer à leurs tours des expériences impliquant souvent un composant devenant invisible.

© Fomin Serhii/shutterstock.com

← Les composés à base de cobalt qui ornent certaines statuettes changent de couleur en fonction de la chaleur, mais aussi de l'humidité de l'air : de la sorte, ils préviennent d'une pluie imminente.

Au début du XXe siècle, nombre de magiciens étaient devenus des prestidigitateurs scientifiques. Le « professeur » Ellis Stanyon offrait dans son école de Londres des cours de « Feu et magie chimique ». Ces cours mettaient l'accent sur la magie scientifique et ne faisaient pas appel à la sorcellerie. Le monde est maintenant bâti sur des « principes physiques », non sur des « arts noirs », écrivait le magicien américain Harry Blackstone en 1959 dans une réédition du manuel *Chemical Magic* (1930), du chimiste et magicien amateur John Lippy. Et dans cette métamorphose, l'encre invisible a joué un rôle particulier. S'éloignant de ses liens précoces avec l'alchimie, elle s'est transformée au fil des siècles en un outil de choix pour démontrer le pouvoir de la chimie et présenter sa valeur divertissante à un vaste public.

SECRET-DÉFENSE

Après les deux guerres mondiales, l'encre invisible acquit une autre identité tout aussi populaire : elle devint synonyme d'intrigue internationale et d'espionnage. Durant la seconde moitié du XXe siècle, les livres et jeux pour enfants se mirent à évoquer des agents secrets usant d'encre invisible et de stylos ultraviolets, et le citron devint le complice des petits espions en herbe. Ainsi l'encre invisible a-t-elle traversé l'histoire et les modes.

L'histoire des messages invisibles n'est d'ailleurs pas terminée. Pour preuve, en 1999, la CIA a refusé de déclassifier des documents relatifs aux encres invisibles, au motif que ces produits relèvent encore de la sécurité nationale. Et les travaux continuent !

En 2011, Manuel Palacios, de l'université Tufts, et ses collègues ont développé une matrice constituée de colonies de microorganismes qui délivrent des messages sur demande en changeant de couleur… Et en 2017, Congyang Zhang, de l'université de Jiao-Tong, à Shanghaï, et son équipe ont publié dans *Nature Communications* une étude sur une nouvelle encre invisible à base de MOF (pour *metal–organic frameworks*) se révélant avec des sels d'halogènes. Pas de doute, l'histoire de l'encre invisible s'écrit encore, avec ou sans jus de citron !

— L'autrice —

> Kristie Macrakis est professeuse d'histoire, technologie et société au Georgia Institute of Technology, à Atlanta. Cet article est adapté de son livre, *Prisoners, Lovers, and Spies : The Story of Invisible Ink from Herodotus to al-Qaeda* (Yale University Press, 2014).

> Cet article a été publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

— À lire —

> C. Zhang *et al.*, Conversion of invisible metal-organic frameworks to luminescent perovskite nanocrystals for confidential information encryption and decryption, *Nature Communications*, vol. 8, art. 1138, 2017.

> K. Macrakis, *Prisoners, Lovers, and Spies : The Story of Invisible Ink from Herodotus to al-Qaeda*, Yale University Press, 2014.

Si la cape d'invisibilité de Harry Potter n'est encore qu'une perspective lointaine, son principe inspire des dispositifs de protection contre d'autres types d'ondes que la lumière.

Invisibilité en vue !

Gregory Gbur

© Musicman/Shutterstock.com



En bref

> Des idées publiées il y a une quinzaine d'années ont donné naissance à la physique de l'invisibilité.

> Toutefois, la réalisation d'une cape d'invisibilité, même imparfaite, se heurte à des obstacles d'ordre pratique, voire théorique.

> Pour se protéger d'ondes autres que lumineuses, les obstacles sont moins nombreux.

> Les scientifiques ont ainsi réalisé divers dispositifs à l'épreuve des ondes sismiques, des vagues, de la chaleur…

La légende raconte qu'elle aurait été offerte au XIIIe siècle par la Mort elle-même à Ignotus Peverell pour justement qu'il puisse lui échapper. L'objet, une des reliques de la Mort, sera ensuite transmis de génération en génération pour finalement échoir, un soir de Noël 1991, dans les mains de celui à qui il est immanquablement associé, Harry Potter, le jeune magicien inventé par J.K. Rowling. De quoi s'agit-il ? De la cape d'invisibilité !

Comme son nom l'indique, cette grande cape argentée dont l'étoffe évoque la fluidité de l'eau et la légèreté de l'air dissimule quiconque s'en recouvre aux yeux de tous et le protège de tout sort. Rêve de millions de lecteurs, jusqu'où peut-elle devenir réalité ?

En tout cas, elle est devenue le sujet de recherches depuis une quinzaine d'années. Mais, en dépit d'efforts théoriques et expérimentaux acharnés, de nombreux obstacles restent à surmonter avant qu'une cape d'invisibilité dans le domaine optique se profile à l'horizon. En effet, des limitations théoriques indiquent que de tels dispositifs pourraient être impossibles à réaliser, si l'on exige d'eux une taille macroscopique et une efficacité parfaite.

Une cape de masquage idéale guide les ondes autour d'une région centrale, un peu comme l'eau s'écoule autour d'un gros galet dans un ruisseau. Les objets situés dans cette région n'interagissent pas avec les ondes qui, en aval et en amont de la région masquée, sont imperturbées. Cette propriété est en fait un inconvénient pour les capes d'invisibilité, où les ondes dont il s'agit sont des ondes lumineuses : celui qui la porte ne sera pas vu, mais il ne pourra rien voir non plus.

Cependant, toutes les ondes ne sont pas lumineuses, et l'on pourrait exploiter les idées de dissimulation par cape pour protéger des objets ou des personnes contre les effets nuisibles d'ondes océaniques, sonores, magnétiques ou sismiques. En fait, la mise au point de dispositifs de dissimulation pour protéger, plutôt que pour cacher, pourrait être l'application la plus intéressante susceptible d'émerger de ce domaine de recherche encore tout jeune.

L'INVISIBILITÉ, MISSION IMPOSSIBLE ?

Les racines de l'invisibilité en physique remontent à des recherches dans le domaine biomédical. Au début des années 1970, le Britannique Godfrey Hounsfield développait la première technique d'imagerie médicale en trois dimensions, le tomodensitomètre. Dans un tel scanner, l'objet examiné est exposé à des rayons X venant de multiples directions, ce qui produit un ensemble d'images qu'un ordinateur combine en une image tridimensionnelle complète de l'objet.

Mais les rayons X sont relativement inefficaces pour distinguer les tissus mous. Les chercheurs se sont donc tournés vers d'autres types d'ondes. Une inquiétude se fit jour immédiatement : et si certains objets n'étaient pas visualisables ? En d'autres termes, existait-il des objets invisibles, par exemple des tumeurs, pour ces techniques d'imagerie ?

Heureusement, des travaux théoriques de la fin des années 1980 ont montré que, en général, ce n'est pas possible. Un objet peut être invisible lorsqu'il est éclairé d'une seule

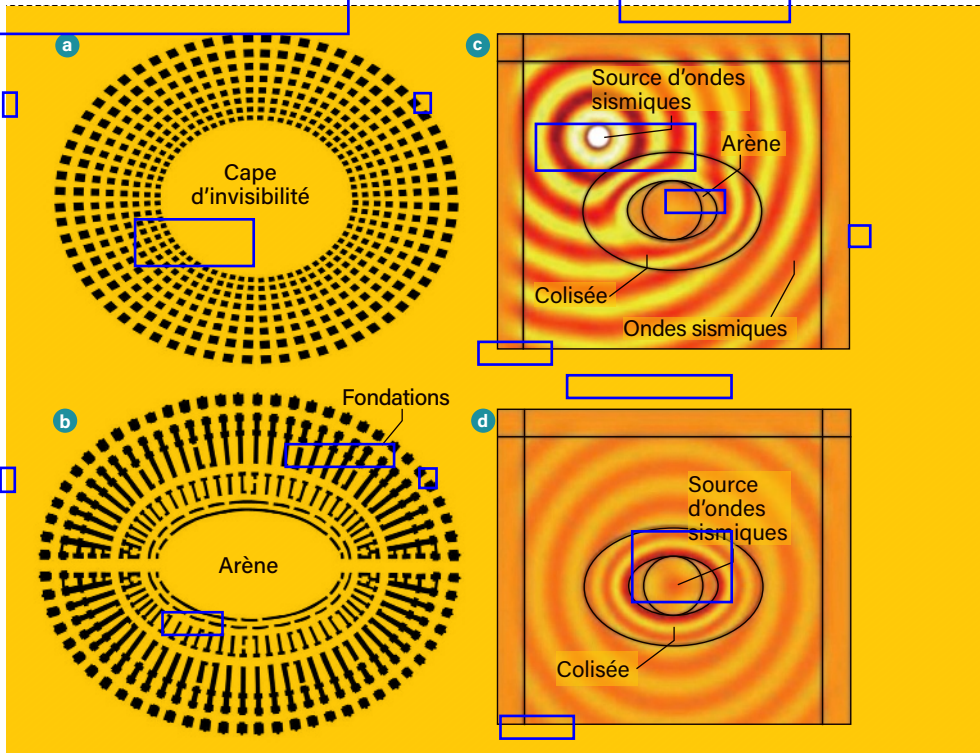
INVISIBILITÉ SISMIQUE ANTIQUE ET FORESTIÈRE

Les séismes se traduisent par des ondes dont certaines, celles dites « de Rayleigh », mettent parfois en résonance les édifices élevés, comme les immeubles, d'où le risque qu'ils s'effondrent. De plus, de nombreuses villes sont historiquement implantées dans les vallées, près de fleuves..., là où les sols sont souvent assez mous et épais. Or ces couches géologiques ont une propension à amplifier les ondes sismiques destructrices. Peut-on alors imaginer une « cape d'invisibilité sismique » qui contraindrait la trajectoire des ondes de surface autour d'un bâtiment à protéger ? Depuis une dizaine d'années, plusieurs études théoriques et expérimentales ont confirmé l'idée. Ainsi, sous certaines conditions, des trous de forage régulièrement et précisément espacés de façon à faire varier la densité moyenne du sol d'un endroit à l'autre, aident à contrôler la vitesse, donc la direction, de propagation d'une onde de vibration dans le sol. Un tel réseau protégerait une structure contre des ondes sismiques.

Les travaux sur l'ingénierie parasismique ont révélé quelques surprises. Par exemple, on s'est aperçu que la répartition dans le sol des piliers de soubassement du Colisée, le gigantesque amphithéâtre de Rome, est très semblable, à un changement d'échelle près, à la structure d'une cape d'invisibilité aux vagues mise au point en 2008 à l'institut Fresnel. Des simulations ont montré que des ondes sismiques venant de l'extérieur épargnent le cœur de l'arène. Cette similitude est fortuite, car la construction n'a été guidée que par des objectifs scéniques et de solidité. Toujours est-il que cette structure a peut-être fait en sorte que rien n'arrête les jeux du cirque, même en cas de tremblement de terre ! Autre surprise, des physiciens, dont Andrea Colombi et Philippe Roux, de l'institut Isterre, à Grenoble, ont récemment proposé de voir dans les forêts des métamatériaux géants à même de protéger des secousses des zones urbaines. Des simulations informatiques ont bel et bien mis en évidence un tel effet, en l'occurrence une atténuation des ondes de Rayleigh à certaines fréquences (celles-ci varient selon que les arbres sont feuillus ou non !). La végétalisation a déjà des effets bénéfiques sur le climat en ville. Si en plus elle protège des séismes, elle a sans doute de beaux jours devant elle !

Sébastien Guenneau,
UMI A. de Moivre
(CNRS-Imperial College,

Stéphane Brûlé,
Institut Fresnel



← La structure théorique inspirée de la cape multi-ondes de l'institut Fresnel *(a, de quelques centimètres de longueur)* et celle des fondations du Colisée *(b, de 187 mètres de longueur)*, à Rome, sont étonnamment semblables. Des simulations révèlent que des ondes sismiques *(en rouge et jaune)* venant de l'extérieur *(c)* épargnent le centre de l'arène. Avec un épicentre au milieu, ces ondes butent *(en rouge foncé)* au pied des gradins.

© S. Brûlé et S. Guenneau (2020)



direction (rappelez-vous quand vous vous êtes cognés contre une porte en verre), mais un objet ne peut être invisible pour toutes les directions d'éclairage.

La question semblait donc définitivement réglée, jusqu'à ce que, en 2006, deux études théoriques soient publiées, l'une par Ulf Leonhardt, à l'université de Saint Andrews, en Écosse, et l'autre par John Pendry, de l'Imperial College de Londres, avec David Schurig et David Smith, de l'université Duke aux États-Unis. Ces deux articles proposaient des modèles théoriques de cape d'invisibilité fondés sur une technique nouvelle nommée « optique transformationnelle ».

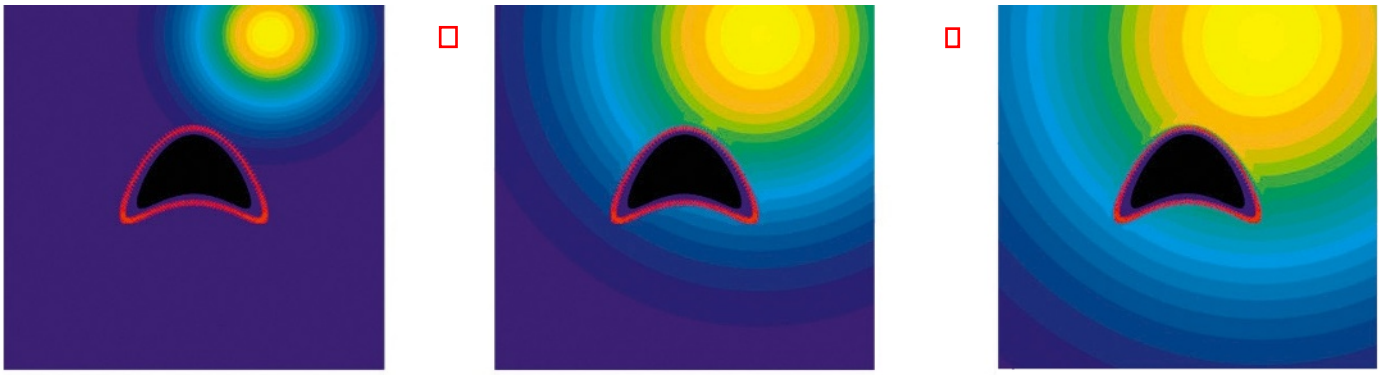
De quoi s'agit-il ? Quand de la lumière passe d'un milieu à un autre, par exemple de l'eau à l'air, elle change de direction – on parle de « réfraction ». Cet effet est évident quand on observe une paille plongée dans un verre d'eau. L'idée clé de l'optique transformationnelle consiste à remarquer que, dans de nombreux cas, courber des ondes lumineuses équivaut mathématiquement à déformer la géométrie de l'espace. Le principe consiste donc à concevoir la déformation spatiale souhaitée, en l'occurrence celle qui force les rayons lumineux à contourner la région à dissimuler, puis à en déduire le type de matériaux nécessaires pour produire le dispositif de camouflage.

Comment est-ce possible alors que des recherches antérieures avaient apparemment prouvé l'impossibilité de l'invisibilité ? Les auteurs des deux études de 2006 résolvaient cette contradiction apparente de deux façons différentes. Ulf Leonhardt notait simplement que la non-existence de l'invisibilité « parfaite » n'exclut pas la possibilité d'une quasi-invisibilité : un objet invisible à 99 %, par exemple, serait sans doute acceptable pour la plupart des applications. Quant à John Pendry et ses deux coauteurs, ils faisaient observer que les preuves de non-existence ne prennent pas en compte des milieux matériels très particuliers que l'on ne trouve pas dans la nature, mais que l'on peut fabriquer en laboratoire.

L'HEURE DES MÉTAMATÉRIAUX

Ces chercheurs pensaient à ce qu'on appelle à présent des « métamatériaux », des milieux formés par un assemblage de structures artificielles. Alors que la plupart des matériaux naturels ne réagissent qu'au champ électrique des ondes lumineuses, on pourrait mettre au point des métamatériaux présentant aussi une réponse magnétique. En outre, la plupart des matériaux naturels sont isotropes, c'est-à-dire que la lumière s'y propage à la même vitesse quelle que soit sa direction. Les matériaux anisotropes, où la vitesse de la lumière dépend de la direction considérée, offrent une liberté supplémentaire pour concevoir de véritables dispositifs de dissimulation.

Fin 2006, les chercheurs de l'Imperial College et de l'université Duke ont construit et testé un dispositif rudimentaire capable de cacher un objet vis-à-vis de microondes. Depuis, divers concepts de dispositif de dissimulation ont été proposés, et un certain nombre d'entre eux ont été testés. Notamment, en 2014, l'équipe de l'université Duke a fait la



démonstration d'une cape d'invisibilité aux ondes acoustiques. Bien que ces dispositifs soient loin de pouvoir prétendre à une véritable invisibilité, ils illustrent la validité des concepts théoriques.

La dissimulation parfaite vis-à-vis des rayons lumineux se heurte cependant à un certain nombre d'obstacles majeurs. Côté pratique, la construction de métamatériaux suppose de manipuler la structure de la matière à des échelles du même ordre que la longueur d'onde de la lumière (condition d'une forte influence sur l'onde), en l'occurrence le millionième de mètre : c'est encore hors de notre portée.

UN OBSTACLE TEMPOREL

Il y a par ailleurs, du côté théorique, un défi encore plus difficile à relever. Pour que la cape soit vraiment indétectable, la lumière doit mettre le même temps à traverser la cape qu'à passer à côté. Or la lumière passant à l'intérieur de la cape doit parcourir une distance supérieure pour éviter la région masquée, ce qui signifie qu'elle doit se propager plus vite que la lumière extérieure. Par conséquent, la lumière à l'intérieur de la cape doit voyager à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans l'air, qui est presque identique à la vitesse de la lumière dans le vide, *c*. Il est possible de réaliser cet exploit pour une plage très étroite de fréquences sans dépasser *c* et violer la théorie de la relativité d'Einstein, mais il semble impossible de le faire pour tout le spectre visible simultanément. En d'autres termes, on pourrait masquer une nuance donnée de rouge, mais l'objet resterait bien visible pour la lumière de toutes les autres couleurs.

Si l'on ne réalisera probablement pas de capes d'invisibilité optique parfaites, ou juste raisonnablement bonnes, et de taille correcte, de nombreux obstacles à la dissimulation vis-à-vis de la lumière visible disparaissent pour d'autres types d'ondes que la lumière. La vitesse de ces ondes, très inférieure, n'a pas, en pratique, de limite supérieure ; de plus, les longueurs d'onde en jeu sont beaucoup plus grandes, ce qui les rend plus aisées à manipuler. Et si ce qui nous intéresse est de concevoir des dispositifs pour se protéger d'ondes destructrices, nous n'avons pas besoin d'atteindre la perfection. Une « cape d'invisibilité » réduisant l'impact d'une onde sismique sur un bâtiment ne serait-ce que d'un ordre de grandeur pourrait empêcher l'effondrement de ce dernier.

← Les courbes isothermes *(du bleu au jaune, la température augmente)* qui diffusent à partir d'une source de chaleur ponctuelle sont déformées par un objet dont la température est maintenue à zéro degré *(a, b et c, à différents pas de temps)* : ce comportement rend l'objet repérable, par exemple par une caméra thermique. Quand l'objet est entouré de sources de chaleur judicieusement choisies *(en rouge)*, ces courbes isothermes redeviennent concentriques *(d, e et f)*. En d'autres termes, on a rendu l'objet

© M. Cassier et al, 2021

Des capes qui protègent contre les aléas de la nature (séismes, vagues, chaleur...) : ce n'est pas de la magie, mais ça y ressemble !

Les scientifiques ont proposé, pour se protéger des ondes, plusieurs dispositifs fondés sur l'idée de dissimulation par cape. Par exemple, on pourrait entourer un bâtiment d'une série de trous ou de piliers positionnés de façon très précise dans le sol, ce qui ferait varier spatialement la densité moyenne du sol et, par conséquent, la direction de propagation des éventuelles ondes sismiques destructrices, lesquelles dévieraient de façon à éviter la structure.

BOUCLIERS SISMIQUES ET BRISE-LAMES

Avec des collègues, Sébastien Guenneau, aujourd'hui à l'UMI Abraham de Moivre du CNRS et de l'Imperial College de Londres, a testé cette idée près de Lyon. En 2012, un réseau de trous a été mis en place par l'équipe de Stéphane Brûlé, de l'entreprise Ménard, pour faire écran à un générateur d'ondes sismiques artificielles. Bien que le système ait simplement bloqué les ondes plutôt que de les guider, il a démontré que des structures souterraines pouvaient agir sur ce type d'ondes. La recherche de parades antisismiques se poursuit et l'on découvre de nouvelles idées dans des endroits inattendus, par exemple dans l'architecture de bâtiments antiques, comme le Colisée, à Rome, et même dans les forêts *(voir l'encadré page 25)* !

Une autre possibilité intéressante serait de se protéger des vagues de l'océan. En 2008, Sébastien Guenneau, avec Stefan Enoch de l'institut Fresnel, à Marseille, et leurs collègues avaient imaginé un dispositif contrôlant la trajectoire des vagues. Il s'agissait d'une série de sept rangées circulaires et concentriques de poteaux, aux diamètres et positions judicieusement choisis de façon que les vagues interfèrent pour s'annuler dans la partie centrale où l'on peut dès lors imaginer placer une éolienne flottante par exemple.

En 2019, Siyuan Zou, de l'université Zhejiang, en Chine, et ses collègues d'une part et l'équipe de Juhyuk Park, de l'université de Séoul, en Corée du Sud, d'autre part ont aussi conçu des métamatériaux protégeant des vagues. Le système du premier groupe consiste en de longues barres parallèles disposées le long des côtés d'un chenal qui, les simulations le montrent, atténuent la vitesse des vagues en surface et amortissent leur amplitude. L'équipe sud-coréenne à quant à elle imaginé un métamatériau qui élimine le sillage qui se forme derrière un obstacle ou à l'arrière d'un navire.

Les ondes ne sont pas les seules cibles possibles d'une telle technologie. En 2012, Sébastien Guenneau et Claude Amra, de l'institut Fresnel, et Denis Veynante, de l'École centrale de Paris, ont introduit l'idée de cape thermique, capable de protéger une région d'un flux de chaleur. Pour l'essentiel, la cape offre une « trajectoire de moindre résistance » au flux de chaleur, qui tendra ainsi à contourner la région dissimulée avant finalement d'y pénétrer partiellement. Un tel concept pourrait fournir une protection à des appareils sensibles à la chaleur, comme le sont les dispositifs électroniques.

En 2021, le principe de cape thermique a été perfectionné par Maxence Cassier, de l'institut Fresnel, et ses collègues, notamment de l'université de l'Utah, aux États-Unis. L'idée ? Entourer l'objet que l'on souhaite dissimuler par des petites pompes à chaleur (comme les réfrigérateurs qui font du froid en pompant la chaleur de l'intérieur de l'appareil vers l'extérieur). Les simulations de Trent Degiovanni et Fernando Guevara, de l'unversité d'Utah, montrent que l'on peut maintenir constante la température de l'objet au centre *(voir la figure pages 26 et 27)*, un avantage par exemple pour protéger des

composants électroniques sensibles en les rendant invisibles à la chaleur environnante. Autre application possible, rendre des objets indétectables par des caméras thermiques.

Le concept de cape est transposable en de nombreux domaines, et l'on peut créer des dispositifs de dissimulation pour les ondes sonores se propageant dans l'air ou dans l'eau. En 2011, Nicholas Fang et des collègues, à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, ont fait la démonstration d'un petit dispositif de dissimulation vis-à-vis d'ultrasons se propageant sous l'eau selon un plan.

Un autre domaine est celui des champs magnétiques. En 2012, Fedor Gömöry et ses collègues, de l'Institut de génie électrique, en Slovaquie, ont fait la démonstration expérimentale d'une cape magnétique. Un tel dispositif serait utile en imagerie médicale. En effet, avec une IRM, le signal est obtenu à l'aide d'un champ magnétique si puissant que la plupart des équipements électroniques utilisés pour exploiter la machine sont placés dans une autre pièce. Ce ne serait plus nécessaire avec une cape magnétique.

Il est même possible de concevoir une cape anticourants électriques, comme l'ont montré Fan Yang et ses collègues, de l'université de Lanzhou et de l'université du Sud-Est, en Chine.

Les techniques d'optique transformationnelle pourraient aussi servir à camoufler, c'est-à-dire à faire en sorte que n'importe quel objet ressemble à n'importe quel autre. Yun Lai et ses collègues, à l'université des sciences et technologies de Hong Kong, ont réalisé la première étude théorique de cette idée en 2009, et un certain nombre de variantes ont été explorées par la suite. Ces chercheurs ont créé l'illusion d'un trou dans un mur, ce qui revient à rendre transparente une surface opaque. Ils ont également montré qu'il est possible de faire paraître un objet beaucoup plus gros qu'il ne l'est en réalité.

Des formes limitées d'invisibilité peuvent offrir une protection de manière tout à fait inattendue. En 2003, avant même la parution des premiers articles théoriques sur la dissimulation, une cape d'un type très différent – une cape rétroréfléchissante – a été introduite par Susumu Tachi, de l'université de Tokyo : une caméra filme la scène se déroulant derrière la cape, et le film est projeté sur le vêtement rétroréfléchissant. La personne portant la cape semble alors transparente, vue depuis certaines directions.

INVISIBILITÉ EN TROMPE-L'ŒIL ?

Ce prototype a été conçu comme démonstration d'une technique utilisable pour rendre « transparent » l'intérieur d'une automobile ou d'un avion. Le pilote ou le conducteur pourrait alors, virtuellement, voir tout autour de son véhicule à tout moment, et en particulier les dangers qui, d'habitude, lui seraient cachés.

La cape est traditionnellement le vêtement que portent les voyageurs pour se prémunir des intempéries. Les applications que laisse entrevoir la physique de l'invisibilité montrent que la science pourrait offrir des capes qui protègent contre presque tous les aléas de la nature. Ce n'est pas de la magie, mais ça y ressemble !

— L'auteur —

> Gregory Gbur
est professeur au département de physique et d'optique de l'université de Caroline du Nord, à Charlotte, aux États-Unis.

— À lire —

M. Cassier *et al.*, Active thermal cloaking and mimicking, *Proc. R. Soc. A.*, vol. 477, art. 20200941, 2021.

S. Brûlé et S. Guenneau, Past, present and future of seismic metamaterials : experiments on soil dynamics, cloaking, large scale analogue computer and space–time modulations, *CRAS*, vol. 21(7-8), pp. 767-785, 2020.

S. Zou *et al.*, Broadband waveguide cloak for water waves, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, 074501, 2019.

L'informatique passe-muraille



Que se passe-t-il derrière ce mur ? Pour le savoir, l'imagerie dite « hors ligne de visée » exploite les faibles signaux disponibles, comme les ombres ténues. Il est alors possible de révéler ce que nos yeux ne voient pas.

Natalie Wolchover



← Le robot écrasera-t-il le lapin ? Non, car il le voit déjà, même si l'animal est caché par un mur

© R. Fister

En 2012, alors en vacances sur la côte espagnole, Antonio Torralba, chercheur à l'institut de technologie du Massachusetts (le MIT), remarque sur le mur de sa chambre d'hôtel des ombres fugaces qui ne semblent correspondre à aucun objet de la pièce. D'où venaient-elles ? En fait, les taches décolorées n'étaient pas des ombres, mais plutôt une image renversée et très floue du patio situé à l'extérieur. Sa fenêtre agissait comme un sténopé – la forme la plus simple de caméra, où les rayons de lumière traversent un petit trou et forment une image inversée de l'autre côté sur un écran. L'image était à peine visible, mais un constat s'imposait : le monde est imprégné d'informations visuelles que nos yeux sont incapables de percevoir.

DES CAMÉRAS ACCIDENTELLES

À partir de là, ce spécialiste de la vision par ordinateur et son collègue Bill Freeman ont mis en évidence l'ubiquité de ces « caméras accidentelles », comme ils les nomment. Celles-ci sont des fenêtres, des angles de mur, des plantes d'intérieur et d'autres objets communs qui créent des images ténues, invisibles à l'œil nu, de leur environnement. Mais « nous avons trouvé le moyen de les rendre visibles », s'enthousiasme Bill Freeman.

Dans leur première étude, les deux chercheurs ont montré que la lumière changeante sur le mur d'une chambre, filmée avec un simple smartphone, peut être traitée pour révéler la scène qui se déroule à l'extérieur, de l'autre côté de la fenêtre.

En automne 2017, avec leurs collaborateurs, ils rapportaient avoir repéré quelqu'un se déplaçant de l'autre côté d'un angle de mur en filmant le sol près de ce coin. En été 2018, à partir des ombres disparates projetées par les feuilles d'une plante d'intérieur, ils ont reconstruit une image tridimensionnelle du reste de la pièce.

En amplifiant les vibrations qui les secouent sous l'effet d'ondes sonores, ces feuilles, ou un autre support, deviennent même un « microphone ». Ainsi, en filmant à travers une fenêtre insonorisée, les scientifiques ont reconstruit les paroles d'un individu à partir des mouvements que la voix imprimait à un… paquet de chips vide. Il s'agissait de « Mary avait un petit agneau… », les premiers mots qu'enregistra Thomas Edison avec un phonographe en 1877.

La recherche sur la vision au-delà des angles et sur l'exploitation d'informations quasi imperceptibles est l'« imagerie hors ligne de visée ». Elle a pris son essor au début des années 2010 avec la publication d'Antonio Torralba et de Bill Freeman sur

Le patio, à l'extérieur de la chambre d'hôtel où Antonio Torralba a remarqué que sa fenêtre agissait comme un sténopé accidentel *(a)*. L'image floue du patio sur le mur *(b)* peut être rendue plus nette *(c)* en couvrant une grande partie de la fenêtre avec du carton pour réduire la taille du sténopé. Vue à l'envers *(d)*, l'image révèle la scène d'extérieur.

les caméras accidentelles et celle tout aussi décisive d'un groupe distinct du MIT dirigé par Ramesh Raskar, nous y reviendrons. En 2016, séduite par ces résultats, l'Agence américaine pour les projets de recherche avancée de défense (Darpa) a lancé un programme de 27 millions de dollars, nommé Reveal (pour « Revolutionary Enhancement of Visibility by Exploiting Active Light-fields »), visant à financer dans tout le pays un certain nombre de laboratoires s'intéressant à ce domaine naissant. Depuis, de nouvelles idées et astuces mathématiques ont rendu l'imagerie hors ligne de visée encore plus efficace.

Outre des applications militaires et d'espionnage évidentes, les chercheurs envisagent des utilisations dans les voitures autonomes, la vision des robots, l'imagerie médicale, l'astronomie, l'exploration spatiale et les missions de recherche et sauvetage.

L'INTERPRÉTATION DES OMBRES

Cependant, Antonio Torralba et Bill Freeman ne pensaient pas à ces répercussions pratiques. Ils ne s'intéressaient qu'aux principes de la formation d'une image et au fonctionnement d'une caméra. Ces questions les ont naturellement conduits à une enquête plus complète sur le comportement de la lumière et sur ses interactions avec des objets dans notre environnement. C'est alors qu'ils ont commencé à voir des choses que personne n'avait pensé à chercher. D'ailleurs, rappelle Antonio Torralba, des études psychologiques ont montré « que les humains sont vraiment mauvais lorsqu'il s'agit d'interpréter des ombres. Peut-être est-ce parce que beaucoup des choses que nous voyons ne sont pas vraiment des ombres, et notre œil renonce à essayer de leur donner un autre sens ».

Les rayons lumineux porteurs des images du monde situé hors de notre champ de vision frappent constamment les murs et d'autres surfaces et se réfléchissent jusque dans nos yeux. Mais pourquoi ces « vestiges visuels » sont-ils si ténus ? C'est parce que ces rayons existent en trop grand nombre et voyagent dans trop de directions différentes. Ils s'affaiblissent.

Pour donner forme à une image, la quantité de rayons lumineux qui atteignent une surface donnée doit être fortement réduite de sorte que seuls quelques rayons en particulier soient vus. C'est justement la fonction d'un sténopé. En 2012, l'idée initiale d'Antonio Torralba et de Bill Freeman consistait à dire que notre environnement restreint naturellement les rayons lumineux, mais que les images floues qui subsistent restent suffisantes pour être traitées par des ordinateurs.

Plus l'ouverture d'un sténopé est étroite, plus l'image résultante est précise. La fenêtre de la chambre d'hôtel d'Antonio Torralba était trop grande pour produire une image claire. Cependant, avec Bill Freeman, ils ont suivi la piste de la caméra antisténopé. L'idée est la suivante : un petit point opaque placé devant un film (là où dans un sténopé on trouverait le trou), en bloquant certains rayons lumineux, conduit à la formation d'une image correspondant à l'ombre des éléments d'une scène, une image en négatif. Dès lors, dans

En bref

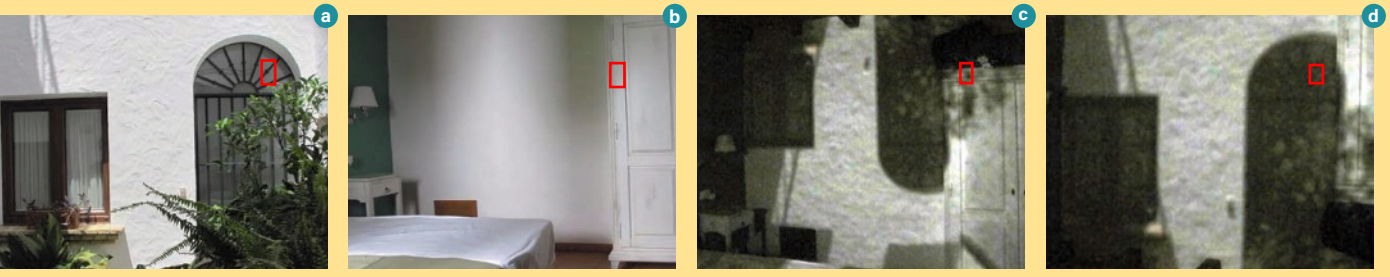
> Même cachée, une scène se trahit par des reflets, des ombres… que des caméras peuvent capter.

> L'analyse par ordinateur de ces signaux reconstruit une image et renseigne ce qui était invisible.

> Encore à leurs balbutiements, ces techniques prometteuses sont en progrès constants.

> Elles équiperont un jour les véhicules autonomes et trouveront des applications en astronomie.

©A. Torralba et W. Freeman



la chambre d'hôtel, n'importe quel petit objet obstruant la lumière conduit à la formation d'images un peu partout.

Imaginez filmer le mur intérieur d'une pièce à travers un petit orifice dans le store de la fenêtre. Vous ne voyez pas grand-chose ! Soudain, le bras d'une personne traverse votre champ de vision. La comparaison de l'intensité de la lumière sur le mur quand le bras est présent puis absent renseigne sur la scène. Des rayons lumineux touchant le mur dans une image de la vidéo sont brièvement bloqués par le bras dans la suivante. En soustrayant les données de la deuxième image de celles de la première, vous pouvez deviner ce que cachait le bras, en l'occurrence des rayons lumineux issus d'une partie de la pièce. En regardant ce qui bloque la lumière autant que ce qui la laisse passer, vous étendez le répertoire d'images du type de celles que génère un sténopé.

Outre leurs travaux sur les sténopés afin de mieux détecter des petits changements d'intensité, Bill Freeman et ses collègues ont aussi mis au point des algorithmes destinés à analyser et amplifier les changements subtils de couleur, comme ceux qui se produisent sur le visage humain quand le sang est pompé à travers ses vaisseaux, ainsi que de minuscules mouvements, notamment ceux des paquets de chips.

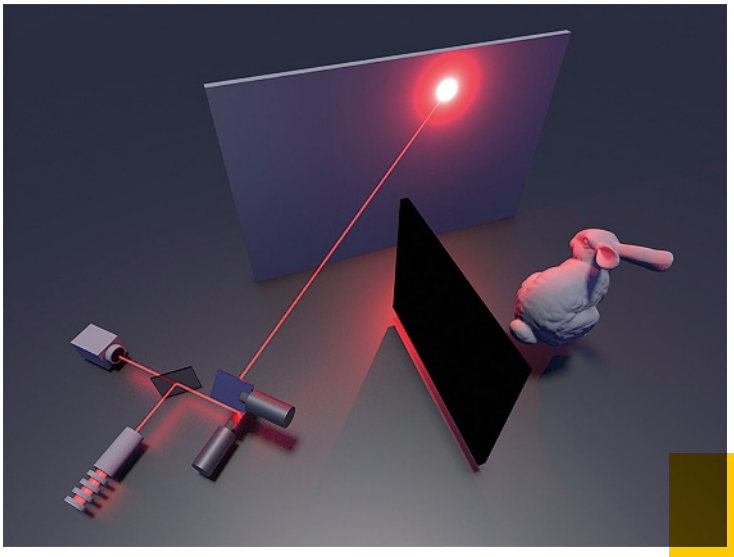
La résolution est telle qu'ils détectent désormais des mouvements qui seraient normalement noyés dans le bruit. Leur méthode consiste à transformer mathématiquement des images en ondes sinusoïdales. De la sorte, le signal n'est pas dominé par du bruit, car les ondes sinusoïdales représentent des moyennes sur de nombreux pixels : le bruit est réparti. Les chercheurs peuvent par conséquent détecter des changements dans les ondes sinusoïdales d'une image à une autre dans une séquence vidéo, amplifier ces modifications et les transformer à nouveau en images.

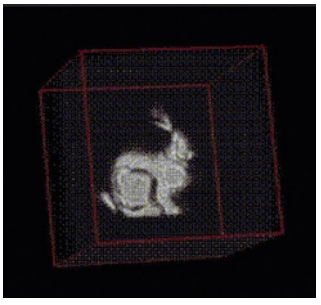
CHEMISE ROUGE ET PLANTE VERTE

En combinant ces astuces, il devient possible d'accéder à des informations visuelles cachées. En 2017, Katie Bouman, à l'époque dans l'équipe de Bill Freeman et aujourd'hui au centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, a montré que les coins des bâtiments agissent comme des caméras qui créent des images grossières de ce qui se trouve derrière l'angle.

Comme dans le sténopé et l'antisténopé, les coins et les rebords restreignent le passage des rayons lumineux. En utilisant du matériel ordinaire, même des smartphones, en plein jour, Katie Bouman et ses collègues ont filmé la zone plus ou moins ombrée (la pénombre), éclairée par des rayons lumineux venant de derrière l'angle d'un bâtiment. Si par exemple une personne portant une chemise rouge y marche, le vêtement projette une toute petite quantité de lumière rouge dans la zone de pénombre filmée, invisible à l'œil nu, mais claire comme de l'eau de roche après traitement.

En 2018, Bill Freeman et ses collègues ont reconstruit une image de l'intensité et de la direction des rayons lumineux dans toute la pièce (on parle de « champ lumineux ») à partir des ombres projetées par une plante verte située près du mur. Les feuilles agissent





← Dans l'imagerie active hors ligne de visée, la lumière d'un laser rebondit sur un mur, est dispersée par un objet caché derrière une cloison *(ici un lapin)*, puis rebondit à nouveau dans la direction de laquelle elle est venue *(ci-contre)*. La lumière réfléchie peut être utilisée pour reconstruire l'objet en trois dimensions *(ci-dessus)*.

chacune comme un antisténopé, bloquant un ensemble différent de rayons lumineux. Analyser l'ombre des feuilles révèle les rayons manquants et aide par conséquent à révéler des images d'une partie de la scène cachée que l'on peut ensuite réunir.

Cette technique du champ lumineux livre des images bien plus nettes que les méthodes précédentes fondées sur des caméras accidentelles. La forme connue de la plante d'intérieur, la supposition que les images naturelles tendent à être lisses, et d'autres informations offrent aux chercheurs des renseignements sur le bruit et les aident donc à produire des images plus précises.

ÉPARPILLÉ FAÇON PUZZLE

Tandis que Bill Freeman, Antonio Torralba et leurs collègues exploraient des images jusqu'alors négligées, ailleurs, sur le campus du MIT, Ramesh Raskar développait une technique nommée « imagerie active » (par opposition à l'imagerie passive des précédents). L'idée consiste à envoyer des impulsions laser sur un mur de sorte qu'une petite fraction de la lumière rebondisse et se réfléchisse de l'autre côté d'une cloison cachant un objet. Quelques instants après chaque impulsion, une « caméra à balayage ultrarapide » enregistre individuellement les photons renvoyés sur le mur par l'objet dissimulé à des milliards d'images par seconde.

En mesurant les temps de trajet des photons recueillis, les chercheurs reconstruisent la géométrie tridimensionnelle détaillée des objets cachés derrière la cloison. La tâche est néanmoins complexe, car les chercheurs doivent notamment connaître toutes les trajectoires possibles des photons laser, ce qui les oblige à analyser la géométrie du mur.

De plus, avec, par exemple, une personne cachée, « la lumière d'un point particulier sur la tête, d'un autre sur l'épaule et d'un troisième sur le genou peuvent toutes arriver [à la caméra] exactement au même moment, explique Ramesh Raskar. Mais si je décale légèrement le laser et le détecteur [dans un système dit "non confocal"], les lumières de ces trois points ne seront plus simultanées ». On reconstruit ensuite la géométrie 3D de l'homme invisible en résolvant ce qu'on appelle le

© Stanford Computation Imaging Lab

« problème inverse » qui consiste à recombiner tous les signaux.

Cependant, avec un tel système non confocal, l'algorithme original de Ramesh Raskar était gourmand en ressources informatiques. En outre, l'équipement nécessaire coûtait un demi-million de dollars.

Depuis, des progrès significatifs ont été accomplis pour simplifier les calculs et réduire les frais. Ainsi, en 2018, une nouvelle étude fixait un nouveau standard pour l'imagerie hors ligne de visée tridimensionnelle, efficace et rentable d'un objet dissimulé derrière un angle. En effet, les auteurs, Matthew O'Toole, David Lindell et Gordon Wetztein de l'université Stanford, aux États-Unis, ont mis au point un nouvel algorithme puissant pour résoudre le problème inverse et utilisé une caméra relativement abordable et néanmoins très efficace se servant des diodes à avalanche à photon unique (Spad).

En pointant le laser et la caméra quasiment sur le même point (un système cette fois confocal), l'équipe de Stanford s'affranchissait des difficultés rencontrées par Ramesh Raskar et pouvait cartographier le même « cône de lumière ». De quoi s'agit-il ?

Quand la lumière se disperse à partir d'une surface, elle forme une sphère de photons en expansion, laquelle trace les contours d'un cône tandis qu'elle s'étend au fil du temps. Matthew O'Toole, aujourd'hui à l'université Carnegie-Mellon, a traduit la physique des cônes de lumière (développée au début du XX^e siècle par Hermann Minkowski, le professeur d'Albert Einstein) en une expression concise reliant les temps de trajet des photons aux positions des surfaces de dispersion.

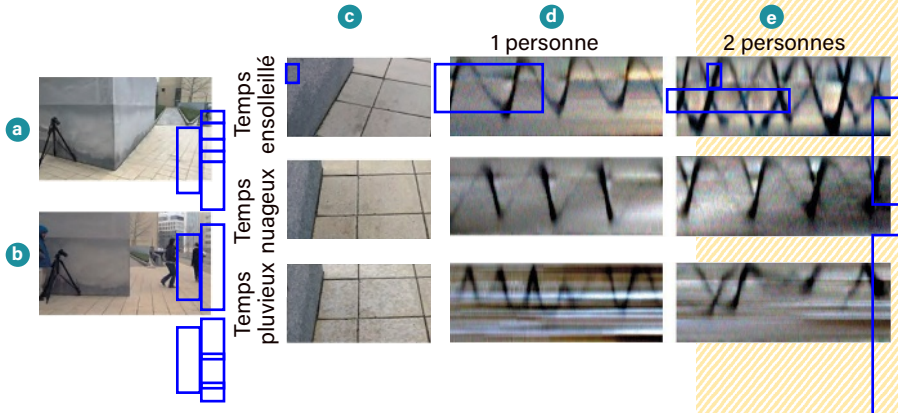
Les voitures autonomes sont déjà dotées de systèmes Lidar (pour *Laser imaging detection and ranging*, soit en français « détection et estimation de la distance par laser »), une sorte de radar où la lumière remplace les ondes radio. Un jour, elles seront possiblement aussi équipées de caméras Spad, pour voir au-delà des angles. « Dans un futur proche, ces détecteurs laser-Spad seront disponibles dans un format portable », prédit Andreas Velten, coauteur de l'étude pionnière de Ramesh Raskar en 2012 et aujourd'hui à l'université du Wisconsin à Madison. L'objectif consistera ensuite à « détecter des scènes de plus en plus complexes », ajoute-t-il.

DE LA VOITURE À LA LUNE

Les chercheurs du groupe de Bill Freeman ont commencé à associer les deux types d'approches, passive et active. Une étude dirigée par Christos Thrampoulidis a montré que, en imagerie active avec un laser, la présence d'un antisténopé de forme connue derrière un coin est utilisable pour reconstruire la scène cachée, sans avoir besoin d'informations relatives à la durée de trajet des photons. « Nous devrions pouvoir le faire avec une caméra CCD normale », estime l'informaticien.

L'imagerie hors ligne de visée pourrait un jour aider les équipes de secours, les pompiers et les robots autonomes. Andreas Velten collabore avec le Jet Propulsion Laboratory de la Nasa sur un projet visant à imager à distance l'intérieur des grottes de la Lune. Pendant ce temps, Ramesh Raskar et d'autres ont utilisé

Un jour, les voitures autonomes seront équipées de caméras spéciales pour voir derrière les murs



1 ou 2 personnes ?

En filmant le sol près d'un coin de rue *(a)*, il est possible d'obtenir des informations à propos des objets cachés à la vue *(b, un ou deux individus)*. Les mouvements de ces derniers se traduisent par des changements subtils de couleur et d'intensité habituellement invisibles à l'œil nu *(c)*. Analysés par des algorithmes, ces signaux faibles renseignent sur ce qui n'est pas visible *(d et e)*.

leur technique pour lire les premières pages d'un livre fermé et pour voir sur une courte distance à travers le brouillard.

Outre la reconstruction audio, l'algorithme d'amplification du mouvement de Bill Freeman améliorerait la détection de mouvements astronomiques minuscules. « C'est une très bonne idée et nous devons l'utiliser », plaide David Hogg, astronome à l'université de New York.

Lorsqu'on évoque les inquiétudes relatives à la vie privée soulevées par ces découvertes, Bill Freeman se fait songeur : « C'est une problématique à laquelle j'ai beaucoup pensé », avoue-t-il. Ce bricoleur de caméras, qui développe des photographies depuis qu'il est enfant, dit qu'en commençant sa carrière, il ne souhaitait pas travailler sur quoi que ce soit qui ait à voir de près ou de loin avec l'armée ou les espions. Mais, avec le temps, il en est venu à penser que « la technologie est un outil utilisable de bien des manières. Si vous écartez tout éventuel usage militaire, vous ne faites rien ». Et d'ajouter que, même dans un contexte militaire, « le spectre d'utilisations est très large. Par exemple, nos découvertes peuvent potentiellement sauver des vies, en détectant un agresseur tapi ».

Toutefois, ce ne sont pas les possibles applications qui l'enchantent le plus, c'est bien plutôt d'avoir exploré un phénomène caché et pourtant exposé à la vue de tous.

— L'autrice —

> **Natalie Wolchover** est diplômée en physique de l'université Tufts et journaliste au magazine *Quanta*.

Quanta magazine

Cet article a d'abord été publié en anglais par ***Quanta Magazine****, une publication en ligne indépendante soutenue par la Simons Foundation afin de favoriser la diffusion des sciences : https://bit.ly/3fLldvA*

— À lire —

> **D. Faccio *et al.*,** Non-line-of-sight imaging, *Nature Reviews Physics*, vol. 2, pp. 318-327, 2020.

> **M. O'Toole *et al.*,** Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform, *Nature*, vol. 555, pp. 338-341, 2018.

> **A. Torralba et W. Freeman,** Accidental pinhole and pinspeck cameras : Revealing the scene out-side the picture, *IEEE CVPR*, pp. 374-381, 2012. bit.ly/3fqcLR2

> **A. Velten *et al.*,** Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging, *Nature Communications*, vol. 3, art. 745, 2012.

© A. Torralba et W. Freeman *et al.*

ABONNEZ-VOUS À

Pour la Science

OFFRE ÉTÉ 1 AN

3 MOIS OFFERTS en plus de votre abonnement 1 an !

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros + 3 offerts	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros + 3 offerts			✓
Le hors-série papier 4 numéros + 1 offert		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros + 1 offert			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €** Au lieu de ~~103,50 €~~	**79 €** Au lieu de ~~143 €~~	**99 €** Au lieu de ~~218 €~~
	43 % de réduction*	**45 %** de réduction*	**55 %** de réduction*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements Pour la Science – 56, rue du Rocher – 75008 Paris – Courriel : serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG213NO

☑ **OUI, je m'abonne pour 15 mois à Pour la Science**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER** — **59€** Au lieu de ~~103,50€~~
- 15 n° du magazine papier

1-F-PAP-P-15N-59€

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — **79€** Au lieu de ~~143€~~
- 15 n° du magazine papier
- 5 Hors-série papier

1-F-HSPAP-P-15N-79€

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **99€** Au lieu de ~~218€~~
- 15 n° du magazine (papier et numérique)
- 5 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

1-F-INT-P-15N-99€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ☐☐☐☐☐ Ville : .....

Téléphone ☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐

Courriel : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @ .....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ **Par chèque à l'ordre de Pour la Science**

Pour un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr/offres-3NO-PLS

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 15 mois. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

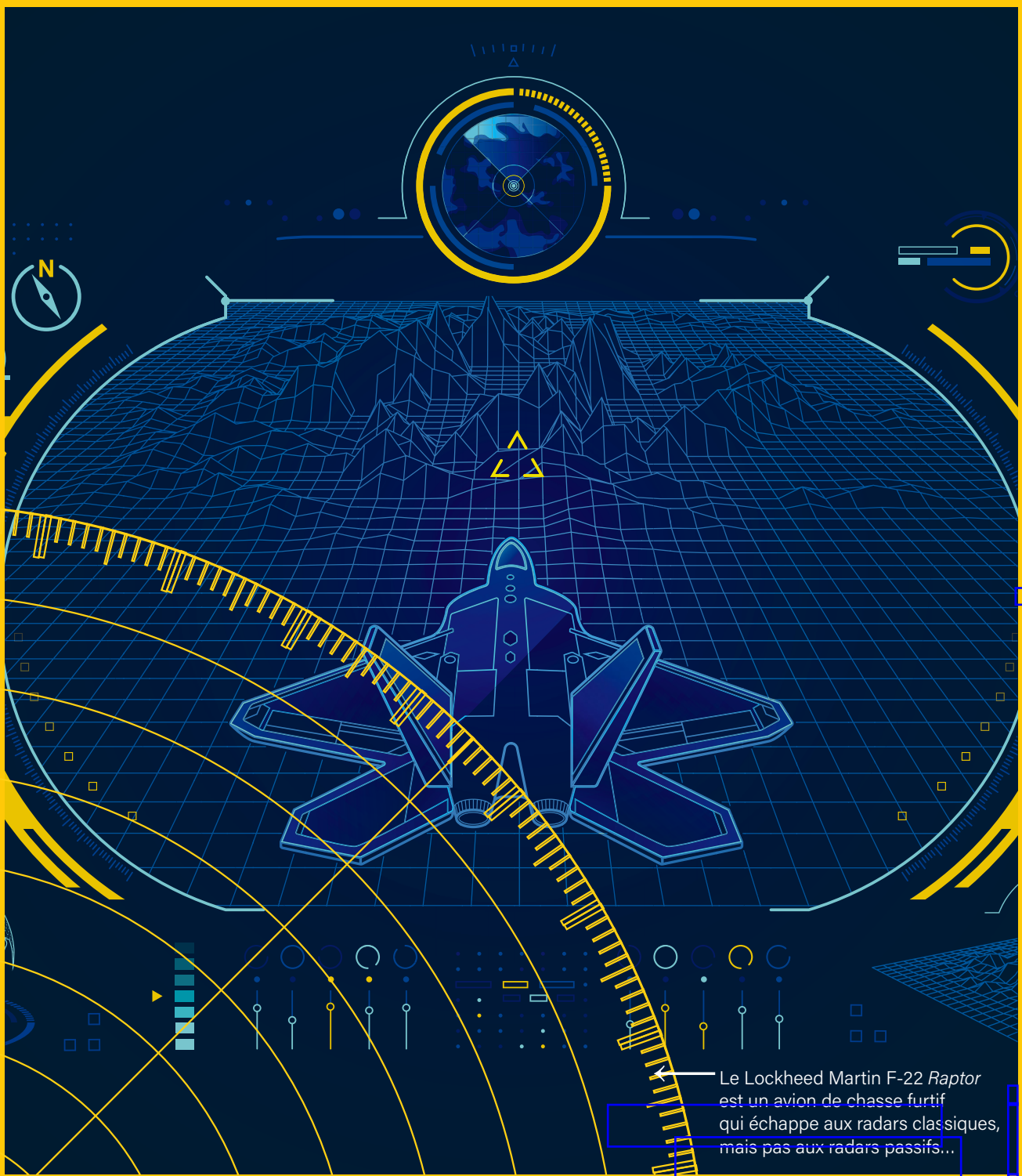
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 58.14 Z

De nouveaux radars indétectables, car dépourvus d'émetteur, repèrent les avions furtifs pourtant réputés invisibles…

Les failles de la furtivité

François Delaveau et François Pipon



Le Lockheed Martin F-22 *Raptor* est un avion de chasse furtif qui échappe aux radars classiques, mais pas aux radars passifs...

© Jackie Niam/shutterstock.com

Il fait nuit noire et une coupure générale d'électricité vous oblige à chercher des bougies stockées quelque part dans votre cave ; muni d'une torche, vous y descendez et commencez à explorer les lieux. Le faisceau lumineux n'éclaire qu'une petite région, et il doit balayer une bonne partie de l'espace avant qu'enfin la lumière réfléchie et diffusée vers vos yeux révèle l'objet convoité. Le principe de cette exploration visuelle est analogue à celui du radar classique, sauf que, d'une part, la « torche » émet des ondes électromagnétiques n'appartenant pas au domaine visible, et, d'autre part, l'émetteur et le récepteur sont confondus dans un seul et même dispositif.

Dans les faits, sans coupure d'électricité, une ou plusieurs sources de lumière non directionnelles éclairent la scène. Vous n'avez alors pas besoin de torche et vos yeux, c'est-à-dire vos détecteurs d'ondes électromagnétiques, distinguent les objets environnants en captant le rayonnement ambiant.

LAMPE TORCHE ET RADAR

Existe-t-il une situation analogue pour les radars ? Oui. Depuis plusieurs années, les industriels mettent au point des radars dits « passifs » qui n'émettent pas d'ondes : ils ne font que capter et analyser (là réside le principal défi) le rayonnement ambiant dans certaines gammes de longueurs d'onde. Et de fait, à part dans quelques rares zones, nous baignons dans un océan de rayonnements que l'on doit aux technologies modernes de communication (radio, télévision, téléphonie mobile…).

En bref

> Les radars passifs n'émettent pas eux-mêmes d'ondes. Ils exploitent celles présentes dans l'environnement, émises par exemple par les antennes-relais de la téléphonie mobile.

> L'absence d'émetteur rend le radar passif très difficile à détecter.

> Les radars passifs peuvent détecter plus facilement des avions furtifs ou des appareils volant à faible altitude.

> Ils sont beaucoup moins coûteux que les radars classiques en équipement, en fonctionnement et en maintenance.

Ainsi, le radar passif ne fait qu'écouter ce qui se passe dans son environnement. Il offre des fonctionnalités complémentaires à celles du radar classique. Surtout, il permet de voir sans être vu : puisqu'un radar passif est dépourvu d'émetteur, il est indétectable…

Comment fonctionne un radar classique et à quoi sert-il ? Un radar est capable de détecter une cible, par exemple un avion, et de mesurer sa distance, sa vitesse et sa direction. Pour y parvenir, il utilise un émetteur d'ondes radio, lesquelles sont réfléchies par les cibles, puis détectées par le récepteur du radar ; les données ainsi recueillies sont ensuite traitées.

La distance de la cible est estimée en mesurant le temps écoulé entre l'instant d'émission de l'onde et celui de réception de son écho. La vitesse de la cible est évaluée d'après la différence entre la fréquence du signal émis et celle du signal reçu, cette dernière fréquence étant modifiée par effet Doppler.

Quant à la direction de la cible, sa détermination dépend du type d'antenne réceptrice. Beaucoup de radars actuels utilisent encore des antennes à réflecteur tournant, qui produisent un faisceau directif. On estime alors la direction de la cible d'après l'orientation de l'antenne qui correspond au maximum du signal reçu, méthode qui peut être affinée par d'autres techniques. Certains radars modernes ont des réseaux d'antennes fixes : les faisceaux, en émission et en réception, sont alors formés dans les directions désirées sans rotation mécanique, mais par calculs électroniques de pondérations en phase et en amplitude des différentes antennes. Cela leur confère une grande rapidité

et autorise des traitements élaborés permettant entre autres de calculer précisément la direction de la cible.

Grâce aux trois types d'informations recueillies (distance, vitesse et direction des cibles), le radar reconstruit et affiche une cartographie de son environnement.

Reprenons une torche pour illustrer le principe : la lumière projetée d'une lampe allumée pendant un bref instant se reflète dans tous les « miroirs » de l'environnement, c'est-à-dire tous les matériaux conducteurs d'électricité. Ce sont ces reflets qui fournissent une cartographie de l'environnement. Les bons conducteurs (comme les métaux) réfléchissent mieux que les mauvais (le bois ou certains plastiques), ce qui se traduit sur l'écran du radar par des zones plus contrastées et détaillées que d'autres.

ATTENTION AUX TURBULENCES

Cependant, bien que la puissance d'émission d'un radar soit généralement très élevée, le niveau du signal reçu en retour est, lui, très faible, et sa qualité fluctuante. En effet, la qualité de l'écho radar ne dépend pas seulement de la puissance du signal émis. Elle dépend aussi de sa fréquence et de sa composition ; de l'orientation et de la taille des antennes d'émission et réception ; de la distance entre le radar et la cible ; des perturbations du milieu de propagation (turbulences atmosphériques, précipitations, masquages par le terrain…) ; de la taille, de la vitesse et des fluctuations de la cible ; des performances de calcul disponibles pour le traitement des signaux reçus…

RADAR

Le mot « radar » est l'acronyme de l'anglais *radio detection and ranging* (« détection et télémétrie par ondes radio »). Les gammes de fréquences d'émission des radars classiques varient, selon les applications, de quelques dizaines de mégahertz à environ 300 gigahertz. Au niveau international, les bandes de fréquences, qu'elles soient civiles ou militaires, pour les radars ou pour les autres dispositifs, sont allouées tous les trois ans par l'Union internationale des télécommunications (UIT).

Ainsi, le radar est capable de discerner des surfaces et des objets plus ou moins conducteurs. Les applications sont multiples. L'eau étant bien conductrice, le radar est fréquemment utilisé en météorologie pour cartographier les précipitations et les formations nuageuses. On retrouve de même des radars sur des satellites d'observation, notamment pour fournir des informations sur le niveau des océans, sur l'état de la surface terrestre ou encore sur la constitution des premières couches de terrain, ainsi que pour le renseignement militaire. Embarqués sur des avions, les radars aident à la détection, à la surveillance aérienne et au guidage de l'appareil, notamment en cas de faible visibilité ou de vol à très basse altitude.

Sur des avions militaires, certains radars constituent un moyen privilégié d'alerte, de

LE RISQUE D'AVEUGLEMENT

Les émissions utilisées par les radars passifs (émetteurs radio, de télévision…) étant souvent permanentes et continues, les ondes reçues directement et celles reçues après réflexion par la cible doivent être traitées simultanément. Aussi, le radar passif doit en permanence gérer le risque d'aveuglement induit par le signal directement reçu de l'émetteur. En pratique, le signal direct reçu est généralement un million à dix milliards de fois plus puissant que l'écho reçu de la cible. Cela représente une difficulté technique majeure. Afin de discerner l'écho de cible malgré tout, une capacité de calcul importante est nécessaire pour mettre en œuvre une architecture de traitement spécifique. Cette architecture de traitement exploite les connaissances que l'on a sur l'émetteur (sa position, ses caractéristiques…) et utilise, pour réduire fortement les signaux aveuglants et détecter les échos avec une grande sensibilité, un réseau d'antennes réceptrices et des filtres adaptatifs très performants.

renseignement et de protection. Outre l'évitement des collisions, l'aide aux approches et aux appontages, les radars militaires aéroportés sont utiles pour cartographier des zones d'intérêt ou un champ de bataille, pour conduire des tirs et guider l'artillerie. Aujourd'hui, les radars aéroportés fournissent des images dont les pixels correspondent à des zones de la taille de quelques centimètres.

Au sol, les radars servent au contrôle aérien. En zone littorale ou portuaire, les radars maritimes jouent un rôle similaire pour repérer et guider les navires. On peut aussi mentionner la sécurité routière, des radars étant dévolus au contrôle de la vitesse des véhicules. Les radars de recul ou encore les radars d'assistance au freinage d'urgence qui équipent certains véhicules ont été développés selon le même principe.

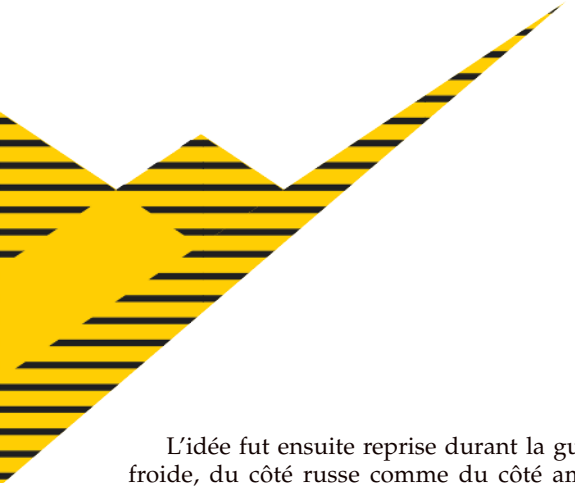
Quels que soient la diversité et l'intérêt de ces applications, le fonctionnement d'un radar classique, ou actif, nécessite beaucoup d'énergie : pour atteindre des portées appréciables, le radar doit émettre des ondes à une très forte puissance. Par conséquent, le radar actif est très peu discret, et même un appareillage électronique rudimentaire peut le détecter facilement. Dans le domaine militaire, un tel radar aide certes à observer, mais il trahit également sa présence ; et dans le domaine civil, les risques de brouillages involontaires posent aussi des difficultés. Enfin, un dispositif capable de rayonner une grande quantité d'énergie coûte extrêmement cher en équipement, en installation et en maintenance.

ÉLIMINER L'ÉMETTEUR

Ces contraintes ont conduit à l'idée de radar passif. L'idée fondamentale consiste à ne développer et à n'installer que la partie « réception » du radar. Il n'y a pas d'émetteur au sens strict. Le radar passif exploite tout simplement des signaux externes présents dans son environnement, tels ceux émis par des antennes de radiodiffusion ou télédiffusion, ou des stations relais des téléphones portables.

Le principe du radar passif a été inventé peu après celui du radar actif, au début du XX^{e} siècle. Les premiers à effectuer des recherches sérieuses ont été les Allemands pendant la Seconde Guerre mondiale : la société Telefunken avait réalisé un prototype de radar passif, utilisant une antenne gigantesque, dont les signaux reçus étaient dépouillés et exploités manuellement par une équipe de plusieurs dizaines d'opérateurs.

© Vector1st/shutterstock.com



L'idée fut ensuite reprise durant la guerre froide, du côté russe comme du côté américain. Le radar passif n'a toutefois pas dépassé le stade du prototype. Les recherches n'ont abouti qu'au début des années 2000, lorsque des applications industrielles et les premiers radars passifs opérationnels ont vu le jour pour des applications de surveillance maritime et aéroterrestre : il fallait attendre que la technologie nécessaire – émetteurs radio, télédiffusion numérique, ordinateurs puissants… – soit disponible.

UN RADAR OPPORTUNISTE

Le principe d'un radar passif est simple : profiter de la présence opportune d'un ou de plusieurs émetteurs suffisamment puissants, mais conçus pour tout autre chose, afin d'analyser les échos renvoyés par des cibles en mouvement. En effet, une antenne qui diffuse des émissions de radio, de télévision ou qui relaye des communications téléphoniques émet continuellement des signaux puissants. Dans le domaine militaire, les émissions des radars alliés ou ennemis ainsi que certaines transmissions des satellites de télécommunication ou de géolocalisation remplacent si besoin ces émissions civiles.

Lorsque ces ondes atteignent un obstacle comme un navire ou un avion, elles sont réfléchies par la coque ou la carlingue. Un récepteur capable de capter l'écho qui en résulte peut alors détecter et localiser le navire ou l'avion, puis en évaluer la vitesse de déplacement, la trajectoire et la direction.

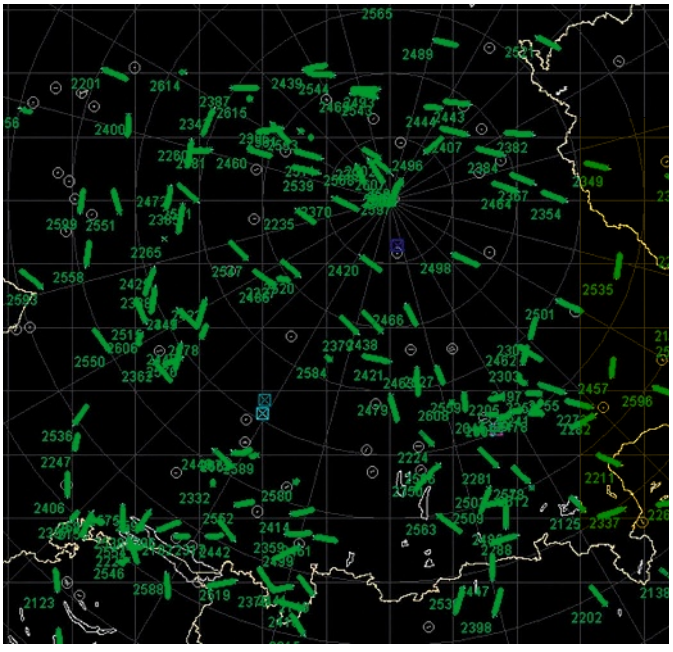
Les radars passifs constituent un complément du radar actif, dont ils compensent les faiblesses en offrant divers avantages. Lesquels ?

Tout d'abord, un radar passif ne nécessite aucune allocation de fréquence spécifique. Ensuite, il est indétectable puisqu'il se résume à un récepteur. Un avion ennemi équipé d'un détecteur de radars n'enregistrera en fait qu'une activité radioélectrique normale, constituée d'émissions de télévision, de radio et de réseaux de téléphonie mobile. Cet aspect est particulièrement important pour les applications militaires, mais il présente aussi de nombreux avantages pour les applications civiles : l'absence d'émission élimine les risques de brouillage et facilite la coexistence du radar passif avec d'autres systèmes radioélectriques, aux bandes de fréquences souvent encombrées.

Par ailleurs, en utilisant des bandes de fréquences basses (celles de la radio FM et de la télévision, c'est-à-dire d'environ 80 à 860 mégahertz), le radar passif présente un complément de couverture aérienne, notamment aux basses altitudes, très appréciable par rapport aux radars actifs, qui couvrent essentiellement les zones de moyenne et haute altitudes. En effet, l'exploitation conjointe de signaux de basse fréquence et

AVION FURTIF

Un avion est dit « furtif » quand il est conçu pour être le plus invisible possible aux radars. Pour ce faire, on peut choisir des formes, souvent anguleuses, qui réfléchissent les ondes incidentes autrement que vers l'émetteur. Autre option, couvrir l'avion d'un composé qui absorbe ces ondes. Les deux solutions sont compatibles et applicables à d'autres engins, comme les hélicoptères, les bateaux, les sous-marins… En outre, la furtivité peut aussi concerner la diminution de chaleur émise et des sons produits par l'appareil.



Le ciel du sud de l'Allemagne et les avions *(en vert)* qui le traversent, vus fin juillet 2019 par un dispositif de radar passif (nommé Twinvis) conçu par la société Hensoldt. Il s'agit d'un système multistatique réunissant quatre appareils installés à Nuremberg, Roth, Erding et Ulm. Ces tests validaient la pertinence des radars passifs pour le contrôle aérien.

de la configuration dite « bistatique », où l'émetteur et le récepteur sont spatialement séparés, donne lieu à trois atouts essentiels.

Un premier est le contournement des obstacles constitués par le relief. En effet, les ondes de basse fréquence ont une assez grande longueur d'onde (de l'ordre du mètre), et sont donc peu sensibles aux obstacles de petite taille ; par ailleurs, la position décalée de l'émetteur donne accès à des zones qui, autrement, seraient cachées par le relief.

LES AVIONS FURTIFS DÉVOILÉS

Un deuxième atout lié au couple basse fréquence-configuration bistatique est la suppression ou la forte réduction de la furtivité de certains avions militaires. Les avions furtifs, tels les bombardiers américains F117, B2 ou F-22 *(voir la figure page 39)*, sont des appareils dont la forme et les matériaux qui les recouvrent sont conçus pour limiter la puissance des échos radar renvoyés en direction de l'émetteur. Cette parade des avions furtifs est très efficace contre les radars classiques, qui cumulent en un même lieu les fonctions d'émission et de réception ; mais elle est battue en brèche par la géométrie bistatique des radars passifs et par la faible efficacité des revêtements absorbants pour les ondes de basse fréquence.

Un troisième atout réside dans la capacité à augmenter fortement la couverture et la précision lorsque plusieurs dispositifs sont exploités simultanément. Il ne s'agit plus de configuration à strictement parler bistatique, mais plutôt multistatique. La multiplication des points de vue sur la cible se traduit par un accroissement du nombre de données, aujourd'hui gérable grâce aux calculateurs modernes, qui fiabilise et raffine beaucoup le processus de localisation. La capacité de discernement obtenue ici est équivalente à celle d'un radar usuel de contrôle aérien comme l'a montré la société allemande Hensoldt, en 2019 *(voir la figure ci-dessus)*.

Grâce à ces divers avantages, le radar passif peut être utilisé pour assurer la surveillance des côtes, des frontières, voire des routes, pour aider à lutter contre différents trafics illicites. Par ailleurs, étant dépourvu d'émetteur et d'antenne d'émission de forte puissance,

© Hensoldt

le radar passif coûte beaucoup moins cher qu'un système classique ; sa maintenance, plus simple, est également moins coûteuse. Pour la même raison, un radar passif est, à performances comparables, moins encombrant qu'un radar actif. On peut facilement l'intégrer dans une simple camionnette et, ainsi, le déplacer.

Toutefois, les radars passifs n'ont pas que des avantages. Un inconvénient réside dans le fait que l'utilisation d'un tel dispositif dépend du nombre, de la qualité et de la fiabilité des émetteurs situés dans les alentours. À l'exception des cas où des émetteurs sont spécifiquement disposés à cet effet, ce qui est envisageable dans certains cas (installation d'un réseau radio local, par exemple), on n'a aucune maîtrise sur eux.

Par exemple, si l'on se trouve dans une zone désertique, tel le Sahara, il n'y aura pas nécessairement une quantité suffisante de signaux émis pour faire fonctionner un radar passif.

Par ailleurs, il est nécessaire, surtout dans le domaine militaire, de s'assurer de la présence des émetteurs exploités, de leurs caractéristiques et de leur localisation : cela requiert d'intégrer au sein du radar passif des systèmes de mesure dédiés à la récupération de ces informations, des systèmes de mesure proches de ceux utilisés par les installateurs de réseaux de communication hertziens.

En outre, le fonctionnement d'un radar passif nécessite une mémoire informatique de grande capacité et la réalisation de calculs lourds et complexes. C'est l'amélioration récente et rapide des systèmes informatiques qui a permis d'atteindre les performances requises. La réalisation des composants matériels et l'optimisation des calculs, elles, représentent toute la valeur ajoutée des entreprises capables de réaliser et de commercialiser un tel appareil.

DE L'IRAN AUX ÉTATS-UNIS

Où en est la commercialisation des radars passifs ? Ce n'est que depuis le début des années 2000 que l'on peut parler de phase d'industrialisation. Parmi les grands acteurs mondiaux capables de commercialiser des radars passifs figurent deux grands groupes internationaux : Thales associé à l'Onera (Office national d'études et de recherches aérospatiales) et Lockheed Martin avec son Silent Sentry. Depuis le début des années 2010, l'Iran disposerait aussi de sa propre technologie de radar passif. La recherche est active dans plusieurs pays comme la Russie, la Chine, l'Afrique du Sud…

L'avenir semble très favorable au développement du radar passif. En effet, la généralisation de la radio numérique et surtout de la télévision numérique offre à la technologie du radar passif un gain énorme en précision et en qualité : les signaux émis ont une largeur de bande bien supérieure, d'où une mesure de distance des cibles bien plus précise, une discrimination des cibles et un pistage de bien meilleures qualités.

De même, l'amélioration notable et rapide des calculateurs, plus puissants, moins encombrants, moins coûteux et plus fiables, est une tendance très favorable. Enfin, l'essentiel des composants matériels utilisés est disponible sur le marché à des coûts de plus en plus attractifs.

La prochaine étape, déjà engagée chez Hensoldt comme chez Thales et à l'Onera, consiste en la mise au point de radars passifs hybrides, c'est-à-dire capables de couvrir en même temps plusieurs types d'émetteurs dans les bandes dites « basses » (radio FM et télévision numérique terrestre par exemple), en s'adaptant aux allocations de fréquences ayant cours dans les différentes régions du monde. Une autre piste explorée est celle de l'installation de radars passifs sur des engins mouvants, par exemple flottants.

— Les auteurs —

François Delaveau et François Pipon sont ingénieurs à la société Thales et sont basés à Colombes, en région parisienne.

— À lire —

G. Mazurek *et al.*, Experimental seaborne passive radar, *Sensors (Basel)*, vol. 21(6), art 2171, 2021.

A. Modi *et al.*, New class of RCS-reduction metasurfaces based on scattering cancellation using array theory, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, pp. 298-308, 2019.

F. Delaveau *et al.*, *Passive radar for maritime surveillance,* dans Actes du congrès MAST, Cadix (Espagne), 2008.

Pour disparaître à la vue, un objet ou un organisme vivant doit être transparent et ne pas réfléchir la lumière. Quasi impossible, mais cela n'empêche pas les artistes de jouer avec l'idée.

Un terrain de jeu pour la SF

Roland Lehoucq et J. Sébastien Steyer

© Lightspring/shutterstock.com



En bref

> La quête de l'invisibilité interroge depuis l'Antiquité : Platon s'est penché sur la question.

> Romans, films et séries se sont emparés du sujet et nombre de héros peuvent ainsi disparaître.

> Plusieurs espèces animales parviennent tant bien que mal à se rendre invisibles.

> De leur côté, les physiciens proposent de nombreux mécanismes, mais aucun n'est encore vraiment satisfaisant.

Pourquoi le désir d'invisibilité est-il si fort et si présent dans l'inconscient collectif, dans la littérature et dans les films ? Vraisemblablement parce que l'invisibilité fait disparaître les contraintes sociales et morales. Pouvant échapper à tout châtiment, l'homme invisible devient un danger pour la société *(voir Le miroir de L'Homme invisible, par S. Dieguez, page 92)*.

C'est d'ailleurs le sujet de la fable de Gygès, contée par Platon au début du IIe livre de *La République*. Gygès, simple berger de Lydie, découvre par hasard un anneau qui lui permet de se rendre invisible tout en conservant la faculté de voir et d'entendre ce qui se passe autour de lui. Grâce à ce pouvoir, il se rend au palais royal, séduit la reine, complote avec elle et assassine le roi pour s'emparer du pouvoir. Cette expérience de pensée permet à Platon de discuter de ce qu'est un homme juste et des motivations de la moralité.

C'est une histoire voisine que raconte H. G. Wells dans *L'Homme invisible* (1897), où le chimiste Jack Griffin découvre un sérum d'invisibilité et le teste sur lui. Jouissant de ce pouvoir, il commet vols et crimes, s'enfermant dans une spirale infernale qui le conduira à la mort. Souvent, l'invisibilité est un superpouvoir qui se paie cher, comme l'apprendront aussi Bilbo, puis son neveu Frodon, en utilisant l'Anneau unique de Sauron, dans *Bilbo le Hobbit* (1937), et *Le Seigneur des Anneaux* (1954-1955).

Quant aux méthodes conférant l'invisibilité, elles varient de la magie jusqu'aux techniques les plus élaborées. Côté magie, Harry Potter et sa cape d'invisibilité viennent immédiatement à l'esprit. Pour le reste, les exemples foisonnent. Ainsi, Jane Storm, des *Quatre Fantastiques* (Marvel Comics, 1961), peut se rendre invisible à volonté après avoir été irradiée accidentellement par des rayons cosmiques. Dans la série américaine *L'Homme invisible*, datant de 1975, le savant Daniel Westin met au point une « machine à rayons » capable de rendre les objets invisibles et qu'il s'applique à lui-même. Plus près du mimétisme, la major Kusanagi est une cyborg du manga *Ghost in the Shell* dotée d'un camouflage « thermo-optique ».

SE RENDRE INVISIBLE

Posons-nous maintenant la question de l'invisibilité sur Terre. De nombreux animaux disposent de différents types de camouflages ou de mimétisme, qui ont été sélectionnés par l'évolution. En effet, ils leur confèrent un avantage lors de la chasse ou pour échapper aux prédateurs. Ces stratégies sont rendues possibles notamment grâce à des cellules pigmentaires de la peau (les chromatophores et les iridophores) qui réfléchissent différemment la lumière. Par ailleurs, l'imagerie médicale rend le corps quasi transparent, et les physiciens fabriquent des capes d'invisibilité.

La première solution pour disparaître aux yeux des humains consiste à ne pas absorber la lumière visible : l'objet est transparent. Mais la transparence ne garantit pas l'invisibilité. Bien qu'une faible épaisseur d'eau ou de verre n'absorbe quasiment pas la lumière visible, nous voyons la surface d'une goutte d'eau ou celle d'une vitre parce qu'elles réfléchissent une partie de la lumière incidente. Cette réflexion

est inévitable, car elle est due à la différence d'indices optiques des deux milieux. L'indice optique de la matière biologique étant plus proche de celui de l'eau que de celui de l'air, il est plus facile de limiter les réflexions – et donc de devenir invisible – dans l'eau que dans l'air.

C'est le cas de certains organismes marins, tels que les méduses ou les poissons des abysses : ils passent *incognito*, d'une part car leurs tissus sont transparents et d'autre part car la lumière est faible à grande profondeur. D'autres espèces – manchots, cétacés ou requins – ont le dos beaucoup plus sombre que le ventre, de sorte que leur corps se confond soit avec la surface de l'océan quand ils sont observés de dessus, soit avec le ciel quand on les voit de dessous.

Les réflexions étant évitées, il reste à se prémunir contre la diffusion de la lumière. Pour ce faire, un tissu biologique doit être organisé de façon homogène sur des distances comparables aux longueurs d'onde de la lumière visible. C'est rare, mais possible, comme l'illustre la cornée de l'œil, qui est transparente grâce à un arrangement parfaitement régulier des fibres de collagène qui la composent.

UN CERVEAU TRANSPARENT

En biologie, pour étudier un squelette ou des tissus, la technique classique consiste à tremper l'animal dans différents bains, afin de rendre les chairs invisibles et de colorer les tissus que l'on souhaite observer. Une équipe américaine de l'université Stanford a réussi à rendre transparent le cerveau d'une souris en le plongeant dans un bain d'hydrogel, une substance similaire à celle dont sont constituées les lentilles jetables. Les molécules de ce gel ont pénétré dans les tissus, formant une armature souple et transparente ; les lipides cellulaires opaques à la lumière ont été éliminés.

Il existe d'autres façons de créer l'invisibilité. Si vous branchez une *webcam* qui filme très précisément l'arrière-plan de votre écran d'ordinateur, et si vous adaptez précisément l'image à la taille de votre écran, vous aurez l'impression que celui-ci est devenu invisible ! Malheureusement, ce procédé ne fonctionne que selon la direction perpendiculaire à l'écran. Kazutoshi Obana, de l'université de Tokyo, a perfectionné l'idée. Une caméra filme l'arrière-plan d'une personne et l'image obtenue est projetée sur l'avant de l'individu. Pour que l'illusion soit parfaite, il faut que le sujet porte un manteau couvert de milliers de minuscules réflecteurs sphériques dont la partie postérieure est réfléchissante. En renvoyant chaque rayon lumineux dans sa direction d'arrivée, ce manteau donne l'illusion que celui qui le porte est transparent. Là encore, ce camouflage n'est efficace que dans une seule direction.

En octobre 2006, David Smith et ses collègues de l'université Duke ont réussi à rendre un objet réellement invisible. Pas invisible à la lumière du Soleil, mais dans la gamme des microondes. D'habitude, les engins furtifs absorbent l'énergie électromagnétique incidente ou la renvoient grâce à la forme particulière de leur fuselage. Les Américains ont utilisé des métamatériaux (dont l'indice de réfraction est négatif) pour construire un dispositif capable de forcer les rayons lumineux à contourner un objet, un peu comme l'eau s'écoule autour d'un galet. Les rayons ne sont ni absorbés ni renvoyés par l'objet, de sorte qu'il devient invisible. En raison des contraintes de fabrication, l'équipe américaine a dû utiliser des microondes. Mais, les recherches s'orientent aujourd'hui vers des matériaux invisibles dans la partie visible du spectre lumineux.

On le voit, la science rattrape une fois encore la fiction, et la voiture invisible de James Bond sera peut-être un jour accessible à tous. Mais cela ne deviendrait intéressant que si son conducteur était, lui aussi, invisible !

— Les auteurs —

> Roland Lehoucq est astrophysicien au CEA, à Saclay.
> Jean-Sébastien Steyer est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris.

— À lire —

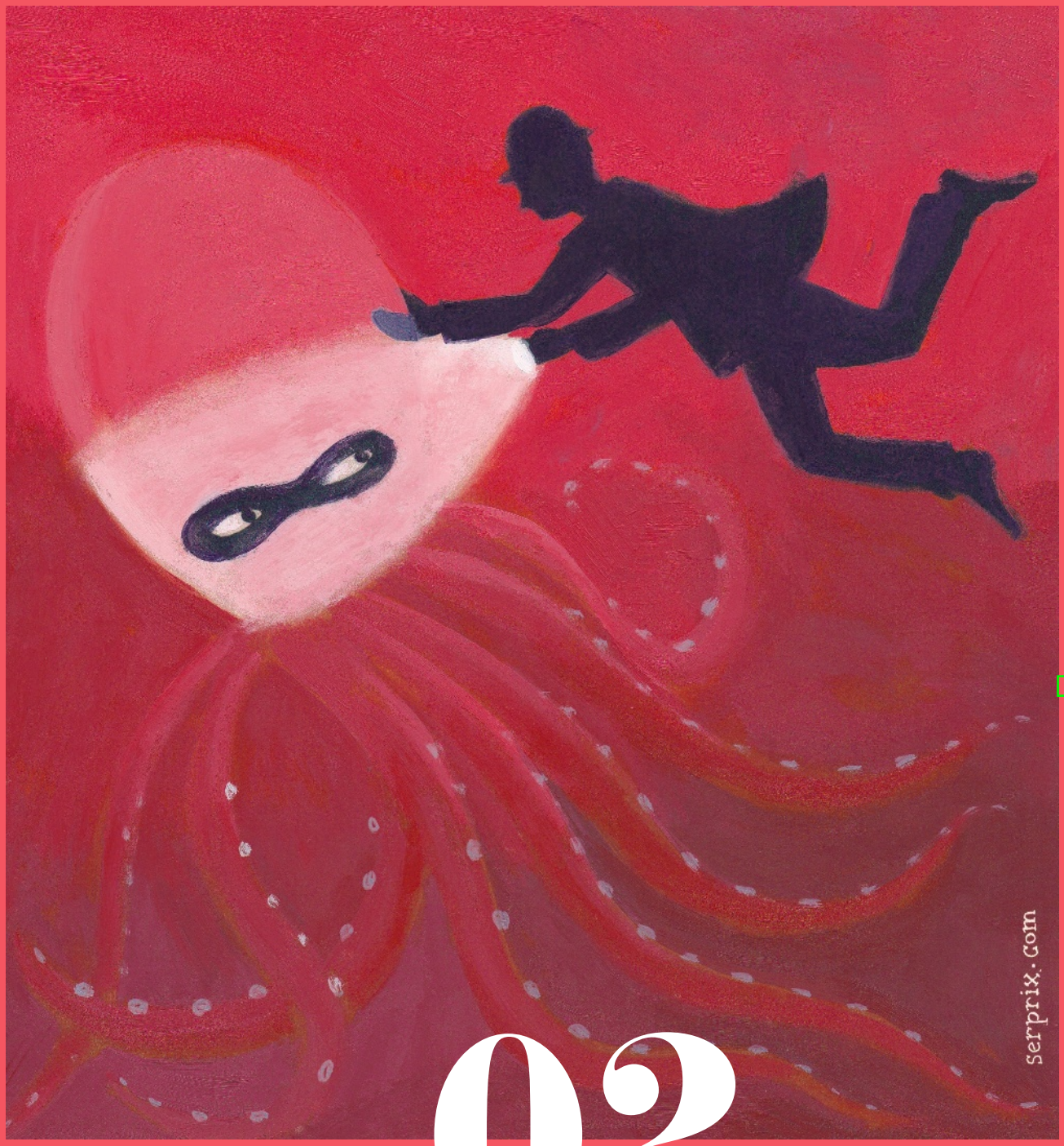
> K. Chung *et al.*, Structural and molecular interrogation of intact biological systems, *Nature*, vol. 497, pp. 332-337, 2013.

> D. Schurig *et al.*, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, *Science*, vol. 314(5801), pp. 977-980, 2006.

Vivre en toute discrétion

« Pour vivre heureux, vivons cachés », dit l'adage. De nombreuses espèces animales l'ont bien compris et ont acquis au cours de l'évolution des caractéristiques grâce auxquelles elles échappent aux prédateurs. Ou, au contraire, surprennent leurs proies plus facilement. Dans l'eau ou sur terre, les as du camouflage rivalisent d'ingéniosité pour se fondre dans le décor. Et même dans notre corps des parasites multiplient les stratégies pour échapper à la vigilance du système immunitaire.

Mieux ! Notre planète Terre ne serait pas ce qu'elle est sans l'action d'êtres invisibles, les microbes. La nature est décidément le royaume de l'invisibilité.



02

Rois de la stratégie, de nombreux parasites se soustraient à la vigilance de leurs hôtes, au point même parfois de devenir invisibles aux « yeux » de leur système immunitaire.

Pour vivre heureux vivons cachés

Sophie Beltran-Bech

© sciencepics/shutterstock.com



Quoi de mieux pour un parasite, comme *Plasmodium falciparum*, l'agent du paludisme *(ici représenté au stade dit « sporozoïte » au moment de la transmission par le moustique)*, que de devenir invisible pour mieux infecter un hôte ?

Nous-mêmes, nos enfants ou des proches avons tous été confrontés aux poux, ces parasites qui prospèrent et prolifèrent sur le cuir chevelu et parfois en d'autres endroits du corps. Tenaces, ils ont néanmoins un point faible : ils sont visibles, et on peut leur faire la chasse facilement pour s'en débarrasser. Ce n'est hélas pas le cas de tous les parasites, tant s'en faut. Certains s'ingénient en effet à se rendre invisibles jusqu'à même se rendre indétectables par le système immunitaire de l'hôte. C'est un peu le stade ultime du parasitisme ! Mais de quoi parle-t-on précisément ?

L'interaction d'un hôte et d'un parasite est une symbiose durable et intime, un passage obligé pour le parasite qui en tire un bénéfice pour accomplir au moins une partie de son cycle de vie. Du côté de l'hôte, cette association, tout sauf indispensable, est au mieux neutre et s'avère le plus souvent synonyme de coûts qui se traduisent parfois en maladies. Le parasite est considéré comme du non-soi par l'hôte, qui met en place des stratégies de protection. En réponse, le parasite adopte des mécanismes de défense pour contrer l'arsenal défensif de son hôte.

C'est une course aux armements au long cours, celui de l'évolution, théorisée par Leigh Van Valen dans les années 1970 avec son concept de la Reine rouge, une référence à un épisode de *De l'autre côté du miroir*, le roman de Lewis Carroll, où Alice court avec la Reine d'un jeu d'échecs (dans les pays anglo-saxons, les pièces sont blanches et rouges) à la même vitesse que le paysage ! L'idée est schématiquement que toutes les espèces évoluent en parallèle, aucune ne pouvant prendre le pas sur une autre, chaque individu cherchant juste à survivre.

Cette course aux armements entre hôtes et parasites se situe à plusieurs échelles, de celle du comportement à celle de la molécule avec des mécanismes spectaculaires mis en place par les deux belligérants, hôtes et parasites. Ajoutons que, généralement, les parasites ont un atout de taille, un taux de réplication bien supérieur à celui de leur hôte, ce qui confère aux mutations et donc aux adaptations une probabilité plus grande d'apparaître chez les parasites !

Dans ce contexte, le parasitologue Claude Combes a proposé un cadre théorique pertinent fondé sur l'existence de deux filtres : la rencontre et la compatibilité. Une interaction hôte-parasite n'a lieu que si ces deux filtres sont ouverts. Les stratégies des hôtes visent alors à fermer au moins un des deux filtres, tandis que celles des parasites ont pour but d'ouvrir ou contourner ces filtres.

UNE QUESTION DE FILTRES

À l'échelle des comportements, c'est souvent le filtre de rencontre qui est visé, que ce soit par l'hôte ou le parasite. Au cours de l'évolution, en guise de contre-offensive, certains hôtes ont appris à reconnaître, par des signaux olfactifs ou autres, leurs congénères parasités et ont mis en place des mécanismes d'évitement de ces individus, en privilégiant un partenaire de reproduction non parasité quand le choix leur est donné. Ainsi, la souris domestique femelle détecte chez le mâle la présence de parasites intestinaux à l'odeur de l'urine et s'en détourne.

À l'inverse, des parasites ont mis en place des mécanismes favorisant la rencontre avec leur hôte. De fait, plusieurs espèces de schistosomes (des vers parasitaires responsables des bilharzioses) ciblant les humains (environ 280 000 décès par an), les bovins et les rongeurs quittent au stade larvaire de cercaire leur hôte intermédiaire, en l'occurrence des mollusques d'eau douce, aux heures où la probabilité de rencontre des hôtes vertébrés est maximale, par exemple lorsqu'ils vont boire : le matin pour les bovins, en milieu de journée pour les humains et le soir pour les rongeurs. Les cycles de vie sont ainsi synchronisés.

Par ailleurs, des parasites sont doués pour manipuler le comportement de leur hôte, le

En bref

> Pour au moins une partie de leur cycle de vie, les parasites dépendent de leur hôte pour qui, à l'inverse, cette relation est souvent néfaste.

> Les parasites mettent donc en œuvre des stratégies pour éviter leur neutralisation et leur élimination.

> L'une d'elles est le mimétisme : en ressemblant à leur hôte jusqu'aux molécules produites, celui-ci ne repère pas l'intrus.

> Plus encore, par diverses stratégies, des parasites parviennent à se rendre invisibles au système immunitaire de leur hôte.



← En Malaisie, un scarabée *(à droite)* suit une fourmi légionnaire, en toute impunité, sans craindre les terribles mandibules. C'est qu'il a rendu ses différences invisibles : physiquement, comportementalement, et même chimiquement, il a tout d'une fourmi !

poussant à adopter des comportements parfois aberrants qui favorisent la transmission. Par exemple, un crustacé d'eau douce du genre *Gammarus* « devient fou » quand il est infecté par le ver trématode *Microphallus papillorobustus* et se met à tournoyer à la surface du plan d'eau attirant à son insu ses prédateurs : des oiseaux hôtes définitifs du parasite en question. La liste de telles prises de contrôle de l'hôte est longue et tous les cas sont fascinants, mais les parasites ont d'autres cordes à leur arc, notamment quand il s'agit d'échapper aux défenses de leur hôte.

LE MIMÉTISME DES PARASITES

Le parasite peut opter pour le mimétisme afin de duper son hôte et laisser ouvert le filtre de rencontre. Quelque 40 % des espèces de coucous utilisent cette stratégie. Chez le coucou gris *Cuculus canorus*, l'œuf ressemble à ceux des passereaux dans le nid desquels, profitant de leur absence, la femelle pond. Au passage, elle consomme un de leurs œufs qu'elle remplace par le sien. Les parents devenus adoptifs à leur corps défendant assurent ensuite la couvaison. Le petit coucou éclôt plus tôt que ses colocataires et élimine les œufs de ses hôtes en les jetant hors du nid. Ainsi, les parents passereaux s'occupent-ils de lui seul sans se rendre compte qu'il n'est pas de leur espèce. Cette manipulation entraîne un coût très important pour les passereaux hôtes qui échouent dans leur propre reproduction, mais le filtre de rencontre était béant et le mimétisme de l'œuf du coucou a ouvert le filtre de compatibilité.

Ce mimétisme se rencontre également à l'échelle moléculaire, l'interaction du papillon du genre *Phengaris* et la fourmi hôte *Myrmica schencki* l'illustrant. Les chenilles produisent sur leur cuticule des molécules, des hydrocarbures, similaires à celles que produisent les larves des hyménoptères. Leurrée, une fourmi qui rencontre cette chenille pense à tort qu'il s'agit d'une larve de sa colonie et la ramène au sein de la fourmilière où elle sera traitée comme une des leurs et bénéficiera de tous les soins (alimentation et protection…) nécessaires à son développement. À ce camouflage chimique s'ajoute parfois un raffinement supplémentaire de type sonore : la chenille de l'Azuré de la croisette *Phengaris rebeli*, une fois dans la fourmilière de *Myrmica schenki*, émet des sons semblables à ceux de la reine et profite alors d'une attention toute particulière de la part des ouvrières. Certains *Phengaris*, dont l'Azuré du serpolet *Phengaris arion*, vont jusqu'à dévorer les œufs des fourmis (*Myrmica sabuleti* ou *M. scabrinodis*) qui les hébergent.

Un autre cas étonnant est celui de coléoptères de la famille des Staphylinidae et de plusieurs espèces de fourmis légionnaires, c'est-à-dire dont les colonies sont nomades et se déplacent en nappes ne laissant rien sur leur passage lors de leurs migrations (c'est la *marabunta*, en espagnol). L'intrus passe inaperçu dans la colonie *(voir la photo ci-dessus)* pourtant redoutablement inhospitalière, où il profite du vivre et du couvert en mimant l'aspect, le comportement et, à l'instar de *Phengaris*, la composition chimique de la surface de la cuticule de ses « congénères ».

© T. Komatsu

La stratégie du mimétisme et l'invisibilité qui en découle peuvent aller plus loin. En effet, si les hôtes sont dotés de systèmes de défense parfois très complexes, mettant en jeu des acteurs cellulaires et moléculaires, avec ou non des systèmes de mémoire, des parasites échappent parfois à la vigilance du système immunitaire de bien des manières et le mimétisme en est une. De la sorte, non reconnu comme du non-soi, l'intrus peut se développer. Certains insectes parasitoïdes tirent profit de leur proximité phylogénétique pour synthétiser des molécules similaires à celles de leurs hôtes insectes.

NEUTRALISER L'IMMUNITÉ

La guêpe parasitoïde *Venturia canescens*, qui pond ses œufs dans un autre insecte (un lépidoptère) *Ephestia kuehniella* en est une illustration parfaite. Ici, les œufs du parasitoïde sont recouverts d'une protéine qui présente de fortes homologies avec la protéine P42 que l'hôte synthétise naturellement notamment au niveau des hémocytes (les cellules immunitaires des invertébrés). Les œufs du parasitoïde deviennent invisibles aux « yeux » des hémocytes de l'hôte.

Deux précautions valant mieux qu'une, la même espèce de guêpe a une autre corde à son arc : son ADN contient le génome d'un virus, un nudivirus désormais domestiqué, qui constitue une arme biologique redoutable. Le génome vestigial code, dans les ovaires de l'insecte, la production de vésicules lipidiques, des liposomes, qui renferment des protéines immunosuppressives produites par la guêpe et injectées avec ses œufs dans le corps de la chenille, également d'*Ephestia kuehniella (voir l'encadré page ci-contre)*. Là, les pseudovirus infectent les hémocytes de la chenille et les inactivent. Le papillon a peu de chances de voir le jour…

L'ADN d'une guêpe contient le génome d'un virus transformé en une redoutable arme biologique

La ressemblance de ces molécules trouve parfois son origine dans l'échange de matériel génétique au cours de l'évolution entre deux protagonistes, par exemple *via* des éléments transposables, c'est-à-dire des éléments génétiques mobiles qui se déplacent dans le génome et d'un génome à un autre. De fait, dans certaines relations hôte-parasite, on retrouve des fragments d'ADN communs dans les génomes des deux organismes qui ne partagent pas d'ancêtre commun suffisamment proche pour justifier cette proximité génétique : elle ne s'explique donc que par un transfert génétique horizontal. On trouve ainsi des séquences génomiques de la bactérie *Wolbachia* dans le génome de son hôte, le crustacé terrestre *Armadillidium vulgare*.

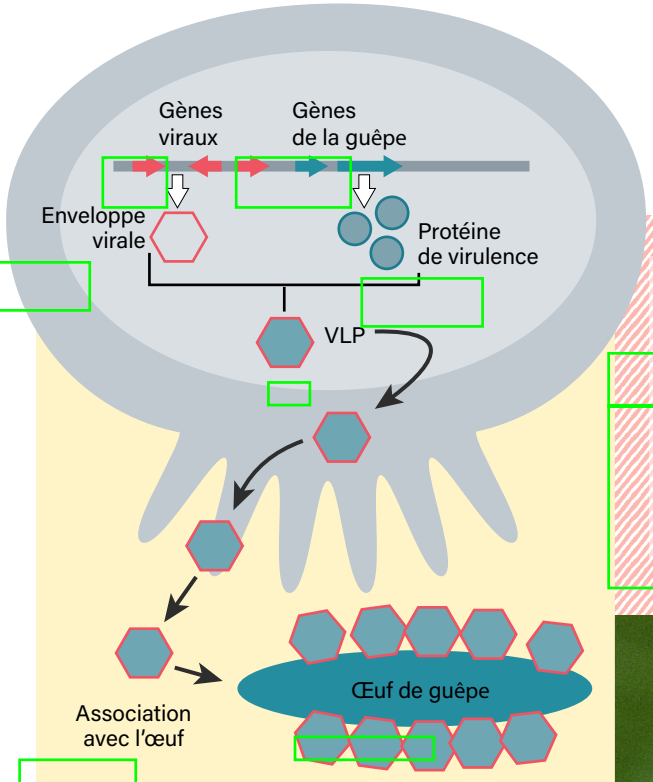
D'autres parasites, incapables de synthétiser des molécules proches de celles de leurs hôtes, les empruntent pour s'en recouvrir et passer inaperçus. Grâce à ces mécanismes de camouflage moléculaire, souvent très efficaces, le parasite est alors moins, voire plus du tout, détecté par le système immunitaire de son hôte.

Se cacher dans des organes où le système immunitaire est le moins efficace, le plus tolérant au non-soi, est une autre façon d'échapper aux défenses de l'hôte. Ces organes sont, par exemple, en contact direct avec l'extérieur, et donc davantage exposés aux antigènes (là, pour éviter un emballement, le système immunitaire est bridé) ou encore soumis à une réaction inflammatoire qui limiterait leur fonctionnement de base. Parmi ces organes jouant le rôle d'impasse immunitaire, citons l'œil, le cerveau, l'utérus ou encore les testicules. Si l'hôte favorise leur protection, il n'en reste pas moins que les parasites qui parviennent à y trouver refuge deviendront quasiment invisibles, même s'ils se retrouvent dans les yeux de leur hôte comme le fait le nématode parasite *Onchocerca volvulus* dans le cas de l'onchocercose ou cécité des rivières.

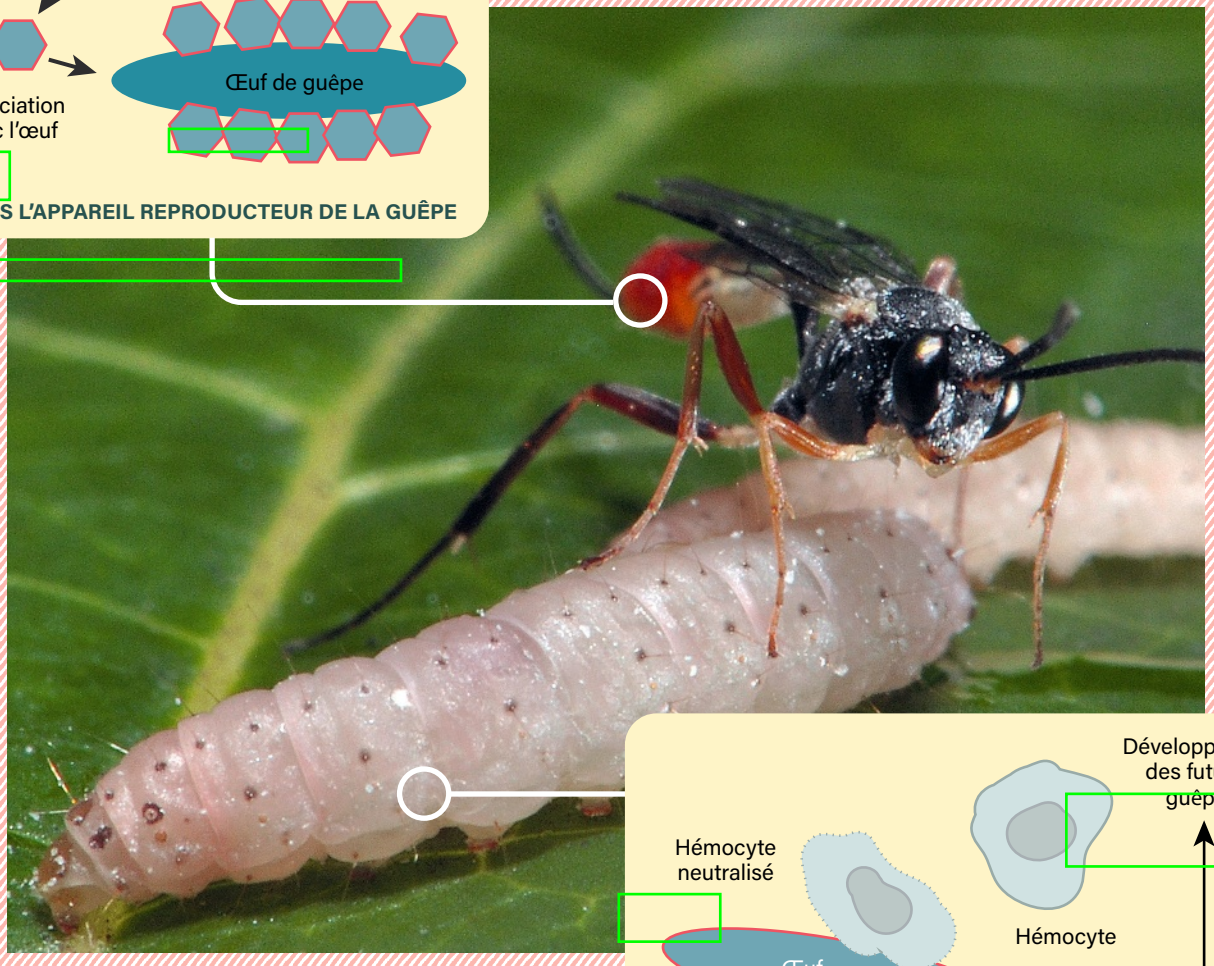
Ces techniques parasitaires de mimétisme et de camouflage prennent parfois un tour plus dynamique. Le cas du *Plasmodium*, l'agent du paludisme (première parasitose humaine en termes de morbidité avec 229 millions de personnes malades et 409 000 décès en 2019) en est une illustration. Le parasite, un unicellulaire, synthétise une protéine grâce à laquelle il se fixe et infecte les globules rouges de son hôte

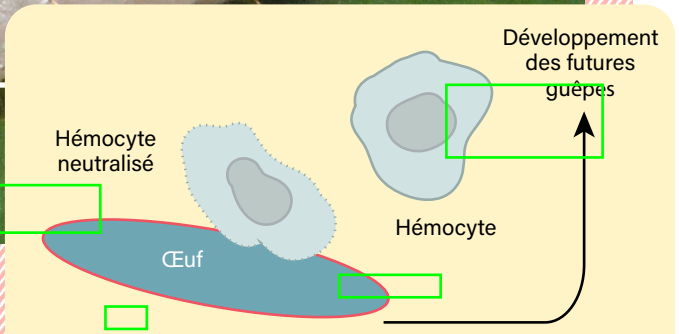
Un virus détourné

La guêpe parasitoïde *Venturia canescens* pond ses œufs dans la chenille du papillon *Ephestia kuehniella*. Les œufs du parasitoïde sont recouverts de particules virales (VLP), codées dans le génome de la guêpe et contenant des protéines *(en bleu)* qui détruiront les cellules immunitaires (les hémocytes) de la chenille parasitée.



DANS L'APPAREIL REPRODUCTEUR DE LA GUÊPE





DANS LE CORPS DE LA CHENILLE

© T. Steinemann/IRBI/CNRS



← Chez les schistosomes, mâle *(en rouge)* et femelle *(en bleu)* vivent imbriqués. Cependant, cette dernière n'hésitera pas à quitter son partenaire pour un autre génétiquement plus éloigné de façon à assurer une meilleure diversité génétique chez les descendants, gage d'une meilleure résistance au système immunitaire de l'hôte.

vertébré, être humain ou autre. Le système immunitaire de ce dernier parvient parfois, seulement après quelques semaines, à reconnaître cette protéine comme du non-soi : il détruit alors les cellules sanguines infectées et garde en mémoire le profil de l'agent pathogène. Fin de partie ? Non, car le *Plasmodium* est capable de fabriquer plusieurs protéines d'adhésion différentes : en changeant d'apparence, le parasite prend de court le système immunitaire de l'hôte et continue d'envahir l'organisme. Ce scénario est ici une succession d'ouvertures et de fermetures du filtre de compatibilité.

DIVORCE CHEZ LES SCHISTOSOMES

L'une des grandes forces des parasites est justement fondée sur ce polymorphisme antigénique qui entrave le système immunitaire et l'empêche de lutter efficacement. L'origine de cette caractéristique est à chercher au niveau génétique. Ainsi en est-il chez le schistosome *Schistosoma mansoni*, un parasite monogame : la femelle, de forme cylindrique de 15 à 25 millimètres de longueur vit en permanence dans un canal aménagé, dit « gynécophore », dans le corps du mâle, qui, lui, est plat et long de 8 à 12 millimètres *(voir la figure ci-dessus)*. Au laboratoire de l'université de Perpignan, nous avons montré que la femelle de ce parasite choisit son partenaire sexuel mâle et optimise ainsi la diversité génétique de sa descendance. En effet, lorsqu'on proposait expérimentalement à la femelle des mâles qui lui étaient plus dissemblables génétiquement par rapport au premier mâle auquel elle était associée, elle changeait de partenaire !

À quel signal réagit la femelle ? On l'ignore encore, mais il s'agit probablement de molécules (protéiques ou lipidiques) impliquées dans les signaux thigmotactiques, c'est-à-dire transmis lors de contacts, entre mâles et femelles. Si ces molécules sont des protéines, on peut s'attendre à ce que, par leur composition en acides aminés, elles reflètent la diversité individuelle des parasites.

En parallèle, nous avons révélé que le système immunitaire des hôtes reconnaissait et donc luttait plus efficacement contre des parasites similaires à ceux qu'ils avaient déjà rencontrés : on parle d'immunité concomitante. On comprend alors l'avantage pour le parasite d'augmenter la diversité génétique. L'hôte, par la pression de sélection qu'exerce cette immunité concomitante, favorise la diversité génétique des parasites adultes qui se développent et se reproduisent de façon optimale dans ses veinules !

Chez *S. mansoni*, et chez beaucoup d'autres parasites comme le trypanosome *Trypanosoma*

© Shutterstock.com/Royaltystockphoto.com

cruzy (responsable de la maladie de Chagas) ou le nématode *Toxocara canis*, de volumineuses glycoprotéines de surface de type mucine font aussi preuve d'un extrême polymorphisme. Ces molécules constitueraient une sorte d'« écran de fumée » pour le système immunitaire de l'hôte en formant des complexes antigènes-anticorps à distance du corps même du parasite, notamment pendant la phase d'invasion. Celui-ci ne cherche donc pas ici à proprement parler l'invisibilité, mais il reste protégé en tenant à distance le système immunitaire de son hôte.

Les exemples de « combats » entre hôtes et parasites que nous avons décrits, mobilisant des techniques d'invisibilité, de camouflage, de manipulation… ne sont qu'un type de relation entre organismes. Il en existe d'autres comme dans les symbioses commensales où les interactions intimes et durables ne causent de tort ni à l'un ni à l'autre des protagonistes. Mieux encore, dans les symbioses mutualistes, fondées cette fois sur la collaboration, l'association est bénéfique et conduit à une meilleure adaptation des deux partenaires à l'environnement. Les relations « apaisées » emblématiques de ce type sont celles des polypes du corail et des algues zooxanthelles ou bien du microbiote intestinal et de l'être humain. Pourquoi le système immunitaire de l'hôte n'élimine pas et tolère les organismes hébergés ? De nombreuses recherches s'attachent à répondre.

DES SYMBIOSES DYNAMIQUES

Cependant, nous savons aujourd'hui que ces symbioses mutualistes sont bien moins pacifiques qu'elles en ont l'air. Le bilan coût-bénéfice de ces interactions est certes, au moment où on les observe et dans la plupart des cas, positif pour les deux partenaires. Toutefois, ces systèmes sont dynamiques d'un point de vue évolutif et une interaction symbiotique mutualiste peut à un moment ou en un lieu donné devenir parasitaire. Ainsi, la densité en algues zooxanthelles dans le tissu corallien dépend de la quantité de lumière reçue. Insuffisante, les algues disparaissent et le corail blanchit, trop abondante, les zooxanthelles prolifèrent et nuisent au développent du polype.

Une interaction symbiotique parasitaire peut également, par baisse de virulence du parasite ou par une plus grande tolérance ou résistance de l'hôte, devenir commensale voire mutualiste. C'est le cas avec les bactéries *Wolbachia* pour lesquelles on observe un continuum allant du mutualisme obligatoire au parasitisme. Chez des nématodes, le microorganisme est obligatoire à l'hôte, car il permet le développement des ovaires. Chez de nombreux arthropodes, seules les femelles infectées par *Wolbachia* peuvent se reproduire avec les mâles infectés par cette même bactérie : les spermatozoïdes des mâles infectés contiennent un « poison » dont seuls les ovules des femelles infectées contiennent l'antidote. Cette fois, la situation est celle d'une interaction plus contrainte et plus parasitaire.

Finalement, le parasite n'est pas si différent de l'hôte, lui-même potentiellement parasite d'un autre organisme : chacun lutte pour sa survie et la transmission de ses gènes à sa descendance, le moyen d'y arriver n'est autre que le résultat d'un mélange de hasard et de sélection naturelle, l'hôte n'étant pour le parasite et, inversement, le parasite n'étant pour l'hôte que l'un des éléments de l'environnement. Alors avant d'appliquer un traitement antipoux, ayez une pensée pour l'insecte parasite, sa présence sur le cuir chevelu est le résultat de millions d'années d'évolution !

— L'autrice —

Sophie Beltran-Bech
est maîtresse de conférences, au laboratoire CNRS Écologie et biologie des interactions à l'université de Poitiers.

— À lire —

C. von Beeren *et al.*, Chemical and behavioral integration of army ant-associated rove beetles – a comparison between specialists and generalists, *Frontiers in Zoology*, vol. 15, art. 8, 2018.

A. Pichon *et al.*, Recurrent DNA virus domestication leading to different parasite virulence strategies, *Science Advances*, vol. 1 (10), e1501150, 2015.

S. Beltran *et al.*, Vertebrate host protective immunity drives genetic diversity and antigenic polymorphism in *Schistosoma mansoni*, *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 24(3), pp. 554-572, 2011.

En jouant avec la physique de la lumière, de nombreux animaux deviennent transparents. Ou presque. Portraits choisis.

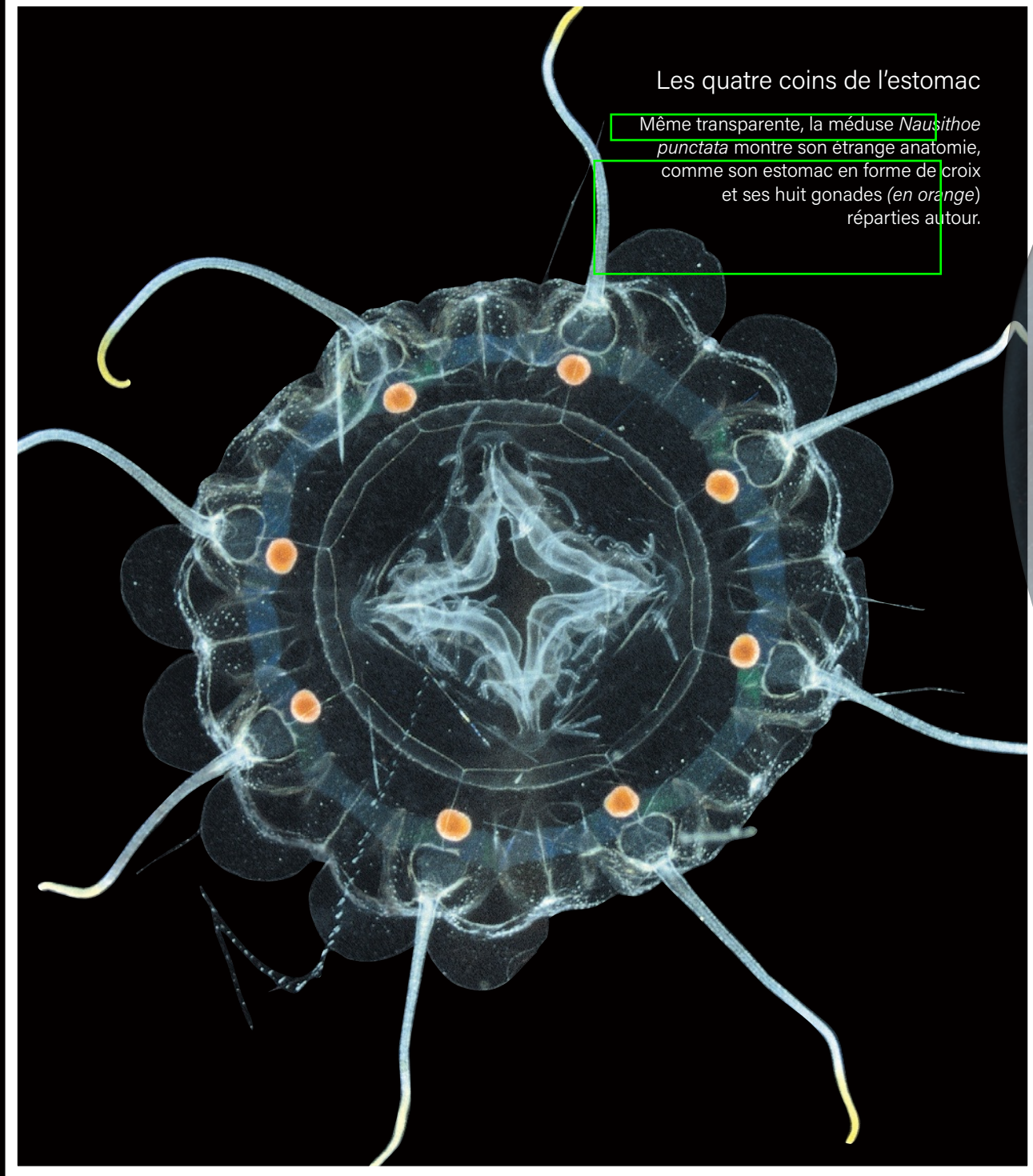
La ménagerie de verre

La pieuvre photogénique ⟶

Cette larve de *Wunderpus photogenicus* (soit la « merveilleuse pieuvre photogénique »), que l'on trouve en Océanie, ne présage en rien de la beauté de l'animal adulte, qui fait le bonheur des plongeurs et explique son nom.



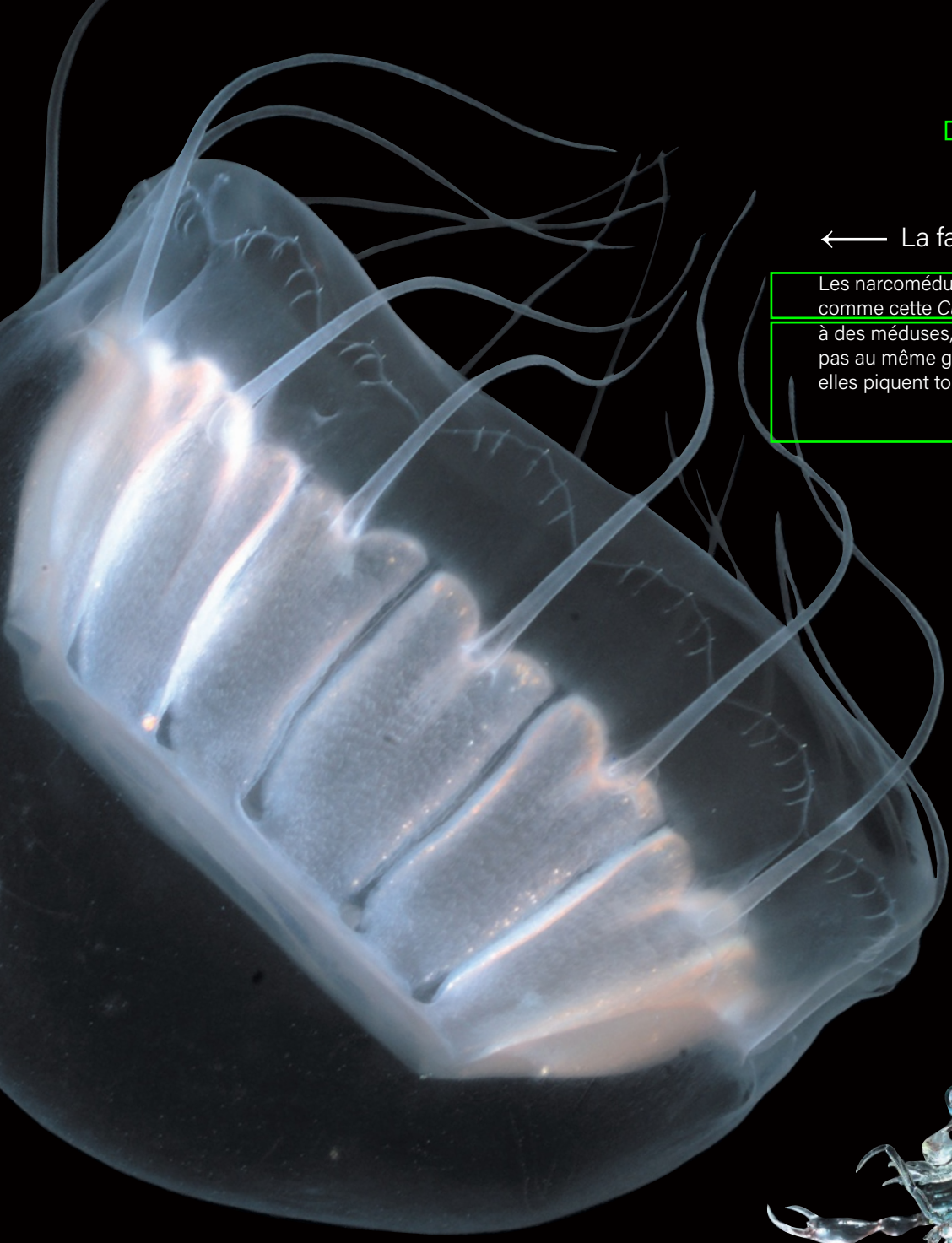
© Suzan Meldonian/Shutterstock.com



Les quatre coins de l'estomac

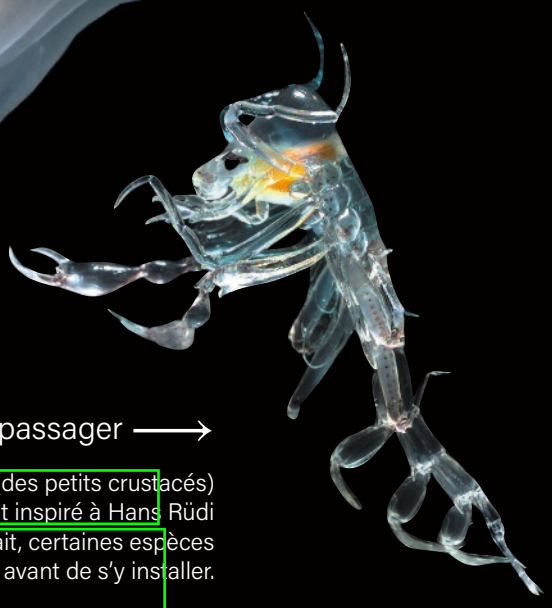
Même transparente, la méduse *Nausithoe punctata* montre son étrange anatomie, comme son estomac en forme de croix et ses huit gonades *(en orange)* réparties autour.

G. Richard Harbison (N. Punctata) ; Eddith A. Woder (Phronima et Cunina)



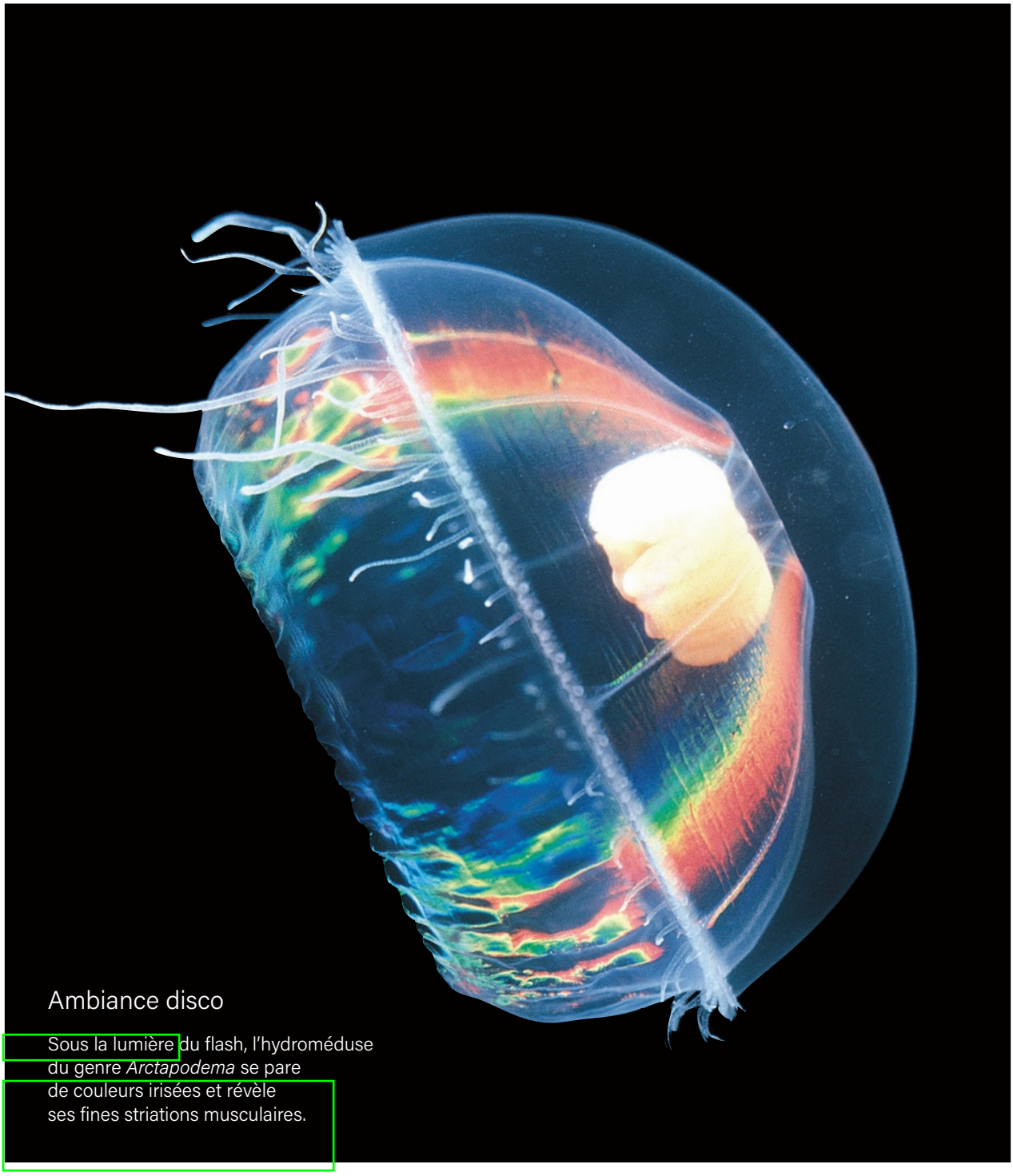
← La fausse méduse

Les narcoméduses (des hydrozoaires) comme cette *Cunina* ressemblent à des méduses, mais n'appartiennent pas au même groupe. Il n'empêche, elles piquent tout autant.



Le huitième passager →

Phronima est un genre d'amphipode (des petits crustacés) de quelques millimètres de longueur. Il aurait inspiré à Hans Rüdi Giger la tête du monstre d'Alien. De fait, certaines espèces de *Phronima* dévorent l'intérieur d'une méduse avant de s'y installer.



Ambiance disco

Sous la lumière du flash, l'hydroméduse du genre *Arctapodema* se pare de couleurs irisées et révèle ses fines striations musculaires.

Laurence P. Madin Whoi (*Arctapodema*); G. Richard Harbison (Pterosoma et Vitreledonella richardi); Suzan Meldonian (*Cardiopoda placenta*); Edith A. Widder (*Prayidae*); G. Richard Harbison (*Forskalea*)

← Des colonies prédatrices

Les siphonophores sont des cousins des méduses qui se réunissent en colonies. Certains *(Prayidae, ci-contre, et Forskalea, en bas, dans le cartouche)*, regroupent leurs cellules urticantes en petits amas clairs. Les animaux attirés par ce qu'ils croient être des poissons ou des crevettes ne voient pas l'animal transparent beaucoup plus gros et sont capturés.



← Des escargots flottants

Cardiapoda placenta (ci-contre) et *Pterosoma (ci-contre, en bas)* sont des petits gastéropodes (la famille des escargots) qui se laissent porter par le courant.







La grenouille de cristal ⟶

Plusieurs espèces du genre *Hyalinobatrachium* (ici *H. iaspidense*), des grenouilles d'Amérique du Sud, ont la peau de leur abdomen transparente, laissant voir leurs viscères.

© Dr Morley Read/shutterstock.com



Une tortue dans la rosée →

Les cassides, comme cet *Aspidomorpha miliaris*, sont des coléoptères *(surnommés scarabées-tortues)* plus ou moins ronds dotés d'une cuticule translucide qui évoque une goutte de rosée.



← Paillettes d'or

La larve de ce flet *Cyclopsetta fimbriata* est constellée d'éclats dorés. Adulte, un œil sera passé de l'autre côté, et l'animal, un poisson plat, se tapira au fond de la mer et se confondra avec son environnement sableux.

— À lire —

> S. Johnsen, The Optics of Life : A Biologist's Guide to Light in Nature, *Princeton University Press*, 2012.

© Stephane Bidouze/shutterstock.com (*Aspidomorpha miliaris*), Suzan Meldonian/shutterstock.com (*Cyclopsetta fimbriata*)

Pour que le corps de certains animaux soit en partie invisible, la transparence des tissus ne suffit pas...

Se faire invisible ou presque

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

© Darkdiamond67 / shutterstock.com





Pour un animal, l'invisibilité peut, en le dissimulant à ses prédateurs, constituer un avantage considérable. De nombreux organismes marins sont composés de tissus biologiques qui n'absorbent pas la lumière. Pourtant, peu sont réellement invisibles. Si l'évolution n'a pas favorisé l'invisibilité, c'est que cette propriété est difficilement compatible avec la vie. Pourquoi ? La physique livre quelques pistes.

La première condition pour ne pas être vu est de ne pas absorber la lumière visible, c'est-à-dire d'être transparent. C'est le cas de presque toutes les molécules organiques qui composent les êtres vivants. Hélas, pour les animaux terrestres, quelques composés viennent gâcher une situation apparemment favorable : citons notamment les pigments de la peau ou du pelage qui protègent des rayons du soleil, ou l'hémoglobine qui absorbe le jaune, le vert et le bleu. Au contraire, dans le milieu marin, quelques mètres d'eau absorbent l'essentiel du rayonnement ultraviolet et seuls les vertébrés ont de l'hémoglobine.

Mais la transparence des matières ne garantit pas à elle seule l'invisibilité. Alors que l'eau et le verre n'absorbent pas (ou si peu) la lumière visible, nous voyons sans difficulté la surface d'une goutte d'eau ou d'une vitre, qui réfléchissent une partie de la lumière. Et nous sommes incapables de percer un brouillard, composé de minuscules gouttelettes d'eau qui diffusent la lumière dans toutes les directions. Pour devenir invisible, il faut donc aussi éviter de réfléchir la lumière et de la diffuser.

En bref

> Certains animaux parviennent à se rendre en grande partie invisibles.

> Transparents, ils ont en outre développé des mécanismes pour éliminer les reflets et limiter la diffusion de la lumière.

> Ces stratégies concernent surtout les espèces marines, mais certaines, comme des papillons, évoluent sur terre.

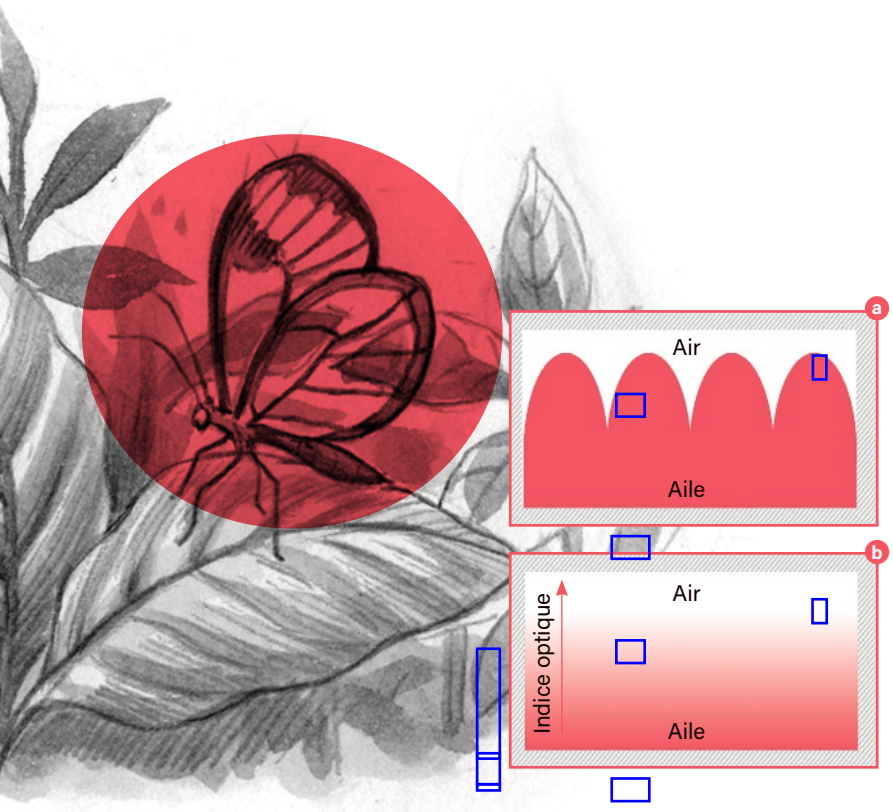
> Seuls les yeux et le tube digestif échappent à cette transparence.

ÉLIMINER LES REFLETS

Comment faire ? Commençons par la réflexion. Lorsque la lumière arrive à angle droit sur l'interface entre deux milieux, la puissance lumineuse réfléchie varie à peu près comme le carré de la différence des indices de réfraction optique. Pour chaque face d'une vitre en verre, dont l'indice est de 1,5 (l'air étant d'indice 1), elle est égale à 4 % de la puissance incidente. Ainsi, une vitre laisse passer 92 % de la lumière et en réfléchit 8. Les yeux de l'homme et de la plupart des animaux, qui sont sensibles à des contrastes d'intensité lumineuse de l'ordre de 1 ou 2 %, décèlent donc aisément une vitre.

Les êtres vivants n'étant pas en verre, qu'en est-il de la matière organique ? L'indice optique des tissus biologiques est à peu près proportionnel à leur densité ; il s'échelonne entre 1,35 pour le cytoplasme (le liquide qui emplit les cellules) à 1,55 pour des protéines en arrangement compact. Dans l'air, les taux de réflexion varieraient

© Bruno Vacaro



Certains papillons, notamment *Cephonodes hylas (à gauche)* et *Greta oto (à droite)*, ont les ailes transparentes et sans reflets. L'atténuation des réflexions est due à des protubérances microscopiques sur l'aile *(a)* qui rendent progressive la transition entre un milieu, l'air, et l'autre, l'aile : la discontinuité qu'il y aurait entre l'indice optique de l'air et celui du matériau de l'aile est atténuée *(b)* dans la direction perpendiculaire à l'aile.

entre 2 et 5 % : trop pour être invisible. Par contre, dans l'eau, dont l'indice est plus élevé (1,34), les taux de réflexion tombent entre 0,001 et 0,5 %.

L'affaire semble entendue : pour être invisible, mieux vaut vivre dans l'eau et sans pigmentation, donc pas trop en surface. C'est le cas de nombre d'organismes marins (crevettes, vers, pieuvres…) qui vivent à des profondeurs allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres *(voir le portfolio page 60)*.

Cependant, certains animaux terrestres présentent une invisibilité partielle. Tel est le cas de quelques papillons dont les ailes sont transparentes et sans reflets. Quel est leur secret ? Comme nous l'avons vu, la réflexion de la lumière est due à la discontinuité de l'indice de réfraction à l'interface de deux milieux. Sur les ailes transparentes des papillons en question, cette discontinuité est atténuée grâce à des protubérances microscopiques. Ces bosses étant distantes les unes des autres d'une fraction de longueur d'onde lumineuse, elles constituent un milieu optiquement homogène le long de l'aile. Parallèlement à l'aile, l'indice optique est la moyenne pondérée de l'indice du fluide environnant et de celui du matériau biologique de l'aile.

Comme ces bosses s'affinent à leurs sommets, il y a de moins en moins de matériau à mesure que l'on s'éloigne de la surface de l'aile : l'indice optique passe progressivement de celui du matériau biologique à celui du fluide environnant *(voir la figure ci-dessus)*. La variation de l'indice de réfraction à l'interface aile-air est suffisamment douce pour éliminer la plupart des réflexions ; c'est pourquoi l'aile, transparente, apparaît sans reflets, comme si elle était trouée.

ÉVITER LA DIFFUSION

Éviter la diffusion de la lumière est plus délicat qu'éviter sa réflexion. Pour s'en convaincre, préparons un breuvage désaltérant, quoiqu'alcoolisé, en ajoutant à cinq volumes d'eau un volume de pastis (ou d'arak, ou d'ouzo). Ces deux liquides sont parfaitement transparents, mais leur mélange est laiteux : on ne voit plus à travers. D'où vient cette soudaine opacité ?

L'anéthol, l'huile essentielle qui donne ce goût anisé, est soluble dans l'alcool ou les mélanges fortement alcoolisés, tandis qu'il est insoluble dans l'eau ou les mélanges faiblement alcoolisés. Solubles dans le pastis pur, dont la concentration en alcool dépasse les 40 %, les molécules d'anéthol sont insolubles dans le mélange eau-pastis. Elles se regroupent donc

Les yeux et le tube digestif sont le maillon faible des animaux transparents

en gouttelettes dont le diamètre est de l'ordre de 0,7 micromètre, c'est-à-dire une taille comparable aux longueurs d'onde (0,4 à 0,8 micromètre) qui composent la lumière visible.

Pour cette taille, la diffusion lumineuse est maximale. Pourquoi ? Considérons d'abord le pastis pur. La situation pour les molécules d'anéthol est comparable à celle des molécules de l'air : leur répartition est aléatoire, mais relativement homogène. Une partie de la lumière est diffusée, mais trop peu pour qu'on le perçoive sur une faible épaisseur.

LE SECRET DU PASTIS

Regroupons maintenant un millier de ces molécules en un agrégat compact, de taille très inférieure aux longueurs d'onde de la lumière visible. De ce fait, les molécules reçoivent le même champ électromagnétique, et les vibrations de leurs charges sous l'effet de ce champ réémettent une lumière d'amplitude 1 000 fois supérieure à celle d'une molécule unique. En concentrant en un petit paquet un millier de molécules, on obtient donc une puissance de diffusion (proportionnelle au carré de l'amplitude) 1 000 fois supérieure à celle d'un millier de molécules éparpillées.

En revanche, lorsque la taille de ces paquets dépasse les longueurs d'onde du visible, les molécules d'un agrégat ne sont pas toutes soumises au même champ électromagnétique. Par interférence, les ondes lumineuses qu'elles émettent se détruisent mutuellement, sauf vers l'avant, c'est-à-dire dans la direction de la lumière incidente : la diffusion diminue.

Tout cela implique une forte contrainte sur les tissus biologiques, dont les composants varient beaucoup dans leurs proportions et leurs indices optiques. Afin d'éviter au mieux la diffusion lumineuse, ils doivent être organisés de façon à former une structure homogène à l'échelle des longueurs d'onde optiques. C'est possible, comme l'illustre la transparence de la cornée de l'œil, constituée de fibres de collagène régulièrement espacées d'environ 0,05 micromètre.

Par ailleurs, certains organes ne peuvent être transparents. Il s'agit en particulier des yeux (car pour voir il faut absorber une partie de la lumière incidente) et du tube digestif (qui dévoile la nourriture opaque ingurgitée). Même si les espèces aquatiques multiplient les astuces physiologiques, ces organes demeurent les maillons faibles de leur camouflage. Sönke Johnsen, de l'université Duke, aux États-Unis, a même montré que l'exercice physique nuisait à la transparence, du moins chez la crevette *Ancylomenes pedersoni* : après trois battements de queue, elle devient opaque !

— **Les auteurs** —

> Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik sont professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris. Leur blog : http://idphys.free.fr/

— **À lire** —

> L. Bagge *et al.*, Transparent anemone shrimp (*Ancylomenes pedersoni*) become opaque after exercise and physiological stress in correlation with increased hemolymph perfusion, *J. Exp. Biol.*, vol. 220(22), pp. 4225-4233 2017.

> S. Johnsen et I. Grillo, Small-angle neutron scattering study of a world-wide known emulsion : Le Pastis, *Colloids and Surfaces A*, vol. 225, pp. 153-160, 2003.

ABONNEZ-VOUS À

Pour la Science

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an		✓
Le hors-série papier 4 numéros par an	✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an		✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS
	31 % de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Service Abonnement Pour La Science - 56 rue du Rocher - 75008 Paris - serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG21STDDOS

☑ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE**
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

6,50€ PAR MOIS -31 %

1-F-HSPAP-N-3PVT-6,5€

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

8,20€ PAR MOIS -43 %

1-F-INT-N-3PVT-8,2€

2 / Mes coordonnées

Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tel. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Courriel : ..... @ .....
(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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 : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Désignation du compte à débiter
BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
IBAN |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Que ce soit pour se dissimuler des prédateurs ou au contraire berner des proies, beaucoup d'espèces animales se fondent remarquablement bien dans le décor. Saurez-vous les retrouver ?

Où est Charlie ?

La fausse orchidée ⟶

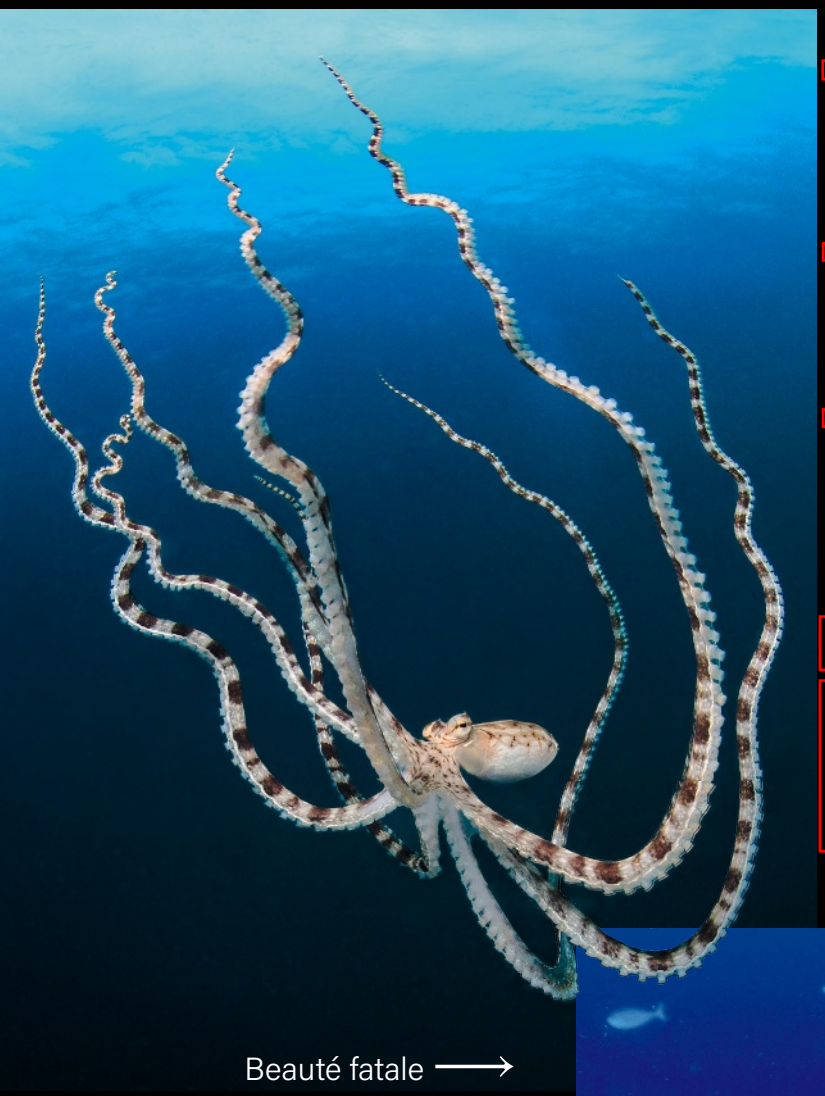
Hymenopus coronatus fait partie des mantes fleurs. Dans les forêts d'Asie du Sud-Est, elle mime une orchidée et attend les insectes, comme les papillons, attirés par une promesse de nectar : ils finiront au menu de la mante.

© kuritafsheen/GettyImages



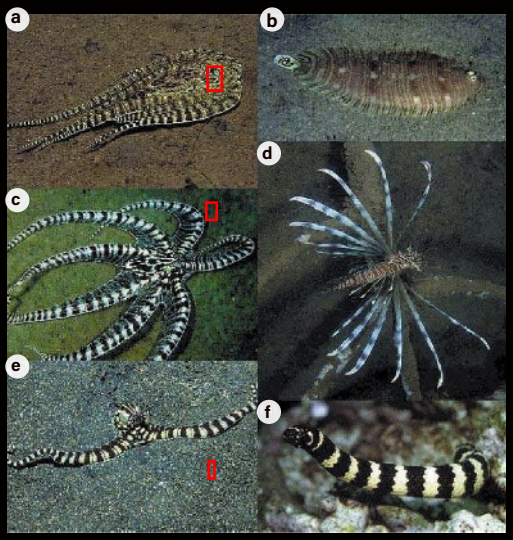


© Hal Beral/Gettyimages ; © Bernard Radvaner/Gettyimages *(haumoctopus mimicus)* ; © M. Norman et R. Steene *(a, b, c et d)*



Beauté fatale ⟶

Gare aux épines des magnifiques poissons-scorpions (famille des Scorpaenidés) : la douleur due à une piqûre s'apparente à une morsure de cobra !



⟵ La championne du monde

La pieuvre *Thaumoctopus mimicus*, découverte en 1998 en Indonésie, imite l'apparence et les mouvements de plus de quinze espèces différentes : poisson plat *(ci-dessus a et b)*, rascasse volante *(c et d)*, serpent de mer *(e et f)*, crabes, raies, murènes, anémones de mer, méduses…



© Richard Whitcombe/shutterstock.com

⟵ Une tête de gorgone

Hippocampus bargibanti vit dans les eaux tropicales du bassin Indo-Pacifique. Grâce à ses bulbes rougeâtres, ce poisson pygmée se cache aisément dans les coraux comme ces gorgones *Muricella paraplectana*.

Le diable par la queue →

À Madagascar, le gecko satanique à queue en feuille *Uroplatus phantasticus* passe inaperçu au milieu des feuilles mortes.





Aurore florale

Chez le papillon *Anthocharis cardamines*, dit « aurore », les femelles peuvent butiner tranquilles, on ne les remarque pas. Les mâles sont trahis par une tache orange.

© Hugh Lansdown/GEttyImages (Pisthograptis luteolata.)

© Stock vanRem/shutterstock.com



← Un beau brin de larve

La chenille du papillon *Pisthograptis luteolata*, ou citronnelle rouillée, ressemble à s'y méprendre à une brindille.



© Lubo Ivanko/shutterstock.com



© davemhuntphotography/shutterstock.com

← Se mettre au vert

Le caméléon *Furcifer campani* et la grenouille « moussue » *Theloderma corticale* n'ont rien à craindre dans leur décor végétal.

© Damian Ryszawy/shuttestock.com



Au gré du vent

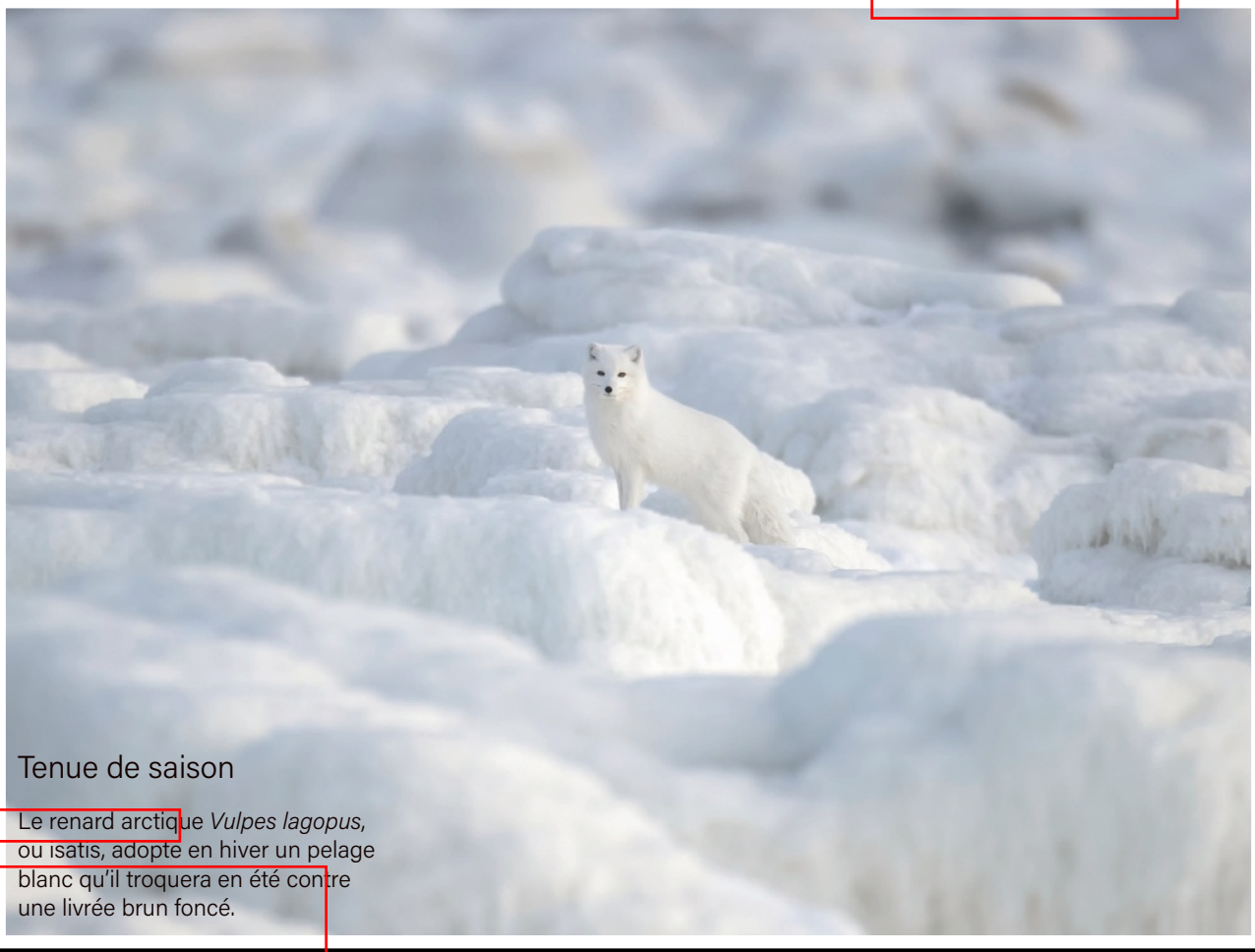
Les phasmes *Areolatae*, souvent nommés « phyllies » (du grec signifiant « feuille »), poussent le mimétisme avec des feuilles jusqu'à se suspendre et se laisser balancer par le vent.

© somnuk krobkum/GettyImages



← En chasse

Une simple ligne noire trahit la lionne *Panthera leo* dans la savane. Son pelage se fond dans les herbes séchées.



Tenue de saison

Le renard arctique *Vulpes lagopus*, ou isatis, adopte en hiver un pelage blanc qu'il troquera en été contre une livrée brun foncé.

© Art Wolfe/GettyImages (*Panthera*); © Robert Postma / Design Pics/GettyImages (*Vulpes lagopus*); © mlorenzphotography/GettyImages (*Megascops*)

← Le duc de la forêt

Seul l'œil du petit-duc *Megascops* trahit sa présence. Mais il peut le fermer : ce rapace nocturne s'appuie sur son ouïe hyperdéveloppée pour chasser.



© Vicki Jauron, Babylon and Beyond (*Marmota caligata*)

Dormir comme un rocher

Dans les montagnes du nord-ouest américain, la marmotte des Rocheuses, *Marmota caligata*, porte bien son nom puisqu'elle ressemble… à un rocher.



© Artush/shutterstock.com

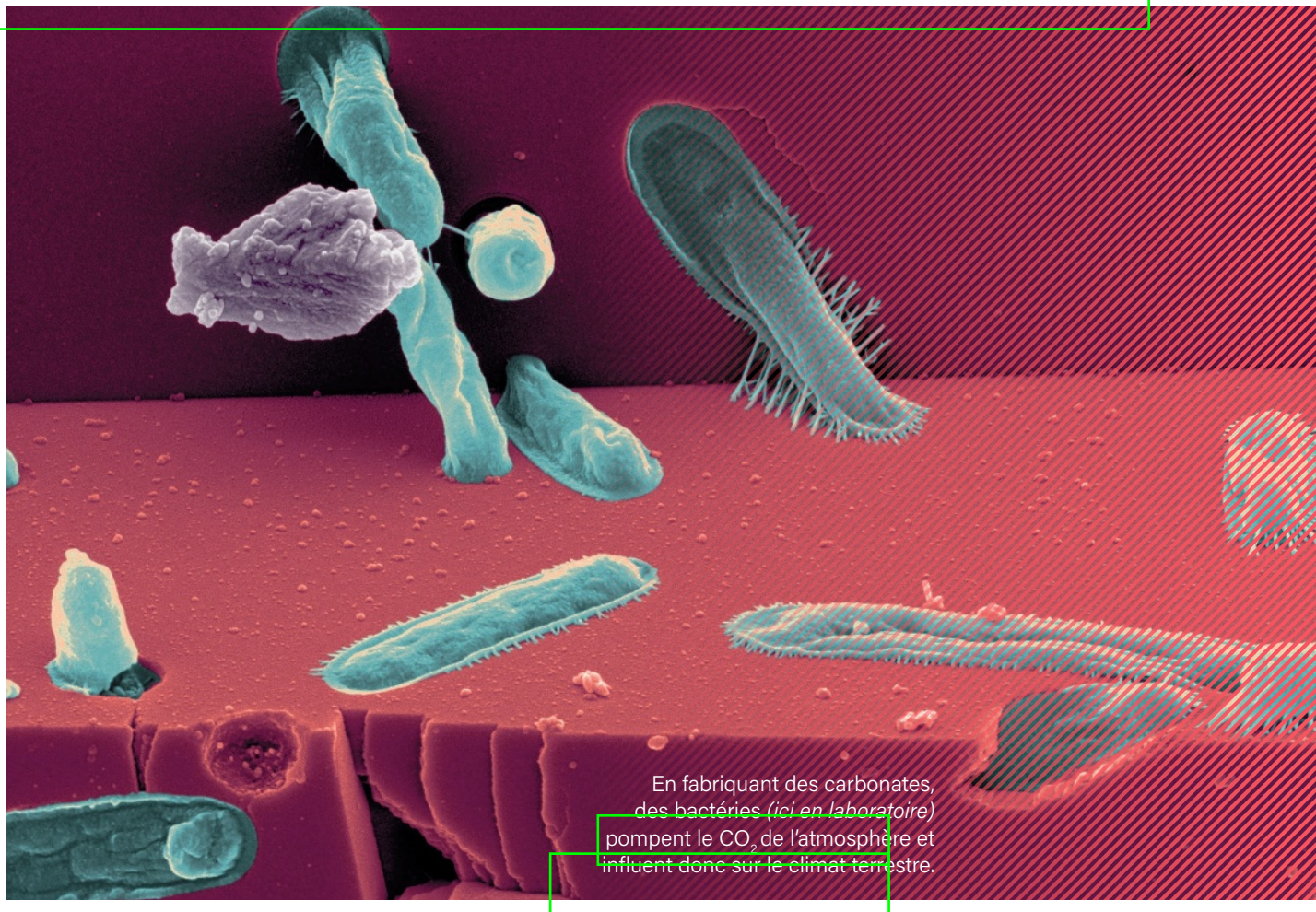
Devenir un arbre

Le gecko-mousse à queue foliacée, *Uroplatus sikorae*, est affublé d'un ourlet de peau irrégulier grâce auquel il fait corps avec le tronc couvert de lichen. De plus, il change de couleur la nuit pour s'adapter à la luminosité.

À lire

> L. Dickel et S. Darmaillacq, Le surdoué des invertébrés, *Hors-Série Pour la Science*, pp. 18-24, n° 92, 2016.

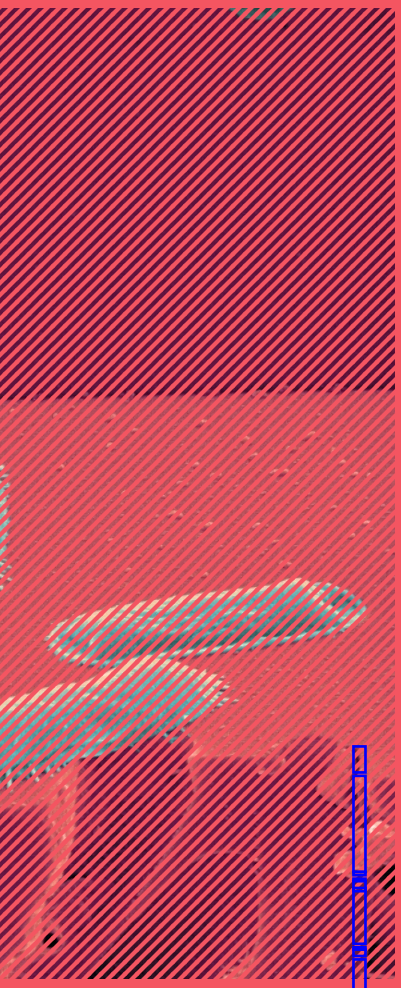
L'essentiel est invisible pour nos yeux



En fabriquant des carbonates, des bactéries *(ici en laboratoire)* pompent le CO_2 de l'atmosphère et influent donc sur le climat terrestre.

On ne les voit pas, et pourtant, depuis des milliards d'années, ils façonnent la Terre et la rendent habitable pour nous. Climat, océans, sous-sol… les microbes invisibles sont les bâtisseurs de notre planète.

Marc-André Selosse, Pierre Thomas et Bénédicte Ménez



© A. Perron et S. Borensztajn, IPGP/Université de Paris

En 1910, dans *La Journée d'un Parisien au XXIe siècle*, Octave Béliard imagine une Terre où la technologie triomphe, mais le vivant périclite. Seuls quelques animaux subsistent… au Muséum d'histoire naturelle. Pour y remédier, il est décidé d'aménager une réserve naturelle accueillant les espèces terrestres en danger, avant que l'humanité n'y débarque. Où ? Sur la Lune ! Notre satellite se voit donc doté d'une atmosphère, puis de végétation…

Cette histoire est l'un des premiers exemples dans la littérature de l'idée de terraformation, c'est-à-dire de la transformation d'un corps céleste, planète ou autre, de façon à le rendre habitable. Le concept fera florès et on le retrouve dans les plus grandes œuvres de science-fiction, comme *Dune*, *Total Recall* ou *Star Wars*. La tâche est sans doute ardue tant les processus à prendre en compte sont nombreux, mais une source d'inspiration est toute trouvée, là, sous nos pieds. En effet, au moment de sa formation, notre planète était loin d'être propice à la vie terrestre actuelle : il a fallu que la Terre soit terraformée.

Ce fut un travail au long cours qui au bout du compte a produit les mers et océans, les roches du sous-sol, le climat que nous connaissons, et même l'oxygène que nous respirons. Les phénomènes en jeu sont innombrables, mais ils partagent un point commun : ils sont le fait d'invisibles, à savoir les microbes, ces unicellulaires variés incluant surtout les bactéries au sens large (les archées et les bactéries au sens strict) à qui nous ne devons rien de moins que la Terre actuelle.

DES MICROBES QUI NE MANQUENT PAS D'AIR

Quand des corps rocheux s'agglomérèrent pour former la Terre, l'atmosphère se dégaza sous l'effet de la chaleur libérée ; elle fut ensuite renforcée par des chutes tardives d'autres météorites et les volcans.

Cependant, quand on chauffe expérimentalement des météorites de composition semblable à ces corps rocheux primordiaux, le mélange obtenu ne contient pas de dioxygène O_2, qui pourtant représente 21 % de l'atmosphère actuelle. Par contre, il est riche en CO_2 (ce gaz constitue par exemple plus de 90 % des atmosphères martiennes et vénusiennes) alors que l'atmosphère terrestre actuelle n'en contient que 0,04 %. Que s'est-il passé ? Comment l'atmosphère a-t-elle été transformée ?

C'est que la Terre porte la marque d'une invention microbienne majeure : la photosynthèse oxygénique. Probablement inventé par les cyanobactéries il y a 2 ou 3 milliards d'années, voire plus tôt, ce métabolisme utilise la lumière solaire et transforme le CO_2 en

matière organique avec un sous-produit : l'O_2. Consommation du CO_2 et production d'O_2 ont modifié notre atmosphère, en même temps que se développait la biomasse.

Mais il y a un hic. Très oxydant, l'oxygène est toxique pour les êtres vivants qui n'y sont pas adaptés : sa libération et son accumulation dans l'atmosphère entre 2,3 et 1,8 milliards d'années, un événement connu sous le nom de Grande Oxydation, semblent avoir été suivies d'un milliard d'années pauvres en fossiles. Dans cette biosphère perturbée, l'intensité de la photosynthèse elle-même chuta d'au moins 80 %. La biosphère a néanmoins survécu à l'oxygène. Les cyanobactéries sont toujours présentes aujourd'hui, et certaines vivent dans les cellules des plantes ou des algues où, après « domestication », elles sont devenues… les chloroplastes, ces compartiments qui effectuent justement la photosynthèse. Un processus bactérien est devenu celui du monde végétal.

Certains microbes parvinrent à tolérer l'oxygène, d'autres à l'utiliser. Ce fut le début de la respiration aérobie, une sorte de miroir de la photosynthèse où l'oxygène est utilisé pour oxyder de la matière organique : cela libère de l'énergie et du CO_2. On parle ici de la « respiration cellulaire », un ensemble de processus métaboliques récupérant l'énergie de molécules organiques grâce à une réaction avec l'oxygène. La respiration aérobie est un métabolisme de bactéries dont certaines, à l'instar des cyanobactéries devenues chloroplastes, ont été accaparées par un lointain ancêtre commun aux animaux, plantes, champignons et amibes pour évoluer en mitochondries, ces compartiments de la cellule producteurs d'énergie grâce à la respiration aérobie. Quand nous apportons de l'oxygène à nos cellules, nous alimentons des microbes invisibles !

L'O_2 libéré par les cyanobactéries a eu un autre effet crucial : dans la stratosphère, entre 13 et 40 kilomètres d'altitude, les rayonnements solaires le transforment en ozone (O_3). Or là-haut, ce gaz intercepte plus de 97 % des rayonnements ultraviolets B particulièrement nocifs pour l'ADN. Avant l'établissement de la couche d'ozone, l'essentiel de la vie était réfugié sous les eaux ou dans les roches… L'oxygénation de l'atmosphère et l'installation d'un bouclier d'ozone protecteur rendirent les continents habitables pour une large gamme d'organismes !

OXYGÈNE EN EXCÈS OU MANQUANT ?

Le lien entre la quantité de biomasse formée par la photosynthèse et la quantité d'oxygène est évident. Pourtant, en considérant toute la biomasse terrestre, le résultat du calcul de la quantité d'oxygène que devrait contenir l'atmosphère est cent fois inférieur à ce qu'il est en réalité. C'est que nous avons oublié la matière organique d'origine biologique fossilisée, enfouie dans le sous-sol, accumulée dans les charbons ou dispersée dans d'autres sédiments, argiles et marnes par exemple. Refaisons le calcul… encore raté, car on obtient cette fois cent fois plus d'oxygène qu'attendu. Où est l'erreur ?

En bref

> La Terre, inhabitable pour nous au moment de sa formation, a été transformée par l'activité microbienne qui l'a rendue propice à la diversification des formes de vie actuelles.

> Des bactéries ont produit l'oxygène et capté le CO_2, faisant de notre atmosphère celle que nous connaissons.

> Ces microbes, invisibles, constituent une part majeure de la biomasse et convertissent dans de grands cycles le carbone, le fer, l'azote, le soufre…

> Ce faisant, ils influent notablement sur le climat, les océans, le sous-sol et participent aux extinctions de masse.

© P. Thomas

En fait, l'oxygène libéré par des millions d'années de photosynthèse et d'enfouissement de la matière organique a réagi avec d'autres éléments, spontanément ou avec l'aide de bactéries dites « chimiolithotrophes » qui tirent leur énergie vitale de telles réactions chimiques. Le soufre, initialement présent sous forme de sulfures et de soufre natif, a été oxydé en sulfates (SO_4^{2-}) et autres formes oxydées du soufre ; l'azote, au départ, surtout du diazote gazeux N_2, en nitrite (NO^{2-}) et nitrate (NO^{3-})… Aujourd'hui communs, ces ions dissimulant l'oxygène invisible sont des produits largement bactériens issus de la Grande Oxydation.

Des métaux contenus dans les roches proches de la surface de la Terre ancienne ont eux aussi été oxydés : l'uranium, le nickel et d'autres encore, mais surtout le fer (le plus abondant, qui représente 8 % de la croûte terrestre). Majoritairement ferreux (sous forme d'ion Fe^{2+}) à l'origine, il a été oxydé en fer ferrique (Fe^{3+}), celui de la rouille, qui résulte elle-même en partie de l'action de bactéries chimiolithotrophes vivant de l'oxydation du fer. Cependant, à l'inverse du fer ferreux, le fer ferrique est insoluble dans l'eau aux conditions d'acidité habituelles et précipite sous forme solide. En conséquence, la Grande Oxydation a laissé une trace des plus spectaculaires : les fers rubanés *(voir la figure ci-dessous)*, des roches contenant de 15 à 30 % de fer et représentant 90 % du minerai de fer exploité. Leurs dépôts s'échelonnent entre 3,8 et 2 milliards d'années : ils précèdent donc la Grande Oxydation, sans doute parce que l'oxygène des cyanobactéries a été utilisé dès le début de sa production.

Une hypothèse alternative propose que les bactéries des fers rubanés aient réalisé… une photosynthèse basée sur le fer. De telles bactéries existent aujourd'hui, même si elles sont peu connues. Dans la photosynthèse des cyanobactéries, l'énergie de la lumière sert à arracher des électrons à une molécule d'eau (qui donne l'O_2) qui contribuent à transformer le CO_2 en matière organique. Dans la photosynthèse basée sur le fer, la lumière arrache des électrons au fer ferreux, qui devient ferrique et précipite.

DES OCÉANS ANÉMIÉS

Le fer oxydé est donc moins soluble. Si le fer manque rarement dans les sols, où il provient des roches sous-jacentes, il est rare dans les océans actuels, notamment en surface. C'est la raison pour laquelle les zones littorales sont plus poissonneuses que le cœur des océans : les fleuves y déversent du phosphate et du nitrate, mais surtout du fer venu des sols, indispensable à la photosynthèse du plancton, lui-même vital aux chaînes alimentaires conduisant aux poissons… Voilà pourquoi les pêcheurs français demandent l'accès aux eaux britanniques ! En effet, rien ne sert d'aller au milieu des océans, très pauvre en plancton, car le fer manque. Un bel exemple d'actualité dont les ressorts, *in fine*, sont à chercher dans le monde des invisibles.

Les besognes bactériennes modulent également la teneur atmosphérique en CO_2. De fait, la



Témoins de la Grande Oxydation

Les fers rubanés *(ici, un échantillon collecté près de Barberton, en Afrique du Sud)* dans lesquels alternent les couches grises à brun-rouge d'hématite (un oxyde ferrique, Fe_2O_3, où le fer est sous sa forme la plus oxydée Fe^{3+} et celles, roses, de silice plus ou moins ferrugineuse, témoignent de la Grande Oxydation, la période d'enrichissement de l'atmosphère en oxygène produit par des bactéries.

photosynthèse et la fossilisation de la biomasse enfouie dans les sédiments appauvrissent l'atmosphère en CO_2… Ici encore, les bactéries, mais aussi les algues planctoniques, jouent un rôle important, au travers de deux mécanismes.

Le premier, la pompe biologique, fait intervenir les seuls organismes marins. Des plus gros organismes flottants jusqu'aux microbes (bactéries, algues et autres unicellulaires, qui constituent 90 % de la biomasse aquatique), leur maintien en surface, là où est la lumière, est un processus actif. Il implique des mouvements, comme la nage, l'entretien d'expansions qui freinent la chute, et la production de composants qui diminuent la densité, notamment des lipides peu denses ou des vésicules intracellulaires contenant du gaz chez les cyanobactéries et les archées. À leur mort, les organismes coulent donc et s'amoncellent au fond des océans. Cette biomasse intègre les sédiments en formation où, en l'absence d'oxygène, elle se fossilise.



D'UNE POMPE À L'AUTRE

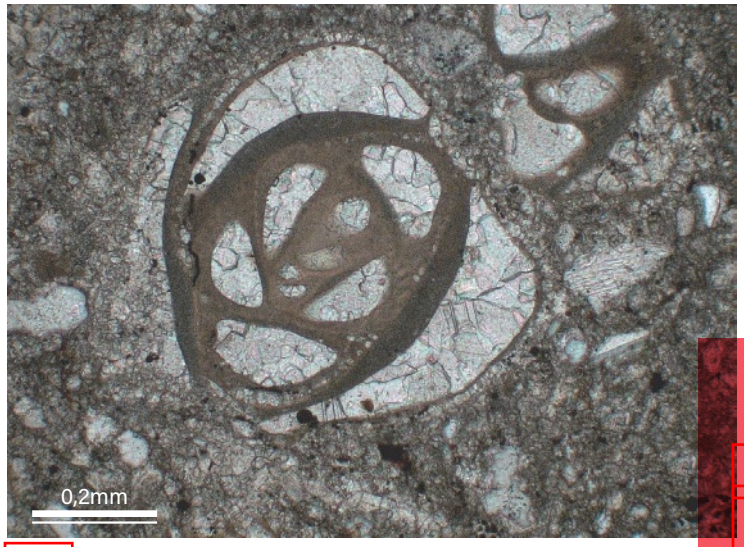
Le deuxième processus, la pompe des carbonates, fait d'abord intervenir des microbes qui, dans les sols ou les roches émergées, aident à l'attaque des minéraux par l'eau. Les bactéries, mais aussi des champignons microscopiques, agissent sur la dissolution des roches, par exemple au sein des minces couches microbiennes (ou biofilms) qui recouvrent et teintent de gris falaises et façades, mais aussi dans les sols ou plus en profondeur. Ces microbes agissent en produisant de l'acidité et piègent une partie des produits solubilisés de la roche, car c'est ainsi qu'ils libèrent le fer, le phosphore ou le potassium nécessaires à leur alimentation ! Les microbes aident également à libérer du calcium et du magnésium, et augmentent ainsi leur transfert vers les océans par les eaux douces. Là, microbes et animaux à coquilles les combinent au CO_2 atmosphérique dissout dans l'eau, pour former des enveloppes calcaires protectrices *(voir la figure page 82)*.

À leur mort, les cellules, alourdies par ce lest, sombrent. Par exemple, les restes des algues unicellulaires du groupe des coccolithophoridés constituent la craie des falaises de Normandie, tandis que les milioles (des amibes unicellulaires) ont donné les calcaires qui construisent Notre-Dame ou le château de Versailles *(voir les photos ci-dessus)*. Ces chefs-d'œuvre de l'architecture classique française doivent beaucoup à la pompe des carbonates, actionnée depuis des millions d'années par de minuscules organismes.

Pompe biologique et pompe des carbonates soutirent donc du CO_2 à l'atmosphère… Le carbone des carbonates représente environ 80 % du carbone piégé dans la croûte terrestre contre 20 % pour les roches carbonées (pétroles et charbons). À la faveur de mouvements tectoniques, les roches calcaires et riches en matière organique formées au fond des océans reviennent parfois en surface où elles sont altérées ; d'autres sont déstabilisées par la chaleur et la pression lors de leur enfouissement, dans les zones de subduction notamment. Ces événements libèrent alors du CO_2, mais finalement après un long séjour dans le sous-sol, loin de l'atmosphère.

La réduction de la teneur atmosphérique en CO_2 a une conséquence climatique : elle diminue l'effet de serre global, largement lié à ce gaz au fort pouvoir réchauffant. Cependant, quant au climat, les microbes soufflent aussi bien le chaud que le froid, car on leur doit aussi une grande partie des gaz entretenant l'effet de serre. Ils libèrent bien un peu de CO_2 lors de l'attaque des calcaires et par leur respiration, mais ils sont surtout à l'origine de deux autres

© Loïc Manen



← Les pierres du château de Versailles *(à gauche)*, en calcaire, résultent de l'accumulation des enveloppes carbonatées des millioles *(à droite)*, de minuscules organismes marins, au fond des océans.

gaz aux contributions climatiques majeures : le protoxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4). Ces deux gaz proviennent de milieux dépourvus d'oxygène, comme le tube digestif des animaux, les sédiments, les eaux stagnantes ou les roches. Certaines bactéries y respirent en remplaçant l'O_2 par le nitrate par exemple, ce qui engendre souvent du N_2O, tandis que des archées, parfois aidées de bactéries, respirent en utilisant le CO_2 et émettent du CH_4 : plus de 90 % du méthane sur Terre ont une origine microbienne, ce qui explique pourquoi on le cherche activement sur Mars !

COUPS DE CHAUD

Par la production de CO_2, N_2O et CH_4, le monde microbien contribue à un effet de serre minimal. Rappelons que, sans celui-ci, la température moyenne terrestre chuterait à – 18 °C, voire moins, car la formation de glace, réfléchissant la lumière solaire, diminuerait encore plus la température. Aujourd'hui, une partie de l'effet de serre d'origine anthropique provient de bactéries vivant dans des milieux dépourvus d'oxygène : sols irrigués des cultures et sols inondés des rizières, tube digestif du cheptel bovin en expansion… Les microbes encouragés par nos activités agricoles produisent la moitié du méthane et les deux tiers du N_2O dus à l'humanité.

Le rôle climatique des microbes est violemment illustré par des épisodes de réchauffement climatique passés, qui furent accompagnés d'un brutal déficit en O_2 dans les océans : les « événements anoxiques océaniques » ou EAO. Très tôt repérés par les paléontologues, car les variations climatiques associées causèrent l'extinction de nombreuses espèces, ils sont aussi connus des géologues pétroliers puisque ces périodes ont coïncidé avec des dépôts de roches riches en matière organique à même de se transformer en hydrocarbures. Par exemple, à la fin du Paléocène, il y a 56 millions d'années, la température océanique augmenta de 5 à 8 °C et celle de l'atmosphère de 10 °C, en 20 000 ans seulement. Durant près de 100 000 ans, les circulations atmosphériques et marines furent profondément modifiées et le fond de l'océan devint très anoxique : cela entraîna une extinction des foraminifères marins et un renouvellement des espèces de mammifères continentaux, mettant en place les groupes actuellement dominants. Encore quelque chose qui a bâti le monde moderne…

D'autres EAO sont plus anciens, comme celui du Toarcien, il y a 183 millions d'années, qui dura 600 000 ans. Il se traduisit par une

© D. Mollex / Lithothèque ENS Lyon

Les microbes produisent la moitié du méthane et les deux tiers du N_2O dus à l'humanité

extinction massive des espèces du fond des océans, et dans une moindre mesure de celles de leur surface.

Ces événements sont associés à une particularité : le carbone des calcaires qui se déposent alors est très appauvri en un isotope, le carbone 13 (^{13}C), ce qui met sur la piste d'un possible rôle du méthane. En effet, le CH_4 d'origine microbienne est très pauvre en ^{13}C : un relargage soudain de CH_4, suivi de son oxydation en CO_2 dans l'atmosphère ou dans les océans, conduit à des dépôts calcaires anormalement appauvris en ^{13}C. L'oxydation du CH_4 dans les océans contribua à réduire la quantité d'O_2, expliquant l'anoxie des océans et la préservation consécutive de la matière organique à l'origine du pétrole. Cependant, une fraction du CH_4 s'échappa et réchauffa l'atmosphère. D'où venait-il ?

Le CH_4 est en permanence produit de manière chimique et, à 90 %, biologique dans les roches profondes et les sédiments, dépourvus d'oxygène. Gaz peu dense, il fait son chemin vers le plancher océanique où la pression de la colonne d'eau et des sédiments ainsi que la basse température (4 °C) de l'eau provoquent la formation de clathrates, des édifices moléculaires où le CH_4 est piégé dans de la glace d'eau. Actuellement, de gigantesques réserves de clathrates sont prisonnières dans les sédiments. Mais si la pression baisse, suite par exemple à une baisse du niveau marin, ou si la température augmente, consécutivement par exemple à une modification de la circulation des eaux profondes de l'océan après un début de réchauffement, les clathrates se déstabilisent et libèrent le CH_4. De tels relargages ont contribué sinon à déclencher, du moins à amplifier les EAO. Et aujourd'hui, à l'heure où l'effet de serre anthropique réchauffe les océans, la bombe à retardement des clathrates inquiète beaucoup…

Durant les EAO, les extinctions liées au changement climatique et à l'anoxie des fonds océaniques sont parfois renforcées par un autre effet également lié… à des bactéries. Les fonds océaniques anoxiques sont en effet pleins de matière organique et de méthane, non utilisés par des organismes respirant avec de l'oxygène, car celui-ci y est en quantité insuffisante. Par contre, des bactéries, dites « sulfatoréductrices », respirent en remplaçant l'oxygène par les sulfates qui sont alors transformés en H_2S, un gaz à l'odeur d'œuf pourri et surtout très toxique. C'est ce qui se passe lorsque les algues des marées vertes s'accumulent sur nos côtes. À plus grande échelle, cela a probablement contribué aux extinctions d'espèces.

UNE BIOSPHÈRE PLUS PROFONDE QUE PRÉVU

Archées et bactéries règnent aussi dans les entrailles de la Terre, comme le suggère le CH_4 profond d'origine biologique. En fait, les roches sont loin d'être biologiquement inertes, comme en attestent les forages ou les expériences tentant d'injecter du CO_2 dans les premiers kilomètres de la croûte terrestre pour contrer l'augmentation des teneurs atmosphériques. Les basaltes sont appropriés dans cette perspective, car le CO_2 y est piégé en formant des carbonates solides avec le fer et le calcium présents. Mais des colmatages inattendus des pores censés accueillir ce gaz sont fréquents, comme récemment sur le site islandais d'Hellisheidi où des injections expérimentales ont eu lieu entre 500 à 800 mètres de profondeur. Les communautés bactériennes réagissent à la présence de CO_2 et d'H_2S dans les fluides

injectés et aux nutriments, comme le fer, libérés par le basalte. L'équipe de Bénédicte Ménez et d'Emmanuelle Gérard, de l'Institut de physique du globe de Paris, a démontré que des espèces bactériennes sont défavorisées par ce changement de conditions tandis que d'autres, utilisant par exemple le CO_2 ou oxydant le fer ou les sulfures, prolifèrent et colmatent parfois les pores de la roche.

Les forages et les mines repèrent la présence de vie jusqu'à 2,5 kilomètres de profondeur sous les océans et 5 kilomètres sous la surface des continents ! Tant qu'il y a de l'eau et que la température ne dépasse pas 121 °C, la vie est là : les bactéries et les archées vivent lentement, au gré de la circulation des eaux souterraines et de réactions chimiques autorisées par leurs interactions avec la roche. Par exemple, certaines vivent en attaquant le fer ferreux des minéraux, d'autres utilisent du dihydrogène (H_2) produit lors des interactions eau-roche et le font réagir avec du CO_2 pour produire leur énergie et du méthane comme déchet. Même si leur quantité est limitée à une à dix tonnes de microbes par kilomètre cube de roches, l'énorme volume du sous-sol poreux et fracturé renfermerait… plus de 70 % des microbes terrestres.

UN HOLD-UP ?

Ainsi notre sous-sol, notre atmosphère et notre climat sont-ils profondément influencés par les microbes. C'est moins un hold-up que l'effet du temps, car la vie microbienne a existé bien avant les organismes pluricellulaires et macroscopiques, comme les animaux. Ceux-ci se sont adaptés au monde déjà façonné, déjà « terraformé » par les microbes. Souvent, leur évolution a utilisé ces invisibles, non seulement avec les chloroplastes et les mitochondries de leurs cellules, mais aussi avec les microbiotes qui les habitent et les aident à fonctionner.

Les bactéries jouent avec la chimie de notre environnement grâce à la diversité de leurs métabolismes. Elles contribuent grandement aux formes dans lesquelles se trouvent les éléments chimiques, en réalisant des conversions entre ces formes qui s'organisent en cycles. Pour le cycle du carbone, nous avons vu que les bactéries, libres ou intracellulaires, expliquent les échanges entre carbone minéral et carbone organique. Mais les autres cycles sont aussi dominés par les bactéries. Dans celui de l'azote, la fabrication du nitrate ou encore sa transformation en N_2O sont microbiennes. Plus généralement, la majeure partie de l'azote présent dans la matière organique a été, à un moment ou un autre, extraite de l'atmosphère par des bactéries dites « fixatrices d'azote ». On pourrait multiplier les exemples avec les cycles des métaux, comme le fer, ou celui du soufre.

Ouvriers invisibles du monde que nous habitons, les microbes sont et font le monde. Imaginons qu'un coup de baguette magique efface tout (êtres vivants macroscopiques, animaux et plantes, et la matière minérale) de la Terre entière à l'exception des microbes, il resterait, vu l'abondance de ces derniers dans les sols, les roches ou la surface de l'océan, une sorte de boule. Un observateur peu attentif vivant sur la Lune prendrait toujours ce qui reste pour la Terre grâce à la lumière renvoyée par ces milliards de milliards de microbes… L'invisible rendrait la Terre visible !

— Les auteurs —

> Marc-André Selosse
est professeur du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et aux universités de Gdansk, en Pologne, et de Kunming, en Chine.

> Pierre Thomas
est professeur émérite à l'École normale supérieure de Lyon.

> Bénédicte Ménez
est professeure de l'université de Paris à l'Institut de physique du globe de Paris.

— À lire —

> E. Mlewski et al., Characterization of pustular mats and related *Rivularia*-rich laminations in oncoids from the Laguna Negra lake (Argentina), *Front. Microbiol.*, vol. 9, art. 996, 2018.

> M.-A. Selosse, *Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*, Actes Sud, 2017.

> B. Ménez, La vie intraterrestre : les microbes de la cité perdue, in C. Jessus (Éd.), *Étonnant Vivant. Découvertes et promesses du XXIe siècle*, CNRS Éditions, pp. 57-64, 2017

> P. Ward, Un impact venu des profondeurs, *Pour la Science*, n° 349, pp. 40-45, 2006.

Les ambiguïtés de l'invisibilité

Quelle place tient l'invisibilité dans notre société ? Dans nos rapports aux autres ? Dans le monde numérique ? Une place ambiguë, car tantôt elle est souhaitable voire indispensable, par exemple pour protéger nos données personnelles ou bien naviguer sur internet sans craindre d'être traqué. Tantôt elle est source de problèmes quand, offrant un paravent, elle libère les instincts les plus vils, comme sur les réseaux sociaux, où l'anonymat favorise la violence. L'invisibilité est à double tranchant. H. G. Wells ne disait pas autre chose dans son roman, *L'Homme invisible* : un grand pouvoir entraîne de grandes responsabilités !



03

Avec son roman, H. G. Wells interroge, dans le prolongement de Platon, les fondements de la morale avec le fantasme d'impunité, mais il sonde aussi les ressorts de nos réactions, face au surnaturel.

Le miroir de L'Homme invisible

Sebastian Dieguez

© fran_kie/shutterstock.com



En bref

> *L'Homme invisible* de H. G. Wells montre les réactions humaines face à un phénomène inexpliqué : évocation du surnaturel, recherche des causes cachées…

> Nous sommes habitués à deviner la présence d'un être agissant à travers les modifications qu'il imprime à son environnement : ce récit en fournit une sorte d'hyperbole.

> La question morale de l'invisibilité avait été évoquée par Platon, qui se demandait si le sentiment de justice pouvait survivre à l'assurance d'une impunité complète.

> Wells étend la réflexion philosophique au domaine de la sociabilité : l'invisible n'existe plus pour les autres ; il les domine, mais s'en retranche et finit fou.

À la fin du XIXe siècle, quatre ans suffisent à Herbert George Wells (1866-1946) pour réinventer l'imaginaire de notre modernité. En 1895, il écrit *La Machine à explorer le temps*, vite suivi par *L'Île du docteur Moreau* (1896) et *La Guerre des mondes* (1898). Par ses œuvres, il invente un nouveau genre – la science-fiction –, qui introduit une puissante méthode littéraire pour interroger l'avenir de l'humanité, les limites entre le naturel et le monstrueux, les bienfaits et dangers de la science, et plus généralement notre place dans l'Univers et la vulnérabilité de notre espèce. Ses « romances scientifiques » ou ce qu'il nommait lui-même ses « fantaisies du possible », anticipent bon nombre d'avancées technologiques et de changements sociaux, mais surtout elles parviennent à identifier les nouvelles angoisses d'un monde en perpétuel bouleversement.

Parmi ses fictions, *L'Homme invisible* (1897) s'éloigne quelque peu des autres en étant la plus psychologique, la plus proche de l'humain. Là où ses intrigues impliquaient souvent des dangers et des transformations externes, comme une invasion martienne, *L'Homme invisible* introduit une métamorphose interne, une altération radicale de la matérialité de l'homme. À la fois satire, farce et tragédie, cette « romance grotesque » selon le sous-titre original, raconte l'« étrange et terrible carrière » de Griffin, le scientifique qui a découvert « le subtil secret de l'invisibilité ».

Wells s'est amusé à commenter quelques invraisemblances de son roman (si la lumière passe à travers les yeux de son personnage, comment peut-il voir quoi que ce soit ?) et en définitive a conclu qu'« il y a très peu à dire au sujet de *L'Homme invisible* – ça raconte sa propre histoire ». Pourtant, d'une prémisse si simple, il a conçu une œuvre extraordinairement riche. En faisant passer un thème classiquement dévolu au merveilleux, à la mythologie et à la magie dans le domaine du réalisme scientifique, *L'Homme invisible* donne à voir beaucoup de choses. « L'expérience, non moins bizarre que criminelle, de l'homme invisible » en effet, dévoile par l'absurde les mécanismes cognitifs par lesquels nous interprétons la présence et les intentions d'autrui. Ceux-ci passent pour ainsi dire « par-dessus » ou « outre » la vision en elle-même. Par ailleurs, le roman explore les relations entre la perception et la moralité, deux domaines ordinairement tenus à distance.

SOUS LES BANDAGES : RIEN !

Le récit suit une construction en trois temps. Au début, un « étrange voyageur » errant dans un paysage enneigé, vêtu d'un accoutrement inhabituel, arrive à Iping, un petit village du Sussex, où il loue une chambre d'hôtel. Il explique vouloir y poursuivre ses recherches en toute tranquillité. Ce mystérieux personnage, qui ne se sépare jamais de son chapeau, de ses grosses lunettes noires, de son manteau et de ses gants, et dont on découvrira bientôt qu'il a le visage couvert de bandelettes, ne manque pas d'attiser la curiosité des villageois.

C'est à travers leurs yeux que l'on va progressivement découvrir les éléments de cette énigme, jusqu'à la révélation choquante et incompréhensible que sous ces vêtements et ces bandages, il n'y a… rien. Incapable d'avancer dans ses expériences, et sans cesse importuné

© MisterEmil/shuttestock.com

par des indésirables, l'homme invisible perd vite patience. Irascible, sujet à des « accès de violence », parlant tout seul, méprisant et arrogant, il se met rapidement tout le village à dos et, son invisibilité pour ainsi dire révélée aux yeux de tous, il doit fuir Iping. « Et c'est ainsi que disparut l'homme invisible » indique le narrateur, dans l'une des nombreuses astuces verbales que permet cette intrigue.

Dans la deuxième phase du récit, l'aventure de l'homme invisible nous est révélée de son propre point de vue, quand il se confie au docteur Kemp, un ancien camarade étudiant en médecine chez qui il trouve refuge. Il raconte son travail acharné pour devenir invisible, et fournit au passage quelques indications scientifiques *(voir l'encadré page suivante)*. Puis il détaille les difficultés quotidiennes d'un homme invisible, qui se déplace entièrement nu, dans les rues londoniennes, jusqu'à ce qu'il décide de fuir la ville pour s'installer dans un endroit reculé et tranquille.

La dernière partie relate la fuite de Griffin, trahi par Kemp, son ultime tentative de vengeance, et finalement sa chasse et mise à mort par la foule. L'alerte à l'homme invisible s'est en effet rapidement répandue dans tout le pays. Traqué, recherché de toute part, épié sans relâche, l'homme invisible finit par se faire attraper et lyncher, et ne reprend qu'à cet instant ses traits humains. Reprenons depuis le début.

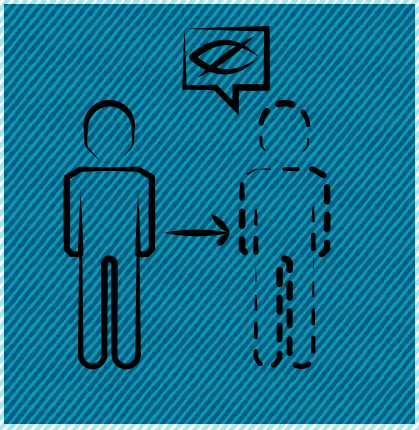
Au départ, les villageois n'ont qu'une perception confuse de Griffin. Ils n'ont aucun moyen de donner du sens à ce personnage, son étrangeté est radicale. Et c'est là que s'activent les systèmes interprétatifs de chacun, car il leur faut bien trouver une explication. Les hypothèses ne manquent pas, mais celle d'un « homme invisible » – et c'est là le point intéressant – n'en fait jamais spontanément partie.

L'INVISIBLE POUR MIEUX VOIR

Tout d'abord, pourquoi ce déguisement absurde, cette allure de « scaphandrier » ? C'est là tout le problème, l'homme invisible cache son invisibilité, ce qui le rend, en quelque sorte, d'autant moins « visible », et multiplie les thèses explicatives : « Le pauvre homme a eu un accident, ou une opération, ou quelque chose » ; « c'est un nègre. Du moins ses jambes sont noires » ; « cet homme est un homme pie […] noir ici et blanc par là, par taches. Et il en est honteux ».

Mais bientôt, à mesure que des événements de plus en plus bizarres se font jour – des meubles se déplaçant tout seuls, un nez pincé par une main « fantôme », une manche se mouvant sans bras à l'intérieur... –, il faut affiner d'un cran le système explicatif. On commence bientôt à chuchoter le mot « surnaturel » dans le village, on parle d'un « revenant », de « fantôme », d'un « croquemitaine ».

Même quand la maîtresse de maison surprend Griffin en train d'ôter ses bandages, elle ne peut interpréter ce qu'elle « voit » : quand l'évidence devrait parler d'elle-même, l'invisibilité n'est toujours pas interprétée comme telle. Excédé par la curiosité des villageois, Griffin finit par « se mettre à nu » : « Vous ne comprenez pas […] qui je suis ni ce que je suis. Je vais vous le montrer. Parbleu ! Je vais vous le montrer ! » et de retirer l'un après l'autre ses bandages devant



Une explication scientifique ?

H. G. Wells ne fournit pas les détails du secret de Griffin, mais il est très clair sur la nature scientifique du phénomène. Griffin explique : « L'étude de la lumière m'attirait. [...] Je découvris un principe général des pigments et de la réfraction, une formule, une expression géométrique comportant quatre dimensions. [...] C'était une idée capable de conduire à une méthode par laquelle il serait possible, sans changer aucune des propriétés de la matière (excepté, en certains cas, la couleur), de réduire l'indice de réfraction d'un corps solide ou liquide à celui de l'air. »
Dans le fond, la technique repose sur le fait qu'un corps est constitué de tissus transparents et incolores : « Il faut peu de chose pour nous rendre visibles ! » Il suffit donc d'isoler et de contourner ce « peu de chose » pour obtenir un être matériel, qui peut être senti et touché, mais ne renvoie pas les particules de lumière.

les spectateurs effarés. « On s'attendait à voir des balafres, des difformités, des horreurs réelles – mais rien, rien ! » On ne voit certes « rien », mais malgré cela, l'invisibilité physique n'est toujours pas une explication satisfaisante. Griffin lui-même aura beau vouloir s'expliquer, la réalité de son être est tout simplement inacceptable. Même devant l'évidence, le policier qui prétend l'arrêter reste impassible : « Point de doute que vous ne soyez un peu difficile à distinguer en plein jour. Mais je suis porteur d'un mandat. »

LA TENTATION DU SURNATUREL

La rencontre avec un clochard du nom de Marvel offre aussi sa dose de malentendus. Entendant la voix de Griffin, mais ne voyant personne, Marvel se demande naturellement s'il n'est pas sous l'effet de la boisson. Il soupçonne ensuite un phénomène de ventriloquie, cherche un individu caché quelque part, et finit par conclure qu'il ne peut s'agir que d'un esprit. Là encore, Griffin ne sait pas comment s'expliquer.

Même le très rationnel docteur Kemp, qui envisage d'emblée l'hypothèse surnaturelle, est « envahi par cette sensation qui s'appelle la peur des revenants », puis par celle d'un truquage : « Voyons, c'est absurde ! C'est quelque tour… » Finalement, il avance une ultime explication : « Cela ne peut être que de l'hypnotisme ! Vous devez m'avoir suggéré que vous étiez invisible. »

Comme le dit le narrateur, il semble donc que rien ne soit « plus facile que de ne pas croire à un homme invisible ». L'invisibilité, bien qu'elle concerne directement le système visuel, n'offre en effet rien à voir.

© Art studio G/shuttestock.com

Notre compréhension se heurte donc à une sorte de tache aveugle mentale, un trou noir cognitif. Tout plutôt qu'un « homme invisible », semblent penser les personnages ! Là où manque le matériau visuel, la propriété d'être visible, on ne perçoit pas une absence de visible, mais un vide que l'on remplit de notions plus familières : la présence d'une intention, d'un agent, d'une volonté abstraite.

Le récit entier repose sur cette particularité de la cognition humaine. Wells nous prive de tout accès direct à sa créature. Tout ce que l'on en sait provient des témoignages d'autres personnages ou du narrateur. Cette astuce est qualifiée par le critique Frank McConnell de « quarantaine narrative » et même d'« effet spécial » au sens cinématographique. La présence de l'homme invisible dépend toujours d'éléments extérieurs qui le trahissent, en dessinent les contours, en révèlent le passage, comme autant de « truquages ». L'homme invisible devient ainsi un paquet qu'il porte, ou ses vêtements, lesquels sont souvent utilisés en guise de sujet, par exemple : « La robe de chambre vint sur lui à grand pas. » Les chiens le reniflent et la neige au sol révèle ses traces de pas ; la neige tombante, tout comme la pluie, la brume, la boue, la poussière et les fumées de charbon, dévoilent ses contours.

Il est également rendu visible « de l'intérieur » : « Je jeûnais, car manger, me remplir l'estomac d'aliments qui ne seraient pas tout de suite assimilés, c'était redevenir visible, et d'une façon grotesque. » Un autre « effet spécial » particulièrement saisissant est de le voir fumer !

Wells prend un malin plaisir à exploiter ce filon prodigieux. Quand Griffin s'exprime, il est souvent désigné simplement comme « une voix », et quand on l'attaque, il disparaît purement et simplement de la scène. La plupart de ses actions sont traitées au passif, comme s'il n'existait pas, et même comme s'il devenait lui-même les objets qu'il manipule.

Tout ce que l'on « voit », ce sont des objets soudain doués d'une agentivité, d'une subjectivité propre… *L'Homme invisible* fonctionne comme une démonstration scientifique des principes régissant notre appareil perceptif. Loin de s'arrêter à la surface visible des choses, celui-ci va un pas plus loin en reconstruisant et interprétant les causes cachées derrière ce qui est vu.

Après s'être préoccupé du versant du public et de ce que disent ses réactions face à *L'Homme invisible*, Wells passe de l'autre côté du miroir en examinant les relations entre la perception et la moralité du point de vue du personnage lui-même. Le tyran, en effet, selon la *Politique*

L'INVISIBILITÉ À TRAVERS LES ÂGES

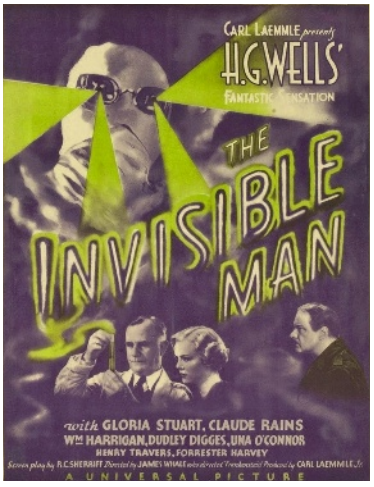
Le classiciste américain Arthur Stanley Pease a répertorié nombre d'occurrences du phénomène d'invisibilité à travers l'histoire. Dans l'Antiquité, l'invisibilité impliquait la divinité, le passage de la mortalité à l'immortalité. Tout comme les dieux invisibles pouvaient parfois se montrer aux hommes, les hommes, surtout les héros, pouvaient parfois se soustraire à la vue des autres. De même avec l'essor des monothéismes, et lors du Moyen Âge, l'invisibilité n'était jamais « juste » l'invisibilité. La visibilité du corps s'imposait comme une limitation, une contrainte physique et bassement matérielle qui empêchait les héros d'entrer dans la légende.

Le phénomène accompagnait toujours des histoires d'âmes perdues, de revenants et d'apparitions, d'êtres liés à des puissances occultes ou des divinités, et impliquait la capacité d'observer les hommes à leur insu, la possibilité de se tirer de situations difficiles et de se dissimuler quand on le souhaitait, ainsi qu'une mobilité illimitée, souvent proche de la téléportation.

Mais dans tous les cas, l'invisibilité menait à la sainteté, à la divinité, à la légende ; l'invisibilité était égale à la négation de la mort, en somme.

Si les potions magiques, les capes, les pierres, les casques, les anneaux, et les formules permettant de se rendre invisible n'ont pas manqué dans les mythes de nombreuses cultures, Wells fut le premier à examiner le phénomène en tant que tel – l'invisibilité pour ce qu'elle est –, plutôt que comme un simple moyen d'atteindre un but ou une démonstration de divinité ou de sainteté. En d'autres termes, et c'est là toute la nouveauté qu'apporte la science-fiction, il fut le premier à prendre l'invisibilité au sérieux.

L'invisible n'est jamais «juste» invisible. Il s'agit toujours de quelque chose d'autre, d'un pouvoir surajouté, d'une force agissante en deçà du monde réel



d'Aristote, est celui qui rend son peuple en permanence visible, tout en se soustrayant lui-même à la vue d'autrui. C'est bien ce que permet l'invention de Griffin : être invisible introduit le corollaire de pouvoir voir sans être vu.

LE FANTASME D'IMPUNITÉ

Qui n'a jamais rêvé de ce pouvoir-là ? Griffin ne se prive d'ailleurs pas de l'exploiter pour s'amuser, révélant ses tendances machiavéliques. «J'avais une tentation folle de plaisanter, de faire peur aux gens, de leur taper sur l'épaule, d'envoyer promener des chapeaux, afin de m'ébattre en mes avantages exceptionnels.»

Le pouvoir d'échapper à la perception d'autrui semble entraîner un désir de domination. «J'étais invisible et je commençais seulement à me rendre compte de l'avantage extraordinaire que me donnait cette qualité. Ma tête fourmillait déjà de projets insensés et merveilleux que je pouvais dès lors mettre à exécution impunément.»

Et c'est bien cette équation entre invisibilité et impunité qui se pose comme le problème principal du roman, au-delà de la question purement perceptive. Sommes-nous moraux simplement parce que nous gardons un œil les uns sur les autres ? Que reste-t-il de notre humanité quand nous sommes soustraits au regard de l'autre ?

Dans le livre II de *La République*, Platon utilise l'invisibilité pour illustrer une discussion sur la valeur intrinsèque de la justice. «Accordons à l'homme juste et à l'homme injuste un même pouvoir de faire ce qu'ils souhaitent ; ensuite, accompagnons-les et regardons où le désir de chacun va les guider. […] Il faudrait leur donner à tous les deux les capacités […] de Gygès le Lydien.»

Ce Gygès (ou son ancêtre, selon les interprétations) a découvert un jour, dans une crevasse, un anneau d'or. Le passant à son doigt, il s'est rendu compte qu'il pouvait se rendre invisible à volonté. Fort de ce nouveau pouvoir, Gygès le simple berger s'est arrangé pour séduire la reine et tuer le roi, et devenir ainsi le premier tyran de l'Antiquité.

Dans le dialogue de Platon, Glaucon argumente que quiconque serait en possession de l'anneau agirait comme Gygès. Socrate finit toutefois par convaincre Glaucon que «l'âme doit accomplir ce qui est juste, qu'elle ait ou non en sa possession l'anneau de Gygès».

À cet égard, Griffin révèle rapidement son vrai visage. «En fait, cette invisibilité n'est bonne que dans deux cas : elle est utile pour la fuite, elle l'est aussi pour l'approche. Elle est donc particulièrement utile pour tuer.» Il s'agit pour lui d'établir ce qu'il appelle un «Règne de la Terreur». Son discours devient de

© Domaine public

plus en plus décousu, dévoilant une évidente mégalomanie, des tendances homicides et une paranoïa grandissante : « La ville est sous ma domination, à moi, et je suis la terreur ! Ce jour est le premier de l'an 1 de la nouvelle ère, l'ère de l'homme invisible. Je suis Invisible Ier. »

Néanmoins, de nombreux indices indiquent que Griffin flirtait avec la notion du mal avant sa découverte. Manquant d'argent pour poursuivre ses recherches, il n'avait pas hésité à voler son propre père, et n'a pas montré le moindre remords quand celui-ci s'est suicidé. À ce moment de son existence, Griffin est déjà sérieusement perturbé : sa solitude est complète et la vie ordinaire lui paraît complètement vide.

Chez lui, le fantasme d'invisibilité ressemble de près à une sorte de suicide social : « Disparaître ! Il n'y avait que cela », confie-t-il. De marginalisé, il a perdu sa propre substance vitale et morale, le monde lui-même lui semblait irréel et dénué de tout intérêt, et finalement il est devenu, comme un aboutissement logique de sa névrose, littéralement invisible. Griffin est en outre un ambitieux éperdu de reconnaissance, ce qui lui cause mille tourments : « Pour l'ambition, pour l'orgueil, de quel prix est une place où il ne vous est pas permis de vous montrer ? »

VOIR, ÊTRE VU ET SE VOIR

La morale de *L'Homme invisible* va donc plus loin que Platon. Le regard d'autrui est sans doute fondateur dans le développement de la moralité et dans nos motivations quotidiennes, mais décider de faire le mal simplement parce que personne ne peut nous voir ne dépend en rien de facteurs perceptifs. La délibération morale précède la tentation de commettre l'injustice, qui est donc indépendante du regard de l'autre.

Wells ajoute que l'impunité en tant que telle a pour effet de nous couper du monde social. Le voyeurisme, l'espionnage, les manigances, les trafics demandent de la discrétion, mais précisément cette discrétion est déjà en elle-même une coupure du contrat social, un retrait de l'ordre commun. Quand Gygès active son anneau magique, il ne devient pas seulement invisible, il devient *de facto* asocial. Et choisir la clandestinité, quel que soit le pouvoir que l'on en retire, ne cesse jamais d'être un handicap.

Signalons encore que l'homme invisible ne peut pas se voir lui-même, et songeons par exemple à la difficulté de se mouvoir dans de pareilles conditions : « En descendant l'escalier, la première fois, j'avais trouvé une difficulté imprévue : je ne voyais pas mes pieds ; je trébuchai à deux reprises. »

Si ne pas être vu par autrui conduit à un sentiment d'impunité, l'incapacité à se voir soi-même pourrait favoriser une absence de honte et de remords, une incapacité à s'autoexaminer, et devenir un frein à l'introspection. Et c'est bien ce qui semble se produire chez Griffin : n'ayant plus de corps visible, il n'est plus que pure intention, un esprit agissant incapable de réflexion sur lui-même. Il n'est plus que ce que les autres voient en lui : un fantôme.

Fidèle à sa réputation d'anticipateur et de prophète de la modernité, Wells, à travers cette fable *a priori* fantaisiste, a su non seulement identifier certains principes fondamentaux de la psychologie de la perception et de la philosophie morale, mais il a également décrit les prémices d'un monde qui deviendra obnubilé par l'hypervisibilité, la sécurité et la surveillance, et négligera du même geste les drames de l'invisibilité sociale.

— L'auteur —

> Sebastian Dieguez
docteur en neurosciences, travaille au Laboratoire de sciences cognitives et neurologiques de l'université de Fribourg, en Suisse.

— À lire —

> R. Bowser, Visibility, interiority, and temporality in *The Invisible Man*, *Studies in the Novel*, vol. 45(1), pp. 20-36, 2013.

> P. Holt, H.G. Wells and the ring of Gyges, *Science Fiction Studies*, vol. 19, pp. 236-246, 1992.

> J. M. Walker, Short-circuited : the isolated scientist, *H. G. Wells's « The Invisible Man »*, vol. 15, pp. 156-168, 1985.

> F. McConnell, *The Science Fiction of H.G. Wells*, Oxford University Press, 1981.

Comment protéger les données concernant un individu tout en obtenant des informations utiles sur une population à laquelle il appartient ? C'est le paradoxe que résout la confidentialité différentielle.

Anonymat garanti

Tristan Allard, Louis Béziaud et Sébastien Gambs

Pour la Science, © Shutterstock.com/Kritchanut


7298470568305267901232 10

En bref

> Pour préserver l'anonymat des données personnelles, des méthodes longtemps utilisées, non fondées formellement, ont montré leurs limites.

> Aujourd'hui, la « confidentialité différentielle » et ses variantes pallient ces défauts et sont largement plébiscitées.

> Elles consistent à ajouter un bruit aléatoire aux données de façon à cacher la contribution de n'importe quel individu.

> Ce modèle de vie privée est désormais utilisée par Apple, Google et d'autres géants du numérique.

Le 22 mai 2021, Guillaume Rozier, informaticien, a été décoré de l'Ordre national du mérite pour avoir créé deux sites, l'un pour suivre la progression de la pandémie de Covid-19, l'autre afin de trouver facilement un créneau de vaccination disponible. Cela n'aurait pas été possible sans la mise à disposition en *open data* de données publiques, notamment de la part du ministère de la Santé. Au-delà de cet exemple, l'intérêt de rendre accessibles des informations, parfois personnelles, est aujourd'hui largement reconnu.

Cependant, il importe d'offrir aux individus concernés des garanties fortes de protection de leur vie privée. En Europe, et plus particulièrement en France, elles sont offertes par un arsenal juridique constitué dans le sillage du règlement général sur la protection des données (le RGPD) pour favoriser la diffusion et la réutilisation de telles données. L'anonymisation est la clé de voûte de cet édifice juridique. Elle rend possible non seulement le partage des données, mais aussi leur valorisation sans avoir besoin de revenir vers les individus pour obtenir leur consentement.

Le récent rapport de la mission du député Éric Bothorel sur la politique publique de la donnée, des algorithmes et des codes sources, fait état de cette difficile tension entre protection et exploitation. Néanmoins, les progrès de ces dernières années dans le développement de techniques d'anonymisation robustes suggèrent que le défi n'est pas insurmontable.

Historiquement, les approches non formelles, c'est-à-dire empiriques et non fondées sur des modèles mathématiques de vie privée rigoureux, à la problématique de l'anonymisation ont prévalu. Parmi elles, la pseudonymisation a longtemps été jugée digne de confiance : elle consiste à remplacer les informations directement identifiantes, comme un numéro de sécurité sociale, par une chaîne d'octets aléatoire, une sorte de pseudonyme. Cependant, il manque à ces approches un composant essentiel : un modèle de vie privée solide, c'est-à-dire la garantie exigée des algorithmes d'anonymisation, exprimée par une équation. Elle formalise le type de garanties offertes et le niveau de protection atteint (et parfois aussi le type d'attaquant auquel le protocole de protection résiste). Bien entendu, un modèle formel de vie privée ne fonctionne pas à 100 %, mais il explicite les garanties de protection. Mais contre quoi faut-il se prémunir ?

L'EMPIRE CONTRE ATTAQUE

Une grande partie des attaques se focalisent sur la réidentification, c'est-à-dire identifier l'identité associée à une donnée censée être anonymisée, dans un but, par exemple de profilage ou d'usurpation d'identité. La réidentification est souvent rendue possible par la présence dans les données de quasi-identifiants, en l'occurrence un ensemble d'attributs dont la combinaison des valeurs pour un individu est en général unique. Ainsi, l'association (code postal, genre et date de naissance) dans une base de données pseudonymisée peut être un quasi-identifiant conduisant, avec l'aide d'une autre base de données, comme une liste électorale, à l'identité d'un individu. Plusieurs affaires ont fait beaucoup de bruit dans les années 2000 et mis en lumière le peu de protection qu'assure la pseudonymisation : le gouverneur du Massachusetts a été identifié

dans des données médicales pseudonymisées par une simple comparaison avec, justement, une liste électorale !

Une autre forme d'attaque est l'inférence. Celle dite « d'attribut » consiste à déduire une information sensible à partir des données anonymisées. Se protéger de cette menace est important même dans les situations où le risque de réidentification est nul. Ainsi, déterminer l'origine ethnique d'une personne peut conduire à une discrimination pour l'obtention d'un prêt bancaire. Quant à l'inférence « d'appartenance », elle a pour objectif de décider si un individu particulier fait partie d'un ensemble de données sensibles, même anonymisées, comme une cohorte de patients atteints d'un cancer.

Récemment, ces attaques par inférence ont été adaptées au contexte des modèles d'apprentissage, du type de ceux utilisés en intelligence artificielle. Ce ne sont pas alors les données elles-mêmes qui sont visées, mais une structure, comme un réseau de neurones, qui a été élaborée à partir des données. Ici, l'objectif est de déterminer si les données d'un individu cible faisaient partie de celles qui ont servi à l'apprentissage, par exemple d'un système de classification des tumeurs en oncologie.

PREMIERS ÉCHECS

Motivés par les scandales de réidentification, les premiers modèles formels de vie privée ont cherché à contrecarrer les attaques dues à l'existence des quasi-identifiants. Les algorithmes d'anonymisation ainsi conçus partitionnent un jeu de données de sorte qu'un ensemble de contraintes soit satisfait dans chaque morceau. Le *k*-anonymat, par exemple, requiert que les quasi-identifiants d'une même partition soient identiques et que chaque partition contienne les données d'au moins *k* individus. Une attaque de réidentification à partir du quasi-identifiant devient donc imprécise, d'autant plus que la valeur de *k* est grande.

Autre modèle formel pionnier, la *l*-diversité nécessite que chaque partition contienne un ensemble de données sensibles suffisamment divers : au moins *l* données sensibles distinctes, ou bien que la valeur de la donnée sensible la plus fréquente ne soit pas beaucoup plus présente que les données sensibles les moins fréquentes. La *l*-diversité espère ainsi lutter contre des attaques d'inférence d'attribut qui associeraient simplement à un quasi-identifiant la donnée sensible la plus fréquente dans sa partition.

Cette famille de modèles est aujourd'hui sur le déclin, victime des failles et des limitations qui ont été découvertes progressivement. D'abord, ces modèles ne sont nativement pas composables. Ce qui signifie que des analyses successives sur un même jeu de données, certes anonymisées, peuvent néanmoins briser la protection. Ensuite, ces modèles ne sont pas assurés contre le post-traitement : les critères de protection ignorent les algorithmes qui anonymisent les jeux de données. Or le comportement de ces programmes est souvent déterministe (il fournit toujours le même résultat à partir de données identiques) et dépendant des données. Certaines attaques tirent parti de ces caractéristiques pour faire de la « rétro-ingénierie » afin de retrouver la base de données initiale à partir de sa version anonymisée.

BEAUCOUP DE BRUIT POUR RIEN ?

La situation de l'anonymisation des données a radicalement changé avec la confidentialité différentielle, inventée en 2006 par Cynthia Dwork, alors chez Microsoft, conjointement avec d'autres chercheurs, originellement pour contrer les attaques d'un autre type, celles dites de « reconstruction de base de données » : l'idée est de générer un grand nombre de requêtes statistiques sur des sous-ensembles variés de la base de données (nombre de patients qui ont la grippe, ceux dont le numéro de sécurité sociale commence par « 1 70 » et qui ont la grippe…), puis de résoudre un système d'équations

modélisant les informations obtenues. Avec un nombre de requêtes suffisant, l'attaque est ravageuse, car on reconstruit toute la base de données : ce n'est plus la simple identification d'un individu unique, même s'il est gouverneur, mais par exemple l'ensemble d'un fichier de patients.

Schématiquement, la confidentialité différentielle consiste à cacher la contribution de tout individu possible au résultat d'une requête en ajoutant un bruit aléatoire aux données. En d'autres termes, le résultat d'une analyse sera sensiblement le même que l'on retire les données privées d'un individu particulier de l'ensemble des données ou qu'on les y inclut *(voir la figure ci-contre)*. De la sorte, tout individu devient « inrepérable ». L'amplitude du bruit ajouté dépend d'un paramètre quantifiant le « niveau de vie privée » (noté ε) et d'un paramètre de « sensibilité de la requête » quantifiant l'impact d'un individu sur les résultats de la requête. La valeur du paramètre ε est fixée par l'administrateur. Il s'agit d'un compromis entre, d'une part, la précision des résultats obtenus, en un mot l'utilité des données, et, d'autre part, la protection de la vie privée.

Ainsi, pour une requête sur la somme des salaires d'un nombre d'individus dans une base de données, par exemple l'ensemble du personnel d'une université, la confidentialité différentielle ajoute un nombre d'euros déterminé aléatoirement à partir d'une loi de statistiques (comme une distribution de Laplace) et proportionnel à la contribution d'un individu. De la sorte, impossible de connaître le salaire de tel ou tel membre du campus. Et ce sera d'autant plus le cas que la valeur du paramètre ε, celui qui contrôle le niveau de vie privée, sera élevée.

UN BUDGET DE VIE PRIVÉE

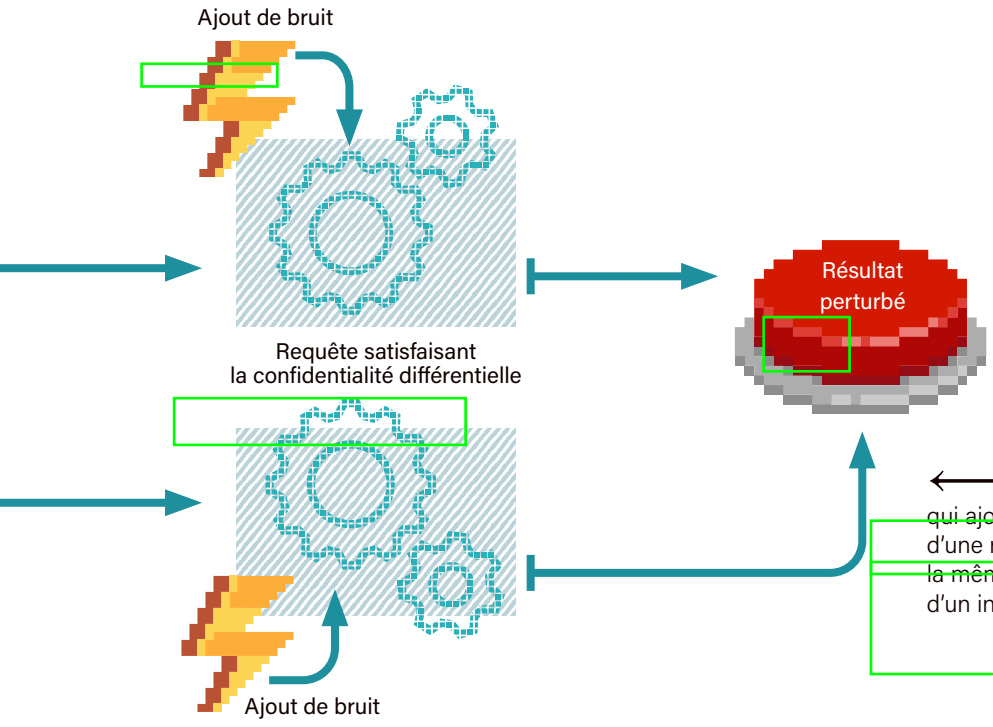
La confidentialité différentielle présente deux avantages cruciaux : elle est composable et résiste à un post-traitement, c'est-à-dire là où le bât blessait avec les modèles précédents. Toutefois, il a été montré au début des années 2000 que, même bruitées, on peut finir par reconstituer une base de données pour peu que l'on dispose de beaucoup d'informations. Pour contrer cet obstacle, et c'est un changement d'habitude à acquérir, la confidentialité différentielle impose une borne sur la quantité d'informations totale révélée par plusieurs calculs effectués sur les mêmes données. La conséquence en est que l'on peut voir dans le paramètre ε une sorte de budget de vie privée. À mesure que les requêtes se suivent, les valeurs de ε de chacune s'additionnent tandis que le « niveau de vie privée garanti » se dégrade. Aussi, un ε total, une « somme à ne pas dépasser », est-il fixé par l'administrateur.

La seule façon de poursuivre au-delà est d'utiliser une autre base de données. C'est possible, par exemple, en subdivisant un groupe initial de 100 000 individus en quatre parties égales. Cependant, cette méthode oblige à réfléchir à la construction des bases de données pour éviter les biais.

Si la confidentialité différentielle originale est aujourd'hui la référence, plus de 200 variantes ont depuis été proposées, chacune prenant en compte différents besoins, modèles d'attaquant ou types de données. En voici quelques-unes.

Une variante populaire est la (ε, δ)-confidentialité différentielle qui consiste à autoriser le mécanisme à moins bien cacher les contributions (proportionnellement à δ). Cet assouplissement de la définition originale autorise à introduire moins de bruit, et donc à faire des économies sur le budget de vie privée. Dans une seconde variante, la confidentialité différentielle personnalisée, chaque individu définit son exigence en matière de vie privée, par exemple par le biais d'un formulaire de consentement, plutôt que d'en imposer une globale. Cependant, l'hétérogénéité qui en résulte complique l'exploitation de la base de données.

© Eleven/shutterstock.com; Pour la Science



Avec la confidentialité différentielle, qui ajoute du bruit de façon aléatoire au résultat d'une requête, une analyse sera sensiblement la même avec ou sans la contribution d'un individu quelconque.

D'autres variantes encore tiennent compte de la modification de la définition de la sensibilité, à savoir la façon dont on mesure l'impact d'un individu sur la sortie de l'algorithme d'anonymisation. La définition classique considère uniquement la présence ou l'absence de l'individu, mais on peut l'étendre à la modification d'un de ses attributs. Sur un exemple concret, ce type de variation protège non pas toutes les visites individuelles d'un site web par un individu, mais le fait qu'il ait déjà visité ou non le site. Enfin, si la confidentialité différentielle est typiquement adaptée à des données tabulaires (en tableau), elle peut se décliner à d'autres types de données à protéger, par exemple des données de type graphe dans le cadre d'un réseau social où les données représentent les individus et les liens qui les unissent.

UNE BIBLIOTHÈQUE DE BRIQUES

L'univers des algorithmes satisfaisant la confidentialité différentielle a en parallèle lui aussi fortement crû. Ces algorithmes dépendent du type de données à anonymiser (données sociodémographiques dans un tableau, séries temporelles, ensembles de nœuds et d'arêtes d'un réseau social…), de la catégorie d'informations à publier, du contexte de calcul (centralisé ou distribué). Malgré le large éventail de solutions disponibles, lorsqu'on ne trouve pas chaussure à son pied, il est nécessaire de concevoir un nouvel algorithme dont les garanties de confidentialité différentielle sont à prouver formellement. Cette tâche est loin d'être triviale, mais des outils ont été proposés. D'une part, certains offrent un cadre de démonstration clair listant les conditions formelles nécessaires pour qu'un algorithme satisfasse la confidentialité différentielle. À charge pour le concepteur de démontrer que son algorithme les remplit. D'autre part, des outils de vérification automatique établissent une preuve formelle, ou non, de la confidentialité différentielle.

Tous ces efforts sont grandement facilités quand l'algorithme en question peut être décomposé en briques élémentaires pour lesquelles la confidentialité différentielle est déjà assurée. Le concepteur pioche alors ce dont il a besoin dans des bibliothèques existantes. Pour ce faire, un écosystème d'outils a été développé, faisant le pont entre les travaux académiques et ceux de l'industrie. La bibliothèque Ektelo propose un ensemble générique de briques de bases pour développer des algorithmes obéissant à la confidentialité différentielle. IBM, Google et Microsoft distribuent aussi leurs propres bibliothèques. En 2020, Google a par ailleurs donné accès à une version de la bibliothèque d'apprentissage machine TensorFlow incorporant la confidentialité différentielle afin d'entraîner des modèles respectueux de la vie privée. Ces bibliothèques assurent la gestion du budget de vie privée, refusant l'exécution d'une requête si ce dernier est épuisé.

UN SONDAGE SENSIBLE

Question
Avez-vous déjà pris de la drogue ?



Lancer de dé

Si résultat pair → DIRE LA VÉRITÉ

Si résultat impair → RELANCER LE DÉ

Si résultat pair → RÉPONDRE OUI

Si résultat impair → RÉPONDRE NON

Comment répondre à un sondage sensible en dissimulant sa réponse de façon efficace et résistante aux attaques ? Grâce au mécanisme de réponse randomisé proposé par Stanley Warner en 1965. Demandons à 1000 individus s'ils ont déjà pris de la drogue. Selon le résultat d'un jet de dé (pair ou impair), ils disent la vérité ou bien répondent au hasard en fonction d'un second jet de dé. La probabilité de répondre honnêtement *versus* aléatoirement (ici, 1/2) est fonction du paramètre de vie privée ε. Résultat : 500 interrogés répondent au hasard, et parmi eux, 250 prétendent avoir pris de la drogue, sans lien avec la vérité. Si, sur les 1000 interrogés, 450 individus répondent « oui », seuls 200 font partie de la moitié (500 individus) qui dit la vérité. Sur l'ensemble, en supposant que le groupe des interrogés ayant répondu au hasard suit la même distribution que le groupe ayant répondu honnêtement, c'est donc à peu près le double (400) qui a déjà pris de la drogue.

Ce développement récent d'outils a accompagné la mise en place de la confidentialité différentielle au sein d'applications et de services de la vie quotidienne. Cependant, son utilisation par les acteurs du numérique est pour l'instant concentrée sur la collecte de statistiques ou bien la publication d'informations de nature statistique.

ET DANS LA VRAIE VIE ?

En 2016, lors de sa conférence annuelle WWDC, Apple introduisait l'utilisation de la confidentialité différentielle pour, entre autres, la collecte de statistiques sur l'utilisation des émojis dans les messages privés. Depuis, l'idée, auparavant cantonnée au milieu académique, s'est diffusée dans les médias qui, même spécialisés, touchent un plus grand public. Avant cela, en 2014, Google avait mis en place un outil nommé Rappor afin d'analyser l'utilisation de son navigateur Chrome. Grâce à cet algorithme, fondé sur un mécanisme proposé en 1965 par le statisticien Stanley Warner, un individu peut répondre à un sondage sensible en conservant la possibilité de nier de façon plausible sa réponse, tout en offrant des garanties sur la quantité de bruit une fois l'ensemble des réponses agrégées. Le mécanisme en jeu est le suivant : étant donné une question sensible dont la réponse est binaire (« oui » ou « non »), l'individu choisit aléatoirement, par exemple à l'aide d'un jet de dé, de répondre la vérité (avec une certaine probabilité qui dépend du bruit, c'est-à-dire au paramètre ε), ou de répondre « oui » ou « non » aléatoirement à l'aide d'un second jet de dé *(voir l'encadré ci-dessus)*. Les résultats individuels sont agrégés dans une structure probabiliste qui donne ensuite accès à des statistiques globales correctes tout en respectant la confidentialité différentielle.

Plus récemment, des jeux de données d'importance ont été anonymisés par des algorithmes satisfaisant la confidentialité différentielle. En 2020, le bureau du recensement de la population aux États-Unis (Census) l'a adoptée comme modèle de vie privée pour la publication de ses statistiques. En plus des nombreuses valeurs agrégées publiées, le Census distribue des données synthétiques générées aléatoirement à partir des distributions anonymisées. La confidentialité différentielle a aussi été utilisée pour publier le

© Eleven/shutterstock.com (dé) ; Pour la Science

Search trends symptoms dataset, un jeu de données anonymisées sur les recherches sur Google liées aux symptômes associés au Covid-19.

La recherche académique est aujourd'hui très active et de nombreux chantiers sont ouverts. Certaines pistes de recherche sont particulièrement prometteuses, notamment pour répondre à des questions importantes. D'abord, comment combiner équité et vie privée ? En effet, si la confidentialité différentielle est aujourd'hui une référence pour la protection de la vie privée lors de la publication de données, son impact sur l'équité n'est pas anodin. Son adoption par le Census a par exemple posé clairement ce problème. En effet, le bruit ajouté aux requêtes pour anonymiser les données du recensement peut impacter différemment certains groupes vis-à-vis d'autres. C'est notamment le cas des statistiques concernant les langues minoritaires, utilisées afin de décider dans quelles langues le matériel de vote doit être distribué. Le taux d'erreur, c'est-à-dire l'impact du bruit ajouté, varie entre les juridictions en fonction du nombre de locuteurs minoritaires recensés.

DANS LA TÊTE DE L'ATTAQUANT

Autre problématique, comment compléter les techniques de protection formelles comme la confidentialité différentielle avec des approches empiriques d'attaque ? L'objectif est d'évaluer l'efficacité d'une anonymisation au-delà des garanties théoriques du modèle. La tâche est cruciale, car un modèle de vie privée ne capture pas tout. Il est ici nécessaire de se mettre à la place d'un attaquant qui observerait des données anonymisées et tenterait d'en extraire une information sensible. De quelles connaissances auxiliaires dispose-t-il (partagées sur les réseaux sociaux, obtenues de façon illicite…) ? Avec quelles méthodes va-t-il exploiter les données anonymisées et les connaissances auxiliaires (réidentification, reconstruction ou inférence d'appartenance) ? Le niveau de protection assuré par une méthode d'anonymisation peut être estimé en comparant le succès d'attaques sur les données brutes et sur les données anonymisées. Cette approche empirique, jamais exhaustive, de gestion du risque est complémentaire des approches formelles, car elle guide les choix complexes de modèle de vie privée, d'algorithme d'anonymisation et de paramétrage (par exemple, le budget).

Enfin, dernier exemple : comment combiner chiffrement et perturbations aléatoires liées à la confidentialité différentielle, par exemple dans un contexte de calcul sécurisé (donc hors du domaine d'application initial de la confidentialité différentielle, c'est-à-dire l'anonymisation) ? Les techniques de protection habituelles sont parfois trop coûteuses ou trop rigides quand les données sont massives ou distribuées. En autorisant un dévoilement contrôlé d'informations au cours du calcul, les techniques de perturbation aléatoire satisfaisant la confidentialité différentielle peuvent compléter les techniques cryptographiques en accélérant les performances tout en conservant des garanties formelles. Le prix à payer est la perte en précision des calculs due aux perturbations aléatoires.

En pleine ébullition, les travaux sur la confidentialité différentielle et son amélioration nous promettent un avenir où notre vie privée sera garantie de façon plus sûre qu'elle ne l'était jusqu'à présent. De la sorte, nous aurons moins de réticences à confier nos données. À l'heure de l'open data, c'est une bonne nouvelle.

— **Les auteurs** —

> Tristan Allard
est maître de conférences à l'université de Rennes 1 et rattaché au laboratoire Irisa.

> Louis Béziaud
est doctorant en informatique à l'université Rennes 1 et à l'université du Québec à Montréal.

> Sébastien Gambs
est titulaire de la chaire de recherche du Canada en analyse respectueuse de la vie privée et éthique des données massives, et professeur au département d'informatique de l'université du Québec à Montréal.

— **À lire** —

S. Wagh *et al.*, DP-cryptography: Marrying differential privacy and cryptography in emerging applications, *Commun. ACM*, vol. 64 (2), pp. 84-93. 2021.

C. Sahin *et al.*, A differentially private index for range query processing in clouds, 2018 IEEE 34th international conference on data engineering (ICDE), pp. 857-868, 2018.

C. Dwork et A. Roth, The algorithmic foundations of differential privacy, *Found. Trends Theor. Comput. Sci.*, vol. 9, pp. 211-407, 2014.

M. Alaggan *et al.*, BLIP: Non-interactive differentially-private similarity computation on bloom filters, *SSS*, 2012.

Pourquoi l'anonymat favorise-t-il la violence des internautes ?

Se masquer pour faire le mal

Gérald Bronner

© AlexanderPavlov/shutterstock.com



En février 2015, en France, la Commission nationale consultative des droits de l'homme (CNCDH) émettait un avis sur les discours malveillants sur internet. Dès les premières lignes de son texte, elle dénonçait la « prolifération des contenus haineux sur la Toile ».

L'idée qu'internet représente un risque de radicalisation des points de vue n'est pas neuve. Elle a bien souvent été confirmée, tant à travers le constat de la diffusion de propos racistes que de la visibilité publique de déclarations tombant sous le coup de l'apologie d'actes de terrorisme. Plus généralement, et beaucoup moins grave, reconnaissons-le, quiconque a fréquenté les réseaux sociaux sait qu'une simple conversation virtuelle peut facilement, et parfois sur un simple malentendu, dériver vers des fâcheries, voire des insultes ou des menaces. Le pire est probablement atteint sur les forums des divers sites d'information où ceux qui échangent des commentaires ne sont même pas censés être « amis ».

La violence des discussions et la façon dont s'apostrophent, souvent par des noms d'oiseaux, ceux qui participent à ces échanges doivent sans doute beaucoup au fait qu'ils ne sont pas physiquement en contact les uns avec les autres : cette distance peut inspirer des audaces que la vie réelle n'autoriserait pas. Dans la vie ordinaire, la proximité spatiale entre les individus les enjoint souvent à éviter d'utiliser l'insulte ou l'invective. Ce n'est pas que la chose soit impossible, mais elle est plus rare, car en faire usage c'est prendre le risque de payer instantanément le prix de son agressivité. Au contraire, dès qu'une certaine distance physique rend un peu irréel le danger qu'implique toute interaction physique, la situation change. Un peu comme l'automobiliste, protégé par l'habitacle de son véhicule, hurle plus volontiers contre ses congénères que s'il les croisait sur le trottoir.

La garantie pacificatrice de la proximité physique est encore moins garantie sur les réseaux sociaux, et qu'ils facilitent un climat agonistique n'est donc pas surprenant. Les échanges sur internet incitent à ce que John Suler, de l'université Rider, à Lawrenceville, appelle la « désinhibition numérique ». Il a identifié six facteurs qui la favorisent, et l'un d'eux est l'anonymat derrière lequel se cachent certains internautes.

En bref

> Sur internet, invectives, insultes et fâcheries sont monnaie courante.

> Parmi les facteurs qui expliquent cette tendance, la dissimulation derrière l'anonymat est un des plus importants.

> On retrouve ce phénomène dans le comportement des guerriers tribaux : masqués ou grimés, ils sont plus violents.

> L'anonymat sur internet est en outre très répandu, surtout chez les jeunes.

LES DÉRIVES DE L'ANONYMAT

De fait, beaucoup profitent de l'anonymat que confère un pseudonyme protecteur pour s'abandonner à l'outrance. Cet anonymat fait partie de l'idéologie fondatrice du web qui se voulait un projet d'émancipation par les communautés virtuelles, ce sur quoi insistait, dès les années 1980, l'écrivain et enseignant américain Howard Rheingold, l'un des gourous d'internet alors naissant. Dès lors, ces communautés vous offraient la possibilité d'être « un autre » afin de vous extraire des contraintes de votre identité géographique. Personne ne songeait alors que, protégés par des avatars virtuels, les individus en profiteraient pour laisser libre cours aux manifestations les plus obscures de leur personnalité.

Pourtant, dans un tout autre domaine, l'anthropologie avait montré les risques de

40 %

des 18-29 ans commentent sur des forums ou sur les réseaux sociaux sous une fausse identité

l'anonymat et du travestissement de son identité. En effet, en 1973, John Watson, anthropologue de l'université Harvard, eut l'idée de comparer 23 tribus différentes en se demandant si le fait que les combattants revêtaient des peintures de guerre ou des masques changeait leur attitude vis-à-vis de leurs prisonniers.

La réponse qu'il obtint est sans appel : les tribus où les guerriers modifient leur apparence en utilisant des masques, des peintures ou n'importe quel stratagème pour dissimuler leur identité sont, dans 80 % des cas (12 tribus sur 15 dont les guerriers changent d'apparence, contre 1 sur 8 pour les autres tribus), plus enclines à tuer, mutiler ou torturer que les autres. Ce qu'il appela une « désindividualisation » paraissait de nature à réveiller les instincts les plus sombres de l'homme.

Il est ainsi possible que le recours à des identités de substitution permette plus facilement de lever les inhibitions vis-à-vis de la violence physique ou verbale en nous soulageant de la responsabilité de la conséquence de nos actes. Nous sommes donc au-delà de la simple protection que confère l'anonymat. Ce qui est vrai pour le monde réel l'est pour le virtuel. Il n'y a donc pas lieu de s'étonner que, sous le masque de l'avatar, le guerrier des forums et des réseaux sociaux répande son venin plus souvent que la raison ne l'y invite.

Il se trouve par ailleurs que cette dissimulation de l'identité n'est pas rare. Un sondage réalisé aux États-Unis indique qu'un quart des internautes commentent sur des forums ou sur les réseaux sociaux sous une fausse identité. Et cette pratique est particulièrement répandue chez les plus jeunes puisque ce chiffre atteint 40 % chez les 18-29 ans. Sans surprise, les commentaires faits anonymement sont ceux qui ont le plus de risques de contenir des insultes et de manifester un comportement incivil.

C'est ce qu'a montré en 2014 Arthur Santana, de l'université de Houston. Son analyse de centaines de commentaires déposés sur les sites de journaux aussi divers que le *Houston Chronicle*, le *Wall Street Journal* ou *USA Today* montre que l'anonymat permet de prédire une partie de l'incivilité des messages laissés. En effet, si 29 % des commentaires émis par des internautes dont l'identité n'était pas masquée pouvaient être considérés comme grossiers et offensants, 53 % des messages d'anonymes relevaient de cette catégorie. C'est bien ce que dénonçait la CNCDH !

— L'auteur —

Gérald Bronner
est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

— À lire —

> G. Bronner, *Apocalypse cognitive*, Puf, 2021.

> A. Santana, Virtuous or vitriolic, *Journalism Practice*, vol. 8, pp. 18-33, 2014.

> J. Suler, The online disinhibition effect, *CyberPsychology & Behavior*, vol. 7, pp. 321-326, 2004.

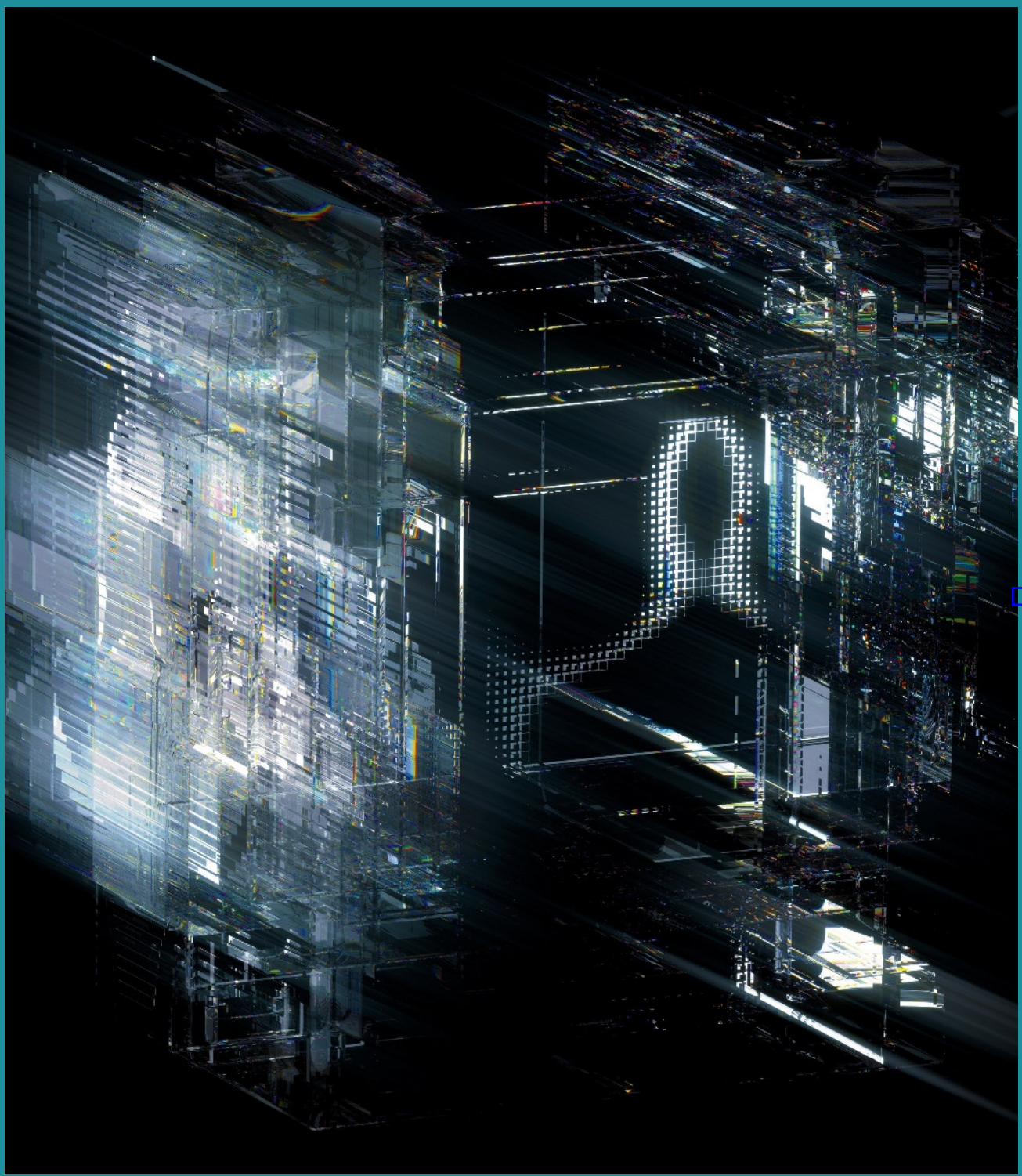
> J. Watson, Investigation into deindividuation using a cross-cultural survey technique, *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 25, pp. 342-345, 1973.

Naviguer sur la Toile
et y effectuer des recherches
sans laisser de traces ? C'est possible
grâce aux étranges lois
de la physique quantique.

S'effacer dans le monde quantique

Seth Lloyd

© Philipp Tur/shutterstock.com



Je me sentais un peu en décalage ce jour où je me suis retrouvé à la table de milliardaires. Mon rôle était sans doute de divertir ceux qui s'intéressaient au monde quantique. Parmi les invités se trouvaient Sergey Brin et Larry Page, les fondateurs de Google. À ma surprise, ils en savaient long sur l'information quantique. Après quelques échanges sur la façon dont la physique quantique changera l'usage d'internet, je suggérai alors de travailler sur des « requêtes quantiques sur internet » qui mettraient en péril le modèle économique de la firme, car les internautes deviendraient invisibles. Rêve ou utopie ?

La confidentialité est de fait rare à notre époque, en particulier sur internet où, à chaque fois que nous cherchons quelque chose sur Google, nos requêtes sont enregistrées pour la postérité – ou du moins pour les annonceurs. Les fournisseurs d'accès affirment protéger la vie privée de leurs clients en cryptant les informations personnelles. Mais les méthodes employées ne sont pas toujours efficaces.

Les lois de la physique arrivent à la rescousse. Les communications sur des « canaux quantiques » permettent déjà aux banques et à d'autres institutions d'envoyer des données avec un cryptage pratiquement inviolable. Ainsi, il existe déjà des techniques cachant nos requêtes à des indiscrets qui risqueraient de les intercepter. Mais à l'avenir, grâce à l'internet dit « quantique », tout un chacun enverra des requêtes et recevra des réponses avec l'assurance que personne, pas même Google, ne sache quelles questions ont été posées. De plus, les mêmes techniques qui garantiront la confidentialité des requêtes fonctionneront pendant toute la durée de la connexion.

Bien sûr, les moteurs de recherche sauvegardent et analysent les données des utilisateurs afin d'afficher des publicités ciblées. C'est ainsi qu'ils rentrent dans leurs frais et font des bénéfices. S'ils décident de garder secrètes les données des utilisateurs, les moteurs de recherche auront besoin d'un nouveau modèle commercial. Et les utilisateurs décideront eux-mêmes s'ils sont prêts à payer leurs recherches ou s'ils préfèrent la gratuité… au prix de leur anonymat.

En bref

> Quand un internaute navigue sur la Toile, même de façon anonyme, des informations personnelles peuvent être extraites par d'autres acteurs.

> Grâce à une version quantique d'internet, les moteurs de recherche fourniront les réponses aux requêtes avec l'assurance que personne n'a sauvegardé ou copié les données.

> De telles requêtes quantiques nécessiteront pour les bases de données un nouveau type de stockage de mémoire qui fait déjà ses preuves en laboratoire.

LE THÉORÈME DE NON-CLONAGE

La capacité de la physique quantique à procurer une confidentialité totale découle d'un fait très simple : les systèmes quantiques peuvent exister dans des états multiples, superposés. À tout instant, un atome peut se trouver en différents endroits, un photon polarisé à la fois horizontalement et verticalement, le moment magnétique d'un électron pointer vers le haut et vers le bas, et ainsi de suite.

Par conséquent, alors qu'un bit de donnée classique enregistre soit la valeur 0, soit la valeur 1, un bit quantique (ou qubit) peut représenter les deux valeurs 0 et 1 en même temps. Qui plus est, dans ce cas, on ne peut pas réaliser une copie exacte de ce qubit, et toute tentative en ce sens changera l'état du qubit. Cette règle, connue sous le nom de « théorème de non-clonage » (défini en 1982 par William Wootters, Wojciech Zurek et Dennis

Dieks), s'applique également aux chaînes de qubits, représentant par exemple des mots ou des phrases. En conséquence, quelqu'un qui espionnerait un canal quantique (typiquement une fibre optique transportant des photons dans des états de polarisation multiple) ne pourrait intercepter la communication sans la perturber et ainsi révéler l'intrusion.

Il existe plusieurs techniques de cryptage quantique pour échanger des données en toute confidentialité, grâce à la propriété de non-clonage. Mais elles supposent que les destinataires soient autorisés à lire les données que vous envoyez : le simple fait d'envoyer une requête à Google à travers un canal quantique ne résoudra pas le problème.

DES REQUÊTES CONFIDENTIELLES

Cependant, en 2008, avec Lorenzo Maccone, de l'université de Pavie, et Vittorio Giovannetti, de l'École normale supérieure de Pise, nous avons découvert que le théorème de non-clonage autorise aussi des requêtes confidentielles. Dans le protocole que nous avons conçu, un utilisateur doit être capable d'envoyer au moteur de recherche une « question quantique » : une chaîne de qubits qui contient simultanément la bonne question et une autre, peu importe laquelle.

Le moteur de recherche trouve les réponses à vos questions multiples et y répond sous forme d'un paquet quantique qu'il vous renvoie. Si le moteur de recherche fait une copie de vos questions pour ses archives, vous saurez que la confidentialité a été violée parce que l'état quantique de vos questions d'origine aura subi une perturbation détectable par votre ordinateur. Point essentiel, le moteur de recherche peut apporter des réponses sans détecter physiquement (et à plus forte raison sans cloner) la chaîne de qubits qui encode les questions, et donc sans savoir quelles étaient les questions.

Même si un tel tour de force est impossible avec les ordinateurs, les bases de données et les matériels de mise en réseau dont nous disposons actuellement, nous nous sommes aperçus qu'il n'est pas, techniquement, hors de portée.

La première exigence pour formuler des requêtes privées quantiques est un internet quantique rudimentaire. La technologie pour échanger des messages quantiques sur une ligne dédiée existe déjà et est utilisée pour sécuriser les communications. Cependant, un internet quantique à part entière ne sera pas une simple ligne entre deux points, mais devra constituer un réseau dont les nœuds aiguillent les paquets de données de sorte que chaque utilisateur puisse atteindre tout autre utilisateur ou tout serveur web. Il s'avère qu'aiguiller des données sans en faire de copies temporaires (et donc sans souffrir des conséquences du théorème de non-clonage) est une tâche non triviale, et nécessite une technologie complexe qui n'en est qu'au stade expérimental : le routeur quantique.

C'est ce qu'ont réussi à fabriquer en 2021 Matteo Pompili, de l'université de technologie de Delft, aux Pays-Bas, et ses collègues. Ils ont conçu un réseau quantique doté de… trois nœuds (les routeurs) reliant des qubits constitués de centres NV (pour *Nitrogen vacancy*), c'est-à-dire des impuretés (un atome d'azote et une lacune, dans le réseau cristallin d'un diamant).

La deuxième exigence pour effectuer avec confidentialité des recherches sur internet est que les utilisateurs et les serveurs de données soient dotés d'ordinateurs quantiques rudimentaires, capables de stocker et de manipuler des qubits. Malheureusement, les qubits sont instables et ont tendance à perdre

Si le moteur de recherche fait une copie de vos questions, vous le saurez tout de suite. Confidentialité garantie !

spontanément leur superposition quantique en une fraction de seconde.

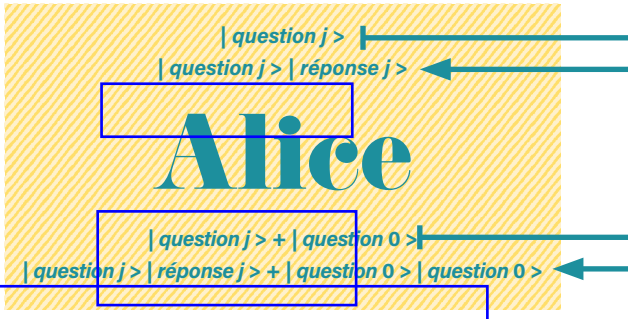
Les ordinateurs quantiques expérimentaux qui stockent des qubits sous la forme d'états magnétiques d'ions simples suspendus dans le vide, par exemple, ne peuvent pour l'instant stocker qu'environ 20 qubits à la fois. Un ordinateur quantique abouti nécessiterait des centaines, voire des milliers, de qubits, et cela ne se fera probablement pas avant plusieurs décennies, même en version expérimentale. Par chance, dans l'optique de requêtes quantiques à caractère personnel, une trentaine de qubits devraient suffire : bien codée, une requête de 30 qubits peut extraire une réponse dans une base de données contenant plus d'un milliard d'entrées. Or les dernières avancées parviennent à intriquer 53 qubits lorsqu'il s'agit de supraconducteurs et 51 avec des atomes neutres.

ON RAME POUR LA RAM

Pour l'instant, tout a l'air de bien rouler : les requêtes confidentielles quantiques semblent n'exiger que de très simples ordinateurs et systèmes de communication quantiques. Mais c'est maintenant que cela se complique. Pour répondre à une requête quantique à plusieurs volets, la base de données du moteur de recherche doit être capable de fournir simultanément la réponse à chaque composante de la question. Pour cela, il faudra un nouveau type de stockage de données nommé « mémoire vive quantique », ou RAM (*Random Access Memory*, soit mémoire à accès aléatoire) quantique.

La mémoire vive est juste un dispositif servant à stocker les données, rangées selon une structure arborescente. Chaque élément de donnée est une séquence de huit bits, ou octet, et est affecté d'une adresse qui est elle-même une séquence de bits. Les octets sont comme les feuilles de l'arbre, tandis que l'adresse contrôle le chemin qui va du tronc à une feuille donnée. Le premier bit de l'adresse spécifie laquelle des deux branches suivre au niveau le plus bas de l'arbre, le deuxième bit contrôle l'embranchement du deuxième niveau, et ainsi de suite. Les branches se dédoublent à chaque niveau et, dans une mémoire vive traditionnelle avec des adresses à 30 bits, il faut actionner 2^{30} (plus de 1 milliard) commutateurs pour récupérer les données.

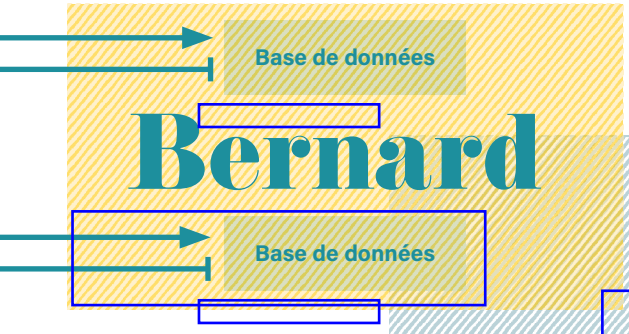
On peut imaginer une version quantique de la mémoire vive traditionnelle. La seule différence est que les interrupteurs qui aiguillent l'information dans l'arbre binaire doivent maintenant être capables d'acheminer l'information le long de deux branches différentes simultanément, puisque chaque bit d'une question quantique peut spécifier deux chemins différents. On peut construire de tels commutateurs quantiques avec les techniques existantes, comme les miroirs semi-transparents qui « scindent » les photons en leur faisant suivre deux trajectoires à la fois. Le problème est que les circuits quantiques sont excessivement sensibles au bruit et aux erreurs : il suffit qu'un des commutateurs soit défaillant pour que la confidentialité du qubit correspondant soit perdue. Un bit d'adresse contrôlant un nombre énorme de commutateurs, les risques de perdre la confidentialité sont très élevés.



Avec Lorenzo Maccone et Vittorio Giovannetti, nous avons proposé un concept différent pour l'adressage d'une mémoire vive (classique comme quantique), où beaucoup moins de commutateurs sont mis en jeu pour chaque appel à la mémoire. L'idée est d'aiguiller les bits d'adresse le long des mêmes branches d'arbre que vont devoir suivre les données, plutôt qu'à travers des lignes d'adressage séparées. Comme les bits d'adresse passent séquentiellement à travers le réseau, nous appelons cela une mémoire vive en « brigade de seaux » (de l'anglais *bucket brigade*).

UNE BRIGADE DE SEAUX

L'architecture en brigade de seaux n'impose d'actionner qu'un seul commutateur à chaque niveau du réseau, alors que la mémoire vive ordinaire actionne tous les commutateurs à tous les niveaux *(voir l'encadré page 118)*. Le gain est remarquable : une mémoire vive à brigade de seaux ayant un milliard d'emplacements de mémoire actionne 30 commutateurs pour



LE PROTOCOLE QUANTIQUE DE CONFIDENTIALITÉ DES REQUÊTES

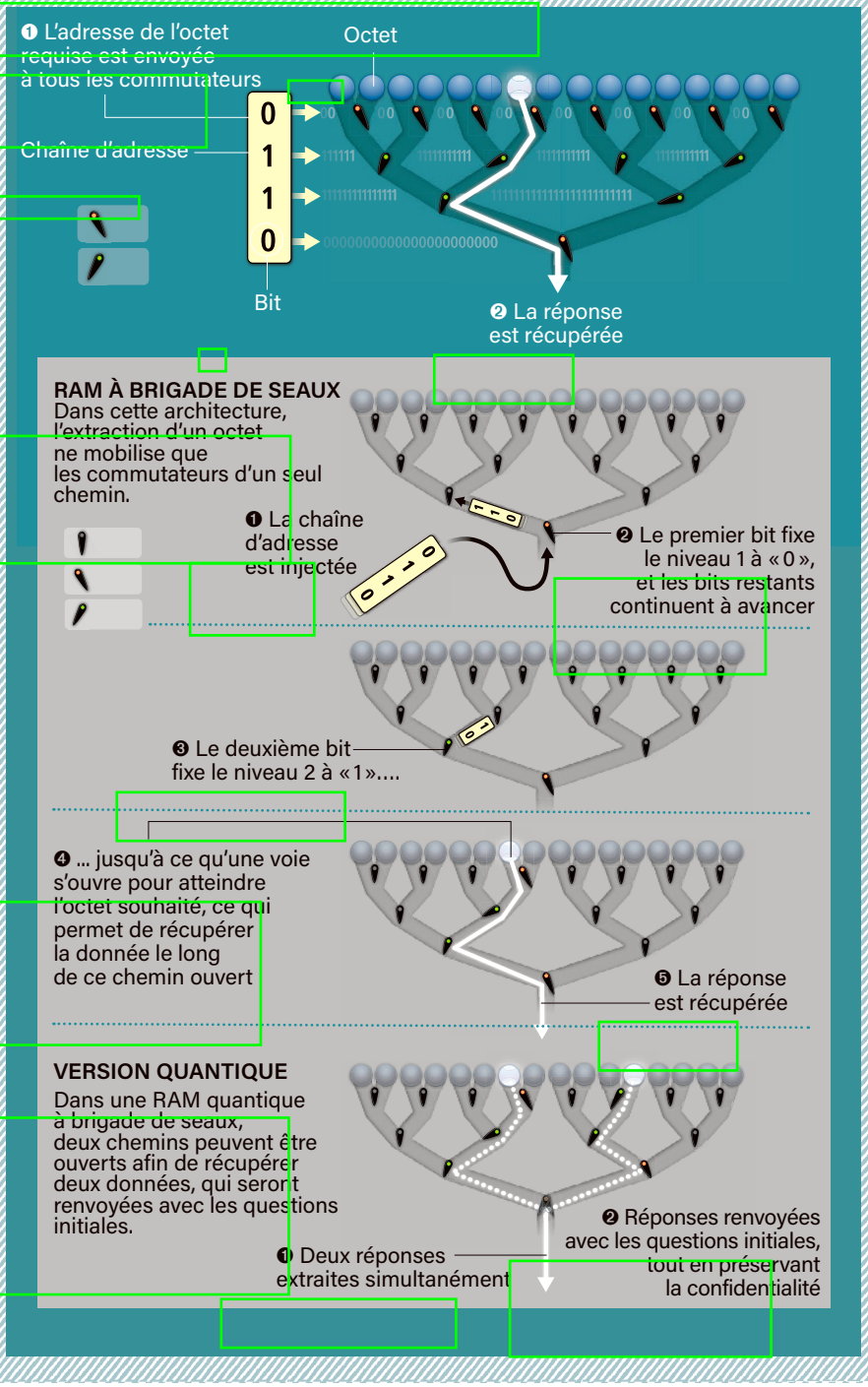
Comment garantir la confidentialité des requêtes sur internet? Décrivons le protocole quantique proposé par Seth Lloyd et ses collègues italiens. On suppose qu'Alice effectue des requêtes dans la base de données de Bernard, et qu'elle ne souhaite pas que Bernard sache de quelle requête il s'agit. Dans ce qui suit, la notation de Dirac $|message\rangle$ signifie qu'un message binaire (une suite de 0 ou 1) a été placé dans un registre de mémoire quantique (formé de bits quantiques). Ainsi, la notation $|question\ j\rangle$ signifie qu'Alice souhaite découvrir le $j^{\text{-ième}}$ enregistrement dans la base de données de Bernard. Alice utilise un registre de mémoire contenant n bits quantiques, ce qui lui permet d'effectuer 2^n requêtes distinctes. On suppose qu'Alice connaît le contenu $|réponse\ 0\rangle$ d'un registre de référence, qui est la réponse à la requête $|question\ 0\rangle$. Afin de vérifier que Bernard ne l'espionne pas, Alice soumet deux requêtes successives dans un ordre arbitraire, non connu de Bernard, et attend la réponse après chacune d'elles. Chaque requête est placée dans un registre quantique à n bits quantiques. Par exemple, elle choisit comme première requête $|question\ j\rangle$, tandis que la seconde requête est la superposition quantique : $|question\ j\rangle + |question\ 0\rangle$, qui lui permettra *a posteriori* de vérifier si, oui ou non, Bernard a tenté de découvrir quelle était sa requête. Une fois reçue la première requête, $|question\ j\rangle$, la base de données de Bernard retourne, grâce à l'utilisation d'une RAM quantique, la réponse $|réponse\ j\rangle$. Cette réponse est véhiculée par un second registre quantique, accolé à la question d'Alice. Autrement dit, Alice reçoit le message : $|\psi_1\rangle = |question\ j\rangle\ |réponse\ j\rangle$. Alice envoie ensuite sa seconde requête $|question\ j\rangle + |question\ 0\rangle$. L'interrogation de la base de données de Bernard a pour résultat de renvoyer à Alice sa seconde requête complétée par les réponses, sous la forme : $|\psi_2\rangle = |question\ j\rangle\ |réponse\ j\rangle + |question\ 0\rangle\ |réponse\ 0\rangle$. Bernard ne sait jamais si le registre qu'il reçoit d'Alice est celui contenant la superposition, ou l'autre registre, ce qui signifie qu'il ne peut pas extraire l'information sur j sans risquer de perturber le registre. À la fin du protocole de communication, Alice mesure le contenu du second registre de $|\psi_1\rangle$ pour déterminer $|réponse\ j\rangle$. Elle peut alors utiliser cette réponse pour vérifier que la superposition du second état $|\psi_2\rangle$ a été préservée. Si ce n'est pas le cas, elle sait en vertu du théorème de non-clonage quantique que Bernard a tenté de connaître sa requête. Le protocole quantique de confidentialité des requêtes est en fait très similaire à un protocole de cryptographie quantique, qui permet l'échange sécurisé de clés secrètes.

Michel Planat
Institut FEMTO-ST, Besançon

Une mémoire vive quantique

Afin d'offrir une confidentialité absolue, les moteurs de recherche stockeront l'information concernant le contenu de la Toile dans une mémoire vive (ou RAM) quantique. Les utilisateurs enverront des requêtes multiples sous forme d'un unique « paquet quantique ». La RAM quantique ajoutera les réponses au paquet et le renverra. Toute perturbation dans l'état quantique du paquet alertera l'utilisateur, qui saura ainsi s'il y a eu violation de la confidentialité. La RAM quantique nécessitera de remplacer l'architecture RAM ordinaire par une architecture dite « en brigade de seaux ».

Dans une RAM ordinaire, les octets de données sont disposés en arbre. La récupération d'un octet de données impose d'actionner tous les commutateurs du réseau. Pour une RAM quantique, il ne serait pas réaliste d'actionner un grand nombre de commutateurs en raison de la fragilité des états quantiques, le taux d'erreurs serait trop élevé.



© D'après Jen Christiensen

chaque requête, par opposition au milliard de commutateurs actionnés pour chaque requête dans une mémoire RAM classique. Et les avantages de l'architecture en brigade de seaux, en termes à la fois de taux d'erreurs et d'économies d'énergie, augmentent exponentiellement avec le nombre de bits.

Dans un premier temps, nous pensions que l'idée de la brigade de seaux avait le potentiel de révolutionner l'industrie des RAM classiques. Mais nous découvrîmes bientôt que d'autres chercheurs avaient déjà eu des idées similaires et que de toute façon le concept était trop lent pour une RAM classique.

LA FIN ANNONCÉE DE GOOGLE

Mais le concept en brigade de seaux serait crucial pour les requêtes quantiques, parce que son architecture peut tolérer un taux d'erreurs de un pour 30, plutôt que de un pour un milliard. Le matériau à mémoire pour une RAM quantique pourrait être un support physique classique, comme un DVD classique. La partie véritablement quantique de la RAM quantique est le réseau de commutateurs, chacun devant aiguiller les bits quantiques le long des deux branches à la fois. De tels commutateurs quantiques existent déjà et atteignent des taux d'erreurs suffisamment faibles pour construire une RAM quantique dotée d'un milliard d'emplacements de mémoire, ou davantage.

Bien sûr, l'assemblage de commutateurs quantiques suffisamment nombreux pour obtenir une mémoire quantique de grande capacité sera probablement ardu, sans parler du problème de la connexion de la mémoire vive quantique à des canaux de communication quantique. Mais aucune de ces difficultés ne paraît insurmontable.

D'ailleurs, Francesco De Martini et son équipe de l'université de Rome-La Sapienza ont construit une RAM quantique très simple au moyen de lasers, de polariseurs et de détecteurs de photons. Le groupe a fait la démonstration de notre protocole de requêtes sur une petite base de données. Les requêtes confidentielles quantiques sont donc une possibilité réelle.

À leur suite, en 2021, avec des collègues de l'institut de technologie du Massachusetts, à Cambridge, nous avons également proposé une architecture de circuit intégré photonique pour bâtir une RAM quantique. Ici, les qubits sont fondés sur des impuretés (un atome cette fois de silicium et une lacune) dans un réseau cristallin de diamant.

Par ailleurs, nous avons récemment remarqué que les techniques d'acheminement des données de notre concept de RAM quantique s'appliquent aussi aux réseaux de commutation de l'ensemble de l'internet quantique. Les internautes navigueraient alors sur la Toile incognito, sans révéler ce qu'ils recherchent ni quels sites web ils visitent. Est-ce la fin annoncée de Google ?

— L'auteur —

> Seth Lloyd est professeur de génie mécanique à l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), à Cambridge, aux États-Unis.

— À lire —

> M. Pompili *et al.*, Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits, *Science*, vol. 372(6539), pp. 259-264, 2021.

> K. C. Chen *et al.*, Scalable and high-fidelity quantum random access memory in spin-photon networks, *ArXiv : 2103.07623*, 2021.

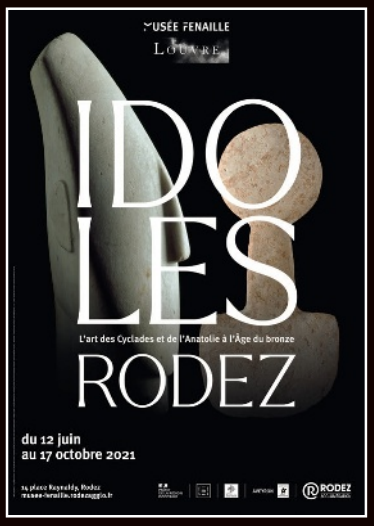
> T. Meunier, La course aux bits quantiques, *Hors-Série Pour la Science*, n° 107, pp. 78-85, 2020.

À VISITER

Beauté intemporelle

Une exposition à Rodez réunit des statuettes de l'âge du Bronze et les confronte à des œuvres du XXe siècle qu'elles ont influencées.

Découvertes au XIXe siècle dans les Cyclades grecques et en Anatolie (Turquie), des « idoles », ces statuettes anthropomorphes souvent en marbre, ont d'abord été attribuées à des sociétés peu évoluées, voire primitives.
Cette vision a changé au gré des découvertes archéologiques et on sait désormais qu'elles sont les vestiges précieux de civilisations complexes, prises dans des réseaux denses de commerce et d'échanges culturels.
En réunissant un ensemble unique d'œuvres prêtées par des institutions prestigieuses, comme le Louvre, le musée Fenaille, à Rodez, témoigne de ce revirement. En les associant aux pièces emblématiques de ses collections permanentes, notamment des statues-menhirs de plusieurs millénaires, l'établissement aveyronnais invite le visiteur à réfléchir à l'évolution de la représentation de la figure humaine et à son expression dans les sociétés du passé.
Avec le temps, la beauté de ces statuettes, très épurées ou au contraire plus naturalistes, s'est imposée aux yeux de tous, spécialistes comme profanes, ainsi qu'aux artistes modernes du début du XXe siècle comme Constantin Brancusi, Jean Arp, Alberto Giacometti, Ossip Zadkine ou Brassaï, dont certaines œuvres aussi exposées dénotent une influence de l'art cycladique évidente. Ce voyage dans le temps et l'espace révèle ce que le sculpteur britannique Henry Moore appelait un « langage mondial commun des formes ».



« Idoles. L'art des Cyclades et de l'Anatolie à l'Âge de bronze », musée Fenaille, 12000 Rodez. Jusqu'au 17 octobre 2021
https://bit.ly/3i9cogV

À ÉCOUTER

À quand le Covid-31?

Comment (bien) vivre avec les moustiques ? Les zoonoses vont-elles s'intensifier ? Quelle viande mangerons-nous demain ?
Les réponses sont à retrouver dans les premiers épisodes de *Zootopique*, un podcast d'anticipation conçu par l'Anses. L'idée est de projeter l'auditeur en 2031 pour interroger les liens entre santé humaine et santé animale. Pour ce faire, des chercheurs présentent les travaux les plus récents sur la façon de prévenir les risques de demain. Parce que la santé des uns passe par celle de tous.

https://bit.ly/3g8l18G



À LIRE

Six feet under

Nous marchons dessus tous les jours, et pourtant nous le connaissons si mal ! Quoi ? Le sol ! Dans *Sous terre* (Dargaud, 176 pages, 19,99 euros, 2021), Mathieu Burniat, conseillé par Marc-André Selosse, met en scène cette fine couche à la surface de la Terre où la vie grouille. Cette bande dessinée dévoile à travers un palpitant récit d'aventures la richesse et l'importance de ce sol sur le climat, le cycle de l'eau, l'alimentation… En un mot, il est indispensable à la survie des humains. Alors autant en prendre soin ! C'est le vœu que formule l'auteur.

https://bit.ly/3uRyHdv

À VISITER

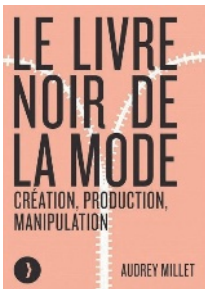
Les racines du mal

Une exposition éclaire la crise environnementale actuelle en remontant jusqu'au Néolithique, quand l'exploitation de la nature, désormais poussée à l'extrême, a commencé.

L'Anthropocène, un concept encore débattu, est défini comme la période durant laquelle les activités humaines laissent une empreinte majeure, visible géologiquement, sur l'écosystème terrestre. À quand faire remonter le début de cette époque ? La question divise, mais une chose est sûre, l'humanité n'a cessé de transformer son environnement depuis le Néolithique et la domestication des plantes et des animaux il y a quelque 12 000 ans. C'est l'objet de l'exposition « La Terre en héritage, du Néolithique à nous », proposée par le musée des Confluences, à Lyon, et coproduite avec l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap). L'idée : aborder les grands défis environnementaux de notre temps à l'aune de cette période charnière de notre histoire dans lesquels ils s'enracinent, car c'est là que notre rapport à la nature, fondé sur son exploitation, a changé dramatiquement.
Face aux multiples dérèglements dont souffre notre planète (changement climatique, surexploitation, pollution, effondrement de la biodiversité…), le pari des commissaires est que l'on sera plus en mesure d'y remédier en comprenant leur genèse. Comme disait Tocqueville, « Quand le passé n'éclaire plus l'avenir, l'esprit marche dans les ténèbres. » Alors rallumez la lumière en visitant l'exposition !



« La Terre en héritage, du Néolithique à nous », musée des Confluences, Lyon. Jusqu'au 30 janvier 2022.
https://bit.ly/3peVqPy



À LIRE

Un cimetière dans le placard

Des collections de vêtements renouvelées toutes les semaines et à des prix défiant toute concurrence, des ateliers de fabrication où des ouvriers, parfois des enfants, sont exploités voire réduits en esclavage, le recours à outrance à des produits chimiques toxiques… Derrière les paillettes, le monde de la mode a son côté obscur, et il n'est guère reluisant. C'est le constat documenté et accablant que dresse Audrey Millet, chercheuse associée au CNRS et historienne de la mode, dans son ouvrage *Le Livre noir de la mode. Création, production, manipulation* (Les Pérégrines, 2021). Après avoir remonté tous les fils de cette industrie gigantesque (1,2 milliard de tonnes de gaz à effet de serre émis chaque année, soit environ 2 % de l'ensemble des émissions mondiales), l'autrice résume la situation : « Nos placards sont des cimetières. » Peut-on contribuer à améliorer la situation ? Oui, d'abord en achetant moins, et ensuite en privilégiant le recyclage et les produits d'occasion. Le mouvement est en marche, mais il n'en est qu'à ses balbutiements. C'est le moment de faire le bilan de votre garde-robe…

Le Livre noir de la mode. Création, production, manipulation, Les Pérégrines, 2021. 280 pages, 20 euros
https://bit.ly/3vMx1Du

Pour la Science HORS-SÉRIE

WWW.POURLASCIENCE.FR
170 bis bd du Montparnasse
75014 Paris
Tél. : 01 55 42 84 00

GROUPE POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions :
Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe :
Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Sean Bailly

Développement numérique :
Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager et partenariats :
Aëla Keryhuel
aela.keryhuel@pourlascience.fr

Conception graphique :
Céline Lapert et Ingrid Leroy
Direction artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault,
Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
et Charlotte Calament
Réviseuse : Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion : Charline Buché
Cheffe de produit : Eléna Delanne
Direction du personnel : Olivia Le Prévost
Secrétaire général : Nicolas Bréon
Fabrication :
Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
Directeur de la publication et gérant :
Frédéric Mériot
Ont contribué à ce numéro :
Caroline Vanhoove et William Rowe-Pirra

PUBLICITÉ FRANCE
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne :
https://boutique.groupepourlascience.fr
Courriel : serviceclients@groupepourlascience.fr
Tél. : 01 86 70 01 76
Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h
Adresse postale :
Service Abonnement Pour la Science
56, rue du Rocher – 75008 Paris
Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
France métropolitaine : 59 euros
Europe : 71 euros
Reste du monde : 85,25 euros

DIFFUSION
Contact kiosques :
À Juste Titres ; Alicia Abadie
Tél. : 04 88 15 12 47
Information/modification
de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief : Laura Helmuth
Acting President : Stephen Pincock
Executive Vice President : Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays.
La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier : Finlande • Taux de fibres recyclées : 0 % • « Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau » : P_{tot} 0,003 kg/t

PEFC 10-31-1282 / Certifié PEFC / Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées. / pefc-france.org

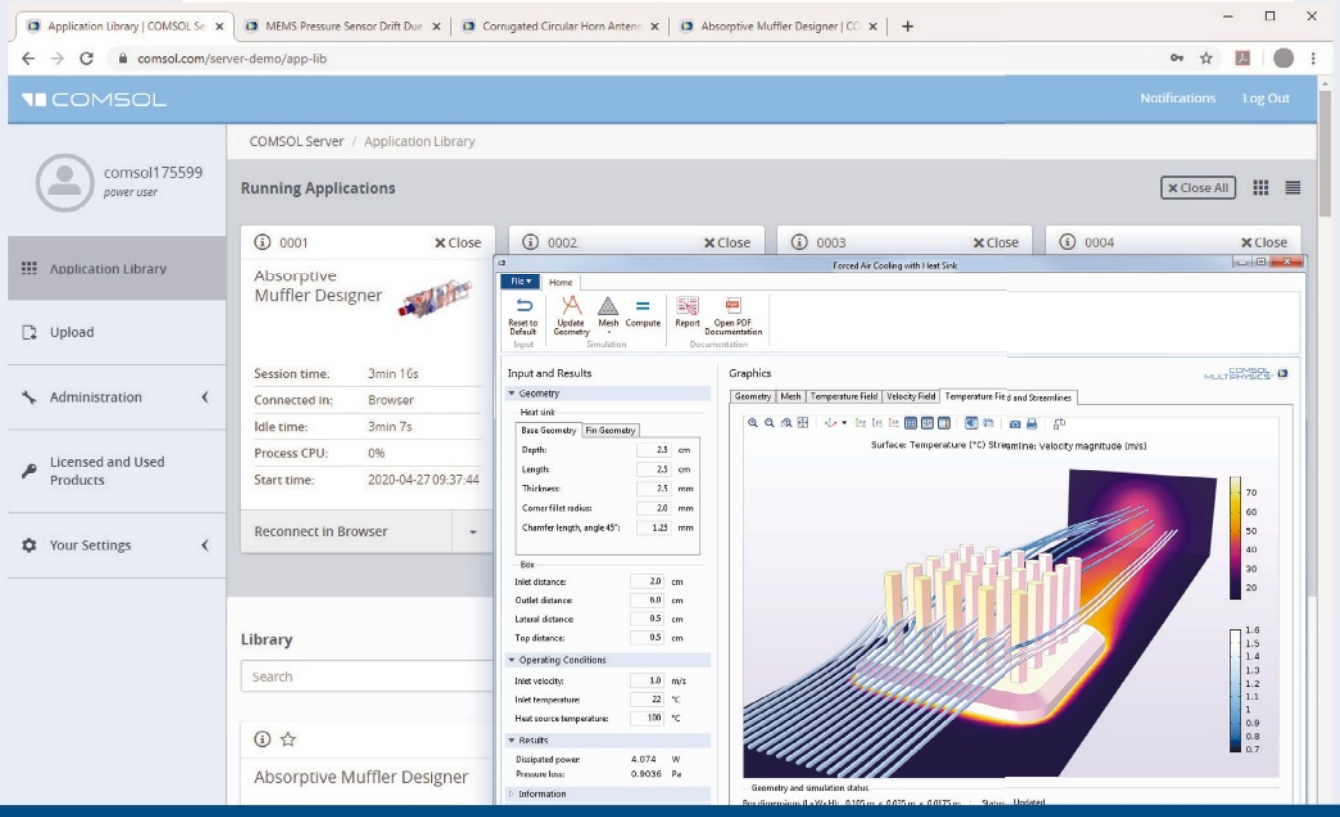
Imprimé en France – Maury imprimeur S.A. Malesherbes – N° d'imprimeur : 255 070 – N° d'édition : M0770712-01 – Dépôt légal : juillet 2021.
Commission paritaire n° 0922K82079 du 19-09-02 – Distribution : MLP – ISSN 1 246-7685 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

ÉTUDE DE CAS

Accélérez et améliorez le développement de vos produits.

Les ingénieurs et les chercheurs de l'industrie accélèrent le développement de produits en créant des applications de simulation numérique et en les déployant au sein de leurs organisations. COMSOL Multiphysics® vous permet de créer des applications spécialisées et COMSOL Server™ et COMSOL Compiler™ vous aident à les distribuer aux bons collaborateurs et au bon moment dans votre cycle de développement de produits.

EN SAVOIR PLUS *comsol.blog/product-development*

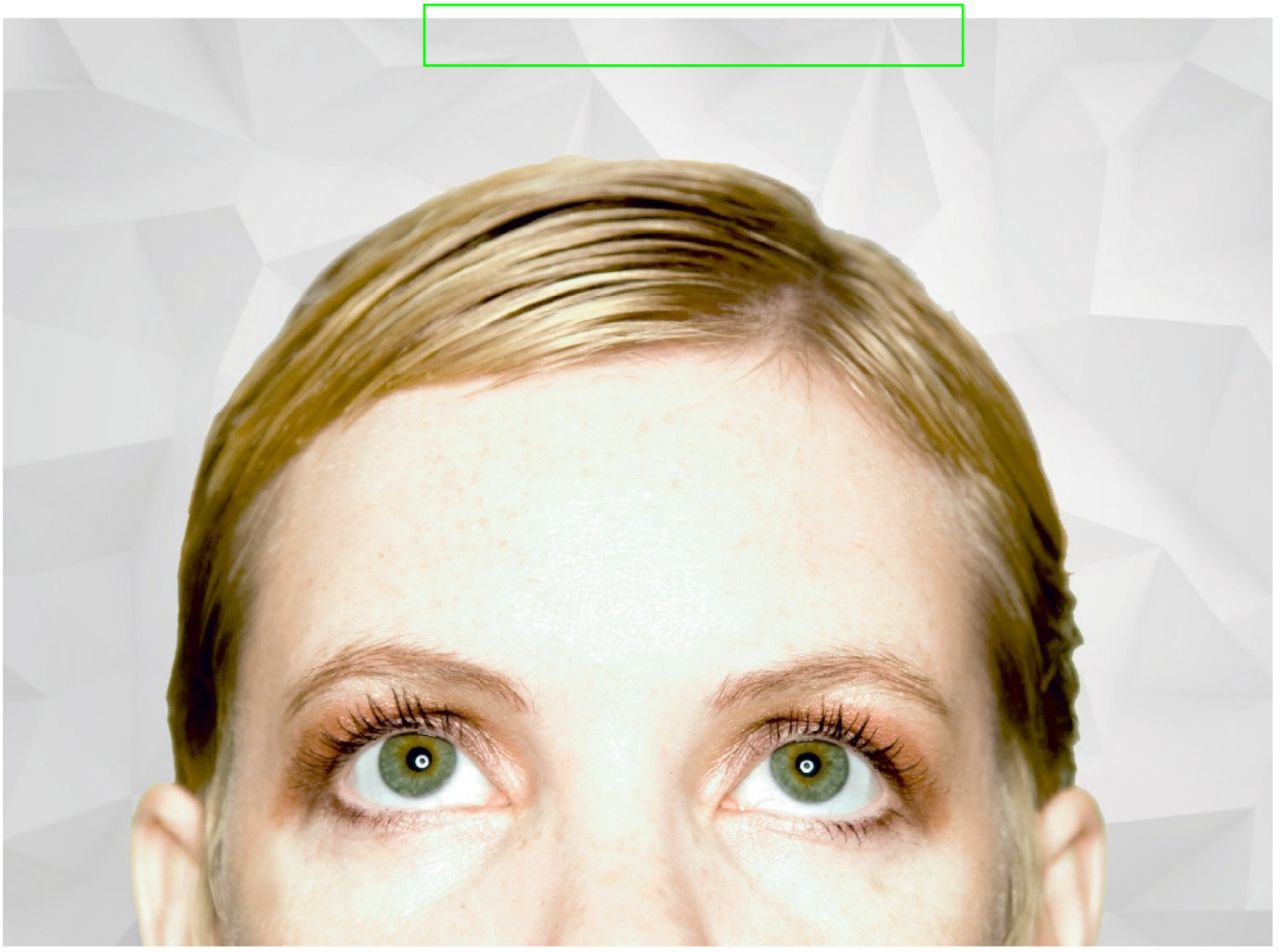


COMSOL

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.

AcademiaNet

La base de données qui rassemble toutes les femmes scientifiques de renommée internationale



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil de plus des 2.300 femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Partenaires

Robert Bosch Stiftung

Spektrum der Wissenschaft

nature

Pour la Science

www.academia-net.org