

ET SI NOTRE PARESSE
ÉTAIT UN SUPER-POUVOIR

LA PARTICULE
QUI A SAUVÉ LE MONDE

POURQUOI NOTRE CERVEAU
ADORE SUPERMAN

FACE AUX
MONSTRES
DU COSMOS

TOP 5 DES
SUPER-CONCEPTS
MATHÉMATIQUES

LE DOSSIER SURPUISSANT

SERPENT VOLANT, FLEUR MUTANTE, GRENOUILLE À GRIFFES...
RENCONTRE AVEC LES VRAIS SUPER-HÉROS



SUPER-POUVOIRS

FRANCE: 7,00 € - CH: 1,60 FS - D: 9,40 € - ESP: 11,00 € - GR: 7,20 € - DOM/S: 7,00 € - M: 7,70 MAD
TUN: 14,50 TND - C*N: 10,99 SCD CPPAP

L 14332 - 6 H - F: 6,90 € - '20





Le dossier

SURPUISSANT

ROCKET P.15

LA FLÈCHE P.14

BZZZ! P.12

TELESCOP P.11

POIGNE D'ACIER P.10

GRIFFU P.8

DIABOLIK P.16

GAIA P.18

CLAY W. P.20

PHOENIX P.28

SENTINES P.27

SURVIVANT P.26

PLASIA P.25

DÉTONATUS P.24

L'OMBRE P.23

MCINSTROPLANTE P.20

LES SUPER-POUVOIRS C'EST QUOI?

La réponse en 100 personnages de fiction

30

LES SUPER-POUVOIRS DE NOS FAIBLESSES

Dépression, paresse, dyslexie... Elles nous rendent plus forts

42

IA : LES LIMITES DU SUPER-POUVOIR

ChatGPT face au mur des données

66

LES SUPER-POUVOIRS DE L'ABSTRACTION

top 5 des concepts mathématiques

78

LES ÉMOIQUES DE SUPER-POUVOIRS

Il sont hype, thymésique ultra endurant, synesthésiste, apnéiste et se racontent

94

ABÉCÉDAIRE

Quelques mots pour bien en parler

98

LES SUPER-POUVOIRS DU BOSON

Mais pourquoi est-il si fort?

32

LES SUPER-POUVOIRS DES ASTRES

Rencontre avec les monstres du cosmos

52

CE MATÉRIAU A DES SUPER-POUVOIRS

Le dioxyde de vanadium va changer le monde

72

L'OBSSESSION DES SUPER-POUVOIRS

Pourquoi on adore les super-héros

86

LES CHIFFRES DES SUPER-POUVOIRS

Fusion, sorcières, Terre, ultrasons, miracles...

96



SI TU ES TRÈS FORT,
TU DOIS AUSSI
ÊTRE TRÈS GENTIL



Fifi Brindacier (Astrid Lindgren, 1947)

SHUTTERSTOCK



PIERRE-YVES BOCOUEUET
RÉDACTEUR EN CHEF DÉLÉGUÉ

ÉDITO

On aime bien Superman et ses acolytes, mais les super-pouvoirs d'ici nous voulons vous parler ici n'ont rien de surnaturel au contraire. Ils sont là partout bien réels. En biologie, en physique, en chimie, en actrophysique, et même en mathématiques ou en psychologie, les chercheurs traquent ces extravagances de la nature quand ils ne sont pas en train d'en inventer, nouvelles techs à l'appui. Comme le disait Stephen Hawking, « Nous sommes juste une race avancée de singes sur une planète mineure d'une étoile très ordinaire. Mais nous sommes capables de comprendre l'Univers. Cela fait de nous quelque chose de très spécial » la science permet à notre drôle d'espèce de se confronter à ce qui la dépasse. Là est notre super-pouvoir.

SUPER-SCIENCE

ABONNEZ-VOUS À **epsilon** ET NE MANQUEZ AUCUN NUMÉRO epsilon.com

epsilon Pour écrire à la rédaction : epsilon@uniqueheritage.fr.

La rédaction

Pierre-Yves Bocuuet, rédacteur en chef
Léa Vélazquez, rédactrice
Catherine de la Roche, Vincent Noiret, journaliste
Sébastien (rédaction en chef),
Muriel Lecoq (adjointe), Anne Riera
(édition), Laetitia Raynaud (relecture)

Le directeur adjoint Josephine
Audron, Simon Péroz, Florence
Gacci, Valérie Greniez, Clémence
Laurons, Aline Nippert, Emmanuelle
Picaut, Joxandra Pihen, Constance
Veyrie (rédaction),
Stéphane Aubin (icones), Hélène Colau
(édition), Valérie Farnaud (maquette)

SERVICE CLIENT et ABONNEMENT (+33) 01 87 64 09 62

Appelez-nous si vous souhaitez
ou pour toute commande.
Mail : epsilon@uniqueheritage.fr
Courrier : CDM, Lotie - Epsilon
7, rue Charles Tillon - S80021
3308 Aubervilliers Cedex
Téléphone : 01 87 64 09 62
Abonnement annuel : 7,80 € (12 n°) ou
8,40 € (12 n° + hors-séries)
Ventes au numéro réservé abonnés
et membres de journaux : sabote
Allez à : distribution@uniqueheritage.fr
(+33) 01 56 79 36 94. Distribution : MLP

Abonnements : Nathalie Dunnas,
Vanessa Frossio (relations abonnés):
abo.epsilon@uniqueheritage.fr

Publicité : La Compagnie et médias, Virginie
hoang@compagniemedia.fr 01 11 15 63,
Christiane Jena, 06 05 71 11 06
Fédération C. de la presse, 07 71 72 43 16
Édition : L'Asie (13)
Unité de production : Inca 0
Tous droits réservés © 2023
Centre de presse "EP"
Prix : 6,00 € / kg

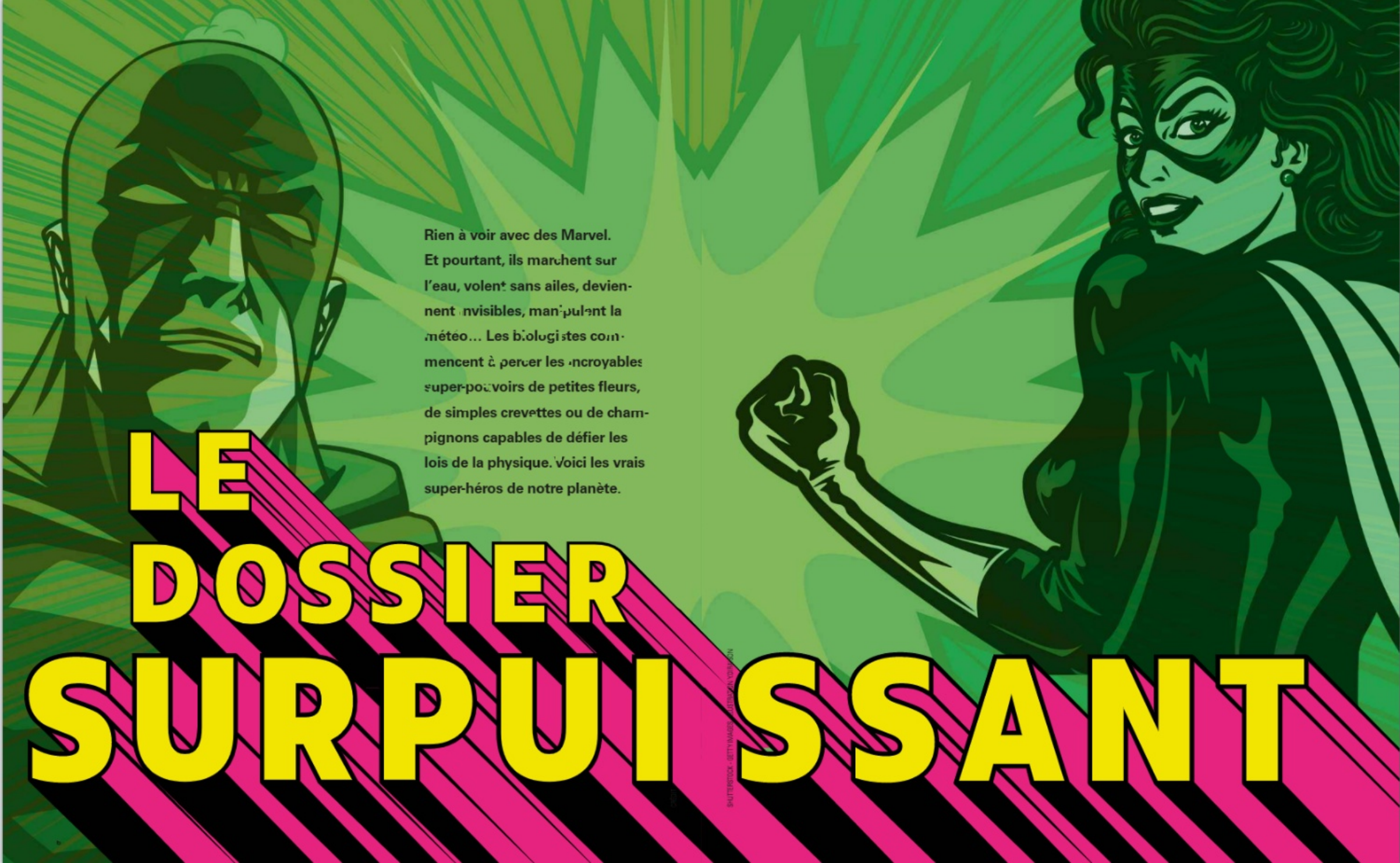
Epsilon est édité par
Unique Heritage Science SAS,
1, rue de la Presse, 75012 Paris.

A la Une : Unique Heritage Media
Présence : Le Monde
Publication : Emmanuelle Mounier

N° de SN : 080-4/33
C. de la presse : 07-33-4027
Dépôt légal : à paraître



Une publication du groupe
**UNIQUE
HERITAGE
MEDIA**



Rien à voir avec des Marvel.
Et pourtant, ils marchent sur
l'eau, volent sans ailes, devien-
nent invisibles, manipulent la
météo... Les biologistes com-
mencent à percevoir les incroyables
super-pouvoirs de petites fleurs,
de simples crevettes ou de cham-
pignons capables de défier les
lois de la physique. Voici les vrais
super-héros de notre planète.

LE DOSSIER SURPUISSANT

SHUTTERSTOCK - GETTY IMAGES / ALAMY / JONAS LIN

GRIFFU

Le pouvoir de
métamorphose



Plus de cent ans après sa description, elle reste mystérieuse. On ne sait même pas à quoi servent ses griffes

ANNEMARIE OHLER, ZOOLOGISTE
AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE DE PARIS

Les chasseurs camerounais ont appris à s'en méfier. Pour attraper ce petit amphibien d'une dizaine de centimètres a priori inoffensif, ils n'hésitent carrément pas à se munir de lances et de machettes. Car ils savent que celle qu'ils surnommement parfois « la grenouille de l'horreur » possède une arme secrète : des griffes cachées sous la peau.

Situées à l'extrémité de ses pattes arrière, les griffes de *Trichobatrachus robustus* se présentent sous la forme de petits os libres capales, par contraction musculaire, de sortir en perforant la peau des orteils. Faisant de cette grenouille le seul vertébré connu paré de griffes rétractiles composées d'os, et non de kératine. Une arme secrète qui, comme chez Wolverine, le héros mutant des *X-Men*, ne va pas sans un super-pouvoir compensateur de cicatrisation. « Les amphibiens possèdent une peau très fine et riche en grandes productrices d'antioxygènes et d'antibiotiques, explique Annemarie Ohler, spécialiste des amphibiens et professeure au Muséum d'histoire naturelle de Paris. Elle ne risque rien, ce n'est pas une blessure grave pour elle. » Cerise sur le gâteau : les os reprendraient leur place initiale une fois relâché le muscle ayant provoqué leur sortie. « Reprendraient », car cette rétractation n'a, à ce jour, jamais été observée par les naturalistes. « *Trichobatrachus robustus* est une grenouille des torrents, explique la zoologiste. Et ces dernières sont très difficiles à

étudier. leur élevage en laboratoire est fastidieux, car elles ont besoin d'une eau très oxygénée pour se reproduire. Elles restent donc très mystérieuses, plus de cent ans après leur première description.

D'ailleurs, on ne sait même pas vraiment à quoi leur servent leurs griffes en milieu naturel. « Utiles contre les chasseurs à mains nues, elles sont probablement aussi redoutables pour repousser serpents et poissons carnivores. Et peut-être aussi précieuses pour s'accrocher aux parois rocheuses ou pour protéger les œufs dans les eaux à fort courant. La comparaison avec Wolverine ne s'arrête d'ailleurs pas aux griffes. Car les

mâles, en période de ponte, se parent de touffes qui ressemblent à s'y méprendre aux rouflaquettes du célèbre mutant. « C'est un caractère unique, on a l'impression qu'ils sont poilus, or les amphibiens ne possèdent pas de poils. Ce sont, en réalité, des petites extensions de peau. Mais la ressemblance est troublante ! », s'amuse Annemarie Ohler. Un attribut loin d'être purement esthétique, car ces filaments de peau, irrigués par de nombreux vaisseaux sanguins, améliorent l'oxygénation et permettent aux mâles de rester plus longtemps sous l'eau. Un vrai super-héros, on vous dit. J.C.

SHUTTERSTOCK - GETTY IMAGES - ILLUSTRATION VOIRAIN



POIGNE DE FER

Le pouvoir de méga-force

Melody Young, du New York Institute of Technology College, s'en donne à cœur joie : « Ils peuvent soutenir d'une patte entre 99 et 103 % du poids de leur corps ! Les paresseux ont une force considérable. C'est plus que la plupart des primates et plus que l'humain, capable de soutenir au maximum 60 % de sa masse d'une seule main. » Le petit mammifère ombématique du Costa Rica n'était pourtant pas réputé pour sa puissance, c'est peut-être sa masse musculaire assez modeste, habitudes de vie placides. Il passe 12 heures sur 24 à dormir ; ne bouge de son perchoir dans les arbres qu'une fois par jour. Jusque-là, les étimologues s'étaient plutôt passionnés pour son métabolisme : une digestion d'une lenteur indolente ; une température corporelle très basse et fait à peine l'effort de réguler sa chaleur corporelle et se laisse bercer par la température ambiante. Il passe sa vie dans une sorte de léthargie proche d'un état de dormance au point que les chercheurs ont inventé pour lui l'expression « métabolisme métabolique ». « C'est le taux métabolique le plus bas des mammifères non hibernants », constate Rebecca Cliffe, de l'université de Swansea, en Grande-Bretagne. Reste

qu'il sait demeurer accroché sans faillir, ses longues griffes en forme de crochets entourant solidement la tranche sur laquelle il a décidé de s'ancre. « Des travaux avaient montré que malgré leur faible volume, ses muscles paraissent hyper-puissants », relate Melody Young. Une équipe de l'université de Youngstown, dans l'Ohio, avait aussi remarqué en 2020 leur structure particulière : une grande quantité de fibres à contraction rapide. Mais franchement, rien n'annonçait le résultat record obtenu il y a quelques mois. « Grâce à une collaboration avec le Sloth Sanctuary, une réserve consacrée à la préservation de l'espèce au Costa Rica, nous avons pu tester in vivo pour la première fois la force de préhension de cinq *Bradypus variegatus*, des paresseux à gorge brune », raconte la chercheuse. Des branches truffées de capteurs de force ont été conçues pour l'occasion, de divers diamètres... Et le verdict de leur surpuissance est tombé. « Les paresseux : sont plus forts que tous les mammifères que nous avons étudiés. » En fait, seuls les oiseaux les surpassent – eux sont capables de soutenir jusqu'à 300 % de leur poids avec un seul membre. **M. :**



TELESCOP

Le pouvoir de vision nocturne

« C'est une adaptation fascinante ! » Pour l'astrophysicien anglais Robert Fosbury, les yeux des rennes de l'Arctique sont une merveille. « Quand j'ai découvert les premières descriptions faites par mon collègue de l'University College de Londres, Glen Jeffery, je lui ai tout de suite écrit », se souvient-il. Réponse le jour même : « Je savais qu'on avait besoin d'un astrophysicien ! » Car Glen Jeffery ne s'expliquait pas sa découverte : les beaux yeux dorés de ces herbivores s'ouvrant au-delà du cercle polaire virent au bleu soutenu une fois venue la nuit polaire : « Durant 8 à 11 h par jour, entre septembre et avril, le ciel prend une teinte bleutée très intense », rappelle Robert Fosbury. En favorisant cette couleur, la partie réfléchissante au fond des yeux des rennes, que l'on nomme le tapis clair, renforce leur vision. Le bleu leur apparaît alors 15 % plus brillant, réduisant le risque d'être surpris par un prédateur ou de passer à côté de savoureux lichens enfouis sous la neige. En sondant la structure intime de ce tapis clair, le chercheur a révélé en juin dernier le mécanisme à l'œuvre : « Il est formé de fibres nanométriques de collagène qui baignent dans un fluide. À l'approche de l'hiver, la pression oculaire augmente et le fluide s'évapore : en se resserrant, ces nanofibres forment une structure beaucoup plus ordonnée, favorisant la réflexion de la lumière dans le bleu. » Mais pour l'heure, personne ne comprend encore par quelle voie biologique l'hibernant module ainsi la couleur des yeux des rennes. **J.-B.V.**

Bzzzzzz

Le pouvoir d'hyper-audition

Vous n'allez pas en croire vos oreilles. C'onagra bisanti-
nense (*Oenothera drummondii*) une jolie plante à fleurs
dont les pétales jaunes cèdent la nuit les soirs d'été
le d'aujour-d'hui, est dotée d'un super-pouvoir unique
dans le monde végétal : elle entend ! « *Maintenant,
quand je marche dans un champ, j'imagine que les
fleurs ont les oreilles qui traînent...* », s'amuse la biolo-
giste Lilach Hadany, de l'université de Tel-Aviv, princi-
pale autrice de la découverte publiée en 2019.

« *J'étais stupéfait en lisant cette étude, c'est une décou-
verte majeure pour les écologues ! Et puis j'étais
fier qu'il s'agisse d'*Oenothera drummondii* », sourit
Juan Gallego-Fernandez, de l'université de Séville,
spécialiste de cette plante voyageuse originaire du
Mexique. Pour déceler ce super-pouvoir, l'équipe
de l'université de Tel-Aviv a exposé des groupes de
fleurs à quatre sonorités différentes : l'enregistrement
d'une abeille mellifère, le son produit par ordinateur
à une fréquence similaire à celle de son bourdonne-
ment (autour de 110 Hz) et deux autres sons synthéti-
sés à moyenne et haute fréquences. Puis ils ont
prélevé et analysé le nectar sécrété par les fleurs
de chaque échantillon. Le résultat est édifiant : les*

prélèvements se révèlent en
moyenne 1,2 fois plus concentrés
en sucre lorsque les fleurs sont sou-
mises au bzzzzz de l'abeille, le vrai
comme celui reproduit à basse fré-
quence par l'ordinateur, par rapport aux
deux autres situations. « *La plante réagit donc
aux sons émis par les pollinisateurs !, s'enthousiasme
encore Lilach Hadany. Et en quelques mi-
nutes !* » Un super-pouvoir auditif super-utile ! Car en
sucrant son nectar, la plante augmente ses chances
d'attirer les insectes qui voltigent à proximité, rendant
ainsi sa reproduction plus probable. La biologiste et
son équipe sont encore en train d'en étudier les mé-
canismes : « *La forme de la fleur permet de convertir
la vibration de l'air causée par le bourdonnement
en vibrations des pétales. C'est la première étape.
D'autres processus entrent probablement en jeu à
l'intérieur de la plante... mais cela reste à découvrir.* »
Les larges pétales qui lui donnent une forme similaire
à celle du pavillon d'un phonographe – idéale d'un
point de vue acoustique – font donc office d'oreilles.
Les chercheurs sont même parvenus à observer

leurs micromouvements grâce à un
vibromètre laser. Lorsque l'enregistre-
ment des abeilles et le son basse
fréquence étaient joués. A contrario,
nuisibles et dansais quand on leur
jouait des sons à moyenne et haute
fréquences, ou lorsque le silence planait.
« *Vous avez vu le système des fleurs avec un
ou plus de pétales arrachés. La plante devient
moins quasi sourde et qui continue leur rôle joué
dans sa capacité d'écouter* », ajoute Lilach Hadany.
« *Cette découverte est extraordinaire. S'émervaille
Maria Luisa Martinez Vazquez, biologiste à l'Institut
d'écologie de Veracruz. C'est la preuve qu'il faut
être créatif en sciences et ne pas avoir peur de
poser des questions qui, à première vue, semblent
un peu folles !* » Dans la série des questions
« un peu folles », une autre pointe déjà : et s'il existait
d'autres plantes dotées de ce super-pouvoir
auditif ? « *Les premières expérimentations ont été
menées sur *Oenothera drummondii* parce qu'elle
produit beaucoup de nectar et qu'on la trouve
abondamment à côté de l'université. Mais nous
avons bien l'intention de tester d'autres végétaux* »
glisse la biologiste. Bzzzzz... **A.N.**

SHUTTERSTOCK - GETTY IMAGES

ILLUSTRATION YOHAN SIN



Mais comment font-elles ? Tous les biologistes interrogés nous ont confié leur profond désarroi teinté d'admiration. Les barges rouges accomplissent un exploit sans égal dans le monde animal. Chaque année, ces créatures de 300 grammes relient la Nouvelle Zélande à la Corée, puis la Corée à l'Alaska et enfin l'Alaska à la Nouvelle Zélande, réalisant une migration de 29 000 km, avec parfois plus de 10 000 km de vol non-stop. Non seulement ces performances ressemblent à ce jour inexplicables en termes d'énergie dépensée et d'orientation mais les données GPS font apparaître un étrange super sens : ces volatiles semblent capables de prévoir la météo. « Nos oiseaux suggèrent qu'ils décident de leur départ et puis l'Alaska quand il y a des conditions de vent favorables dans l'hémisphère Sud, comme s'ils célestialient des connexions spéciales dans l'atmosphère que les climatologues ignorent encore » conie Pietsma, ornithologue à l'université de Groningue, aux Pays-Bas. Et en plein vol, ils semblent parfaitement lire les alizés, les vents polaires, le jet-stream, anticipant tous les changements atmosphériques. À commencer par la formation de cyclones ! Plusieurs observations font état

d'oiseaux capables de prévoir les tempêtes pour les contourner ou de retarder leur arrivée à un point balayé par ces vents », relève Jean-Baptiste Thiebot, à l'université d'Hokkaido. Tout le monde voit bien l'intérêt évolutif de prévoir la météo pour parvenir sain et sauf au site de reproduction. Mais, encore une fois, comment font ces barges rouges ? Existe-t-il des signes visibles particuliers dans les nuages, les vagues ? Ces animaux sentent-ils la pression du baromètre varier, le vent sur le point de tourner ? Une autre hypothèse est à l'étude : « Les tempêtes très puissantes émettent des bruits dans le domaine des infrasons, à moins de 20 Hz, une gamme à laquelle les oiseaux peuvent être sensibles », souligne le spécialiste. Une hypothèse étayée par quelques anecdotes, comme ces passereaux qui, en 2014, ont migré pour éviter l'arrivée de tornades aux États-Unis ; ou ces oiseaux fuyant vers l'intérieur des terres bien avant l'arrivée de la vague du tsunami qui a touché l'océan Indien le 26 décembre 2004. Au point que des chercheurs du Muséum national d'histoire naturelle ont fini par poser des capteurs sur des barges rouges, dont le comportement pourrait servir d'alerte avancée en cas de typhon ou de tsunami dans le Pacifique. **V.N.**

SHUTTERSTOCK - GETTY IMAGES - ILLUSTRATION YORIMIZEN



ROCKET

Le pouvoir du vol

Ce serpent ne se contente pas de ramper. Il est capable de planer... malgré son absence manifeste d'aile ou de tout autre membre susceptible de l'aider dans cette manœuvre audacieuse. Sans à peine passer sa nature profonde, *Chrysopelea*, un reptile arboricole qui vit en Inde, sait ainsi voler de branche en branche sur des dizaines de mètres avec une agilité qui stupéfie les chercheurs penchés depuis des décennies sur ce curieux dépassement de soi. Une étude menée en 2022 par une équipe de l'université de Virginie vient de lever une partie du voile sur cet incroyable pouvoir en le modélisant ainsi : « Nous avons voulu déterminer la configuration exacte prise par son corps lorsqu'il glisse dans les airs. Nous voulions comprendre comment sa posture modifie et influence sa stabilité et son aérodynamisme ». Le plieur Jake Socha, spécialiste de biomécanique. Verdict ? Le serpent ondule suivant un axe horizontal afin d'augmenter sa portance, mais aussi selon un axe vertical, pour assurer sa

stabilité. C'est avec une trajectoire à 45 degrés qu'il obtient alors le vol optimal. Et ce n'est pas tout. Dès 2014, cette même équipe avait déjà montré qu'il est capable d'aplatir ses côtes durant le vol pour gagner en aérodynamisme. « Plus d'un siècle après la première description de ces capacités, en 1899, le secret commence tout juste à se dévoiler et de belles pistes s'ouvrent », précise l'expert. « Il nous arrive de comprendre un jour tous les détails de cette aptitude inattendue, nous pourrions espérer l'appliquer à des robots. Car pour l'heure, aucune réalisation mécanique n'est jamais arrivée à un résultat aussi spectaculaire et efficace. » Un joli projet de biomimétisme en perspective. Mais un autre mystère reste à éclaircir : quelles raisons poussent *Chrysopelea* à déployer ce super-pouvoir, quand ses cousins rampants se contentent, eux, de se traîner sagement sur leurs branches... Pour se nourrir ? Trouver un partenaire ? Échapper à des prédateurs ? À creuser. **M.L.**

X-PLANT

Le pouvoir de super-mutation

A priori, elle n'a rien de très extraordinaire. Et c'est cette banalité qui a précisément fait de l'arabette l'équivalent d'un rat de laboratoire en version végétale. Un caryotype et soumis à la science suédoise, les botanistes du monde entier réalisent peu à peu ces. Et pourtant ! Au lieu de découvrir que derrière ses petites fleurs blanches insipides se cache en fait l'un des plus singuliers pouvoirs évolutifs observés à ce jour, un talent génétique demeuré jusqu'en 2021, tapi à l'intérieur de chacune de ses cellules au plus près de son ADN. « C'est une découverte extrêmement passionnante », s'enthousiasme Tuomas Hamala, de l'université d'Åbo, en Finlande. De quoi s'agit-il ? « D'une sorte de mutagenèse contrôlée », s'émerveille la biologiste Anne Roulin, de l'université de Zurich, en Suisse. Pour s'adapter plus rapidement à de nouvelles conditions de vie, cette petite plante parvient en effet à cibler certaines mutations de son ADN. Une sorte de super-pouvoir d'évolution. « Ce changement induit un stress qui déclenche l'activation d'éléments transposables », décrit Tuomas Hamala. Ces éléments transposables, appelés parfois « gènes sauteurs » ou « transposons », sont de longs fragments d'ADN capables de changer de place ou de se multiplier. Un mécanisme courant, si ce n'est que dans le cas de l'arabette, ils ne sautent pas à l'aveugle, mais s'insèrent à proximité immédiate de gènes qui s'avèrent clés pour affronter le stress en question. « Certaines de ces mutations peuvent aider la plante à s'adapter rapidement au stress », souligne Anne Roulin. C'est exactement ce qu'observent Tuomas Hamala et ses collègues, dans un article publié fin 2021, au sein d'une population d'arabettes lyrées des plaines qu'ils ont transplantées

à 1 100 m d'altitude : « Les plantes ont alors été confrontées à des températures moins clémentes, et même au gel. » Dès l'année qui a suivi, les chercheurs ont observé chez ces transplantées un nombre plus important de mutations liées à des transposons... Qu'ils n'ont pas manqué de rapprocher du comportement identifié il y a un an par Vincent Colot et son équipe de l'ENS de Paris, chez sa cousine, l'arabette des dames. Une hypothèse confirmée depuis par Anne Roulin et son collègue Michael Thieme : « En faisant subir à l'arabette des dames une sécheresse exception-

nelle, explique ce dernier, nous avons confirmé qu'en réponse au stress de la chaleur, la plante produit des protéines spécifiques. Elles favorisent la réactivation des éléments transposables : ces transposons engendrent des mutants résistants à la sécheresse. » Avec un résultat parfois spectaculaire : « Le mutant le plus résistant

x2 à 3

C'est l'augmentation du taux de mutation chez l'arabette quand la température grimpe à 29°C.

est jaune de la tête au pied, décrit-il, car le transposon a détruit un gène impliqué dans la photosynthèse. » Son métabolisme est plus lent et ses besoins en eau moins importants. Pour l'heure, de telles plantes X-travagantes n'existent pas à l'état sauvage. Mais face à la montée des températures, ces deux espèces d'arabettes, dont les populations ont comme par hasard conquis le monde, pourraient avoir à faire bientôt la preuve in situ de leur pouvoir d'adaptation. Et faire fleurir d'étonnants spécimens. **J.-B.V.**

Ces mutations génétiques peuvent aider la plante à s'adapter rapidement au stress

ANNE ROULIN, BIOLOGISTE

BOUTEBECK - BETTY MARTEL / ILLUSTRATION ELIASSEN



DIABOLIK

Le pouvoir de manipulation

Ophiocordyceps. Voici un champignon qui pousse le parasitisme à son paroxysme : il infecte un hôte, le plus souvent un insecte, et le transforme en automate. Il s'agit, littéralement, d'un hacking de l'insecte. « Les spores du champignon s'infiltrent dans l'esprit », illustre le biologiste espagnol Roberto García-Roa, qui se plaît à photographier ces zombies aux allures surréalistes, surmontés de pousses de champignon. Il va d'ailleurs piloter l'animal vers un endroit favorable à sa croissance, et s'en servir de garde-manger avant d'essayer pour infecter de nouvelles victimes. Une incroyable prise de pouvoir liée à la sécrétion

de molécules chimiques susceptibles d'agir comme des neuromodulateurs dans le cerveau de l'insecte.

« J'étais déjà fascinée par les capacités remarquables et complexes des champignons. Mais celui-là est vraiment extraordinaire », lance la biologiste Charissa de Bekker, à l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, qui étudie ce parasitisme de l'extrême chez les fourmis charpentières. Ce qui l'a amenée à formuler en janvier 2022 une hypothèse inédite sur les mécanismes qui sous-tendent ce détournement comportemental : il pourrait s'appuyer sur une altération des rythmes chronobiologiques de la fourmi. Qui permettrait par exemple de la pousser à se diriger dans des zones en hauteur, mandibules et pattes bien accrochées aux tissus végétaux, contrairement à ses habitudes vers midi... pile à l'heure de diffusion idéale des spores du champignon. « L'expression des gènes impliqués dans les horloges biologiques qui régulent le rythme des fourmis est bouleversée », justifie la chercheuse. « Jus nous plongeons dans les profondeurs des mécanismes, et plus les choses se complexifient. » Vraiment diabolique. **A.P.**



Les spores du champignon s'infiltrent jusque dans l'esprit de l'insecte

ROBERTO GARCÍA-ROA, BIOLÓGISTE



GAÏA

Le pouvoir : d'hydrokinésie

« Les forêts pluviales ne sont pas des écosystèmes passifs ! », prévient Arie Staal, de l'université d'Utrecht. Le phénomène a été repéré il y a deux ans sur des images satellite du luxuriant bassin du Congo : certains mois, plus de 80% de l'humidité atmosphérique provient directement de la végétation. On le sait déjà : les feuilles des arbres transpirent l'eau captée par les racines. Or, dans une vaste jungle, les quantités de vapeur deviennent vite ahurissantes : « Cela génère des masses d'air chaud et humide qui provoquent les rains et pluies dans la forêt », explique l'amielle Fisi, du Laboratoire de météorologie dynamique. Mais cela va plus loin qu'un simple recyclage : « Nous avons découvert que ce phénomène crée une sorte

d'appel d'air, qui apporte l'humidité océanique et déclenche la saison des pluies. » Un mécanisme, étonnamment détecté en Amazonie, où la végétation provoque à elle seule une saison humide avec 2 ou 3 mois d'avance. « Sans la forêt, il n'y aurait pas assez de précipitations dans cette région pour entretenir cette forêt précisément », résume la chercheuse. Autrement dit, sans la jungle, il y aurait tout simplement 70% de pluie en moins en Amazonie. Magnifique ! Sauf que cette super-force de la nature peut se transformer en super-faiblesse : « La déforestation réduit l'humidification de l'air, produisant l'assèchement des pans de forêt voisins, qui deviennent plus vulnérables aux incendies. L'écosystème risque alors de basculer », avertit Arie Staal. Un super-pouvoir fragile. **V.N.**

SHUTTERSTOCK - DR



CLASH
Le pouvoir de déflagration

Mesdames et messieurs, voici la « crevette-pistolet », *Alpheus dentipes*, de son nom savant, est pourvue d'une pince énorme dont les claquements ultra-rapides – moins de 0,5 milliseconde – provoquent de violents courants de quelque 100 km/h, suivis d'une onde de choc susceptible d'assommer prédateurs ou proies, une dépression qui s'accompagne d'un son monstrueux de plus de 220 décibels à une température de 4500°C. Bang ! « C'est vraiment une arme biologique redoutable », admire Alexandra Kingston, de l'université de Tulsa. Parvenir à un tel super-pouvoir hydrodynamique peut sembler improbable ; même un auteur de BD n'aurait pas osé. « Nos études montrent que c'est le fruit de 100 millions d'années d'évolution, au niveau du joint de fermeture de la pince et de la configuration musculaire », détaille Rich Palmer, biologiste à l'université d'Alberta. Et voilà le résultat... **V.N.**

MONSTROPLANTE **Le pouvoir de super-prédation**

Depuis juin 2022, une nouvelle espèce est venue grossir les rangs des plantes tropicales carnivores. Son nom : *Nepenthes pudica*. Sa particularité : attaquer ses proies sous terre, sans qu'aucune partie de son anatomie ne soit visible en surface... d'où le « pudica » dont les botanistes l'ont affublée. Un *modus operandi* encore jamais observé chez les *Nepenthes*, habituellement dotées de longs tubes aériens en forme d'urnes, dans lesquels les insectes glissent et se noient, permettant à la plante de se nourrir. « Quand nous sommes tombés sur une première souche en 2012, au nord de la région du Kalimantan, dans la forêt de Bornéo, ce fut une véritable surprise ! », raconte Martin Dancak, chercheur de l'université Palacký d'Olomouc, en République tchèque.

Un jour, sorti faire des photos, un membre de l'équipe, Lubos Majesky, arracha un peu de mousse et se retrouva nez à nez avec : une poche rouge ressemblant aux pièges qu'arborescent certaines plantes carnivores. L'équipe a alors creusé et découvert plusieurs autres poches mesurant jusqu'à 1 cm de long et 0,5 cm de large, pleines de coléoptères, de fourmis et autres vers de terre... « Quelques plantes carnivores à action souterraine, comme *Genlisea Benth. & Hook*, avaient déjà été repérées », raconte Martin Dancak, mais leurs pièges sont tel en ent petits qu'elles se contentent de proies microscopiques d'un millimètre de longueur au maximum. La particularité de *Nepenthes pudica*, c'est la taille de ses urnes, profondes, épaisses et robustes, qui lui permettent d'attraper des insectes

DR. BETTY WAGES - SHUTTERSTOCK - ILLUSTRATION ZIRAFEN



bien plus gros, de plusieurs centimètres de long. Du jamais-vu. » Impossible d'imaginer qu'il existait une plante carnivore avec des urnes souterraines de cette taille. « Depuis, nous en avons trouvé plusieurs autres souches sur cinq sites de la région,

17 C'est le nombre de souches de *Nepenthes pudica* identifiées à ce jour dans le monde. Et toutes à la née!

à des altitudes de 1100 à 1300 m », se réjouit le chercheur, qui vient de révéler l'existence de la plante dans des régions auparavant découvertes au bout d'un long processus de vérification, retardé par la pandémie. Selon lui, ce super-pouvoir de prédation s'expliquait par l'aridité des régions dans lesquelles vivent ces monstroplantes. C'est en effet dans le sol plus humide, que leur nourriture se régénère... **M...**



L'ombre

Le pouvoir d'invisibilité

Un pouvoir passé inaperçu jusqu'en 2008... Et pour cause. C'est au cœur d'une forêt pluviale tempérée du sud du Chili que le botaniste Ernesto Gianoli a découvert, stupéfait, le pouvoir de mimétisme unique de la vigne *Boquila trifoliolata*: « *Cerueines folii*, c'est-à-dire... semblent pousser à partir de tiges beaucoup plus fines que d'autres. Puis j'ai compris que ces tiges appartenaient en réalité à une vigne hôte voisine et que les feuilles des deux espèces se ressemblaient de façon troublante ».

À première vue, rien de vraiment extraordinaire. de nombreuses espèces de vignes font preuve de mimétisme, un moyen efficace pour elles d'éviter que leurs prédateurs ne mangent leurs feuilles. Sauf que jusqu'ici, ce super pouvoir d'invisibilité se cantonnait à l'imitation d'une seule plante.

Or, *Boquila trifoliolata*, elle, est capable de singer n'importe quelle espèce à laquelle elle s'accroche ! Y compris des plantes exotiques introduites il y a seulement quelques décennies. Et cela avec une virtuosité surprenante : taille, forme, couleur, angle de la feuille, longueur du pétiole... Elle parvient même à imiter les petites épines foliaires. Plus fort encore : un seul individu peut imiter simultanément deux espèces différentes de végétaux qui pousseraient à proximité. « J'ai trouvé au moins deux cas de ces doubles mimétismes » annonce Ernesto Gianoli. Et pour couronner le tout, elle peut même le faire sans être en contact direct avec son modèle. « C'est incroyable. À l'époque, j'ai immédiatement senti que cette découverte aurait un impact sur la communauté scientifique. »

Le chercheur ne s'est pas trompé car depuis, nombre de biologistes tentent d'élucider cet

incroyable pouvoir d'invisibilité. À commencer par Ernesto Gianoli lui-même, qui, en 2021, a suggéré que le microbiote pouvait jouer un rôle dans ce mécanisme : « Lorsqu'elles sont en interaction les feuilles des deux plantes voient leurs communautés bactériennes se chevaucher », soutient le biologiste, qui explore en parallèle d'autres pistes capables de modifier l'expression des gènes de la vigne, à l'image de composés volatils ou de transferts de gènes horizontaux.

Sauf que fin 2022, ce mimétisme a été observé entre la vigne et... des plantes en plastique ! Dépourvues donc de cellules, molécules, gènes ou microbiote. Ouvrant la voie à une hypothèse que personne n'osait

encore formuler : et si *B. trifoliolata* était capable de « voir » les végétaux qu'elle escalade ? « Il n'existe pour l'instant aucune preuve que les plantes aient une quelconque capacité de vision, tempère Ernesto Gianoli. Et même si nous acceptons ce principe, cela ne dit rien sur le mécanisme... »

« Certains animaux simples, comme les seiches et les céphalopodes, disposent d'une vision dite cutanée, rétorque le biologiste Felipe Yamashita, à l'université de Bonn. Même les cyanobactéries bénéficieraient d'une vision rudimentaire. Alors pourquoi pas des végétaux ? » Une option que le chercheur est bien décidé à tester sur les 100 vignes qu'il cultive en laboratoire. À suivre... A.P.

20 C'est le nombre d'espèces recensées que *Boquila trifoliolata* est capable d'imiter



C'est incroyable. J'ai tout de suite senti que cette découverte aurait un impact

ERNESTO GIANOLI, BOTANISTE



Flash

Le pouvoir d'ultra-mobilité

Courir sur l'eau sans couler à pic... C'est le petit miracle réalisé quotidiennement par *Basiliscus plumifrons*, le lézard peuplant les forêts d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. Miracle, car il défie ainsi les lois de la gravité, exploite toute ses dents de tout petits insectes, comme les punaises d'eau ou le gecko pygmée du Brésil, sont censés pouvoir relever, grâce à leur poids plus léger, et s'élanche droit devant, sans s'écarter. Ce n'est pas pour rien que les scientifiques l'ont baptisé « lézard Jésus-Christ ». Une thèse menée en 2012 par Thomas Stroud, de l'université d'Arizona, du Nord, vient de lever le voile sur ce pouvoir d'adaptation : l'animal adapte avec virtuosité la fréquence de sa foulée en fonction du courant. Et il sert bien que la vitesse à laquelle il se jette sur l'eau soit également déterminante : elle ne doit être ni trop rapide ni trop lente. « J'ai déjà vu filer ces animaux depuis le bord d'une rivière, sur 4 ou 5 mètres de distance, ils font ça pour échapper à des prédateurs terriens, comme les serpents », précise Anthony Herrel, chercheur au CNRS, qui les a étudiés de près. Ce sont systématiquement des juvéniles qui exhibent cette faculté. Le fait, les adultes peuvent peser jusqu'à 100 fois plus lourd que les jeunes, qui n'affichent que 2 grammes sur la balance. Ce super-

pouvoir s'appuie en outre sur la présence de petites franges sur chaque doigt de pied arrière, qui augmentent la surface de contact, et donc la portance. « Au cours des dernières décennies, toutes ces adaptations morphologiques et physiologiques ont bien été comprises », précise Juan Camilo Zuluaga, biologiste à l'université de Caldas, en Colombie. Les chercheurs se demandent toutefois encore s'ils ont bien identifié toutes les espèces dotées de ce don hors normes. « Des observations dans la forêt tropicale ont montré que des petits Basiliscus d'une autre espèce que les plumifrons dorment eux aussi près de l'eau pour pouvoir s'échapper facilement en glissant à la surface », avance le chercheur colombien. « Une annonce a aussi été faite il y a quelques mois au cours d'un congrès, révélant que des petits lézards anoles d'Amérique du Nord filaient sur l'eau de cette manière », abonde Anthony Herrel. Les chercheurs n'imaginent pas en rester là. Et espèrent bien trouver d'autres spécimens aussi doués, sachant que ce saurien a conquis la planète. **M.V.**

1,3 C'est, en mètre par seconde, la vitesse à laquelle le lézard court sur l'eau.

« Des observations dans la forêt tropicale ont montré que des petits Basiliscus d'une autre espèce que les plumifrons dorment eux aussi près de l'eau pour pouvoir s'échapper facilement en glissant à la surface », avance le chercheur colombien. « Une annonce a aussi été faite il y a quelques mois au cours d'un congrès, révélant que des petits lézards anoles d'Amérique du Nord filaient sur l'eau de cette manière », abonde Anthony Herrel. Les chercheurs n'imaginent pas en rester là. Et espèrent bien trouver d'autres spécimens aussi doués, sachant que ce saurien a conquis la planète. **M.V.**

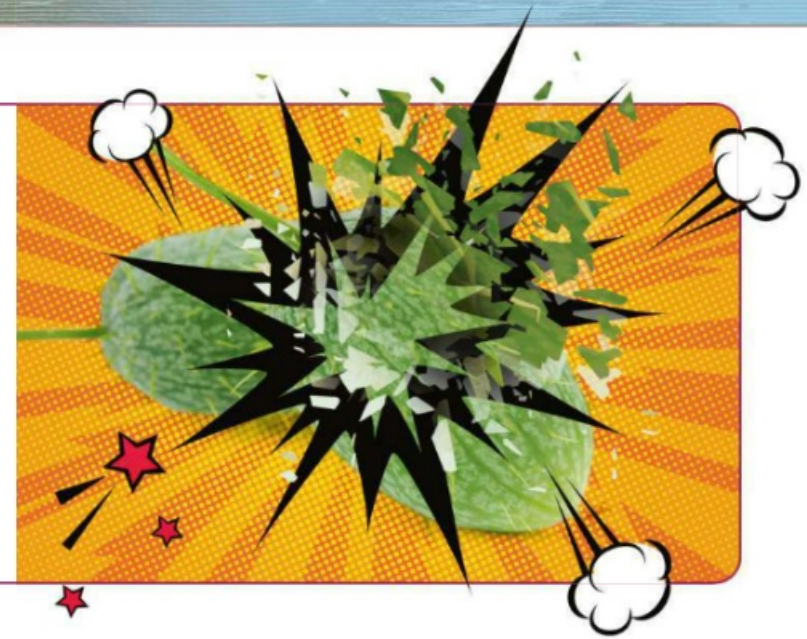
DÉTONATUS

Le pouvoir de giga-explosion

Frôlez-le de trop près, et il va exploser à la figure ! Ce petit concombrelle est une bombe. Plus précisément une bombe à eau dont il se gargarise à mesure qu'il mûrit. Une fois gonflée à bloc, les minces fibres situées à son sommet sont tendues comme un arc, jusqu'à se décrocher de la plante au moindre contact. En 3 millisecondes seulement, il relâche sa pression interne, et un jet jaillit du petit trou laissé béant par le pédoncule

déchiré. Il atteindra 16 mètres/seconde, la vitesse d'un cheval au galop ! « D'anciennes manipulations ont permis de parvenir à ces résultats dans les années 1930 à 1960, s'amuse Yoël Forterre, physicien spécialiste du mouvement des plantes à Aix-Marseille Université. Ce sont des valeurs qui tutoient les limites des lois de la physique pour une structure de cette taille. » Et tout ça dans le but de favoriser sa dispersion : *Echballium elaterium* propulse en effet ses graines jusqu'à 12 mètres de distance. « Et comme l'éjection se fait selon un angle de 45 à 50 degrés, un seul fruit pourra couvrir une surface de 35 m² ! » Ce qui lui vaut d'être considéré comme un nuisible dans les cultures intensives d'oliviers et d'amandiers. Obligeant les agronomes à étudier des méthodes de détection par avion, pour le repérer et l'éradiquer. À grands pouvoirs, grands moyens. **F.G.**

NATURE PICTURE LIBRARY / ALAMY STOCK PHOTO - SHUTTERSTOCK / HETI INK'S



Ce concombre tutoie les limites des lois de la physique pour une structure de cette taille

YOËL FORTERRE, PHYSICIEU

SURVIVOR

**Le pouvoir
d'immortalité**

« Un chercheur belge était tellement fasciné par cette plante qu'il est venu jusqu'ici s'agenouiller devant elle et l'embrasser », raconte Eugene Marais, le directeur du Centre de recherche du Gobabeb, en Namibie. Cette plante, c'est *Welwitschia mirabilis*. Une curieuse créature végétale qui survit en plein désert côtier de Namibie et d'Angola, un enfer où aucune autre plante ne perdure. « En pleine journée, il y fait chaud à crier », atteste Andrew Leitch, de l'université Queen Mary de Londres, qui a lui aussi fait le déplacement, avec femme et enfants, pour saluer « la plus fantastique des plantes ». De prime abord, avec son allure de poule végétal desséché agonisant sur le sable, la *Welwitschia* ne semble pas si incroyable. « Ces sortes de tentacules sont en fait des lambeaux de ses deux seules feuilles qui, au fil du temps, sont déchiquetées par les lames de sable », rectifie le botaniste. « Imaginez, c'est la seule plante au monde dont les feuilles ne meurent jamais », s'exclame le généticien François Parcy, à l'université Grenoble Alpes.

De fait, « chaque année, ses feuilles continuent de s'allonger, parfois jusqu'à 10-20 cm, si les conditions sont bonnes, note Andrew Leitch. Y compris sur les spécimens les plus âgés ». *Welwitschia* pourrait même avoir pulvérisé le record de la plus vieille plante du monde, détenu par un vénérable pin frisant les 5000 ans. « De rares datations au carbone 14 ont attesté un âge supérieur à 1500 ans pour certains plants, mais quelques individus pourraient avoir plus de 10000 ans ! », soutient Eugene Marais. Cette infatigable vigueur s'expliquerait par le fait « qu'à l'intérieur des cellules situées à la base des feuilles, les gènes qui stoppent leur pousse chez les autres plantes, ne s'expriment jamais », explique Andrew Leitch, qui en a établi la preuve en 2021. Peut-être le résultat d'une adaptation ancienne à ses redoutables conditions de survie : « Ses longues feuilles lui servent vraisemblablement à collecter le peu d'humidité qui émane parfois de l'océan le matin », avance François Parcy. Alimentant ainsi son inextinguible soif de vivre. **• B.V.**

SENTINEL

**Le pouvoir
d'hyper-olfaction**

Les résultats éditants s'enchaînent depuis quelques années : non qu'en reniflant l'urine, la sueur ou l'haleine d'un humain, mais des chiens sont capables d'identifier qui souffre de Parkinson. Ou



cancer, du diabète, de la malaria ou du Covid-19. Clara Wilson, de l'université Queen's, à Belfast, est impressionnée :

« Ils semblent détecter des composés organiques volatiles émis par l'organisme malade, parfois à des niveaux infimes d'une molécule parmi mille milliards. » Il faut

dire que nos compagnons à truffe possèdent 220 millions de récepteurs olfactifs, contre 6 millions pour nous. « Et ils peuvent élargir leurs narines pour capter plus d'odeurs. » Un super-sens très utile pour chasser ; et désormais pour la médecine. **V.N.**



Le pouvoir de régénération

« A-t-il rajeuni ou est ce simplement qu'il ne vieillit plus ? Mais d'ailleurs, est-ce encore le même être ? » Biologiste à l'Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer, Stefano Tiozzo le reconnaît : « On ne peut s'empêcher de se poser des questions philosophiques face au pouvoir de régénération des scudies. » Et à ce trouble jeu, *Botryllus schlosseri*, son espèce favorite, est assurément la plus talentueuse. « Ses capacités dépassent de très loin celles d'autres animaux dont une partie limitée du corps, une patte ou une queue, peut repousser », insiste-t-il. Cette minuscule créature des mers d'à peine quelques millimètres de haut, que l'on trouve au :

chée à la coque des navires ou ancrée sur les fonds rocheux fait en effet partie du club extrêmement restreint des êtres qui se riment de la mort : « Même si les crabes ou les poissons qui s'en nourrissent n'en laissent que quelques fragments microscopiques, il suffit de dix jours pour que son corps complet, avec son système nerveux, ses veines, sa peau et surtout son

siphon, essentiel pour se nourrir, réapparaissent », détaille le chercheur. Son laboratoire, l'un des rares au monde à tenter de décrypter la manière dont ces êtres parviennent à renaître à l'identique, vient de publier en 2022 une avancée notable : « Nous avons réussi à suivre à l'échelle cellulaire les toutes premières étapes de la régénération complète du corps », explique Stefano Tiozzo. Fait surprenant, qui s'inscrit en faux contre l'hypothèse prévalant jusqu'ici, sa renaissance ne vient pas de cellules souches circulant dans ce qui reste de vaisseaux sanguins, mais de fragments de tissus, de parfois quelques dizaines de cellules seulement, qui retrouvent seules leur chemin vers les vestiges d'afflux sanguin. En atteignant les veines, elles fusionnent avec la paroi sanguine, provoquant la formation de « vésicules », des sortes de bourgeons, à l'intérieur desquelles se poursuit la lente et minutieuse réparation. La présence de ces cellules bienfaitrices, dont la nature exacte reste à découvrir, semble justement distinguer *Botryllus schlosseri* d'une grande partie de ses espèces cousines : « Nous espérons que les analyses comparées nous permettront d'y voir plus clair », glisse le chercheur. Pour l'heure, on ne peut qu'admirer cette éternelle résurrection. **J.-B.V.**

SHUTTERSTOCK - BETTY HANES - ILLUSTRATION YORRASON

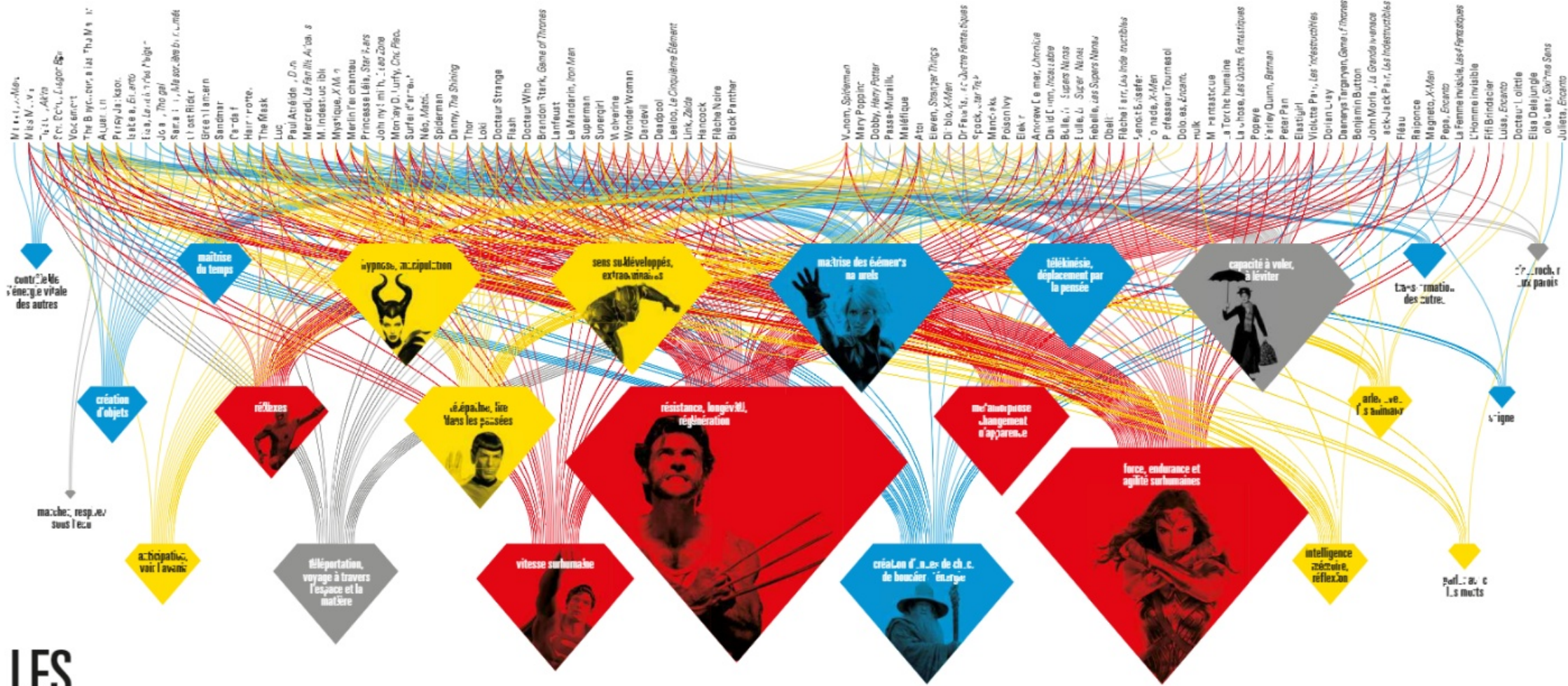


ON N'EST JAMAIS TROP PETIT POUR FAIRE LA DIFFÉRENCE



Greta Thunberg (2019)

SHUTTERSTOCK



LES SUPER-POUVOIRS

C'EST QUOI? La réponse en 100 personnages de fiction

PAR LÉA DESRAYAUD

10 nombre de personnages dotés de ce super-pouvoir

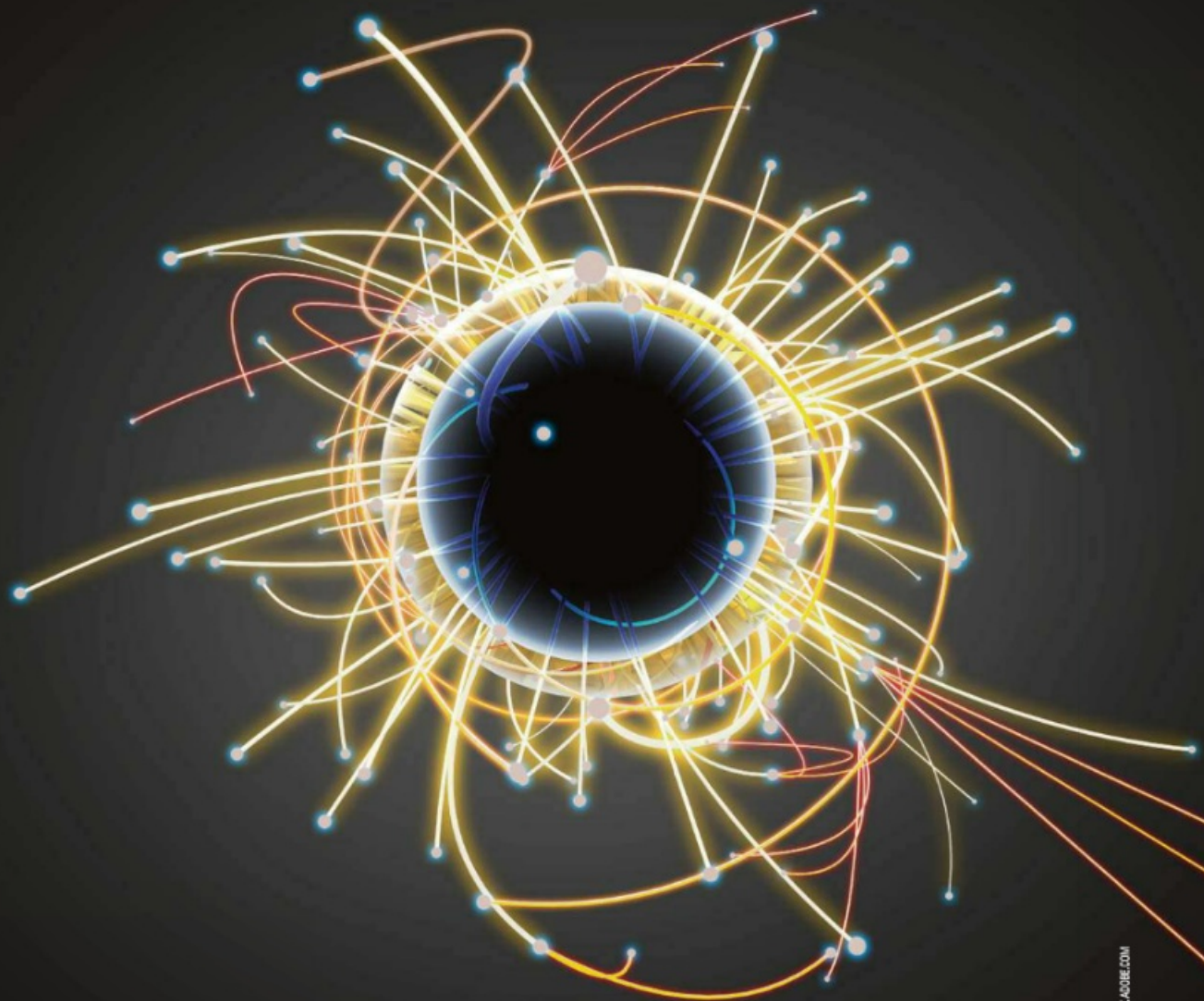
- capacités physiques surhumaines
- capacités de mouvements exceptionnelles
- capacités mentales extraordinaires
- super-pouvoirs de contrôle et de transformation

PLUS D'UN TIERS LES ONT ACQUIS — Souvent par accident : exposés à des poisons comme Lu'ry, les substances radioactives des expériences ou comme Deadpool...

12 EN ONT PLUS DE 10 DIFFÉRENTS — Comme 5 en moyenne, et 2 pour les personnages terminés, particulièrement doués pour voler, léviter, songer et communiquer avec les animaux.

1 SUR 5 LES UTILISE POUR FAIRE LE MAL — 22 personnages sont des méchants, souvent en opposition avec des héros. Venom contre Spiderman, Loki contre Thor, Voldemort contre Harry Potter...

10 % NE PEUVENT PAS LES CONTRÔLER — Et en souffrent, sont exclus ou s'isolent. D'autres peuvent être réduits à l'impuissance, comme Superman, très sensible à la présence de kryptonite.



LES SUPER POUVOIRS DU BOSON

Sans lui, ni galaxies, ni étoiles, ni vie. Rien. Le boson de Higgs est la particule élémentaire qui donne sa substance à l'Univers. Sauf que plus les physiciens l'étudient, plus son pouvoir leur échappe. Il dépasse même tout ce qu'ils imaginaient ..

PAR SIMON DEVOS

Mais pourquoi est-il si fort?

GENEVA/WWW.STOCK.AGENCE.COM

IL ÉQUILIBRE TOUT L'UNIVERS

On savait déjà qu'il était fort, très fort. Le boson de Higgs, c'est la pièce centrale du modèle standard de la physique des particules échafaudé il y a plus d'un demi-siècle pour décrire toute la matière de notre Univers. C'est son cœur battant, son chef d'orchestre, celui qui a donné le la de la grande symphonie cosmique au cours de laquelle se sont assemblés les particules, atomes, molécules, étoiles et galaxies. Car le champ de Higgs, sorte d'océan baignant tout l'espace, a le pouvoir de conférer une masse à toutes les particules.

Inutile de préciser que la confirmation, en 2012 au LHC, le Large Hadron Collider du Cern, à Genève, de l'existence de celle qu'on surnomme « la particule de Dieu » a soulagé les physiciens. Ce fut une consécration : la

preuve que l'on avait bien compris les lois de l'Univers, percé les secrets de la matière... « Enfin, nous levions le voile sur l'origine de la masse de toutes les particules de l'Univers », se souvient Élisabeth Petit, chercheuse CNRS au Centre de physique des particules de Marseille. Mais l'événement a aussi montré que le boson de Higgs était encore plus fort que ce qu'ils imaginaient.

DIABOLIQUE !

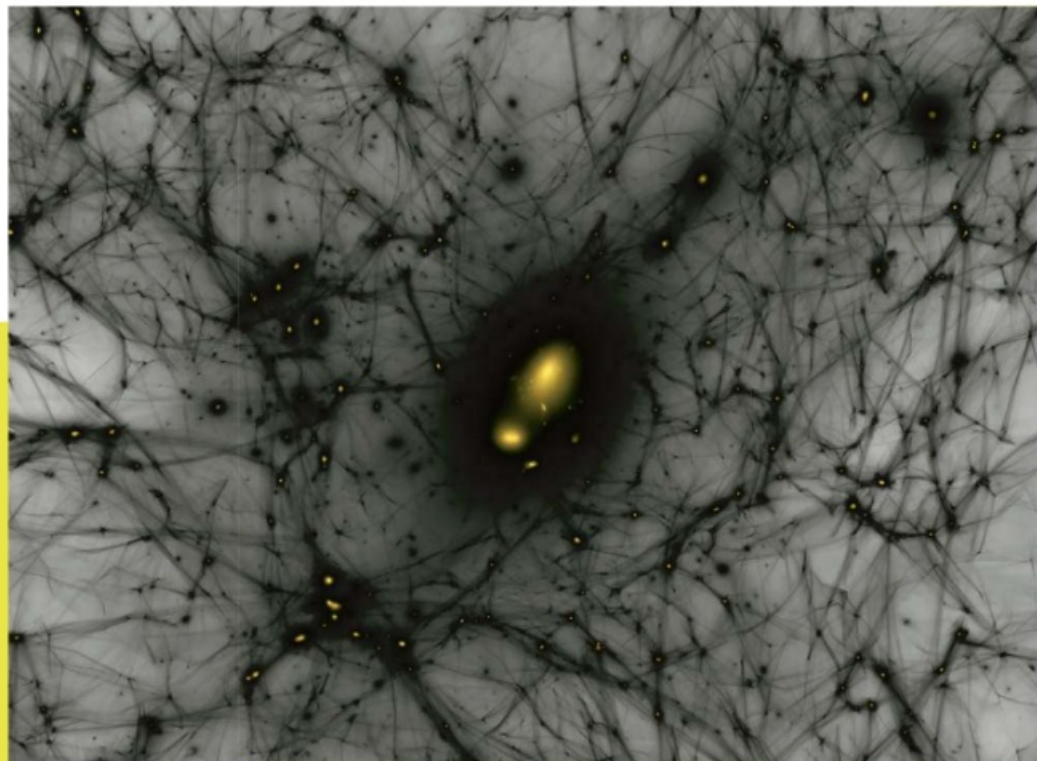
Très vite, la masse de cette particule pas comme les autres a semblé bizarre. « La théorie nous avait préparés à une masse gigantesque de l'ordre de 10^{18} gigaelectronvolts (GeV) », signale Patrick Peter, de l'Institut d'astrophysique de Paris. D'après la théorie quantique des champs, qui sous-tend le modèle standard, la masse d'une particule est en effet la somme de deux termes qui s'opposent : sa masse nue, à laquelle nous n'avons pas directement accès, et un terme de corrections quantiques, issu de l'interaction avec toutes les autres particules virtuelles susceptibles d'apparaître spontanément dans le vide, que

S'IL AVAIT ÉTÉ PLUS LÉGER...

... l'Univers n'aurait pas existé. En effet, s'il avait été un peu moins lourd, ou si le rapport de sa masse avec celui du quark top, la particule la plus lourde du modèle standard, aurait été complètement déséquilibré. Le vide tel que nous le connaissons les physiciens, peuplé de champs de particules apparaissant ou disparaissant de manière fugace, aurait alors été complètement instable. Et se serait instantanément effondré sur lui-même, emportant dans sa chute inexorable toute la matière.

la théorie permet de calculer. En l'occurrence, la valeur de ce second terme est très élevée. Or, en 2012, les expériences du Cern n'affichent rien de tel : la masse globale du Higgs, masse nue incluse, est beaucoup plus faible. « Elle est de seulement 125 GeV, soit 10 ordres de grandeur en dessous de l'estimation ! », s'étonne encore le chercheur. Bizarre : tout semble se passer comme si l'ampleur gigantesque de la masse nue du Higgs avait été ajustée pour compenser l'ampleur gigantesque des corrections quantiques, les deux termes accouchant d'une masse globale cent mille milliards de fois plus petite.

Cette insoutenable légèreté du Higgs a déjà de quoi titiller les chercheurs : aucune loi de la physique ne justifie un tel numéro d'équilibriste. Mais il y a encore plus étrange. Les physiciens le réalisent dans la foulée, en comparant



ROBERTO MALDENAS/AGENCE NASA/ACCELERATOR LAB, ANDRÉ

sa masse avec celle d'une autre particule élémentaire : le quark top, la plus lourde du modèle standard. « Le rapport de masse que l'on observe entre le boson de Higgs et le quark top prouve le vide dans un état extrêmement stable. Autrement, qu'on quitte de cet état stable », résume Yves Sirois, directeur de recherche à l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules et à l'Institut polytechnique de Paris. Car en théorie quantique des champs, le vide n'est pas si vide : il fluctue au gré des apparitions et disparitions spontanées de particules – d'où les corrections quantiques sur la masse. Or, comme le souligne Yves Sirois, « c'est le champ de Higgs qui donne sa structure au vide de notre Univers ». Les calculs montrent que si la masse du Higgs s'avérait légèrement plus faible en regard de celle du quark top, le vide serait instable, les

S'IL AVAIT ÉTÉ PLUS LÉGER...

... l'Univers serait plus simple. Avec quelques gigaelectronvolts de plus au lieu de sept, la masse de Higgs aurait rivales avec la masse du quark top, la plus lourde particule que nous connaissons. Et cette fois le vide quantique serait devenu parfaitement stable. Les chercheurs auraient ainsi une idée plus précise de la voie à suivre pour unifier les quatre forces fondamentales, la gravitation et les forces électromagnétique faible et forte.

fluctuations ne pourraient pas exister, le champ de Higgs non plus. Il n'aurait aucun moyen de faire acquiescer de la masse aux particules ni de former quoi que ce soit : pas de galaxie, pas d'étoile, pas de vie, rien. « Cette instabilité du vide entraînerait avec elle l'Univers tout entier, qui s'effondrerait irrémédiablement sur lui-même », prophétise Yves Sirois.

VEUT-IL S'ÉNERGIEUX BOURBIER

À l'inverse, si la masse du Higgs était un soupçon plus élevée, le vide se situerait dans un état de stabilité parfaite. « La question de sa légèreté subsisterait, mais nous aurions des indices plus clairs de la direction dans laquelle se situe la nouvelle physique : dans une théorie de la gravitation quantique », poursuit le physicien. « Cela →

ne représente pas un problème en soi, rassure Adam Falkowski, de l'université Paris Saclay. *« L'Univers deviendrait bien plus instable. »*

« Mais non, dans notre univers le vide n'est ni stable ni instable. Il est métastable. C'est un vide en apparence stable, mais une petite perturbation suffit à faire basculer vers l'instabilité. Une situation extrêmement improbable. *« C'est comme si l'Univers se trouvait sur le bord d'une falaise, prêt à dégringoler à tout instant. »*

« La découverte du boson de Higgs rend l'existence de notre Univers invraisemblable », abonde Adam Falkowski. À croire qu'il a été parfaitement ajusté pour laisser à notre monde sa part de mystère. Comme si l'Univers avait choisi la masse de cette particule dans l'intention de se rendre indéchiffrable... *« Ce réglage très précis laisse presque penser que la nature est malicieuse, que cette métastabilité est délibérée »,* ose Yves Sirois. La particule de Dieu aurait-elle un côté diabolique ?

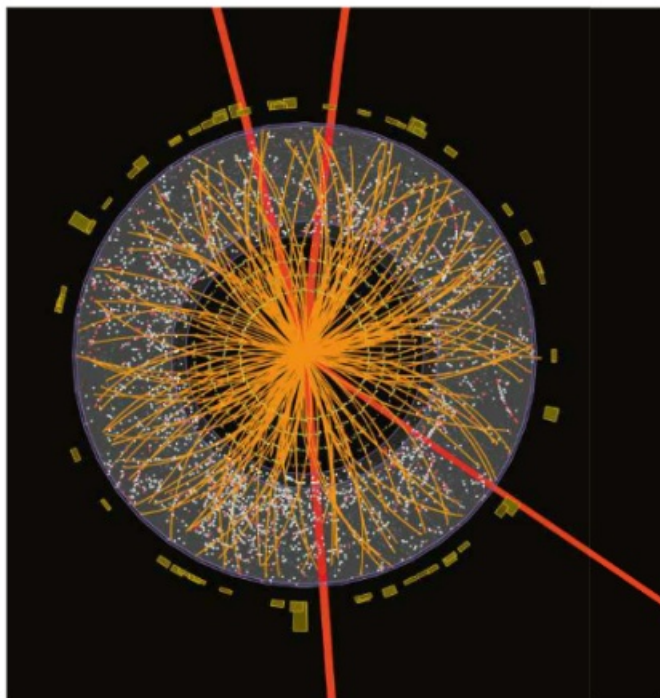
Ces coïncidences se situent en fait dans la droite ligne d'autres bizarreries de certains paramètres de notre Univers, regroupés sous ce que les physiciens appellent les « ajustements fins ». Car il existe d'autres grandeurs physiques, qui semblent avoir été soigneusement réglées. Comme pour le Higgs, une infime variation de leur valeur suffirait à transformer l'harmonie cosmique en cacophonie, voire en silence absolu.

SEULEMENT 4 RÉPONSES POSSIBLES

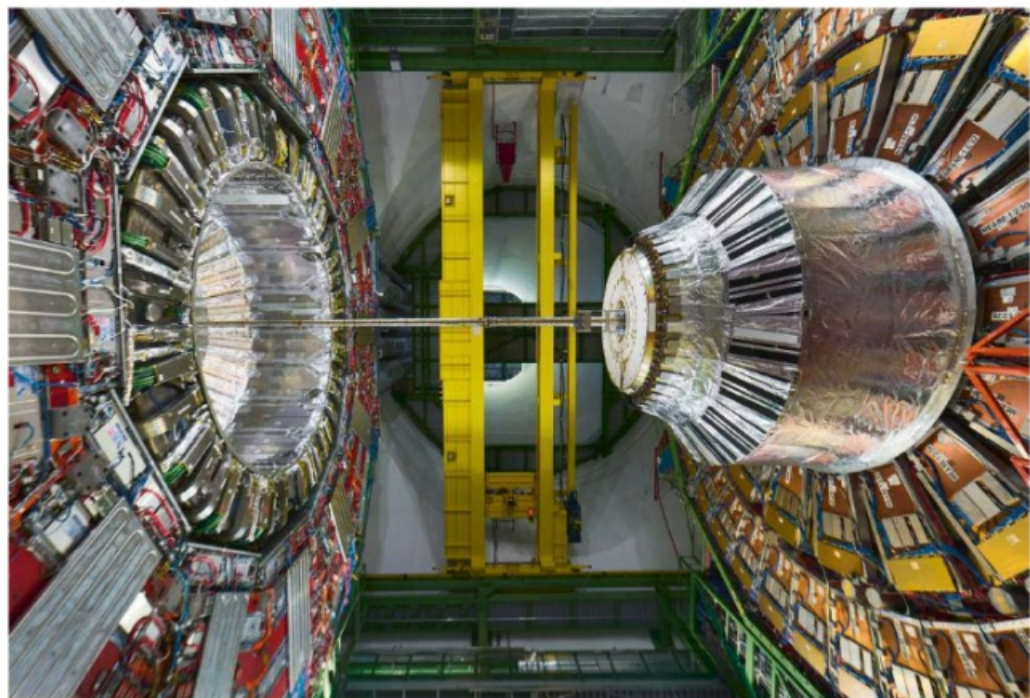
« La réflexion sur les raisons pour lesquelles les constantes de la physique possèdent les valeurs que l'on observe remonte à près d'un siècle, retrace Fred Adams, de l'université du Michigan. Elle a commencé quand on a compris qu'il y avait une phénoménale différence d'intensité entre l'interaction gravitationnelle, et les trois autres interactions, forte, faible et électromagnétique. »

LA DÉCOUVERTE DU BOSON DE HIGGS REND NOTRE UNIVERS INVRAISEMBLABLE

Adam Falkowski, physicien, université Paris Saclay



Cela a dérouté les spécialistes de l'époque: la gravitation, qui détermine la structure de notre Univers à grande échelle, est plus de mille milliards de milliards de fois plus faible que les autres, qui commandent la cohésion des particules, les phénomènes lumineux... Pourquoi ce gouffre ? Le problème a conduit des physiciens à imaginer ce que deviendrait l'Univers si l'on faisait varier légèrement l'intensité de la gravitation, ou d'une autre force. *« La constante de structure fine, qui régit l'interaction électromagnétique et joue un rôle prépondérant dans la structuration de la matière, en est l'exemple le plus parlant, poursuit Fred Adams. Paul Dirac et Max Born, deux des pères de la mécanique quantique, ont conjecturé que si cette constante sans dimension possédait une valeur différente de celle observée, toute la matière s'effondrerait instantanément, et l'Univers ne pourrait pas exister. »* Là non plus, aucune théorie n'explique l'origine de cet ajustement parfait, qui permet presque miraculeusement à l'Univers d'exister.



LA TRAQUE

C'était l'une des grandes priorités du grand collisionneur du Cern (photo) lors de sa mise en fonction, en 2008 : découvrir le boson de Higgs, dernière pièce manquante du modèle standard de la physique des particules. Aujourd'hui, certains théoriciens estiment qu'il pourrait bien ne pas être tout seul, et il faut faire au contraire partie d'une famille qui comprendrait d'autres particules similaires de masses différentes. Des modèles prévoient même que de telles particules pourraient être à la portée du LHC... qui entame prochainement en ce moment ses mesures à haute luminosité. Les prochaines années seront décisives.

Dans les décennies qui ont suivi ces exemples de réglages fins ont défini les domaines de la physique des particules et de la cosmologie. Masse du neutron, rapport au proton, intensité de l'interaction forte, densité d'énergie sombre responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers... À chaque fois, le constat des chercheurs est le même : *« Si la valeur de ces paramètres avait été légèrement différente de celle mesurée, l'Univers aurait évolué de manière radicalement autre »* soutient le cosmologiste Steffen Gielen, de l'université de Sheffield. Avec, dans les cas les plus extrêmes, un anéantissement pur et simple.

« Nous ne travaillons plus seulement sur ces questions de manière théorique, mais en essayant de simuler des univers naissant sous différentes conditions, dévoile David Sloan, de l'université de Lancaster. Ces modélisations nous permettent de mieux cibler les constantes qui pourraient être ajustées différemment, et de nous informer sur la marge dont elles disposent avant de voir »

l'Univers s'effondrer. Mais le constat reste stupéfiant. Pour obtenir un Univers stable, riche, structuré, où la vie telle qu'on la connaît a la possibilité de se développer, certains estiment qu'il faut régler rigoureusement une douzaine de paramètres minimum, tout écart trop important entraînant de graves problèmes de viabilité. *L'ajustement constaté sur la masse du Higgs s'inscrirait dans ce cadre* précise Yves Sirois. *Si elle était plus faible, l'Univers s'effondrerait probablement. Mais pour le Higgs, la moindre d'ajustement va plus loin encore, puisque cette valeur rend l'Univers à la fois viable et réessayablement complexe à appréhender.*

Le problème revient une nouvelle fois sur la table: comment expliquer les super-pouvoirs du Higgs? Comment se tirer de ce vertigineux bourbier des ajustements fins dans lequel le boson nous enfonce? Il n'y a en fait que quatre réponses possibles.

TOUS AZIMUTS

La première réponse, la plus évidente et la plus simple, consiste à interpréter ces multiples ajustements comme l'effet du hasard. L'Univers est ainsi parce qu'il est ainsi. S'il n'y a pas de raisons apparentes expliquant pourquoi ces constantes ont pris ces valeurs, c'est parce que ces raisons n'existent pas. Toutes les constantes de la physique ne semblent d'ailleurs pas faire l'objet d'un réglage fin: il serait par exemple possible de modifier grandement la valeur de l'entropie dans les champs gravitationnels sans incidence forte sur l'évolution de l'Univers ou sur l'émergence de la vie. *D'autres paramètres, comme la constante gravitationnelle, apparaissent réglés, mais assez grossièrement, et l'on pourrait modifier de quelques pourcents leur valeur sans que rien ne bouge*, dramatise David Sloan. Mais la plupart des physiciens jugent que ces fameux réglages sont trop fréquents et trop mystérieux pour n'être qu'un pur effet du hasard. Cette désacralisation élude la question.

La deuxième voie consiste justement à sacraliser le problème. *Selon certains, l'Univers est ainsi dans un dessein précis: permettre l'émergence d'observateurs biologiques doués de conscience, nous en l'occurrence*, décrit Fred Adams. Cela fait intervenir une notion d'intentionnalité dans le choix des constantes

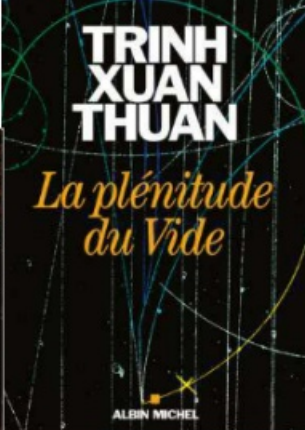
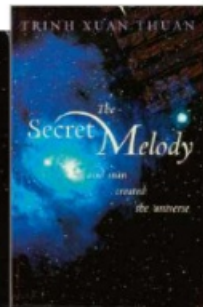
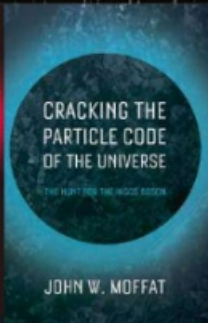
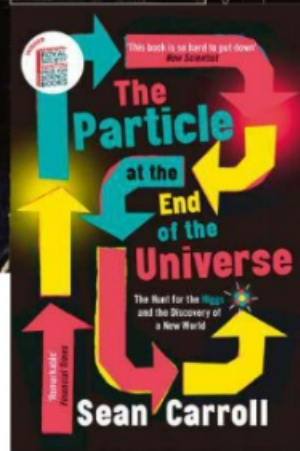
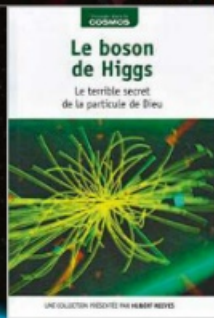
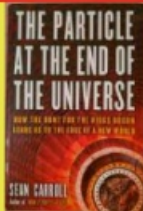
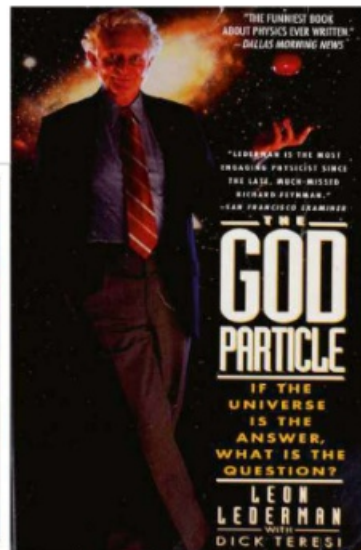
fondamentales de l'Univers. Et conduit à voir dans ces réglages méticuleux la main d'un créateur. Une interprétation dont, comme on l'imagine, beaucoup de chercheurs ont du mal à se satisfaire, vu l'absence d'argument scientifique en sa faveur. *«Ça devient une question de croyance, admet David Sloan. Dans tous les cas, les ajustements fins ont tendance à nous pousser à explorer les frontières de la science.»*

GROSSE LACUNE

Car la troisième voie explorée pour expliquer l'incongruité des réglages de l'Univers s'aventure, elle aussi, à la limite du champ scientifique: il s'agit d'imaginer que notre Univers n'est pas unique, mais qu'il en existe une flopée d'autres, des multivers. Dans chacun de ces hypothétiques univers-bulles toutes les constantes et autres paramètres fondamentaux de la physique pourraient prendre différentes valeurs tous azimuts. *«Il pourrait y avoir une infinité d'univers avec des ajustements très variés, et statistiquement, il en existe au moins un – le nôtre – qui permet l'apparition de la vie»*, résume Adam Falkowski,

UN POUVOIR QUASI DIVIN

Bien avant la découverte du célebrissime boson, une nuée d'ouvrages spéculaient déjà sur son rôle de démiurge dans l'Univers, souvent envisagé comme le chaînon manquant ouvrant la voie vers une nouvelle physique, le boson de Higgs fut même surnommé «la particule de Dieu».



d'imaginer. *«Je suis convaincu que dans de nombreux cas, ce que nous prenons pour un ajustement fin traduit une grosse lacune dans notre compréhension de la physique*, martèle David Sloan. *Si les choses semblent louches, c'est peut-être tout simplement parce que nous ne les avons pas encore bien comprises.* En d'autres termes certaines constantes prendraient ces valeurs précises pour des raisons physiques encore inconnues. Avec sa masse inattendue, le boson essaierait de nous dire quelque chose que nous ne comprenons pas encore...

UN PAN CACHE

C'est la posture adoptée tout récemment par Neil Turok et Latham Boyle, deux physiciens du Perimeter Institute for Theoretical Physics, au Canada, qui avaient en tête d'expliquer plusieurs ajustements a priori fins de la cosmologie: les problèmes de l'homogénéité et de la platitude de l'Univers, ainsi que son expansion relativement lente. →

« Tous ces paramètres semblent avoir l'objet d'un régime fin, en ce sens qu'une perturbation de l'un d'entre eux aurait des conséquences sur l'apparition de la vie ». ajoute Stefan Gleier...

MALIN, SÉRIeux, MYSTÉRIeux, QUASI-MYSTIQUE

Neil Turok et Latham Boyle se sont penchés sur ce problème à travers le prisme de l'entropie, un concept thermodynamique permettant de calculer le nombre de configurations possibles d'un système et, par là, son état le plus probable. En octobre dernier, ils ont repris un raisonnement entamé il y a plusieurs décennies par Stephen Hawking, qui tentait de déterminer l'entropie des trous noirs, et l'ont appliqué à notre Univers primordial « *No s'avons calculé que notre Univers, plat, très homogène, et avec un taux d'expansion faible, est en fait celui qui possède l'entropie maximale, scande Latham Boyle. En gros, l'Univers est ainsi... parce que c'est son état le plus probable, le plus banal.* » Autrement dit, ce qui paraissait être une fantaisie n'est en fait, d'un point de vue thermodynamique, que l'état le plus logique. La découverte mérite certes encore d'être discutée et analysée, mais elle montre que certaines coïncidences rec-

lent peut-être les clés de phénomènes physiques insoupçonnés à l'œuvre dans notre Univers.

L'incroyable ajustement de la masse du boson de Higgs ne serait-il pas, lui aussi, le signe d'un pan caché de la physique des particules? « *Il y a toujours un espoir de trouver au LHC une nouvelle famille de particules, appelées supersymétriques, qui pourraient apporter une réponse à la masse particulière du Higgs* », suggère Patrick Teter. La théorie de la supersymétrie, née vers la fin des années 1960 pour pallier des lacunes du modèle standard, part du principe que ce dernier n'est qu'une approximation à basse énergie d'une théorie plus vaste, qu'il existe d'autres particules, partenaires à très haute énergie de celles que l'on connaît. Et ce serait la

contribution quantique de ces nouvelles particules qui expliquerait la grande légèreté du Higgs. C'est le scénario développé par une collaboration d'instituts de recherche américains, français et coréens en 2021. « *L'idée est de supposer que la masse du boson de Higgs affecte d'autres constantes, ce qui placerait cette particule au cœur du paramétrage de notre Univers*, présente Francesco Riva, de l'université de Genève, qui n'a pas participé à l'étude. *Dans ce cadre, les physiciens ont montré que l'Univers ne pouvait exister que*

pour une poignée de valeurs bien précises de la masse du Higgs. »

Il serait alors plus fort que jamais. Plutôt qu'une série d'ajustements fins déconnectés, tout reposerait en fait sur lui: notre Univers n'aurait été viable que parce que sa masse initiale était la bonne. Cette théorie expliquerait par la même occasion l'ajustement fin de la constante cosmologique qui influence l'accélération de l'expansion de l'Univers, dont la très faible valeur reste une grande source d'étonnement.

“
**SI LES CHOSES
SEMBLENT
LOUCHES, C'EST
QU'ON NE LES A
PAS COMPRIS**

” David Sloan,
physicien, université
de Lancaster

Ces recherches prévoient même l'existence d'un second boson de Higgs, possédant une masse du même ordre que celle mesurée au LHC. Celui-ci représenterait une passerelle qui pourrait nous mener à la découverte empirique de la supersymétrie. « *La survenue de cette nouvelle particule au cours d'une collision serait très rare et donc difficile à observer*, admet Francesco Riva. *Mais au niveau énergétique, elle serait dans les cordes du LHC, et l'espoir de la découvrir existe!* »

Malicieux, mystérieux, quasi-mystique, plus de dix ans après sa découverte, le boson semble plus puissant que jamais.

NOTES

1. N. Arkani-Hamed et al., *Physical Review D* (2021); M. Frankel, *Fundamental Physics* (2022); F. Adams, *Physical Review Letters* (2021); G. Bergshoeff et al., *Journal of High Energy Physics* (2012). Retrouvez toutes nos sources sur epsilononline.com/ sources. Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par *Epsilononline*.



“
**LE CALME EST
UN SUPER-POUVOIR**

” Bruce Lee (probablement apocryphe)



LES SUPER POUVOIRS DE NOS FAIBLESSES

C'est un revigorant renversement de paradigme. Dépression, paresse, inattention, dyslexie... Ces faiblesses seraient de vrais dons sélectionnés par des milliers d'années d'évolution pour nous rendre plus ouverts, plus prudents, plus innovants, et assurer la survie du groupe. Des super-pouvoirs oubliés en quelque sorte

PAR ALEXANDRA PHÉN

ILLUSTRATIONS RÉALISÉES PAR BORIS SÉMEN'AKO

Dépression, obsessions, dyslexie, déficit de l'attention... Nous n'avons pas cessé de vouloir réduire au silence ces troubles considérés au mieux comme des faiblesses, au pire comme de véritables maladies. Il en est même à se demander comment l'évolution a permis que de telles aberrations, souvent héréditaires, perdurent et prolifèrent dans la population. Car ces troubles sont nombreux – certains sont même extrêmement répandus. « Tous les retournons dans les sociétés du monde entier », énonce le philosophe en médecine évolutionniste Adam Hunt. D'où l'hypothèse, a priori provocatrice : et si ces états mentaux qui mettent souvent en marge de la société ceux qui les éprouvent

dissimulaient des avantages cachés, ou du moins négligés ? Et s'ils avaient été soigneusement sélectionnés par l'évolution ? Tel est le credo de la psychiatrie évolutionniste, une discipline qui fait l'objet de recherches éparses depuis des décennies, mais qui commence à prendre de l'ampleur depuis 2016, avec le lancement d'un groupe de recherche au prestigieux Royal College of Psychiatrists du Royaume-Uni.

PENSÉE MAGIQUE

« Personnalité évitante, paranoïaque, obsessionnelle... En dépit de leur connotation négative, tous les troubles de la personnalité ont dû être utiles pour faire encore partie de notre répertoire », soutient le médecin français Dra.oslav Miric. Ces troubles seraient donc présents de longue date et n'auraient pas été conservés par hasard. Avec son collègue Adrian Jaegle, anthropologue de l'Institut de médecine évolutionniste de l'université de Zurich, Adam Hunt s'est essayé à estimer la fréquence de ces troubles dans les tribus de nos ancêtres chasseurs cueilleurs pendant trois millions d'années, jusqu'au néolithique. En considérant des groupes classiques d'environ 165 individus, ils estiment que chaque trouble devait



L'INATTENTION ? UN ATOUT POUR PARTIR À LA CONQUÊTE DU MONDE

« Les enfants atteints d'un TDAH, le trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité, ont de nombreux points forts : ils ont beaucoup d'énergie, ils sont prêts à prendre des risques, ils remarquent tout ce qui se passe », dit la psychiatre Annie Swanepoel. Les qu'aliés qu'ont adhérents ancêtres nomades à tester vigiliants face aux menaces et à tuer, des bris ou du nouvelles surprises de nature. « Les jeunes associés au TDAH sont d'ailleurs plus courants dans les populations nomades », appuie le philosophe Justin Garson. Sau, que la norme, aujourd'hui, est plutôt de rester assis pendant des heures de quoi transcrire les points forts en déficiences, en inadéquations évolutives. Or la prévalence mondiale du TDAH est estimée entre 3 et 5%. Au : États-Unis, jusqu'à 15% des enfants suivent un traitement. Il serait judicieux d'adapter les écoles en exigeant par exemple plus d'exercice physique, martèle Annie Swanepoel. Car lorsqu'ils trouvent leur niche, dans laquelle leurs caractéristiques sont valorisées, ils peuvent exceller. »

LA DÉPRESSION ? UN PRÉCIEUX DISPOSITIF D'ALERTE

Pessimisme, désespoir, léthargie, faible estime de soi et ruminations d'idées noires : difficile au premier abord de percevoir quoi que ce soit de positif dans la déprime. Elle joue pourtant un rôle d'arme fondamentale. À l'image de la douleur physique, l'état dépressif est une alerte face à une situation insatisfaisante. « L'idée sous-jacente est que la dépression a évolué pour indiquer que quelque chose dans sa vie ne fonctionne pas comme il le faudrait et qu'il faut y prêter davantage attention. C'est en quelque sorte une réaction d'essai, et d'ailleurs, note l'esprit à se détacher du plan réaliste. Il s'agit donc d'un premier temps d'essai de compréhension de ce qu'elle essaie de nous dire », estime le philosophe Justin Garson. « Au lieu d'être une maladie, la dépression est le résultat d'un mécanisme conservé par l'évolution qui peut être avantageux dans des situations spécifiques », renchérit le psychiatre Randolph Nesse. La déprime, et l'apathie qui l'accompagne, permet

par exemple d'éviter de gaspiller de l'énergie pour atteindre un mauvais objectif et justifie l'attente qui ouvrira la porte à d'autres stratégies ou d'autres buts. Celle qui escorte le chagrin lié à une séparation douloureuse incite à essayer de prévenir des pertes similaires à l'avenir... Mais, à l'image de l'anxiété, ses signaux s'expriment plus souvent qu'il ne faudrait. « Le progrès dans la prise en charge viendra de l'abandon des tentatives d'attribuer des fonctions spécifiques aux émotions, au profit d'une interrogation sur la situation à laquelle chaque émotion est destinée à faire face », estime Randolph Nesse. « Il est de plus en plus évident que le fait de considérer la dépression comme un "réveil" du cerveau peut améliorer les résultats du traitement et réduire le sentiment de stigmatisation », détaille Justin Garson. Une étude récente confirme d'ailleurs que le fait de présenter la dépression comme quelque chose d'utile soulage instantanément les patients.

LA PARESSE? LE MEILLEUR MOYEN DE GÉRER SES FORCES

Hier, votre détermination à faire un footing était sans faille. Et ce matin, vous voilà scotché au canapé en attendant d'être toutes les excellentes raisons de ne pas en sortir. Une raison de se autoflageller? Au contraire: «*C'est une des grandes stratégies évolutives de l'espèce humaine. Le cerveau n'a pas été créé à dépenser et à l'énergie si ce n'est pas justifié*»

rassure Boris Cheval, neuropsychologue du Centre suisse des sciences affectives, qu'aujourd'hui le fait d'être automatiquement de notre cerveau pour la minimisation de l'effort physique. Ce qui explique le gouffre entre nos intentions d'être physiquement actifs et le passage à l'action. Les processus cérébraux

automatiques prennent le pas sur les processus conscients. Intentions, motivations et nous tirent irrémédiablement vers l'économie d'énergie. Si nous avons la mémoire, c'est la suite de nos ancêtres chasseurs cueilleurs qui nous font porter le poids de leur rythme de vie de l'époque. Une alternance de longues phases de repos qui

permettaient de recharger les batteries. Et de courir, mais intensément moments d'activité nécessitant de dépenser à plein toutes nos capacités comme durant la chasse. Par exemple. Un super pouvoir, peut-être, toutfois se plus aucun effort physique n'est nécessaire pour se nourrir...

toucher au moins 1% de la population, un pourcentage qui aurait même pu monter à près de 7% pour les troubles de l'attention les TDAH et les troubles du spectre autistique. «*Chaque nos ancêtres, chaque humaine a probablement interagis avec au moins un individu atteint d'une de ces pathologies*», note Adam Hunt. Dragoslav Miric pense même que certaines formes précoces de schizophrénie, appelées «schizotypies», caractérisées par la perception de pensées magiques, pourraient être à l'origine du chamanisme, un rôle très prisé dans certaines sociétés traditionnelles.

SYMPTÔMES OU MALADIES ?

Des décennies de recherche n'ont pas permis de dénicher la pathologie sous-jacente à chacun de ces troubles. Organisation cellulaire, réseaux de connexions... Les neurosciences observent bien des différences cérébrales, mais leur origine reste inconnue. La génétique, de son côté, ne cesse de dévoiler des gènes qui provoquent une propension aux troubles mentaux, mais leur origine pathologique reste opaque. «*Dans la plupart des cas, les gènes sont issus de mutations qui ne sont pas récentes. Il faut donc faire appel à l'évolution pour expliquer leur persistance*», estime Adam Hunt.

Ce nouveau regard ne concerne d'ailleurs pas que les pathologies. Tendance à la procrastination, à la timidité... Un nombre de traits de caractère courants qui passent pour des faiblesses pourraient avoir une explication évolutionniste. Certains auraient pour but d'éviter le danger, d'autres d'économiser de l'énergie. «*Nos ancêtres ressentaient ça aussi, et souvent cela les aidait à survivre et à se reproduire. L'approche évolutionniste nous donne une compréhension de notre nature particulièrement valorisante*», se réjouit

Adam Hunt. N'y a-t-il pas en effet quelque chose de rassurant à voir nos faiblesses devenir des forces?

«*En biologie, rien n'a de sens si ce n'est à la lumière de l'évolution*», affirmait dès 1973 le père du néodarwinisme Theodosius Dobzhansky. C'est lui qui a mis la génétique au cœur des processus de sélection naturelle décrits par Darwin. Au cours de l'évolution, les processus de variation aléatoire du génome, de reproduction et de sélection façonnent la forme de nos corps... et de nos esprits. «*Mais contrairement au reste de la médecine, la psychiatrie commence tout juste à voir leur potentiel*», déplore le psychiatre américain Randolph Nesse, pionnier du domaine qui, dès 1984, alertait sur la nécessité de la prise en compte de l'évolution en psychiatrie.

De quoi rebattre les cartes d'une discipline qui s'essouffle. «*En médecine, on distingue les symptômes – comme la douleur et la fièvre – des maladies, comme le cancer et la pneumonie. En psychiatrie, des symptômes tels que l'anxiété et la mauvaise humeur sont qualifiés de maladies s'ils semblent excessifs, sans même chercher à savoir si cette réponse est normale ou vraiment excessive*», appuie Randolph Nesse.

Le cas de la fièvre est emblématique. Au XVIII^e siècle, c'est le chimiste allemand Georg Stahl qui a eu cette brillante idée de la considérer comme une réponse de l'organisme à l'infection, plutôt que comme une maladie. «*Accepter que la fièvre ait une fonction ne signifiait pas que l'on cessait de la traiter. Au contraire, cela a transformé le caractère du traitement. La fièvre n'est plus la chose que l'on essaie d'attaquer, d'étouffer, d'assommer avec des médicaments. Au lieu de cela, vous reconnaissez qu'elle a un rôle à jouer dans le processus de guérison*», renchérit le philosophe américain Justin Garson, spécialiste de psychiatrie



L'OBSSESSION? UN SOUCI DU DÉTAIL PARFOIS VITAL

«*Difficile de se représenter ce que seraient devenus les groupes humains si des personnes obsessionnelles n'avaient pas existé. Tant les bénéfices qui en découlent sont évidents ; avance le médecin Dragoslav Miric. Vérifier sans faille qu'aucune faille n'existait dans les systèmes de protection contre les prédateurs ou les ennemis, qu'aucun détail n'avait été oublié dans la préparation d'une expédition, refaire sans arrêt des check-lists qui ne pouvaient pas encore ce nous à survenir en une grande valeur de survie pour le groupe.*» La personnalité obsessionnelle compulsive pourrait aussi avoir eu un avantage évolutif dans les situations d'épidémie. Différents travaux scientifiques démontrent d'ailleurs une recrudescence des comportements obsessionnels lors de la pandémie de Covid-19. Or, pour le psychiatre indien Ravi Rajkumar, les rituels observés – lavage des mains, désinfections, théaurisation... – soulignent l'avantage que peuvent présenter des obsessions en termes de survie face aux épidémies. Autrement dit, vive les TOC!

évolutionniste. Les symptômes que nous avons longuement considérés comme des maladies mentales peuvent eux aussi s'avérer être des adaptations. Ils peuvent donc être fonctionnels: un changement d'humeur, même extrême, peut être considéré comme une alerte signifiante, et non comme un dysfonctionnement. «*Les capacités d'anxiété et de déprime sont des adaptations, ce n'est pas l'erreur de la psychiatrie moderne*», assène Randolph Nesse.

UN SENS DE NOUVELLES THÉORIES

En dépit de l'inconfort dans lequel ces situations nous plongent, elles nous permettent d'éviter le danger. Trop d'anxiété constitue certes un problème grave, mais trop peu pourrait être pire... Ce serait d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles la plupart d'entre nous éprouvent de tels excès d'anxiété: la sélection façonne le système pour déclencher des alarmes en surnombre, afin de garantir une réponse en cas de besoin. «*Les fausses alertes ne coûtent pas cher par rapport à la possibilité de mourir s'il n'en existe aucune*», garantit Randolph Nesse. Cela change tout du point de vue du thérapeute, mais aussi du patient. «*Lorsque j'explique que la panique est un système utile mais sujet à de fausses alarmes, beaucoup de patients répondent: "C'est logique. Je vais arrêter de m'en préoccuper." Et beaucoup le font*», illustre le psychiatre.

L'approche évolutionniste pourrait aussi amener à considérer certaines maladies, comme la dyslexie, le TDAH ou divers troubles autistiques, comme de simples différences cognitives plutôt que des dysfonctionnements. La théorie de la cognition complémentaire, portée par Helen Taylor, chercheuse aux universités de Strathclyde et de Cambridge, va jusqu'à penser que ces pouvoirs auraient été favorisés par l'évolution pour leurs bienfaits collectifs: «*Les humains ont évolué pour se spécialiser dans des modes de traitement de l'information complémentaires. La combinaison de ces spécialisations permet au groupe d'agir comme la somme de leurs parties, augmentant ainsi sa capacité à créer, résoudre des problèmes et s'adapter*». Vérifier, trier, compter, peaufiner... Autant de facultés qui pouvaient rendre les personnes concernées par l'autisme très utiles pour le groupe, malgré leur manque de socialisation. «*Les obsessions que les artistes ont souvent autour des technologies se seraient clairement manifestées différemment dans un monde sans technologie*», abonde Adam Hunt.

«*Nous nous trouvons à un moment très étrange de l'histoire de l'humanité où les troubles mentaux peuvent prendre un sens à la lumière de notre histoire évolutive. Cela ne signifie pas qu'ils deviennent faciles à vivre, mais que vous n'êtes plus considéré comme "brisé"*», conclut Adam Hunt. Et nos faiblesses de se transformer en super-pouvoirs...



LA VULNÉRABILITÉ? UNE STRATÉGIE DE PROTECTION

Difficile a priori d'imaginer qu'être vulnérable puisse présenter un avantage... Et pourtant, ce serait un réel pouvoir. Une hypothèse récente montre même que cela serait à la base de la coopération humaine: la vulnérabilité extrême exprimée par le nourrisson tend à renforcer l'attention de son entourage, à le pousser à l'aider. Une stratégie gagnante, qui persisterait tout au long de la vie pour renforcer nos liens avec les autres. La vulnérabilité serait un ciment social pour notre espèce. «*On s'inquiète de ce que les gens pensent de nous, de savoir s'ils nous aiment... C'est assez spécifique à Sapiens, espèce interdépendante par excellence*, conforte le philosophe en médecine évolutionniste Adam Hunt. «*La communauté nous nourrit, nous protège, nous offre des opportunités d'accouplement. Il est logique d'être préoccupé par ce qu'elle pense de nous.*» C'est paradoxal, afficher sa vulnérabilité c'est aussi afficher son pouvoir.

LA DYSLEXIE? LA PUISSANCE DE L'INNOVATION

Considérée jusqu'alors comme un trouble de l'apprentissage, la dyslexie englobe des difficultés de lecture et d'écriture dues à une reconnaissance des mots lente et imprécise. «*Mais les dyslexiques ont de nombreux atouts par ailleurs*», souligne Helen Taylor, chercheuse aux universités de Strathclyde et de Cambridge. «*Ils sont notamment très performants pour raisonner sur des systèmes complexes et identifier les connexions entre différents domaines de connaissance. C'est comme s'ils bénéficiaient d'une vision d'ensemble accrue. Ils sont aussi très créatifs.*» C'est sur les recherches en psychologie cognitive et en neurosciences que la chercheuse interdisciplinaire appuie

ses affirmations. Or, les deux disciplines mettent en évidence la spécificité exploratoire des dyslexiques. En général, leur attention est plus large que celle des autres, tant dans les modalités auditives que visuelles. Des études d'imagerie fonctionnelle montrent que les dyslexiques utilisent des réseaux cérébraux différents pour certaines tâches visuo-spatiales. «*Nous constatons également des différences au niveau plus fondamental de l'organisation cellulaire*», ajoute Helen Taylor. Les personnes dyslexiques présentent des particularités de connectivité au sein de ce que l'on appelle les circuits des minicolonnes – des empilements de neurones verticaux interconnectés

qui traversent les couches corticales du cerveau. Ces minicolonnes s'avèrent plus larges et plus espacées: il en résulte une moindre connectivité locale, pénalisant l'automatisme nécessaire à la lecture, mais une plus grande connectivité globale entre les zones du cerveau. «*Cette façon de traiter l'information peut être plus lente et plus laborieuse, mais elle facilite l'exploration de l'inconnu au détriment de l'exploitation du connu*, précise la chercheuse. «*Loin d'être un trouble, la dyslexie est au départ un atout. Elle a sans doute été sélectionnée parce qu'elle permet de bénéficier de solutions plus originales, ce qui peut être un avantage pour l'adaptation et la survie.*»

NOS SOURCES

Randolph M. Nesse, *World Psychiatry* (2023); A. Hunt & A. Jaeggi, *Evolutionary Human Sciences* (2022); H. Taylor, J. Ferradás & S. Wraight, *Cambridge Archaeologica* (2022). Retrouvez toutes nos sources sur epiloop.com/sources. Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par epiloop.

2 MOIS OFFERTS

epsilon

nouveau magazine d'actualité scientifique

Abonnez-vous

... et complétez votre collection

Le mensuel + le hors-série



82 € / AN
Sans engagement*
LA VERSION NUMÉRIQUE EST OFFERTE

Le mensuel



59 € / AN
Sans engagement*
LA VERSION NUMÉRIQUE EST OFFERTE



SUR EPSILOON.COM

ou s. annez le QR code ci-dessus



par téléphone

01 87 64 09 62

Du lundi au vendredi de 9 h à 19 h



SUR COLLECTION.EPSILOON.COM

ou scannez le QR code ci-dessus



Suivez-nous aussi
sur les réseaux sociaux

* Voir conditions générales de vente sur epsilon.com. Offre d'abonnement valable le 10/10/2018. Photos de couverture: 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. Photos de couverture: 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25.



LES SUPER-POUVOIRS DES ASTRES

*C'est dans
l'espace que
les forces
de la nature
s'expriment
avec le plus
de puissance.
Rencontre
avec les pires
monstres
cosmiques.*

PAR MATHILDE FONTEZ

LA TERREUR GRAVITIQUE

**Elle bouscule
toute la matière
sur 100 000
années lumière**

Lorsqu'il entre en fusion, un trou noir fait danser la matière autour de lui : surchauffée, elle s'illumine et projette des bouffées de rayons X et d'ultra violets. Cette simulation dévoile l'un de ses pouvoirs : sa gravité infinie comprime les gaz, les électrifie, les disperse. Une influence qui peut s'étendre sur une galaxie entière. Les phénomènes ont une grande importance sur toutes les structures de l'Univers, s'émerveille l'astrophysicien Akos Bogdan, à Harvard.

NASA 311

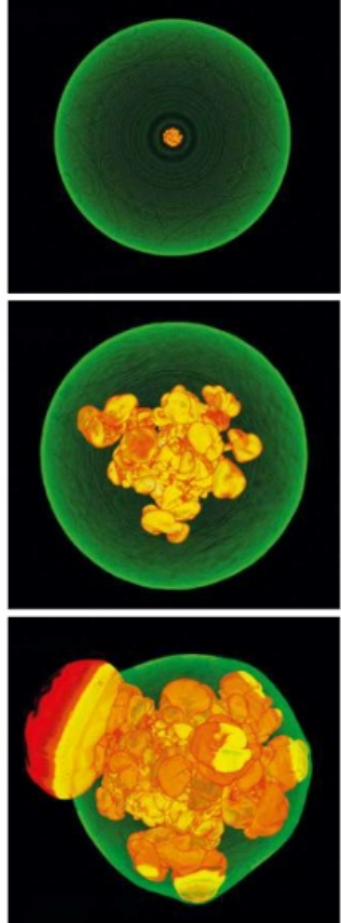
LE PRODIGE SUPERSONIQUE

**Il souffle un vent
qui dépasse le million
de kilomètres-heure**

Voici un gigantesque courant de gaz. Dans cette simulation, les zones les plus sombres sont quasiment immobiles... mais dans les parties les plus lumineuses, la vitesse de la matière est colossale. C'est l'œuvre d'un amas de galaxies massif, au centre duquel est l'impact de ce courant sur l'univers environnant ? Participez à la cartographie des filaments, ce réseau de galaxies qui structure l'univers à grande échelle ? Les recherches sont en cours...



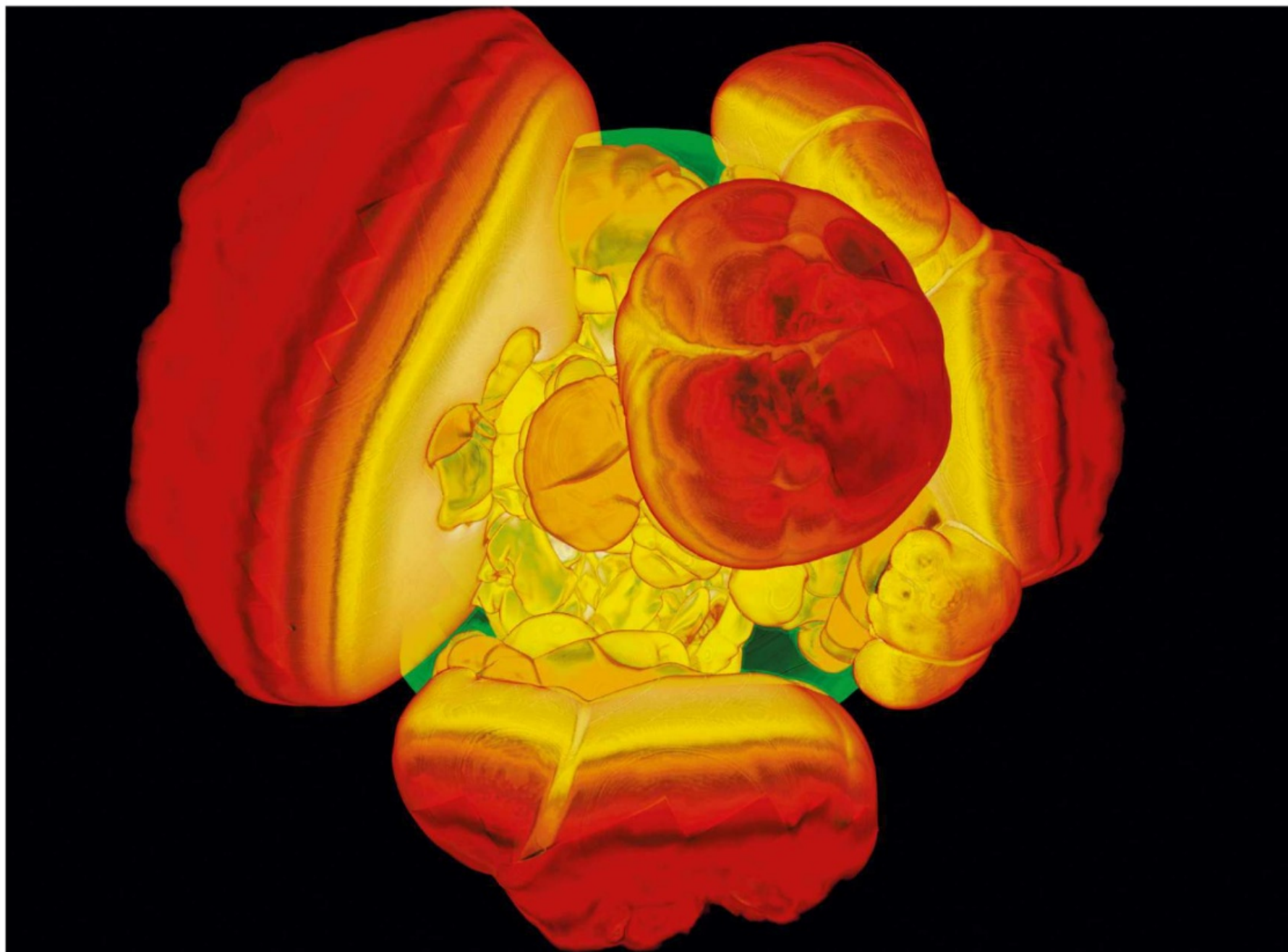
THE TNG COLLABORATION

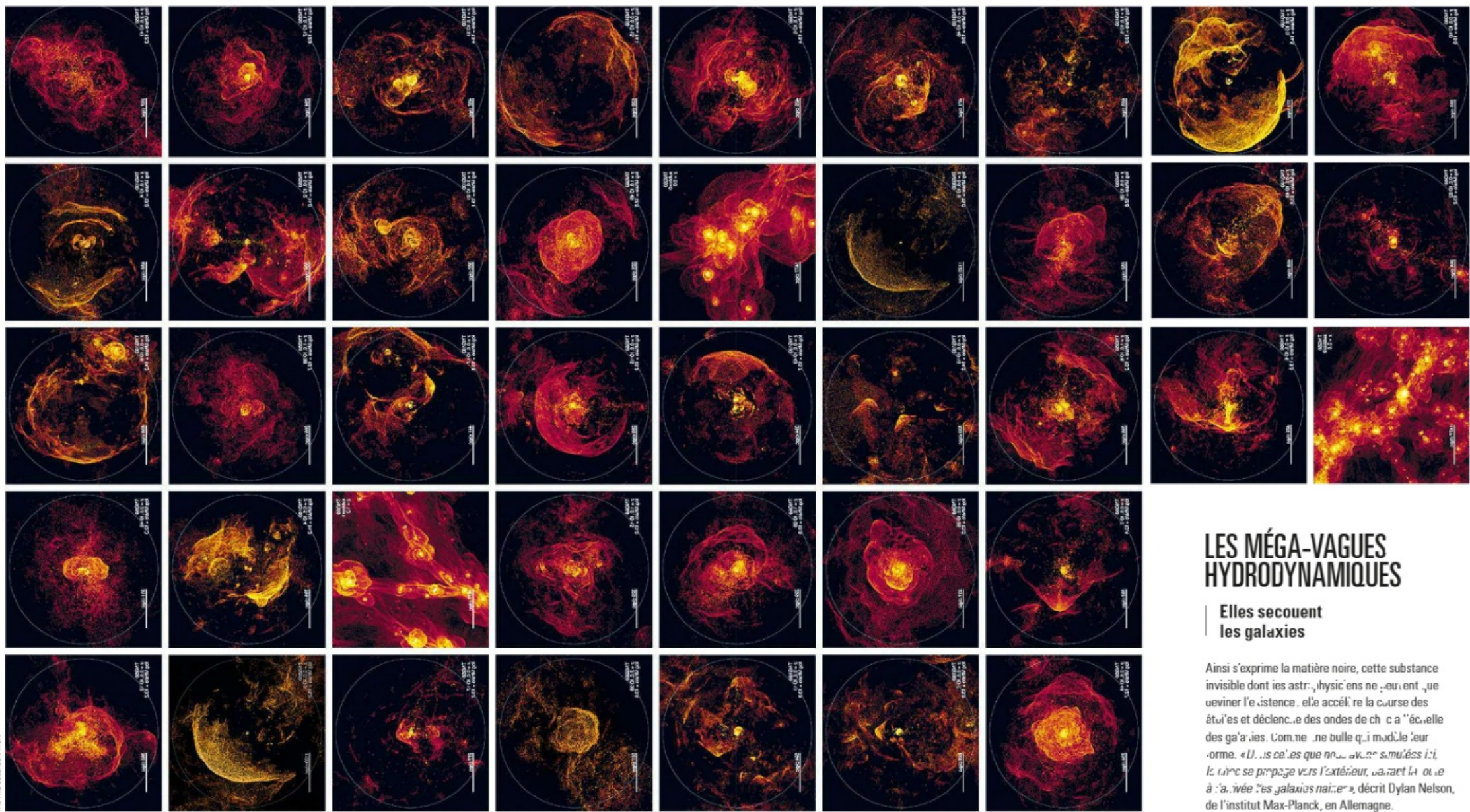


LE MONSTRE ÉNERGÉTIQUE

Il émet autant de lumière qu'une galaxie entière

«Les supernovae sont les explosions les plus puissantes de l'Univers, seules à égaler, voire à dépasser, celles des galaxies entières», explique Bernard Müller du Centre d'astrophysique de Monash en Australie. Cette brutale agonie d'étoile se joue dans un flou de puissance, le cœur s'effondre en moins d'une seconde, expulse des jets de matière brûlante à une vitesse de choc (en vert) qui se propage à des dizaines de millions de km/h.

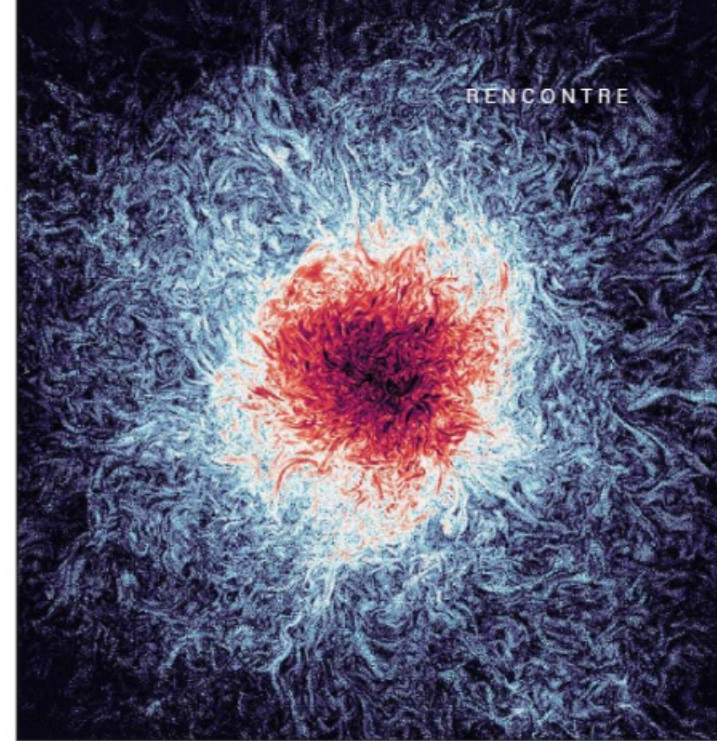




LES MÉGA-VAGUES HYDRODYNAMIQUES

Elles secouent
les galaxies

Ainsi s'exprime la matière noire, cette substance invisible dont les astrophysiciens ne peuvent deviner l'existence. Elle accélère la course des étoiles et déclenche des ondes de choc à l'échelle des galaxies. Comme une bulle qui modifie leur forme. « Elles sont ce que nous voyons sur ces images. Elles se propagent vers l'extérieur, à partir du cœur à l'arrivée des galaxies naissantes », décrit Dylan Nelson, de l'institut Max-Planck, en Allemagne.



LA MERVEILLE MAGNÉTIQUE

Elle irradie à toutes les échelles de l'Univers

Voici une des premières modélisations du champ magnétique d'un amas de galaxies. Un aperçu seulement de sa puissance : cette force diffuse est infime par rapport à la gravitation, mais s'exprime partout dans le cosmos. Aucun astre n'y échappe. « Elle provoque des flambées d'étoiles, régule la voile des galaxies et sans doute des amas », égrène Julien Devriendt, spécialiste du sujet à Oxford. Le super-pouvoir cosmique occulte.

LE FEU ULTRA-TURBULENT

Il fait exploser les plasmas

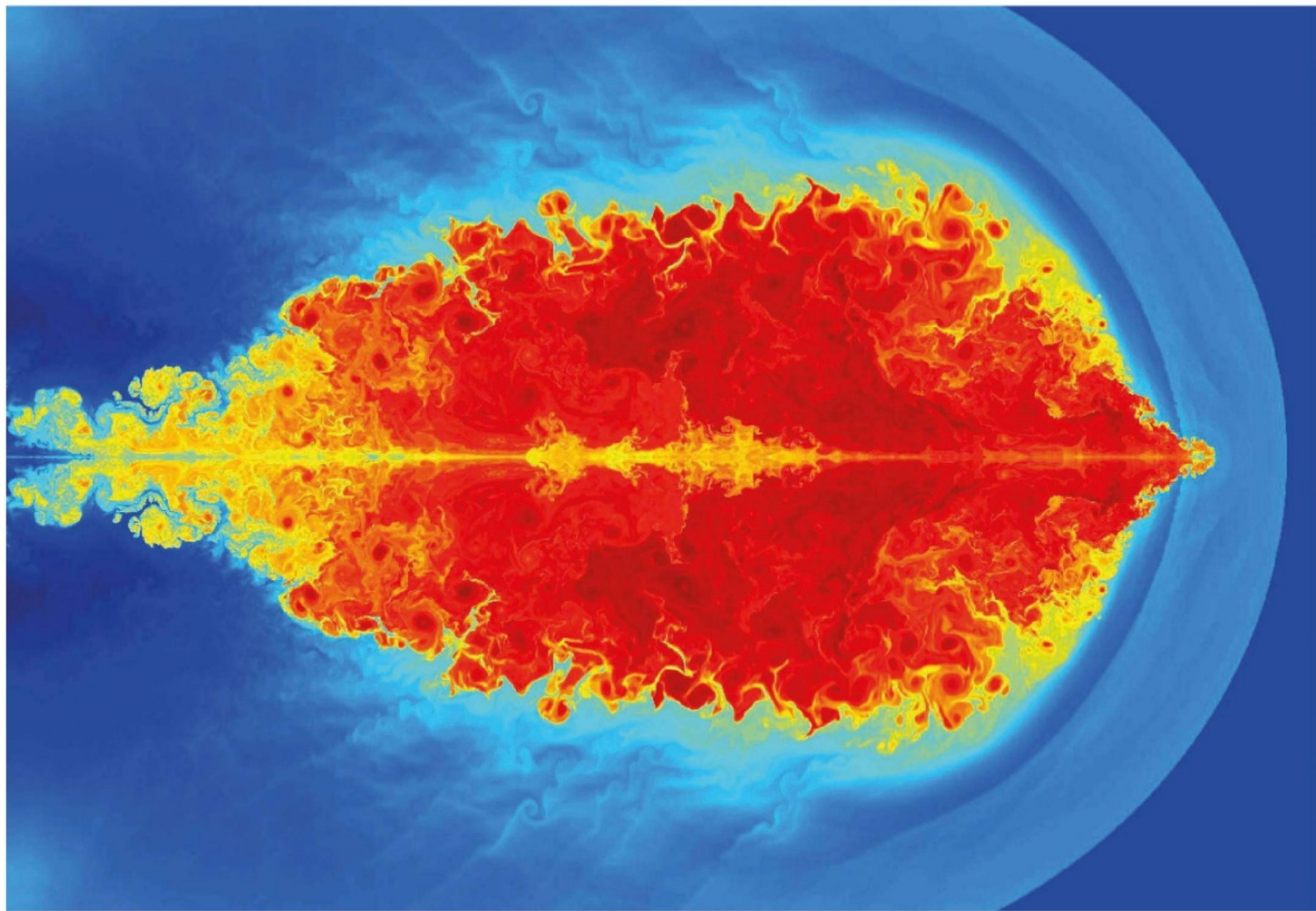
« Nous voyons des ondes dans le plasma, des nappes de courants électriques... » décrit William Matthaeus, à l'université de l'Idaho. La surface des étoiles révèle son incroyable complexité et sa puissance : ces turbulences se renforcent en cascade jusqu'à déclencher éruptions stellaires et autres turbulences magnétiques. « C'est le mécanisme de chauffage dominant à leur surface » conclut le chercheur.

BLUR/REBELEY AP - THE IMG COLLABORATION

L'EXPLOSION ULTIME

Elle se propage sur des millions d'années-lumière

La déflagration est si intense, si rapide, si désordonnée, qu'observée depuis la Terre sous la forme d'un signal radio, elle a été prise pour une tentative de communication d'une civilisation extraterrestre. C'est en fait un blazar; un cœur de galaxie actif (invisible, à gauche) qui propulse un jet de matière ionisée quasiment à la vitesse de la lumière. Précédé, tout à droite, d'une gigantesque onde de choc.



Q

uelles sont les forces dominantes dans l'Univers? Réponse vigente, double et contredicatoire. D'abord la gravitation, qui dirige le mouvement de tous les astres, la naissance des étoiles, de la vie, la formation des galaxies; ensuite l'énergie noire: «*Elle pousse vers l'avant dans une expansion accélérée, accélérée et étire le cosmos*», résume Akos Bogdan, astrophysicien à l'université Harvard. «*Mais au-delà de ces deux forces principales, une multitude de phénomènes extrêmes, surpuissants, participent à la structuration de l'Univers*», ajoute le chercheur. Des monstres?

Des super-héros cosmiques? «*On peut dire ça comme ça...*

«*C'est indéniable, on essaie aujourd'hui d'appréhender jusqu'où vont leurs super-pouvoirs.*»

Jets supersoniques de matière ionisée; vents galactiques, voire super-galactiques; éruptions de plasma... Vus depuis la Terre, ce sont les signaux lumineux à haute énergie qui ont trahi l'existence de ces phénomènes monstrueux. Une lumière qui surgit tout à coup dans le ciel – supernova, explosion d'étoile –, une bouffée de rayons X captée par un télescope radio – quasar, blazar, trou noir... Pour décrire la physique de ces astres extrêmes, pas le choix, il a fallu multiplier les simulations. Cette immense entreprise a débuté dans les années 1980, elle arrive aujourd'hui à maturité. C'est l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs qui a donné le tempo. «*Au début, les simulations ne dépassaient pas 70 millions d'années-lumière, la taille de quelques amas de galaxies*, retrace Dylan Nelson, qui participe à la simulation Illustris à l'Institut Max-Planck. *Aujourd'hui, nous travaillons à l'échelle de l'Univers.*» «*On s'intéresse désormais à toutes les échelles, en ajoutant aux simulations globales des modèles "sous-grille" qui ciblent des phénomènes*



particuliers», ajoute Manuela Campanelli, grande spécialiste du sujet au Rochester Institute of Technology de New York. De quoi tenir compte des effets les plus complexes, liés à la physique microscopique: les processus thermiques, électriques, magnétiques; les écoulements des poussières et des gaz, les ondes de choc, la turbulence... Et prendre la mesure de leur impact littéralement astronomique. «*On parvient aujourd'hui à résoudre les équations tout au long des simulations, sans rien simplifier, et cela révèle l'importance des phénomènes*», décrit Christoph Federrath, à l'université de Heidelberg.

FASCINANT BESTIAIRE

Tout à coup, on comprend que les trous noirs, bousculant la matière qui gravite autour d'eux, régulent la croissance des galaxies, disloquant les nuages de gaz dans lesquels naissent les étoiles. «*Au début, ils étaient étudiés pour eux-mêmes, en tant qu'objets physiques particuliers. Mais depuis une dizaine d'années, on s'aperçoit que les jets de matière et de lumière qu'ils provoquent ont une importance à toutes les échelles*», décrit Akos Bogdan. On détaille aussi comment les supernovae ont essaimé, par la puissance de leur souffle fantastique, tous les atomes complexes de l'Univers. La formule de l'astronome vulgarisateur Hubert Reeves, «*Nous sommes tous des poussières d'étoiles*», n'a jamais été aussi vraie. On s'aperçoit que les champs magnétiques façonnent les bras des spirales, structurent les nébuleuses. On démontre que la turbulence transfère l'énergie à toutes les échelles de l'Univers, depuis la surface des étoiles jusqu'aux filaments galactiques de millions d'années-lumière de longueur...

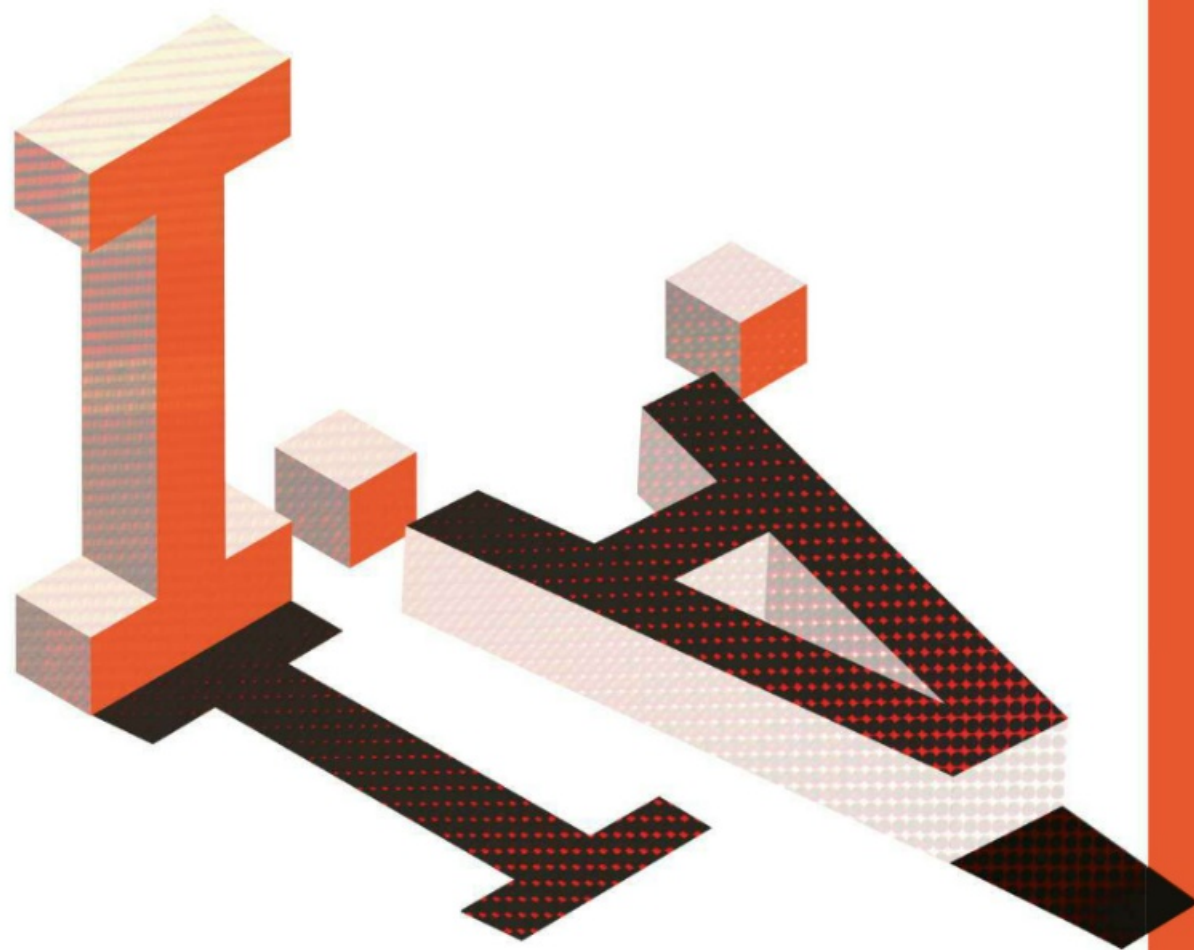
Dans l'Univers, la gravité a beau être reine, et l'expansion impérieuse, elles s'inclinent face aux pouvoirs de tout un bestiaire de super-héros cosmiques.

A. BURNINGS/PRINCETON UNIVERSITY



«
JE SUIS L'INSTANT!
JE SUIS LE POUVOIR!
JE SUIS LA GRANDEUR!
JE SUIS GALACTUS!
»

Galactus (dans Surfer d'argent, 1993)



LES LIMITES DU SUPER POUVOIR

Les performances bluffantes du robot conversationnel ChatGPT font miroiter l'avènement d'une IA omnisciente, qui aurait réponse à tout. Sauf que la technologie sera rapidement confrontée à une limite: elle va manquer de données.

PAR XAVIER BOIVINET

ffrayant», « amusant », « impressionnant »... Qu'ils soient spécialistes ou simples curieux, tous ceux qui ont essayé de te pousser dans ses retranchements sont unanimes : ChatGPT les a bluffés. Lancée en novembre 2022, la plateforme de conversation en ligne de l'entreprise américaine OpenAI semble tout connaître, et être capable de rédiger ses réponses beaucoup plus vite et aussi bien qu'un humain. Chercheur en informatique à l'Inria, l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique, Gaël Varoquaux était pourtant sceptique... Mais une fois le dialogue engagé avec la machine, « on a vraiment l'impression de converser avec un humain dont la grammaire et l'orthographe sont bonnes, admet-il.

C'est la première fois que cela m'arrive. Une étape est en train d'être franchie ».

PREDIRE LE MOT QUI SUIT...

« C'est une nouvelle révolution dans l'accès à l'information. L'enthousiasme lui aussi Benoit Sagot, directeur de recherche à l'Inria. Après l'imprimerie, qui a permis de stocker l'information, et le moteur de recherche, qui nous a indiqué où aller la chercher, elle nous est maintenant directement restituée par ce type de modèle. » Restituée de si belle façon que les professeurs craignent de ne l'entêt plus faire la différence avec des copies d'élèves. Et que les médecins constatent que l'algorithme a presque atteint le niveau de l'un des examens du concours américain de médecine.

La machine omnisciente est-elle en train de voir le jour ? Un génie capable d'aspirer, puis de restituer tous les savoirs de la Terre ? « Je comprends que l'on puisse penser à des super-pouvoirs quand on voit ce que ChatGPT arrive à faire, admet Laure Soulier, maîtresse de conférences à l'Institut des systèmes intelligents et de robotique à Sorbonne Université. Mais de là à parler de machine omnisciente

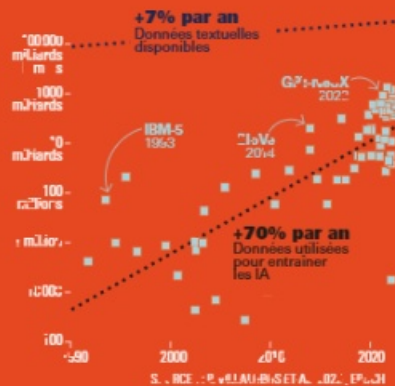
qui remplacerait les humains, on n'y est pas encore. » « ChatGPT ne crée pas, abonde Luc Julia, spécialiste en intelligence artificielle, co-créateur de Siri. Il ne fait que générer du texte à partir de ce qu'il a vu. »

Au cœur de ChatGPT, point de surnaturel, il est vrai. Mais une tâche élémentaire : celle de prédire le mot qui suit dans une phrase à partir du contexte. Comment ? Grâce à une famille de réseaux de neurones appelée « transformers », inventée par des ingénieurs de Google en 2017 pour améliorer le traitement automatique du langage naturel. « Une révolution ! », estime Laure Soulier. Les transformers ont en effet permis des avancées spectaculaires grâce à une analyse plus fine du texte. « Ils capturent des structures textuelles riches et compliquées », précise Gaël Varoquaux. Mais au prix d'un apprentissage intensif, sur d'énormes corpus de texte (livres, encyclopédies, sites web...), afin d'y repérer des régularités et de calculer la probabilité que tel mot soit souvent accolé à tel autre.

FLAGRANT DÉLIT DE FADAISE

Cabinet d'analyse spécialisé dans les enquêtes et la prospective sur le développement de l'intelligence artificielle, Epoch a observé l'évolution de la taille des bases de données textuelles utilisées pour entraîner ces modèles de langage. Elle a été multipliée par 10 millions entre 1990 et 2022, atteignant pour la plus grosse quasi 2 000 milliards d'entrées. GPT-3, sur lequel est basé ChatGPT, a lui été entraîné sur 300 milliards d'entrées...

Et c'est là que se dessine un mur, la limite du super-pouvoir de ce type d'IA. D'abord parce que, malgré les apparences, elle doit encore progresser. « ChatGPT fait encore des erreurs,



LE VOLUME DE DONNÉES UTILISÉES PAR L'IA EXPLOSE

L'apprentissage d'IA de plus en plus savantes comme ChatGPT nécessite des bases de données de plus en plus volumineuses. Mais au rythme d'accroissement des data disponibles, cela ne s'arrêtera bientôt plus. Un plafond inévitable qui pourrait même être atteint dès 2025.

car il ne raisonne pas », pointe Laure Soulier. Il répond par exemple « sans aller à des questions erronées ou névrosées » comme lorsque « vous lui demandez de justifier que 1. n'est pas un nombre premier... elle le fait avec une confiance totale. Et ce de façon souvent très fournie et argumentée, mais totalement fautive. Elle est incapable de repérer l'erreur dans la question. Les réseaux sociaux regorgent d'exemples de ce type où l'IA est prise en flagrant délit de faiblesse. Il est capable de raconter n'importe quoi avec un aplomb déconcertant. S'amuse lui aussi Gaël Varoquaux. Comme un mauvais élève

qui sait très bien faire illusion. » Les IA ont même parfois des hallucinations. C'est-à-dire qu'elles surgissent des éléments dans leurs réponses qui n'ont rien à y faire, parce qu'elles ont eu l'habitude de les voir dans les textes sur lesquels elles ont appris. Comme si on expliquait qu'un match de foot se joue forcément « par un beau dimanche matin », sous prétexte que c'est souvent le cas des matchs amateurs.

Bref, les IA d'aujourd'hui doivent encore progresser. Dans un article publié en mars 2022, des chercheurs de DeepMind, une filiale de Google, reconnaissent d'ailleurs que

« Les modèles de langage actuels sont signés activement sous entrainés, une conséquence de la récente tendance à augmenter le nombre de paramètres, tout en gardant constant le nombre et le types sur lesquelles ils sont entraînés ».

Sauf que pour approcher de l'IA véritablement, il faut plus de données, et cette limite n'est pas une limite absolue. C'est ce qu'a écrit Pablo Villalobos, en ce qui concerne dans un article publié en octobre 2022 sur la plateforme arXiv : il prédit que la progression de modèles de traitement automatique du langage naturel pourrait être rendue de plus en plus compliquée par, atteinte d'un plateau, celui du nombre de données disponibles. Selon ses estimations, ces modèles consomment les données beaucoup plus rapidement que nous ne les produisons. Les bases de données publiques ont ainsi grossi de plus de 40% par an en moyenne entre 1990 et 2022, selon lui, tandis que le volume de données actuellement disponibles n'augmente actuellement que de 7% par an. Le rythme n'est donc pas tenable. « Le stock de données de langage de qualité pourrait être épuisé avant 2026 », résume-t-il. Les données de qualité sont des textes grammaticalement corrects et écrits de manière professionnelle, comme des livres, des articles de journaux, des publications scientifiques, des pages Wikipedia, etc. Et même sans être regardant sur leur qualité, on verrait le bout du stock entre 2030 et 2050, estime le chercheur.

HYBRIDATION, SMALL DATA...

Soucieuse de réduire les conséquences de l'apprentissage en termes de durée, de coûts et de consommation énergétique, « la recherche explore déjà plusieurs pistes qui s'écartent de la course aux modèles toujours plus gros et gourmands en données », annonce Céline Hudelot, enseignante-chercheuse à CentraleSupélec. Certains annoncent l'entrée dans l'ère du « small data ». Une partie de la communauté se penche notamment sur des apprentissages à partir d'un petit nombre d'exemples – des approches dites *few-shot learning* –, dédiées à des applications pour lesquelles il existe par nature peu de données pour entraîner les modèles, comme la reconnaissance de maladies ou d'espèces animales rares sur des images. « C'est un domaine très actif », note Céline Hudelot. Sauf que ce type d'apprentissage

s'effectue en général en spécialisant une IA généraliste... entraînée au préalable sur un gros volume de données. Retour à la case big data.

Une autre piste mise sur de l'hybridation, qui consisterait à ne plus seulement faire appel à une approche statistique, mais à la mixer avec des approches symboliques, ou logiques. Elle inclurait des connaissances jusque-là mises de côté dans les IA conversationnelles de type ChatGPT, comme des règles de grammaire ou de conjugaison. Voir certaines connaissances extra-linguistiques, techniques ou scientifiques... Une sorte de réhabilitation d'une école très présente à la naissance de l'IA, qui tentait de mimer le raisonnement du cerveau avec les « systèmes experts ». Et qui avait finalement été supplantée par la montée en puissance du deep learning et sa méthode probabiliste. Comment combiner ces deux philosophies différentes ? « C'est une question intéressante, mais qui reste à creuser », admet Benoît Sagot.

OMNIVORES

La multi-modalité pourrait de son côté enrichir les jeux de données. En créant des IA omnivores capables d'apprendre en se basant non seulement sur du texte comme ChatGPT, mais aussi des images, voire du son... « Il y a déjà des modèles très performants », précise Céline Hudelot. Comme CLIP d'OpenAI, qui parvient à faire des liens entre des images et les textes des légendes qui leur sont associées. « Des progrès rapides en multi-modalité pourraient intervenir si des applications suffisamment intéressantes pour motiver les gros acteurs venaient à émerger », glisse Gaël Varoquaux, qui imagine déjà des usages en médecine, pour combiner données médicales et imagerie (scan, IRM...).

« D'ici quelques années, il n'est pas impossible qu'une nouvelle architecture plus efficace en termes d'utilisation des données prenne le dessus », résume Benoît Sagot. Mais d'ici là, les transformers et leur insatiable appétit de données auront probablement déjà atteint leur limite.

NOS SOURCES

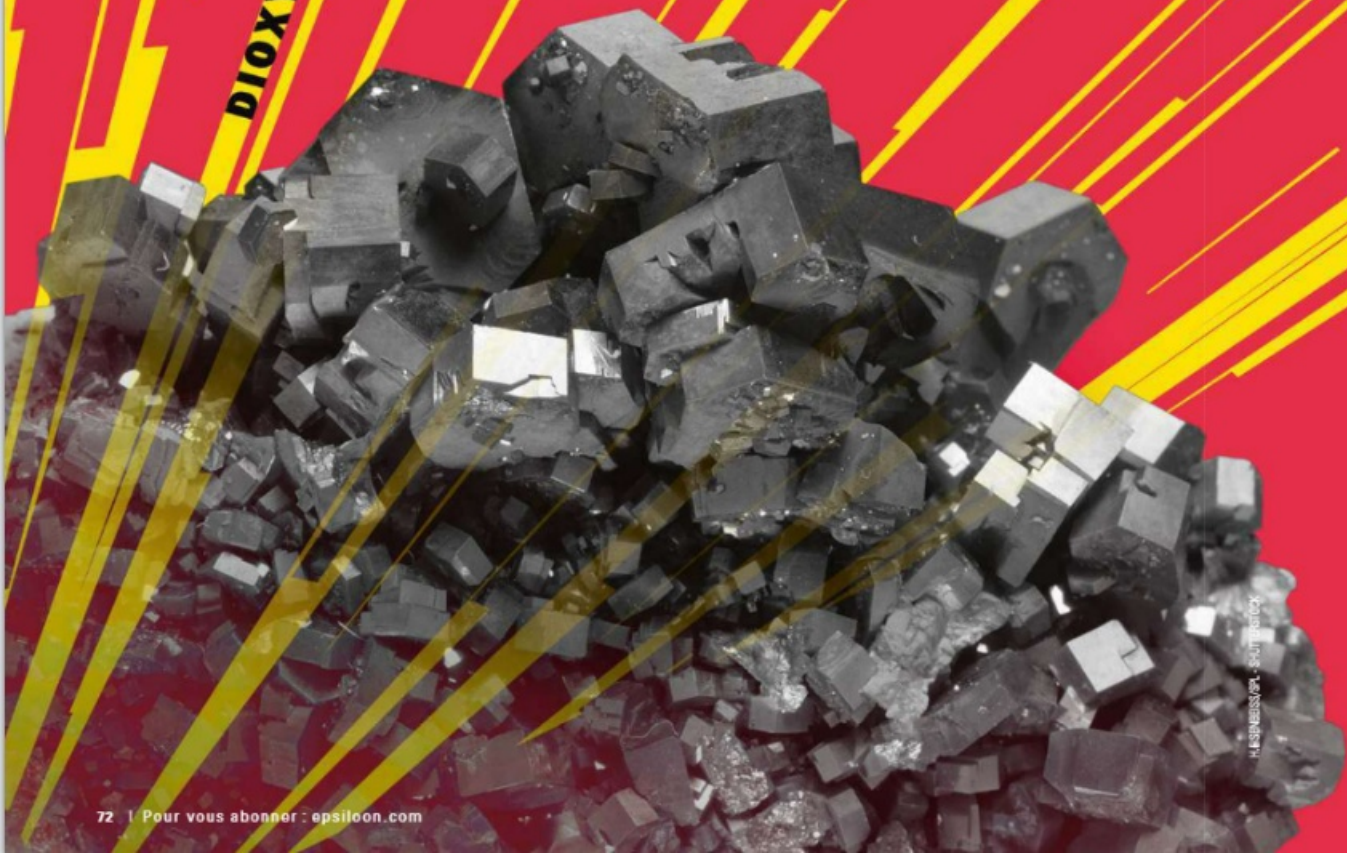
Victor Tseng et al, *Flan* (2023) ; Pablo Villalobos et al., *ArXiv* (2022) ; Jordan Ho. Fran et al. *arXiv* (2022) ; Jack W. Rae et al. *arXiv* (2022) ; *Retro*... et...
 00 tes... so... des... epsiloon.com/ sources. To tes les citations so...
 extra... d'interview... tes par epsiloon.



« CEUX QUI CROIENT
 QUE LE POUVOIR
 EST AMUSANT
 CONFONDENT
 « POUVOIR » ET
 « ABUS DE POUVOIR » »

André Malraux

DIOXYDE DE VANADIUM



CE MATÉRIAU A DES SUPER POUVOIRS

*Il se métamorphose, il calcule,
il mémorise... lorsqu'il est gonflé
à l'oxygène, le vanadium dé-
voile d'extravagantes propriétés.
Oui, ce supermatériau a le pouvoir
de changer le monde.*

PAR VALÉRIE GREFFOZ



première vue, le vanadium n'est qu'un banal métal gris argenté. Un oublié du tableau périodique coincé entre le chrome et le titane. Un métal rare, dur peu exploité pour lui-même et surtout utilisé en alliage pour renforcer l'acier. Ce mal aimé tient-il sa revanche? Depuis quelques années, chimistes et physiciens découvrent que sous ses dehors besogneux se cache en fait un matériau aux propriétés extravagantes. Pour s'en rendre compte, il suffit de le truffer d'oxygène. Le vanadium devient alors du dioxyde de vanadium VO_2 , gagnant soudain un super-pouvoir de métamorphose.

L'histoire de cette réhabilitation commence en 1959, lorsque le physicien Frank Morin, des laboratoires Bell, constate que cet isolant peut subitement devenir un excellent conducteur il suffit de le chauffer un peu pour entraîner une modification de sa structure cristalline, qui laisse alors migrer ses électrons. «*D'autres composés ont aussi cette caractéristique*, témoigne Jean-Christophe Orlianges, physicien au laboratoire Xlim de Limoges. *Mais aucun autre ne le fait à une température proche de la température ambiante: 68°C.*» Pas besoin donc de le refroidir à $-110^\circ C$, comme son cousin V_2O_5 , l'oxyde de vanadium III.

SUPER-POTENTI.

Les scientifiques vont pourtant mettre un peu de temps à comprendre tout le potentiel de ce super-pouvoir. À commencer par celui de se servir du dioxyde de vanadium comme d'un interrupteur. Il suffit en effet d'une simple tension électrique de l'ordre du volt pour le faire passer d'isolant à conducteur. «*Ce qui en fait un interrupteur très intéressant*, explique Jean-Christophe Orlianges, *car il consomme peu d'énergie, ne prend pas de place et s'use à peine, vu qu'il ne comporte aucune pièce mécanique. Or l'électronique a besoin de beaucoup d'interrupteurs.*» Une

IL PASSE D'ISOLANT À CONDUCTEUR À TEMPÉRATURE AMBIANTE

IL A DE LA MÉMOIRE

IL RÉFLÉCHIT LA CHALEUR

IL SAIT CALCULER

vision partagée par Juan José Rostoy, physicien à l'unité mixte de physique CNRS-Thales à Palaiseau, qui place de grands espoirs dans ce matériau pour mettre au point des commutateurs plus performants pour les satellites de télécommunication et les systèmes radar. «*On n'en est qu'au début, mais il est très prometteur par rapport aux technologies actuelles*», atteste le physicien.

Et ce n'est pas tout. Les chercheurs ont également découvert que cette capacité à changer de phase lui permet de dévier la chaleur. «*Au moment où il passe d'isolant à conducteur, le dioxyde de vanadium se met à réfléchir les infrarouges, et donc la chaleur, au lieu de les laisser passer*», explique Aline Rougier, de l'université de Bordeaux. Un effet dit thermochromique que la chimiste imagine pouvoir exploiter pour rendre les vitres plus intelligentes. «*Cette capacité à changer de phase permettrait à une vitre de faire entrer moins de chaleur dans le bâtiment l'été, et de garder plus de chaleur à l'intérieur l'hiver.*» Avec ses collègues du CEA-DAM, elle est déjà en train de mettre au point des films de dioxyde de vanadium à poser sur les vitres, à la façon d'un sticker, qui permettraient d'économiser de 10 à 20% d'énergie. «*Nous avons réussi à faire descendre sa température de transition de 68 à 25°C, en le dopant avec du tungstène, ce qui le rend utilisable en conditions normales*, se félicite



la chimiste. *Il nous reste maintenant à rendre notre film transparent pour qu'il soit exploitable à l'extérieur. L'instant où est encore légèrement mat on...*»

Déjà, le matériau a également servi à développer également s'averer précieux dans le domaine spatial, pour l'isolation thermique des microsatellites, ces petits cubes d'une dizaine de centimètres, trop petits pour pouvoir embarquer un système de régulation de la chaleur, envoyés aujourd'hui en essais dans l'espace ils subissent en effet de violents et réguliers changements de température: «*De +150°C lorsqu'ils sont exposés au Soleil à -150°C lorsqu'ils sont à l'ombre*», atteste la chimiste Laetitia Laversenne, qui étudie la question à l'institut Néel de Grenoble. Une torture pour l'électronique embarquée. «*Une couche de dioxyde de vanadium offrirait un contrôle passif idéal de la chaleur que reçoit ou émet le satellite.*» Et ce, en adoptant automatiquement, selon les conditions, la configuration la mieux adaptée pour maintenir l'intérieur du microsatellite entre $-10^\circ C$ et $+30^\circ C$. «*C'est à l'heure actuelle le matériau le plus prometteur pour l'isolation des microsatellites*, avance son collègue Mohamed Chaker, physicien au Laboratoire de micro et nanofabrication de Varenne, au Québec. *Nous continuons à améliorer les performances de notre revêtement et à faire des tests en collaboration avec l'industrie spatiale.*»

Mais un autre secteur de pointe commence à s'intéresser aussi au dioxyde de vanadium. «*Quand il passe à l'état de conducteur, le matériau se met à osciller*, raconte

Jean-Christophe Orlianges. *On génère ainsi de petits oscillateurs dont on peut piloter la fréquence. Or, en les couplant par deux on peut faire de la logique binaire. Et donc du calcul.*»

ULTRA-ENDURANT

L'idée n'est pas ici de remplacer le silicium, véritable super-héros de l'électronique, mais d'allier leurs pouvoirs. «*L'avance des technologies développées pour le silicium est trop colossale, analyse Jean-Christophe Orlianges. Il s'agit plutôt de pallier ses défauts, de le compléter.*» «*Il y aura un moment où on n'arrivera plus à réduire la taille des transistors pour en mettre toujours plus sur une même puce*, avertit Mohammad Samizadeh Nikoo, physicien à l'École polytechnique fédérale de Lausanne. *Notre proposition est de poursuivre cette miniaturisation en utilisant de nouveaux matériaux, et notamment le dioxyde de vanadium, qui est le plus spécial d'entre tous.*» «*Avec leur combinaison, on pourra entrer dans une nouvelle ère de l'électronique*», prédit Adrian Ionescu, son collègue à l'École polytechnique fédérale de Lausanne.

Une partie de la communauté des spécialistes de l'intelligence artificielle en est également convaincue: le dioxyde de vanadium pourrait servir à fabriquer des réseaux de neurones artificiels ressemblant à ceux de notre propre cerveau. «*Il suffit d'une résistance et d'un composant en dioxyde de vanadium pour reproduire un neurone biologique. C'est extraordinaire*, s'enthousiasme Adrian Ionescu. *C'est une*

BETTY IMAGES

autre façon de faire de l'électronique, sans encoder l'information sur la forme de 0 et de 1... nous l'encodiez en fréquence. D'ailleurs, c'est bien comme ça que la biologie fonctionne. Quand nous stimule un neurone, il envoie un signal analogique, une impulsion, donc la fréquence dépend de l'intensité du signal qui lui est appliqué.» Et le spécialiste d'imagerie déjà en électronique plus de millions de milliards de milliards de fois moins énergivore. Physicien chez IBM à Zurich, son collègue Siegfried Karg ne peut pas d'éloge non plus : « Il peut passer d'isolant à conducteur des milliards de fois, alors que d'autres matériaux ne peuvent plus le faire après seulement quelques milliers de cycles. Cette endurance est très intéressante pour le calcul neuromorphique. »

INTELLIGENT!

Enfin l'été dernier, les chercheurs du PowerLab de l'école polytechnique fédérale de Lausanne lui ont découvert un ultime super-pouvoir: celui de mémoriser des informations. Plus précisément, de conserver une trace de ses transitions passées, une capacité tout simplement jamais observée jusqu'ici. « À l'origine, on voulait juste étudier la rapidité avec laquelle le dioxyde de vanadium changeait de phase », raconte Elison Matioli, physicien et directeur du PowerLab. Jusqu'à ce que son doctorant Mohammad Samizadeh Nikoo fasse une découverte inattendue. Si une impulsion est envoyée 3 heures après un premier signal, le matériau met 0,60 milliseconde pour changer de phase mais si la première impulsion ne la précède que de 10 millisecondes, alors le matériau met quatre fois moins de temps à réagir. « C'est comme s'il se rappelait qu'il avait été excité 3 heures ou 10 millisecondes auparavant, et qu'il changeait sa façon de répondre en conséquence. Impressionnant! raconte Elison Matioli. C'est comme une mémoire intrinsèque associée à la structure même du matériau, et pas à des charges électriques comme sur les mémoires actuelles. » Une mémoire dont les ressorts restent mystérieux, mais qui serait, selon les premières estimations du chercheur, 20 fois moins gourmande en énergie et 10 à 50 fois plus rapide en écriture

qu'une DRAM, la mémoire vive de nos ordinateurs. « Et si ça se trouve, cet effet mémoire dure beaucoup plus que 3 heures, il dure peut-être des jours, voire des années. C'est juste que je n'ai pas encore eu le temps de le démontrer! », s'enthousiasme Mohammad Samizadeh Nikoo.

De quoi encore mieux mimer nos neurones, selon Elison Matioli: « On pourrait imaginer un réseau neuromorphique avec des synapses en dioxyde de vanadium. Il serait beaucoup plus facile d'entraîner ce type de réseau à reconnaître une image, par exemple, car ces synapses se réactiveraient d'autant plus rapidement qu'elles ont déjà été activées. C'est comme ça que notre cerveau apprend: les connexions sont plus rapides une fois qu'on a appris quelque chose. »

MAIS D'OÙ VIENNENT SES POUVOIRS?

Cela fait 60 ans que ça du mystère reste entier. Deux équipes de chercheurs ont tenté d'expliquer la transition du dioxyde de vanadium, mais elles s'affrontent encore et encore. « Il n'y a toujours pas de consensus », atteste Jean-Christophe Orlianges, du laboratoire Klim, de Limoges. S'agit-il d'une histoire de structure cristalline? Le matériau passerait d'une configuration à une autre, où les paires d'atomes seraient moins liées. Ou d'un changement d'état des électrons? Ils interagiraient moins entre eux et se libéreraient ainsi des atomes. Les dernières découvertes n'ont pour l'instant toujours pas permis de trancher. « L'effet mémoire que nous avons identifié pour a été simplifié, par les deux théories », estime Mohammad Samizadeh Nikoo, du PowerLab, à Lausanne.

des trente matériaux critiques pour l'économie européenne – sachant que pour l'heure, 89% de la production mondiale vient de Chine, de Russie et d'Afrique du Sud. Ce n'est pas un hasard si l'Europe se place aujourd'hui à la pointe des recherches sur le sujet, commente Jean-Christophe Orlianges: « C'est un moyen de se positionner sur des technologies où on aurait enfin une chance, demain, de concurrencer les États-Unis et la Chine. »

Pas de doute: ce nouveau super-héros a déjà beaucoup de fans.

Nous SOURCE:

M. F. Nikoo et al., *Nature Electronics* (2022); E. Haddad et al., *Frontiers in Materials* (2022); J. L. Victor et al., *Solar Energy, Materials and Solar Cells* (2022); C. Coriti et al., *Frontiers in New Science* (2021). Retrouvez toutes nos découvertes sur e2silicon.com/ sources. Toutes les citations ont été traitées et vérifiées par e2silicon.

SHUTTERSTOCK





Top 5 des concepts mathématiques

LES SUPER POUVOIRS DE L'ABSTRACTION

N'ayons pas peur des mots, les maths sont l'outil le plus puissant jamais inventé par l'humain. Nous avons demandé à un panel de spécialistes quels sont, à leurs yeux, les concepts mathématiques les plus forts. Voici les cinq super-héros conceptuels qu'ils ont retenus. Leurs pouvoirs sont sans limites.

PAR CLÉMENTINE LAURENS

1 LES VERTIGINEUSES INFINI-CATÉGORIES

« C'est à la fois la chose mathématique la plus triviale et la plus profonde qui soit », s'attache à définir André Joyal, professeur émérite à l'université du Québec, à Montréal, grand spécialiste de ce sujet. C'est une catégorie, ce n'est rien d'autre qu'une collection d'objets et de flèches qui les relient. « Je pense qu'on a initialement introduit cette définition pour simplifier la description de certaines choses. C'était une façon d'organiser des connaissances. »

La puissance du concept ne va cesser de se révéler qu'à la fin des années 1950, lorsque le mathématicien néerlandais Daniel Kan en formalise les contours, avec la notion de « foncteur adjoint » et celle

d'« extension de Kan ». « C'est à partir de là que se développe une véritable théorie des catégories », estime Denis-Charles Cisinski, mathématicien à l'université de Ratisbonne, en Allemagne. Ce n'est plus un simple langage pour décrire d'autres théories : on peut élaborer de nouveaux objets, faire des calculs avec... » Leur pouvoir : « Elles permettent de considérer une structure mathématique comme un membre d'une collectivité plus vaste, explique André Joyal. C'est une sorte de socialisme pour étudier les propriétés d'une structure qui nous intéresse, on étudie ses interactions avec d'autres structures apparentées. »

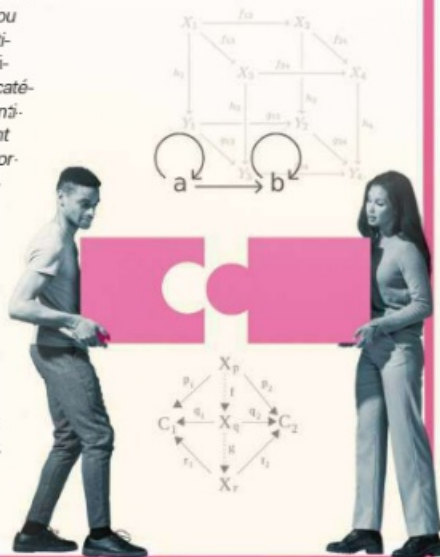
Des nombres entiers aux espaces géométriques en passant par les ensembles, tous les objets mathématiques ont leur catégorie. Ce vocabulaire et ces outils communs permettent de créer des ponts inattendus et fertiles entre des domaines a priori très éloignés. Et le tout de façon dynamique, puisque les catégories contiennent non seulement les objets, mais aussi les fameuses flèches qui permettent de les mettre en relation. Plus fort encore, souligne Denis-Charles Cisinski : « Les catégories parlent de tout... y compris d'elles-mêmes ! Il existe une catégorie des catégories. » Cette dimension réflexive permet donc d'utiliser les outils et les connaissances de la

théorie des catégories pour comprendre les catégories elles-mêmes. Et le vertige ne s'arrête pas là... De plus, une certaine dizaine de catégories se trouve dans un coin, sept encore lui passant les bras autour du cou. « C'est à peu près la même chose que les catégories, sauf que l'ensemble des flèches est, en quelque sorte, un peu plus d'information », explique André Joyal, qui a démontré des résultats fondamentaux sur ces objets dans les années 1980 et 1990. Les infini-catégories permettent de bien identifier des objets ayant les mêmes propriétés pour transposer des résultats

ELLES BÂTISSENT DES PONTS ENTRE DES DOMAINES ÉLOIGNÉS

matématiques d'un domaine à un autre. « Ce n'est pas évident de savoir pour quel type d'énoncé on va pouvoir interchanger des objets identifiants, souligne Denis-Charles Cisinski. Dans le monde des infini-catégories, toutes les manières d'identifier ont le même statut. D'un point de vue externe, ça ressemble énormément à de la théorie des catégories classique. Mais cela a un pouvoir d'expression beaucoup plus grand... L'enjeu, c'est de faire migrer les mathématiciens vers ce nouveau langage plus sophistiqué », lance Bernard Le Stum, de l'université de Rennes. Alors, oui, cela exige un gros effort initial d'abstraction. Mais le jeu en vaut la chandelle, assure le chercheur. « Je suis persuadé que cela va devenir incontournable. »

matématiques d'un domaine à un autre. « Ce n'est pas évident de savoir pour quel type d'énoncé on va pouvoir interchanger des objets identifiants, souligne Denis-Charles Cisinski. Dans le monde des infini-catégories, toutes les manières d'identifier ont le même statut. D'un point de vue externe, ça ressemble énormément à de la théorie des catégories classique. Mais cela a un pouvoir d'expression beaucoup plus grand... L'enjeu, c'est de faire migrer les mathématiciens vers ce nouveau langage plus sophistiqué », lance Bernard Le Stum, de l'université de Rennes. Alors, oui, cela exige un gros effort initial d'abstraction. Mais le jeu en vaut la chandelle, assure le chercheur. « Je suis persuadé que cela va devenir incontournable. »



2 LA FASCINANTE ÉVOLUTION DE SCHRAMM-LOEWNER

Quand on passe à 100°C, quand l'eau se met à bouillir ? Et à 0°C, quand elle se transforme en glace ? C'est ce que les mathématiciens appellent les transitions de phase qui apparaissent à certaines températures critiques. « C'est un grand problème de physique statistique », souligne le physicien et spécialiste de géométrie aléatoire Denis Bernard. Au début des années 2000, l'introduction par le mathématicien

Oded Schramm d'un objet révolutionnaire, appelé désormais évolution de Schramm-Loewner, ou SLE, a tout bouleversé. « Le SLE, c'est juste une collection de courbes qu'on dessine aléatoirement dans le plan, et qui ont la particularité de ne pas se recouper, de ne pas faire de boucles », résume le probabiliste Wendelin Werner, lauréat de la médaille Fields en 2006 pour ses travaux sur le sujet. Or ces courbes permettent de représenter mathématiquement les structures géométriques qui sous-tendent certaines transitions de phase dans des systèmes « plats », à deux dimensions (un peu comme si le matériau était confiné dans un plan). « Souvent, la compréhension de phénomènes physiques est liée à la compréhension des structures géométriques sous-jacentes aux

systèmes qu'on étudie », pointe Denis Bernard. Qui admire le super-pouvoir du SLE : « De nombreuses prédictions qui avaient été faites par les physiciens ont enfin pu être démontrées rigoureusement grâce à cet outil. Et au passage, cela a ouvert de nouveaux champs d'application en stimulant l'imagination des gens et en fournissant de nouveaux outils. » L'objet a par exemple été décisif pour l'étude du « modèle d'Ising à deux dimensions », qui décrit comment l'aimantation de certains métaux varie avec leur température. Ce qui intéresse les physiciens, c'est de comprendre précisément comment l'aimantation tend vers 0 dans des métaux à deux dimensions au fur et à mesure que la température augmente. « Lorsqu'on est largement en dessous de la température critique, le système est figé, quand on

est largement au-dessus, au contraire, il semble complètement chaotique. Et le SLE permet d'étudier les symétries intéressantes qui apparaissent précisément à la température critique », explique Yilin Wang, chercheuse en probabilités et analyse complexe à l'IHES. Un véritable tour de force. Et c'est d'autant plus impressionnant que cette puissance est universelle. « Le SLE apparaît naturellement quand on regarde des comportements limites dans les modèles

de phénomènes extrêmement variés, détaille Jean-Christophe Breton, chercheur en probabilités à l'université de Rennes. C'est cela qui le rend si remarquable et intéressant. »

ELLE MAÎTRISE LES CHANGEMENTS D'ÉTAT DE LA MATIÈRE

3 LA MYSTÉRIEUSE FONCTION DE RIEMANN

C'est une vieille connaissance. Le mathématicien Leonhard Euler la fait apparaître pour la première fois au milieu du XVIII^e siècle : une somme de nombres qui prend la forme $1 + 1/2^k + 1/3^k + \dots$ et ainsi de suite, à l'infini, où k est un nombre entier supérieur ou égal à 2. D'une part, le prodige suisse réussit à calculer les valeurs de cette fonction pour tous les nombres pairs – pour $k = 2$, par exemple, elle vaut $1 + 1/4 + 1/9 + 1/16 + \dots = \pi^2/6$. Surtout, il démontre que cette fonction peut se réécrire sous la forme d'un produit infini, en faisant intervenir tous les nombres premiers, l'un après l'autre.

La fonction touche là au cœur vibrant de l'arithmétique : depuis l'Antiquité, les mathématiciens savent que ces nombres premiers, qui ne sont divisibles que par 1 et par eux-mêmes, sont les briques élémentaires à partir desquels se construisent tous les entiers – chacun s'écrit sous la forme d'un produit de nombres premiers, et cette écriture a le bon goût d'être unique. « Mais les nombres premiers restent méconnus », souligne Florent Jouve, chercheur en théorie des nombres. En particulier, leur répartition dans la suite des entiers nous échappe encore. Et c'est justement pour cela que la fonction imaginée par Euler, et baptisée zêta, va devenir une star des mathématiques. Il faudra attendre que Bernhard Riemann, un siècle plus tard, la prolonge bien au-delà des seules valeurs entières – k peut maintenant

être n'importe quel nombre « complexe », à l'exception de la valeur 1. « Il a eu l'idée d'étudier cette fonction à l'aide de nouveaux outils analytiques, à une époque où émergeait l'analyse complexe, raconte le mathématicien. Établissant grâce à cela un lien explicite entre la répartition des nombres premiers et les endroits où la fonction zêta s'annule. » De ce lien est née la célèbre hypothèse de Riemann, qui permet d'embrasser en un seul geste tous les nombres premiers. La fonction zêta semble avoir le mystérieux pouvoir de dompter leur répartition au sein des autres nombres. « Si on arrivait à démontrer cette hypothèse, des quantités de résultats en découleraient », soupire Florent Jouve. Car zêta apparaît partout. « Dès qu'on veut compter

ELLE EMBRASSE D'UN COUP TOUS LES NOMBRES PREMIERS

des nombres premiers, elle intervient, confirme Cécile Dartyge, chercheuse en théorie analytique des nombres à l'institut Elie-Cartan de Lorraine. Mais on la retrouve aussi dans d'autres problèmes de théorie des nombres. lorsqu'on cherche à compter les diviseurs d'un entier ou quand on veut utiliser certains outils analytiques. » Seulement voilà : l'étude des « zéros de zêta », ces nombres complexes dans lesquels

la fonction s'annule, s'est avérée ardue. Très ardue. « La meilleure estimation qu'on ait d'une zone dans laquelle on est sûr qu'il n'y a pas de zéro de la fonction zêta date de 1958 », s'exclame la chercheuse. On n'a pas réussi à l'améliorer depuis. »

Pourquoi est-ce si difficile ? Parce qu'en prolongeant zêta comme l'a fait Riemann, on acquiert certes la possibilité d'utiliser des outils issus d'un autre domaine (l'analyse complexe), mais on perd l'expression de la fonction sous la forme d'une somme infinie.

« On n'a plus un vrai objet bien explicite à manipuler, c'est beaucoup plus caché », résume Florent Jouve. Tous les mathématiciens sont convaincus que l'hypothèse de Riemann est juste – les tests numériques et l'intuition liée aux connaissances actuelles vont dans ce sens. Mais cela reste à démontrer... « Un véritable mur », selon Florent Jouve.

En attendant, le superpouvoir de cette fonction continue de fasciner. En 2014, à la question d'un journaliste lui demandant ce qu'il ferait s'il pouvait revenir à la vie dans quelques siècles, le grand mathématicien John Horton Conway répondait : « J'aimerais certainement savoir si l'hypothèse de Riemann a été démontrée. »

4 LES INFAILLIBLES TYPES

C'est une querelle centenaire, et un sujet de recherche toujours brûlant : sur quelles fondations, quels principes de raisonnement construire les mathématiques ? Quel socle leur donnerait et dans cette course aux fondements, l'un des concurrents, le théorème des types, est en train de prendre un sérieux avantage. Un avantage technologique. Car cette théorie renforce un lien fertile entre les mathématiques et l'informatique.

Dans cette théorie, tous les objets sont étiquetés en fonction de leur nature : il y a le type « entiers », le type « fonctions », le type « courbes ». Le type d'un objet n'est pas une propriété : il fait partie intégrante de sa définition ; c'est une étiquette qui lui est consubstantielle. Et l'une des spécificités de ce langage, c'est qu'une démonstration est considérée comme un objet mathématique à part entière, dont le type est l'énoncé mathématique qu'elle prouve. « Les types posent les mathématiques comme un tout structuré, en différents objets suivant leur nature », explique Hugo Herbelin, chercheur en théorie de la démonstration à l'Inria. Or, poursuit-il, « en programmation, c'est extrêmement rare d'avoir à l'avance des types. Cela évite notamment de faire des erreurs en manipulant des ensembles de choses qui ne sont pas compatibles : comme des entiers et des listes de nombres par exemple. Mais, même conceptuellement, c'est intéressant : un arbre binaire, ce n'est pas pareil qu'un

nombre entier, alors pourquoi devrions-nous les coder dans une structure commune ? »

Dans la quête des fondements, c'est là un des atouts majeurs de la théorie des types par rapport à ses concurrents, notamment la remarquable théorie des ensembles, qui compte beaucoup d'adeptes : elle coïncide avec l'intuition mathématique, la manière dont informaticiens et mathématiciens pensent aux objets.

De quoi structurer des « assistants à la preuve », ces programmes capables de vérifier automatiquement la validité d'une démonstration. Leur intérêt est double.

ILS FONDENT UN LANGAGE RIGoureux ET INTUITIF

D'abord, il n'y a presque aucun risque qu'un ordinateur laisse passer une erreur cachée dans une démonstration, le risque est en tout cas bien moindre qu'avec une vérification par un être humain. Mais surtout, formaliser un résultat ou une preuve pour l'expliquer à une machine oblige les mathématiciens à bien comprendre leurs propres travaux, à organiser leur pensée et leurs démonstrations de manière optimale. « Ce qu'on veut faire, ce n'est pas seulement s'assurer que les résultats sont

corrects, c'est comprendre les mathématiques. Il faut donc à tout prix conserver le lien avec l'intuition », abonde le spécialiste des mathématiques formalisées Riccardo Brasca, chercheur à l'université Paris Cité. Un bon assistant à la preuve doit donc être fondé sur un langage informatique dans lequel on peut écrire « comme au tableau », insiste-t-il : « Quand les humains écrivent des maths, ils font beaucoup d'approximations de notation, ce n'est pas du tout précis au sens de la syntaxe mathématique. » Grâce au langage des types qui conjugue le besoin de rigueur et de précision de la machine avec l'impératif d'intuition et de visualisation des chercheurs, l'ordinateur peut gérer ces approximations et « deviner » beaucoup de choses implicites, comme le font les humains quand ils lisent une démonstration écrite sur papier. L'arrivée des assistants à la preuve – voire de l'intelligence artificielle – promet de profonds bouleversements dans le champ de la recherche. Et Thierry Coquand, chercheur en théorie de la démonstration à l'université de Göteborg, en Suède, qui a développé un des plus puissants logiciels de vérification automatique, le prédit : « L'avènement des assistants à la preuve sera un excellent moyen de tester, et éventuellement d'améliorer, la théorie des types comme fondement des mathématiques. »

5 LA DÉROUTANTE COURBE ELLIPTIQUE

Personne n'aurait imaginé, il y a un demi-siècle, que cet objet deviendrait si central dans notre vie quotidienne. Il agit, caché, dès que l'on navigue sur Internet : que l'on converse sur une application de messagerie instantanée ou que l'on fournit un mandat de prélèvement bancaire. C'est grâce à lui que l'on s'assure de l'authenticité et de la sécurité de quasiment tous nos échanges numériques. À première vue, pourtant, c'est un objet relativement banal : une courbe elliptique, c'est une courbe plane, lisse, qui correspond à un certain type d'équation : sa forme ressemble un peu à celle d'une goutte qui se forme sur un platond ou qui s'en détache. Les courbes elliptiques ont commencé à acquérir des superpouvoirs au début des années 1980, quand on a compris que la démonstration du grand théorème de Fermat – un très célèbre problème de la théorie des nombres – se ramenait à un problème sur ces courbes raconte Sylvain Duquesne, chercheur en cryptographie à l'IRISA, à Rennes. C'est à partir de ce

moment-là qu'elles ont été massivement étudiées. Et leur aura s'est encore renforcée quelques années plus tard, lorsque des applications en cryptographie ont été découvertes. « C'était une surprise totale ! », se souvient Neal Koblitz, professeur de mathématiques à l'université de Washington, à Seattle, à l'origine, avec Victor Miller, de la cryptographie à base de courbes elliptiques, l'ECC, pour *Elliptic Curve Cryptography*. Leur secret ? Il est possible de définir une addition entre les points d'une courbe elliptique : la « somme » de deux points correspond systématiquement à un troisième, sur la courbe. C'est cette structure, dite « de groupe », qui leur donne leur pouvoir cryptographique. L'avantage des courbes elliptiques, détaille Sylvain Duquesne, c'est qu'on ne leur connaît pas d'autres propriétés exploitables en cryptographie. Cela garantit la sécurité de l'ECC. Autrement dit, ces courbes n'ont ni trop de structure – auquel cas des hackers pourraient imaginer des attaques pour contourner la protection qu'elles confèrent –

ni trop peu – sinon on ne pourrait rien en faire du tout. Et l'avantage, c'est que leur flou structurel est si épais qu'il garantit de hauts niveaux de sécurité sans qu'il soit nécessaire de faire des opérations trop longues. « Ce que je trouve beau dans cette histoire, confie Sylvain Duquesne, c'est qu'à l'origine, les courbes elliptiques ont été développées et étudiées dans le cadre de recherches très théoriques... Et qu'aujourd'hui elles sont partout autour de nous ! » On sait que les courbes elliptiques, si puissantes soient-elles, ne résisteraient pas aux attaques d'un ordinateur quantique. Mais elles vont rester longtemps au cœur de la cryptographie. « L'enjeu est maintenant de développer des systèmes hybrides, mélangeant ECC et cryptographie post-quantique », estime Neal Koblitz.

ELLE PROTÈGE TOUS NOS SECRETS LORS DE NOS ÉCHANGES NUMÉRIQUES



NOS SOURCES

Merci à Manjul Bhargava, Jean-Christophe Breton, Guillaume Dalé, Thomas Dedieu, Jean-Paul Delahaye, Hugo Duminié-Copin, Florent Jouve, Bernard Le Stum, Laure Saint-Raymond et Rouven Réveillac-Picard qui nous ont aidés à constituer ce top... qui reste bien sûr éminemment surjectif. Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par L'Espresso, à l'exception de celle de John Horton Conway.



STUTTERSTOCK - GETTY IMAGES

« ILS OUBLIENT QUE L'INVISIBILITÉ EST UN SUPER-POUVOIR »

Banksy (2019)





IRON
MAN

CAPTAIN
AMERICA

THOR

BLACK
WIDOW

HULK

HAWKEYE

FURY

L'OBSESSION DES SUPER POUVOIRS

*Pourquoi on adore
les super-héros*

PAR EMMANUELLE PICAUD

G

rands, forts, célèbres et toujours fringants malgré leur âge. Les super-héros nés pour la plupart dans les années 1940 ou 1950, durant la grande époque des comics, n'ont pas pris une ride, au contraire; ils sont plus populaires que jamais. Depuis son revival cinématographique entamé avec *Iron Man* en 2008, Marvel a sorti pas moins de trente films de super héros (*Spider-Man*, *Hulk*, *Avengers*...). Quant à Batman, tête d'affiche, avec Superman de son concurrent DC Comics, il a eu l'honneur de six adaptations depuis 2005. Les majors l'ont bien compris. La cote d'amour des super-héros ne se dément pas. Le mot désigne même désormais un genre cinématographique à part entière. Mais qu'est-ce qui nous fascine autant chez ces êtres surhumains?

Ces stars de blockbusters semblent en fait avoir pris la relève des héros antiques aux capacités hors normes, comme Hercule ou Achille, dont on se plaît depuis des millénaires à raconter et à entendre les histoires. Et pas seulement pour se divertir. « *Les comics sont une façon moderne de nous interroger sur les dilemmes et les questions morales de l'humanité. Durant l'Antiquité, c'étaient la littérature et le théâtre qui remplissaient ce rôle. Aujourd'hui, ce sont les super-héros qui nous permettent de réfléchir à ce monde et de transfigurer nos frustrations* », relève Yann Leroux, docteur en psychologie, qui a mené des recherches sur la psychologie des adolescents à l'université Nanterre.

GENTI.S JUSTICIERS

Qu'est-ce qui nous fascine chez Superman ou Wonder Woman? La même chose que chez les héros grecs: la puissance. « *Ces individus tirent une partie de leur charisme de leurs super-pouvoirs* », pose Iwan Morus, historien et professeur à l'université d'Aberystwyth, au Pays de Galles. C'est évident, sur les 8000 super-héros répertoriés dans la littérature comics,



ILS NOUS FONT DE L'EFFET

LES SUPER-HÉROS NOUS INCITENT À L'EMPATHIE

« *Nous avons été surpris par ces résultats, car les individus n'ont été exposés aux images de Superman qu'un temps très court à peine quelques minutes* », s'étonne le docteur Cavon Tonge en, professeur associé de psychologie à l'Université de la Michigan qui a piloté cette expérience en 2017. Elle a consisté à faire entrer une centaine d'individus dans une pièce dont les murs étaient ornés – ou pas – de posters de Superman. Au final, les personnes ayant été exposées au super héros se sont montrées plus enclines (à 91 %, contre 75 % pour le groupe témoin) à venir en aide à des tiers confrontés à une tâche fastidieuse consistant à remplir un questionnaire. Le super-pouvoir d'inspiration.



ILS NOUS DONNENT CONFIANCE EN NOUS

Il suffit pour cela d'adopter le « power posing » caractéristique des super-héros: mains sur les hanches, jambes écartées, torse en avant. Une vaste méta-analyse publiée le 27 février 2022 et englobant 977 participants a en effet confirmé qu'il provoque une hausse notable de la confiance en soi: « *Une à deux minutes suffisent pour ressentir un effet, mais on ne voit pas de bien de temps côté durée* » nuance Robert Kömer, chercheur au département de psychologie de l'université de Bamberg, en Allemagne co-auteur de cette méta-analyse. *Quoi qu'il en soit, je ne connais pas d'autre posture qui ait un tel pouvoir sur l'estime de soi*.

BIBLIOPHILIADES - WALTER BROS

la plupart possèdent une ou plusieurs super-facilités qui les aident dans leur quête de justice. La capacité de voler pour Superman, une force physique qui dépasse l'imagination pour Hulk, des pouvoirs psychiques pour Doctor Strange, pour ne citer que les premiers qui nous passent par la tête. Autant de dons qui dépassent de loin les capacités des pauvres mortels que nous sommes, fussent-ils parmi les plus puissants d'entre nous. « *Le président d'un grand pays aimerait probablement être un super-héros* » ironise Iwan Morus.

ILS NOUS AIDENT À ÊTRE RÉSILIENTS

Voilà un super-pouvoir bien étonnant: celui d'apaiser. Démonstration en a été faite par des chercheurs de l'université d'Halifa en 2017. Partis du constat que « *de nombreux super-héros subissent une perte parentale à un âge précoce* », ils ont étudié les effets de la lecture de comics sur 18: orphelins vivant en foyer. Résultat: sur les trois groupes d'enfants étudiés, celui qui lisait des récits de super-héros 50 minutes par jour pendant 10 semaines a connu la plus forte baisse d'anxiété et de comportements violents. « *Ce sont aussi les enfants qui ont le plus amélioré leur projection dans l'avenir* », notent les chercheurs.



ILS DÉCUPLENT NOTRE SENS DE LA JUSTICE

Notre attirance pour les super-héros vient de loin. Elle sera toujours profonde et ancrée en nous. C'est ce qu'ont démontré des chercheurs de l'université de Tokyo en 2017 en étudiant les réactions de bébés de 6 mois: ils les ont exposés à une vidéo où une sorte de Pacman se poursuit un autre, tandis qu'un troisième personnage fait le choix de s'interposer au milieu entre les deux. Résultat: 85 % des bébés ont marqué une préférence pour le personnage qui avait déjoué la victime. « *Cela démontre qu'avant même de savoir parler, les humains préfèrent qu'on intervienne pour défendre une victime contre son agresseur* », note Yasuhiro Kanakogi, l'un des auteurs. *Nous aurons donc un sens inné de l'héroïsme*.

Cela semble évident, mais les super-pouvoirs ne font pas tout. La preuve: quelques personnages comme Iron Man ou Batman n'acquiescent leurs capacités surnaturelles que par le truchement d'équipements futuristes. « *Batman ne possède aucun super-pouvoir. C'est grâce à son argent et aux technologies qu'il parvient à réaliser le traordinaire* », observe William Blanc, historien et auteur d'un livre sur l'histoire politique des super-héros. C'est aussi le cas de Captain America, de Black Widow ou du Frelon vert, qui font certes la démonstration de performances physiques dignes d'athlètes de haut niveau, mais qui restent totalement dénués de pouvoirs surhumains – comme Ulysse, d'ailleurs, qui n'est fort que de ses mille ruses.

Le vrai super-pouvoir des super-héros n'est peut-être pas celui auquel on pense en premier lieu: « *Souvent, les gens* →

présent que les super-héros, c'est le fondamental des super-pouvoirs. Mais c'est aussi, dans une certaine mesure le fondamental que ce type le plus précis du monde ait de l'empathie... le cadre Xavier Foucault, journaliste-essayiste, reconnu comme un spécialiste de ce sujet.

Une fois que c'est dit, cela semble à nouveau évident : les super-héros sont avant tout des super-héros. Ce sont des super-géants, des justiciers qui se consacrent corps et âme à la défense de la veuve et de l'orphelin. Et ce comportement altruiste semble aussi résonner très profondément dans notre psyché. « Notre attirance pour ce type de personnage est probablement innée », avance même Yasuhiro Kanakogi, psychologue à l'université d'Osaka, au Japon, qui, il y a quelques années, a mis en valeur l'attraction marquée des nourrissons pour les actes héroïques avant même qu'ils soient capables de parler.

De quoi expliquer pourquoi ces justiciers masqués parviennent, à travers leurs exploits, à nous inspirer, à exacerber notre confiance en nous, notre empathie, notre résilience ? « Dans notre esprit, les super-héros représentent le bien et la justice. Cela nous rappelle que nous devons, nous aussi, bien nous comporter envers autrui », se risque David van Tongeren, professeur associé de psychologie au Hope College, dans le Michigan, qui a montré qu'il suffit que des individus soient exposés furtivement à des posters de Superman pour se montrer plus altruistes. Selon le chercheur, le genre met en scène un monde de justice et de responsabilité. « Dans les comics, les gens assument les conséquences de ce qu'ils ont fait et obtiennent finalement ce qu'ils méritent. Dans la réalité, c'est plus compliqué. »

CÔTÉ OSCUR

Eric Wesselmann, professeur et chercheur en psychologie à l'université de l'Illinois, acquiesce : « Lorsque nous entendons parler de faits héroïques, nous nous sentons nous-mêmes inspirés. Dans un certain sens, les super-héros incarnent des idées et des valeurs morales qui provoquent chez nous une forme d'émulation. » Une morale individuelle, ajoute Ivan Morus : « Les super-héros des comics représentent l'individu qui fait le bien, le plus souvent contre l'État corrompu, malveillant ou incompetent. C'est aussi pour cela qu'ils restent contemporains. »

Mais le genre sait aussi dépasser le manichéisme. « Contrairement aux idées reçues, la rupture entre le bien et le mal dans les

réécits de super-héros n'est pas si évidente, rebondit Thierry Rogel, auteur d'un livre sur la sociologie des super-héros. Il y a très régulièrement des personnages qui passent d'un camp à l'autre. » Et même si on adore les voir faire le bien, il semble que nous soyons tout aussi fascinés lorsqu'ils sont tiraillés par leur côté obscur. « Un véritable virage a été pris dans les années 1980, où les super-héros ont encore gagné un cran de complexité sur le plan psychologique, abonde

LES RÉCITS DE SUPER-HÉROS SONT REMPLIS DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES DE LEUR ÉPOQUE

Thierry Rogel, professeur agrégé

de sciences économiques et sociales au Lycée

Descartes de Jouis, spécialiste de la sociologie des super-héros

Yann Leroux. Pour Batman, par exemple, il reste compliqué de savoir s'il a besoin de justice ou de vengeance. Ces dilemmes moraux trouvent un écho chez de nombreuses personnes. »

Eric Wesselmann utilise d'ailleurs lui aussi régulièrement la figure du super-héros pour évoquer des dilemmes moraux avec ses étudiants. « Parfois, il peut être compliqué d'aborder certaines questions de société de front, comme le racisme par exemple. Les étudiants peuvent se braquer. Passer par un tiers, comme le super-héros, permet de libérer la parole », explique le professeur.

D'autant qu'il est plus facile de s'identifier à ces héros modernes qu'à leurs antiques prédécesseurs. Même avec Superman, d'origine extraterrestre mais qui a grandi dans une ferme du Kansas. « Ce qui distingue Superman, le premier super-héros du genre, du héros classique grec, par exemple d'un Argonaute, c'est que ceux-ci



BLOD/JF/IMAGES - CLIBENSKY

La science semble indissociable des récits de super-héros...

Oui, même si l'écrivain italien Umberto Eco a remarqué que l'origine du Conte de Monte-Cristo, le roman d'Alexandre Dumas. Sa personnalité d'Edmond Dantès, renaisse déjà des exploits de ce héros de commensales, en mer Méditerranée. Il est aussi victime d'une injustice sociale

qui l'oblige à prouver sa valeur et à se faire reconnaître. Mais, pour les super-héros modernes, qui se débrouillent dans une société industrielle et urbaine, les super-pouvoirs sont très majoritairement produits par la science et la technique.

La science sert elle-même à crédibiliser ces super-pouvoirs ?

Ils sont parfois d'origine magique, occulte ou religieuse. Comme ceux d'Iron Fist, qui les a gagnés au terme d'un combat avec un dragon.

Ou comme ceux du dieu Thor, qui a hérité des pouvoirs divins de son père. Mais de nombreux super-héros acquièrent leurs pouvoirs à la suite d'accidents scientifiques. Peter Parker est piqué par une araignée radioactive, les pouvoirs des X-Men sont le résultat de mutations génétiques liées à la radioactivité... Toutefois, même dans ces cas, qui se veulent réalistes, la frontière entre science et magie reste difficile à tracer, les explications scientifiques pèchant par leur manque de crédibilité. Comment une mutation génétique pourrait-elle aboutir à des rayons meurtriers, comme ceux du Cyclope dans X-Men. Comment une piqûre d'araignée radioactive peut-elle donner des pouvoirs d'araignée ? En fin de compte,

les récits de super-héros ne sont pas tant scientifiques que fantaisistes. La science donne des super-pouvoirs, et c'est tout. Peu importe comment.

Comment évolue ce rapport à la science au fil des décennies ?

Les années 1940 sont les années de l'absence de doute envers la science, qui doit nous mener vers la connaissance et la liberté – ses aspects néfastes sont généralement dus à des savants fous, et donc à de mauvais usages. Les inquiétudes apparaissent dans les années 1960 à travers des thématiques moins consensuelles – c'est un accident nucléaire qui est à l'origine des super-pouvoirs de Hulk. Et les années 1990-2000 voient émerger des questionnements sur les gènes et le clonage, avec une célèbre saga où Spiderman affronte son clone. Il n'y a donc pas de message permanent : représentations positives et négatives alternent en fonction des opinions dominantes. Le genre est comme une coquille vide qui se remplit des questions propres à une époque.

Des éléments issus de la noblesse, note Williac; Blac. Steve man. lui. est en ce. main man américain. ce qui lui permet d'incarner la réalité.

En le p. oc. us d'ide. li. acio. n. es. d'au. a. n. plus efficace que les super-pouvoirs peuvent paradoxalement affaiblir les super-héros. Soit parce qu'ils leur posent des problèmes (comme le rejet social dont sont victimes les mutants X-Men), soit parce qu'ils possèdent une faille (un talon d'Achille, on y revie. t). Ce qui crée un effet de contraste particulièrement efficace. On pense à Superman, bien sûr, qui craint la kryptonite. Ou mieux à Peter Parker, l'adolescent caché sous le masque du très populaire Spiderman, qui chasse les super-vilains la nuit mais qui, le jour, n'arrive pas à s'intégrer dans son lycée. « Si le héros était trop supérieur, il serait loin de nous. Celui-ci doit aussi avoir des limites, des faiblesses et des névroses », abonde Simon Merle, philosophe spécialiste de la pop culture.

CONTES DE FÉES

Une fragilité à laquelle les adolescents, principale cible de ces films, sont particulièrement sensibles. « Beaucoup de super-héros se transforment et mutent, ils vivent des moments de profonde solitude, voire sont orphelins », abonde William Blanc. « Ce ne sont pas forcément les mécanismes de "grandiosité" qui sont utiles dans les récits de comics, mais aussi ceux permettant de construire un dialogue intime qui aide à mieux se projeter sur sa réalité. Cela permet par exemple à l'adolescent de se demander "suis-je un mutant?" », renchérit Yann Leroux, qui utilise régulièrement les récits de super-héros dans le cadre de séances de psychothérapie qu'il a mises en place avec de jeunes patients.

Les récits des comics ont d'ailleurs toujours été construits pour être plus ou moins connectés au monde de leurs lecteurs ou de leurs spectateurs. « Des éléments issus de la réalité viennent régulièrement troubler les frontières entre réel et fiction, comme



des évocations de l'actualité du moment, par exemple. C'est ce que l'écrivain et critique littéraire Roland Barthes nomme "l'effet de réel". Cela permet au lecteur ou au spectateur de s'immerger dans l'histoire», analyse Frédéric Aubrun, enseignant-chercheur en marketing et communication à l'Institut des hautes études économiques et commerciales.

Exemple emblématique: après les attentats du World Trade Center, en 2001, les comics se sont emparés du risque terroriste, une thématique au cœur des trois opus de la trilogie cinématographique « Batman », de Christopher Nolan, commencée en 2005. Des séries et des films épousent aujourd'hui des causes comme le féminisme (avec le « Wonder Woman » de 2017) ou la fierté africaine (avec les héros de « Black Panther », en 2018 et 2022). « Au départ, les super-héros s'attachaient surtout à défendre le rêve américain. À partir des années 2000, d'autres thèmes émergent, comme la résilience ou la tolérance envers ses semblables. Les super-héros sont constamment revisités afin de défendre des valeurs plus contemporaines », observe Frédéric Aubrun.

Les histoires évoluent, mais le genre perdure. « Les récits de super-héros sont des contes de fées modernes. Ils rejettent ce que nous attendons de notre société », suggère Kristin Bezio, professeure de littérature à l'université de Richmond. Et ça marche. « Quand vous lisez des récits de super-héros, vous n'êtes plus tout à fait ici ni tout à fait dans la fiction non plus, observe Yann Leroux. Ce moment de pause nous permet de réfléchir à nos propres désirs en les vivant par procuration. Cet entre-deux se révèle finalement redoutablement apaisant. » La formule est même très efficace, selon Simon Merle: « Nous avons réussi, à travers les récits de super-héros, à créer une mythologie contemporaine, un récit universel. »

Les créateurs de comics en ont conscience. Et personne n'est dupe: « Il y a un levier marketing évident à ces tendances, même s'il est déguisé », relève Frédéric Lebrun. Tout le monde sait que le principal super-pouvoir des super-héros, c'est celui de fasciner des millions de fans.

NOS SOURCES

R. Kömer et al., Psy. Bulletin (2022); D. van Tongeren et al., Frontiers of Psy (2018); Y. Kanakog et al., Nature Human Behaviour (2021); M. Betzalet et al., Sociol. Theory (2017). Retrouvez toutes nos sources sur epsilo.n.com/ou consultez les citations grâce à nos interviews réalisées par epsilo.n

DELTA/PUBLICIMAGES

Quelle Histoire logo and a grid of 48 historical and cultural figures in a stylized, cartoonish format.

VOS ENFANTS VONT ADORER L'HISTOIRE

Avec les livres Quelle Histoire, découvrez les grands personnages, époques et civilisations qui ont fait notre monde !



RETROUVEZ TOUTE LA COLLECTION SUR QUELLEHISTOIRE.FR

“Mon organisme s’est totalement adapté à l’eau”

Avant de mettre la tête sous l’eau, je dois stocker une grosse réserve d’air. Faite pour 6 litres, ma cage thoracique stocke alors 11 litres. J’ai beaucoup travaillé ma souplesse et grâce à cela mes côtes ont un grand écart permettant d’augmenter cette capacité. Comme les côtes coïncident alors la veine aortique, je peux m’évanouir à tout moment. Je m’applique donc à rester calme et relâché. Il semble que mon organisme se soit adapté à l’élément grâce aux milliers d’heures passées sous l’eau. Des tests réalisés en milieu médical mettent en évidence des similitudes avec les mécanismes que les nageurs professionnels utilisent. Les dauphins mettent en action, à chaque plongée, la diminution violente du rythme cardiaque, la concentration du sang dans les poumons et la diminution de l’irrigation des jambes et des bras, déformation de la trompe d’Eustache. Je peux, par exemple, descendre en profondeur sans avoir besoin d’équilibrer mes oreilles à la pression et sans subir de spasme réflexe.

STÉPHANE MIFSUD est un apnéiste français de 51 ans détenteur de plusieurs records du monde, dont celui d’apnée statique à 101 minutes. Il est resté sous l’eau 11 mois sans respirer, en 2009.

Extraits de propos recueillis par le site figaronautisme.com

“Je ne peux pas arrêter de me souvenir”

Il y a une chose que je ne peux pas arrêter de vous dire depuis que vous étiez enfant : vous suivez toute la journée, jour après jour, puis qu’il les ait toutes combinées sur un seul jour que vous regardez sur un appareil qui mélange au hasard toutes les scènes. Je ne fais aucun effort pour me rappeler des souvenirs ; ils ne vont se remplir, mon esprit sait, ils ne sont pas sous mon contrôle conscient, et même si j’aimerais bien, je ne peux pas les arrêter. Ils apparaissent dans ma tête, peut-être déclenchés par quelqu’un mentionnant une date ou un nom, ou quand j’entends une chanson à la radio ; que je le veuille ou non, mon esprit court droit vers ce moment. Mon souvenir ne s’arrête pas là, avec un seul souvenir ; mon esprit se précipite de l’un à l’autre, feuilletant sauvagement les jours comme s’il s’agissait de cartes dans un Rolodex.

JILL PRICE est une Américaine de 55 ans, première personne diagnostiquée hyperthymésique en 2006. Elle se rappelle chaque minute de sa vie depuis l’âge de 4 ans.

Extrait de *The Woman Who Couldn't Forget*, de Jill Price et Bart Davis, éd. Free Press, 2008 (n.c. traduit)

TÉMOIGNAGES DE SUPER-POUVOIRS



“Je visualise les nombres, je les reconnais tous”

J’aime la date de mon anniversaire parce que lorsqu’elle se visualise les nombres qui la composent, je vois leurs formes lisses et rondes comme des galets sur une plage. Cette impression immédiate de « galet » me permet de reconnaître chaque nombre premier, jusqu’à 9999. Je pense à des nombres, ça m’apaise. Les nombres sont mes amis, ils ne sont jamais loin de moi. Chacun est unique et possède une personnalité propre. Le nombre 1 est amical, 5 est curieux, 4 est à la fois timide et calme. C’est un numéro favori, sans doute parce qu’il ne ressemble. Certains sont grands et gros : 23, 667, 1019. D’autres sont

petits : 6, 13, 541. Certains sont beaux, comme 333. D’autres sont laids, comme 299. Pour moi, chaque nombre est particulier. [J] Mais, le nésthésisme est d’un type inhabituel et complexe, car les nombres m’apparaissent comme autant de formes, de couleurs, de textures et de mouvements. Le nombre 1, par exemple, est d’un blanc brillant et éclatant, comme quelqu’un qui dirige le faisceau d’une lampe torche directement dans mes yeux. 4 est un coup de tonnerre ou le son des vagues qui se brisent sur des rochers. 37 est grumeleux comme du porridge, alors que 89 me rappelle la neige qui tombe.

DANIEL TAMMET, 44 ans, est atteint du syndrome d’Asperger, une forme particulière d’autisme. C’est un hyperpolyglotte doué d’un génie des nombres : en 2004, cet Anglais a récité par cœur les 22514 premières décimales de π .

Extrait de *Je suis né un jour bleu*, de Daniel Tammet, éd. J’ai Lu, 2005

“La pression de mes jambes peut anéantir des planètes”

Corps léger, jambes aériennes. Sentir à quel point la pression de tes jambes sur le sol et le poids de ton corps tout entier sur tes métatarses peuvent fendre les pierres, anéantir les planètes et déplacer les continents. Sentir tes yeux jaillir suspendus dans l’air plus vives que celles d’un guêpard, te prendre pour l’aigle en plein vol. Ou en descente, perdre pied dans la neige et la boue juste avant de te relancer pour te sentir libre pour voler, pour hurler de rage, de haine et d’amour, au bord de la mort. Là où seuls les rongeurs les plus téméraires et les oiseaux blottis dans leur nid sous les rochers peuvent te reconnaître, eux seuls connaissent mes secrets, mes peurs. Parce que perdre, c’est mourir. Et on ne peut mourir sans avoir tout donné sans avoir éclaté en sanglots de douleur, sans se laisser blessures impossibles d’abandonner. Il faut lutter jusqu’à la mort.

KILIAN JORJÛET, 35 ans, est un champion catalan d’alpinisme et d’ultra-trail, détenteur de plusieurs records dont les 171 km de l’Ultra-Trail du Mont-Blanc en moins de 20 heures en 2022, qui lui ont valu le surnom d’« ultra-terrestre ».

Extrait de *Je cours ou mourir*, de Kilian Jornet, éd. Fayard Poche, 2020

100 000 000 000

C'est le nombre estimé de planètes dans notre Galaxie. Et jusqu'à preuve du contraire, la Terre est la seule à disposer du super-pouvoir de faire prospérer la vie.

503

C'est, en secondes, le temps qu'a mis un robot pour passer à travers les barreaux d'une prison en se liquéfiant, avant de reprendre sa forme. Un super-pouvoir lié à la capacité de son alliage métallique à se ramollir et à durcir sous l'effet d'un champ magnétique.



LES PETITS CHIFFRES DES SUPER-POUVOIRS

10 Persone n'a encore ramassé le 100 000 dollars promis depuis 1966 par une association australienne à qui ferait la preuve de dons surnaturels ou paranormaux (télépathie télékinésique voyance...). Et ce malgré de nombreux candidats

37



C'est le nombre de miracles attribués à Jésus dans la Bible. En plus de marcher sur l'eau et de multiplier les pains, il aurait apaisé des tempêtes, chassé des démons et ramené plusieurs morts à la vie.

72

C'est le pourcentage des managers qui, s'ils avaient le choix, entre voler ou être invisibles, choisiraient le premier des deux super-pouvoirs, selon un sondage mené par le magazine Forbes auprès de 7065 cadres du monde entier.

10 000 000 000 000 000

C'est, en octets, l'échelle de grandeur du corpus sur lequel le robot conversationnel ChatGPT a été entraîné. C'est du moins ce qu'il prétend lui-même quand on l'interroge sur son omniscience.

8

C'est, en centimètres, la distance sur laquelle des chercheurs ont réussi à faire bouger un objet en utilisant des ultrasons. Ils ont ainsi fait tomber une limace qu'ils pensaient invaincissable, prédisant qu'un objet ne puisse être déplacé par une longueur d'onde inférieure à sa taille.



GETTY IMAGES - SHUTTERSTOCK

1850

C'est la date de la première description du syndrome de Cotard, un trouble délirant qui fait penser aux personnes affectées qu'elles sont immortelles ou déjà mortes.

37%

C'est la proportion de Français qui pensent qu'il est possible de communiquer par la pensée. Ils sont aussi 28% à croire en la sorcellerie et 26% aux dons de voyance.



3,15

C'est, en mégajoules, la quantité d'énergie que le Laser National Ignition Facility de Livermore, aux États-Unis, est parvenu à dégager grâce à la fusion nucléaire en décembre 2022. Soit plus que les 2 mégajoules apportés pour lancer la réaction. Un premier pas majeur vers l'exploitation du super-pouvoir énergétique des atomes.

SCN9A

C'est le code du gène qui, sous l'effet de mutations, peut conduire à une absence totale de perception de la douleur, alors que les sensations tactiles sont préservées. Un super-pouvoir très rare mais au final dangereux, puisqu'il conduit à une accumulation de blessures et à une espérance de vie raccourcie.

30 à 40

C'est le pourcentage de personnes qui ressentent un apaisement de leur douleur après la prise d'un médicament placebo. L'un des plus fascinants super-pouvoirs du cerveau.

50000

C'est le nombre approximatif de personnes (des femmes, en très grande majorité), qui auraient été brûlées au Moyen Âge en Europe pour actes de sorcellerie, c'est-à-dire pour des super-pouvoirs considérés comme démoniaques.



120 000 000 000 000

C'est, en tonnes, la quantité de CO₂ que les plantes absorbent chaque année dans le monde. Capturer par photosynthèse des gaz à effet de serre en n'utilisant que l'énergie solaire et en ne rejetant que de l'oxygène, un super-pouvoir que le biomimétisme n'est pour l'instant pas parvenu à égaler.

70%

C'est la part de la population qui aurait déjà ressenti au moins une fois la sensation de déjà-vu, et ce, même si elle n'a pas un super-pouvoir de prémonition. Les scientifiques y voient un signe de fatigue ou de stress.

Super

Boum

interj. Mot puissant. Bruit classique du super-héros qui illustre la propension d'un pouvoir, surtout s'il est super, à détruire plutôt qu'à construire.

Cape

n. f. Mot paradoxal. Bout de tissu flottant au vent accroché au cou de nombreux super-héros. Alors que c'est très gênant dans les bagarres.

Imagination

n. f. Mot transcendant. Faculté propre aux humains d'aspirer à voler, lire dans les pensées, être immortels... Le super-pouvoir de ceux qui n'en ont pas.

Kryptonite

n. f. Mot désacralisant. Roche extraterrestre qui a le super-pouvoir de neutraliser les super-pouvoirs. Tout super-pouvoir a une faiblesse.

L'Iliade

n. p. Mot original. Premier comics de l'histoire, qui voit s'affronter durant la guerre de Troie les deux super-héros Achille et Hector.

Radioactivité

n. f. Mot fertile. Phénomène physique qui a engendré Hulk, Akira, Spiderman, les X-Men, une énergie immense et de considérables problèmes de pollution.

Superlatif

n. m. Méga-mot. Tentation irrésistible d'exalter la puissance des phénomènes, contre laquelle nous avons lutté dans le numéro Et à laquelle nous avons en partie succombé.

Voler

v. Mot jaloux. L'un des super-pouvoirs les plus fascinants, que de vulgaires insectes possèdent. On fantasme surtout ce qu'on n'a pas.

Marvel

n. p. Mot magique. Principal éditeur de comics qui, en toute modestie, s'est donc nommé "merveille". Ça a marché.

ABÉCÉDAIRE DES SUPER-POUVOIRS



« QUICONQUE POSSÈDE
UN POUVOIR
A PEUR DE LE PERDRE

» Chancelier Palpatine (Star Wars III, 2005)

ROMAIN NTAMACK

Rugbyman.
International français



LA QUÊTE DE L'EXCELLENCE

RELÈVE DE NOUVEAUX DÉFIS

MARQ[™]
ATHLETE

GARMIN.