

5. Le paradoxe de Simpson et l'émergence de la coopération

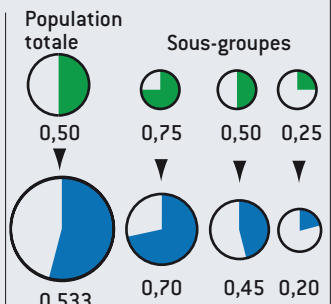
Dans la compétition entre organismes biologiques, le maintien des « biens communs » est une question importante. Lorsqu'il y a un producteur de ce bien commun et un consommateur (un organisme qui en bénéficie sans le produire), les consommateurs ont tendance à proliférer aux dépens des producteurs. L'oxygène de l'air est un exemple de bien commun produit seulement par certains organismes et consommé par d'autres qui ne le produisent pas. En 2009, des chercheurs de l'Université Rockefeller à New York (John Chuang, Olivier Rivoire, Stanislas Leibler) ont créé et étudié une telle situation avec deux souches de la bactérie *Escherichia coli*. L'une des souches produisait un antibiotique utile aux deux souches et l'autre en profitait sans

le produire. Les chercheurs ont composé plusieurs groupes de bactéries, chaque groupe comportant les deux types de bactéries. Une situation apparemment paradoxale est apparue : les non-producteurs croissaient plus vite dans chaque groupe (ce qui n'est pas une surprise) bien qu'au total, les non-producteurs voyaient leur effectif global décroître en proportion. Il s'agissait d'un phénomène de type paradoxe de Simpson.

Pour un biologiste, ce système est un exemple frappant de conflit entre niveaux de sélection. Les bactéries productrices du bien commun sont les bénéficiaires de l'ensemble du système quand on les considère comme un tout, alors qu'à un niveau individuel (celui auquel opère la sélection), elles sont désavantagées,

puisque dans chaque groupe leur proportion diminue.

Grâce aux effets du paradoxe de Simpson, un trait qui bénéficie à la population considérée comme un tout peut ainsi se trouver sélectionné, bien qu'à un niveau individuel le trait soit désavantageux. La chose est étonnante : ce qui est mauvais au niveau individuel se trouve au total favorisé par l'effet mécanique d'un paradoxe de Simpson. La réalisation concrète de l'expérience par les chercheurs démontre que cet effet sélectif paradoxal n'est pas seulement théorique, mais doit être pris en compte par les spécialistes de l'évolution. Cette dynamique doit être envisagée comme un mécanisme de sélection de traits individuels favorables à la coopération et à l'altruisme. Utiliser le paradoxe



En vert, la proportion initiale de bactéries de type 1.
En bleu, la proportion finale de bactéries de type 1.

de Simpson est l'une des ruses que la sélection naturelle mettrait en œuvre pour favoriser les traits coopératifs et faire ainsi émerger et prospérer des entités collectives d'individus coopérateurs et solidaires.

Simpson est toujours présent : tout tableau composé de données pas trop petites est susceptible d'être séparé en deux tableaux créant un paradoxe de Simpson.

Argument 2. Il existe des situations que l'on nommera « Double-Simpson », dont la première a été découverte par Jean-François Colonna, du Centre de mathématiques appliquées de l'École polytechnique, où :

- Le tableau 1 suggère que le médicament est meilleur que le placebo.
- Les tableaux 2 et 3 suggèrent que le placebo est meilleur que le médicament.
- Les tableaux 4 et 5 suggèrent que le médicament est meilleur que le placebo.
- Il existe deux jeux de données (tableaux 6A-9A et tableaux 6B-9B) compatibles avec les tableaux 1-5 et tels que pour chaque catégorie précise (il y en a quatre), ce que laissent supposer les données A est l'inverse de ce que suggèrent les données B (voir l'encadré 3).

Cette possibilité de jeux A et B conduisant à des prescriptions opposées pour chacune des quatre catégories n'était pas connue avant les expériences numériques de J.-F. Colonna. Elle établit définitivement

que dans certaines situations, celui qui veut des certitudes absolues ne peut agir à cause du paradoxe de Simpson.

Heureusement, dans les cas que nous avons envisagés, celui qui est prêt à prendre le risque de se tromper (en médecine le prescripteur est souvent dans une telle situation) réussira à prendre des décisions à peu près sûres. On montre en effet que celui qui connaît un tableau comme notre tableau 1 et le sépare en deux catégories complémentaires ne tombera sur des résultats opposés (tels les tableaux 2 et 3) qu'avec une probabilité de 1,92 %. De même, en fusionnant deux tableaux donnant des indications dans le même sens, la probabilité que le tableau résultant contredise les deux premiers est faible. De même encore, la probabilité que trois tableaux, dont l'un est la somme des deux autres, présentent un paradoxe de Simpson est faible.

La conclusion est que même si les cas où le paradoxe de Simpson se produit sont vraiment gênants (c'est ce qu'établit le « Double-Simpson »), ils sont heureusement assez rares. On peut donc prendre le risque... de ne pas y penser !

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

J. Pearl, *Simpson's paradox : An anatomy*, 2011 : <http://escholarship.org/uc/item/3s62r0d6>

H. Goltz et M. Smith, *Yule-Simpson paradox in research, Practical Assessment, Research & Evaluation*, vol. 15, 2010 : <http://pareonline.net/pdf/v15n15.pdf>

J. Chuang *et al.*, *Simpson's paradox in a synthetic microbial system*, *Science*, vol. 323, pp. 272-275, 2009.

M. Pavlides et M. Perlman, *How likely is Simpson's paradox ? The American Statistician*, 2009 : <http://bit.ly/10xToug>

SCIENCE & FICTION

Le fantôme de l'invisibilité

Pour être invisible, un objet ou un organisme vivant doit être transparent et ne pas réfléchir la lumière. Différentes techniques sont à l'étude, mais aucune n'est parfaite.

Ce qui n'empêche pas certains cinéastes de jouer avec l'invisibilité de leurs personnages.

Roland LEHOUCQ et J. Sébastien STEYER

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 châtement, l'homme invisible devient un danger pour la société.

C'est d'ailleurs le sujet de la fable de Gygès, contée par Platon au début du II^e 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, complot 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 son roman *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 les œuvres de J. R. R. Tolkien (*Bilbo le Hobbit*, 1937, et *Le Seigneur des Anneaux*, 1954-55).

Quant aux méthodes conférant l'invisibilité, elles varient de la magie jusqu'aux

procédés techniques les plus élaborés. Côté magie, Harry Potter et sa cape d'invisibilité viennent immédiatement à l'esprit. Pour le reste, les exemples foisonnent. Ainsi, Jane Storm, membre des *Quatre Fantastiques* (Marvel Comics, 1961), peut se rendre invisible à volonté après avoir été irradiée accidentellement par des rayons cosmiques durant une expédition spatiale. 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, le major Kusanagi est une cyborg du manga *Ghost in the shell* dotée d'un camouflage « thermo-optique » qui n'est pas sans rapport avec l'armure de l'affreux extraterrestre du film *Predator*, qui renvoie la lumière pour annuler le contraste avec son environnement.

Des solutions pour se rendre invisible

Quittons le domaine de la fiction pour nous poser la question de l'invisibilité sur Terre. Nous constatons que de nombreux animaux (céphalopodes, arthropodes ou caméléons) disposent de différents types de camouflages ou autres mimétismes, qui ont été sélectionnés au cours de l'évolution. En effet, ils leur confèrent un avantage lors de la chasse ou pour passer inaperçus aux yeux de leurs prédateurs. Ces stratégies sont rendues possibles notamment grâce à des cellules pigmentaires de la peau (les chromatophores



1. L'HOMME INVISIBLE a été le héros de très nombreux romans, films, séries télévisées ou bandes dessinées !

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 entre l'indice optique du milieu (ici l'eau ou le verre) et celui de l'air. 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 qu'un tissu biologique évite au mieux la diffusion, il doit être organisé de façon homogène sur des distances comparables aux longueurs d'onde de la lumière visible. C'est 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. Mais c'est également rare, car les proportions et les propriétés optiques des composants des tissus biologiques varient notablement.

Pour étudier un squelette ou des tissus, la technique classique consiste à tremper l'animal dans différents bains (contenant notamment des enzymes, de l'alcool et des colorants), afin de rendre les chairs invisibles et de colorer les tissus que l'on souhaite observer (par exemple, le cartilage et les os). Une équipe américaine de l'Université Stanford a récemment réussi à rendre transparent le cerveau d'une souris en le plongeant dans un bain d'hydrogel, une substance similaire à celle dont sont



2. L'ARTISTE peut rendre un être humain transparent. Dans la réalité, même si diverses techniques sont aujourd'hui à l'étude, l'invisibilité reste un mythe.

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. Cette technique a permis d'obtenir des clichés incroyablement précis de l'architecture moléculaire du cerveau.

Du naturel à l'artificiel

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 votre écran est devenu invisible ! Malheureusement, ce procédé ne fonctionne que selon la direction perpendiculaire à l'écran. Un étudiant japonais de l'Université de Tokyo, Kazutoshi Obana, a perfectionné cette 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 *high-tech* donne l'illusion que celui qui le porte est transparent. Comme pour l'écran d'ordinateur, le seul défaut de ce spectaculaire procédé de camouflage optique est qu'il n'est efficace que dans une seule direction.

En octobre 2006, David Smith et ses collègues de l'Université Duke, en Caroline du Nord, ont réussi à rendre un objet réellement invisible. Pas invisible à la lumière du Soleil, mais dans la gamme des micro-ondes. 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 micro-ondes. Mais, en principe, ce qu'ils ont réalisé pour les micro-ondes pourrait l'être pour les ondes visibles. 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 ! ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

Retrouvez les articles de J.-S. Steyer et R. Lehoucq sur www.pourlascience.fr



ART & SCIENCE

Entre le vivant et l'inerte

Plusieurs designers s'inspirent de la biologie pour concevoir des objets, réalistes ou provocants, qui transformeront – peut-être – notre quotidien. Leur motivation est de repenser notre relation à la nature.

Loïc MANGIN

Le biomimétisme a le vent en poupe depuis plusieurs siècles. Chimistes, physiciens, ingénieurs et biologistes s'associent pour observer et décrypter les phénomènes vivants afin de s'en inspirer pour créer de nouveaux matériaux ou processus. C'est d'autant plus vrai aujourd'hui que certains y voient un moyen de faire face aux enjeux environnementaux. Le biomimétisme serait un moyen, parmi d'autres, de passer d'une économie fondée sur le carbone (polluante et gourmande en énergie et en ressources naturelles) à une économie plus « verte ». En d'autres termes, l'observation du vivant aiderait à protéger... le vivant, y compris l'humanité.

Les exemples de biomimétisme sont légion. L'un des plus connus est la tentative de Léonard de Vinci d'imiter le vol des oiseaux pour concevoir une machine volante. Le velcro est inspiré des crochets de la bardane. Des pare-brise sont rendus autonettoyants grâce à la compréhension des propriétés hydrophobes des feuilles de lotus.

L'art n'est pas en reste, et notamment le design – cet art appliqué dont le but est de résoudre un problème lié à l'usage, la forme d'un objet, la technique mise en œuvre pour le fabriquer... La Fondation EDF propose une exposition consacrée aux œuvres de designers qui travaillent avec des matériaux et des techniques issus du vivant. En voici quelques pièces représentatives.

La Britannique Elaine Ng Yan Ling, dans le cadre de son projet *Techno Naturology*, a

conçu des textiles fondés sur les matériaux à mémoire de forme associés à du bois et à des fibres naturelles (*voir la figure a*). Le résultat est un tissu qui imite le comportement d'une pomme de pin : il est sensible aux écarts de température et à l'humidité. On peut alors imaginer des revêtements qui laissent passer la lumière l'hiver et protègent du soleil l'été. Autre exemple, des vêtements et des accessoires qui changent de forme selon l'environnement.

Pour pallier le manque de matériaux, sable pour le béton ou bois, Philip Ross a une solution : utiliser des champignons !

Le Français Vincent Fournier s'est placé dans un futur imaginaire où la biologie de synthèse aurait conquis notre quotidien. Il a imaginé un drone en forme de méduse (*voir la figure b*). Ce robot, mi-vivant, mi-machine, serait immergé dans les rivières et en sortirait pour survoler des zones victimes de sécheresses localisées et y larguer l'eau qu'il contient. Activé par des températures supérieures à 30 °C, il serait guidé à partir des informations recueillies par des satellites de surveillance.

Le 29 mai 2013, l'Assemblée nationale a été alertée d'une possible pénurie de sable, indispensable à la confection du béton. Certaines essences de bois se font rares. Pour pallier ces manques et continuer à construire des meubles ainsi que des bâtiments, l'Américain Philip Ross

propose d'utiliser les champignons ! L'idée consiste à cultiver sur de la sciure ces organismes qui, en consommant la cellulose du substrat, le solidifie. On obtient alors, après séchage, un matériau léger et résistant dont on peut faire, par exemple, une chaise (*voir la figure c*) ou des briques.

Le Français Émile de Visscher a élaboré une méthode, nommée *Pearling*, pour faire pousser chez soi des perles. La nacre est un empilement régulier de couches de cristaux d'aragonite (un carbonate de calcium) autour d'un germe, par exemple un grain de sable. Le principe mis au point par le designer est calqué sur cette structure : un objet est plongé et retiré de façon périodique dans un bain de matières polarisées dispersées dans de l'eau (*voir la figure d*). À chaque cycle, une mince couche se dépose, et l'on peut imaginer transformer ainsi n'importe quel objet en bijou.

Enfin, dernier projet, celui de la Britannique Shamees Aden. Il s'agit d'une chaussure qui s'adapte automatiquement à la surface du terrain (*voir la figure e*). Son secret ? Elle est constituée de protocellules, à la frontière du vivant et de l'inerte, qui réagiraient à l'activité du coureur.

Plusieurs de ces idées sont déjà mises en œuvre concrètement. D'autres n'existent que pour provoquer l'imagination. Mais n'est-ce pas ce dont nous avons besoin ? ■

En vie/Alive, aux frontières du design, Espace Fondation EDF, 6 rue Récamier, 75007 Paris