

LES MOTS DE LA SCIENCE

ÉTIENNE GHYS

MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES



Verbatim

UNE COLLECTION DE PODCASTS À LIRE

Sommaire

PRÉSENTATION

03

LES ÉPISODES

05

ÉPISODE N°01 : ÉGALITÉ	05
ÉPISODE N°02 : L'ADN	09
ÉPISODE N°03 : LE MAGMA	15
ÉPISODE N°04 : EXPONENTIEL	21
ÉPISODE N°05 : MILLE POUR CENT	27
ÉPISODE N°06 : LES MOTS NUMÉRIQUES ...	33
ÉPISODE N°07 : C'EST MATHÉMATIQUE ! ...	39
ÉPISODE N°08 : ALGORITHME	47
ÉPISODE N°09 : SCIENCE	55
ÉPISODE N°10 : MODÉLISATION	61
ÉPISODE N°11 : RIGUEUR	71
ÉPISODE N°12 : COULEUR	77
ÉPISODE N°13 : C'EST CHIMIQUE !	85

Sur 40 000 doctorants en 2022, seulement cinq étudiants avec un trouble auditif poursuivaient une thèse ou une habilitation à diriger des recherches. Ce chiffre édifiant illustre l'ampleur de la tâche qui reste à faire pour favoriser l'émergence de savants parmi les personnes sourdes. L'association STIM Sourd a pointé du doigt le 1^{er} avril 2025 dans un article du Monde le manque de culture scientifique en langue des signes française.

Cortex Média et l'Académie des sciences ont souhaité développer un partenariat inédit pour contribuer à l'évolution d'une culture scientifique chez les personnes sourdes. Étienne Ghys, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences à accepter de mettre les podcasts qu'il produit sur Canal Académie, à disposition de Cortex Média.

L'objectif pour nous est de proposer une transcription et rendre accessibles les heures d'écoute produites par Étienne Ghys. Pour cela, nous proposons une éditorialisation agréable à lire et de qualité, pour que la science ne reste pas accessible à un auditoire valide seulement.



Benjamin Laurent
Directeur de la publication

L'auteur du podcast

ÉTIENNE GHYS

PRÉSENTATION



ÉTIENNE GHYS
*est directeur de recherche émérite
au CNRS. Connu pour sa recherche
en géométrie et les systèmes
dynamiques, il est secrétaire
perpétuel de l'Académie des
sciences et auteur du podcast
Petites histoires de science.*

LES MOTS DE LA SCIENCE

FICHE TECHNIQUE

RÉALISATION Étienne Ghys

SORTIE 30 janvier 2025

FORMAT Podcast

ÉPISODES 13

PAYS France

LANGUE Français
(Disponible en version audio)

PRÉSENTATION

SYNOPSIS

Les scientifiques aiment la précision dans les mots qu'ils utilisent. Alors on peut comprendre qu'ils sautent sur leurs chaises quand ils entendent des mots de science qui sont employés de travers.

Un biologiste sursaute s'il entend parler de l'ADN de la SNCF dans une émission de télévision par exemple. Un mathématicien fronce des sourcils quand il entend le mot « exponentiel » pour signifier une augmentation ? Un informaticien se sent trahi lorsqu'on laisse entendre que les algorithmes froids et inhumains sont la cause de tous les malheurs du monde. Voilà pourquoi j'ai proposé à quelques scientifiques de se « défouler » en rectifiant le sens précis de ces mots. Ils se défoulent mais c'est gentil ! C'est l'occasion d'apprendre des choses !

Épisode n°01

ÉGALITÉ

ÉPISODE N°01



“

QUEL EST LE SENS DE CE PETIT MOT ANODIN, ÉGALITÉ ?
DE CE SIGNE ÉGAL AVEC DEUX PETITES BARRES
PARALLÈLES QUE NOUS MANIONS DEPUIS L'ÉCOLE PRIMAIRE ?

”

Du signe mathématique à l'égalité femmes-hommes, en passant par la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen, le concept d'égalité est omniprésent. Mais que signifie-t-il vraiment ?

Dans ce premier épisode de la saison consacrée aux « mots scientifiques », Étienne Ghys, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, livre une chronique personnelle et éclairée, à travers l'exemple des triangles en géométrie, les multiples facettes de cette notion.

Le 12 février 2025, Hugo Duminil-Copin, mathématicien, fera une conférence à la Sorbonne sur l'égalité. Je ne sais absolument pas ce qu'il va raconter, mais je me suis dit que ce podcast pourrait servir en quelque sorte d'introduction.

$(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$. Couper un gâteau en parts égales. L'égalité, homme-femme. Quel est le sens de ce petit mot anodin, *égalité* ? De ce signe égal avec deux petites barres parallèles que nous manions depuis l'école primaire ? Ou plutôt, quels sont ses sens ?

La première idée est de consulter un dictionnaire. Celui de l'Académie commence par : *“semblable soit en nombre, en quantité, soit en nature, en qualité”*. Géométrie, figures égales, figures qu'on peut faire coïncider exactement superposables, semblables en nature, en qualité, en intensité, en valeur, droit, en parlant des personnes dont les droits et les devoirs civiques sont les mêmes. Par extension qui n'établit pas de différence, d'inégalité entre les personnes ou les choses. Personne qui a le même mérite, les mêmes droits, le même rang social qu'une ou plusieurs autres.

Lorsqu'on consulte un dictionnaire, on est bien sûr amené à utiliser d'autres mots. On voit ici que l'Académie utilise les mots semblables, superposables, coïncidés, mêmes, etc. Chacun d'entre eux est à son tour défini dans le dictionnaire en utilisant d'autres mots, qui eux-mêmes sont définis par d'autres. Comme les dictionnaires ne contiennent qu'un nombre fini de mots, il n'y a que deux solutions. Ou

bien, en suivant la chaîne des définitions, on trouve un mot qu'on a déjà consulté. Ou bien, certains mots ne sont pas définis dans le dictionnaire. La première solution est largement utilisée dans les dictionnaires. Souvent, ce n'est pas vraiment un problème. Les mathématiciens aiment la précision. Ils ont opté pour la seconde solution. Un certain nombre de symboles primitifs ne sont pas définis. C'est le cas du symbole $=$. Il va donc falloir comprendre le sens du mot égal à travers des situations où il intervient et faire émerger ce sens. Les premières lignes des premiers volumes des éléments de mathématiques de Bourbaki décident de ne pas tenter de définir le symbole $=$. C'est un signe spécifique, nous voilà bien avancés.

Restons dans le domaine des mathématiques et examinons quelques exemples. Jadis, on disait que deux triangles sont égaux, si en reproduisant l'un sur un papier calque, puis en déplaçant le papier calque, on pouvait le faire coïncider avec le second.

Voici par exemple ce qu'on trouve à la page 3 d'un livre célèbre de géométrie élémentaire par [Jacques Salomon] Hadamard publié en 1898 : *figures égales, une figure quelconque peut être transformée dans une infinité de façon dans l'espace, sans déformation, comme cela a lieu pour les corps solides usuels. On nomme figures égales, deux figures que l'on peut transporter l'une sur l'autre, en un mot deux figures égales, sont une seule et même figure en deux places différentes*. On comprend ce que cela veut dire mais des difficultés sérieuses se présentent. Ainsi, il n'y



“ **DEUX CHOSES ÉGALES À UNE MÊME
TROISIÈME SONT ÉGALES EN ELLES.
CES TROIS PROPRIÉTÉS SATISFAITES, ON
PARLE DE RELATION D'ÉQUIVALENCE ET
ON S'AUTORISE À UTILISER LE MOT 'ÉGAL'.
EXEMPLE : DEUX SALARIÉS NE SONT PAS
IDENTIQUES EN TANT QU'ÊTRES HUMAINS,
MAIS LEUR SALAIRE PEUVENT ÊTRE
IDENTIQUES.** ”

aurait qu'un seul et unique carré d'un mètre de côté et cet unique carré abstrait viendrait s'incarner par ci, par là, dans des positions différentes. Un peu comme si le carré était un individu qui se déplace. Mais que veut dire se déplacer sans déformation ?

Si on pousse cette définition un peu loin, on peut dire que tous les points sont égaux car je peux évidemment faire coïncider deux points quelconques en déplaçant l'un sur l'autre. Tous les points égaux, je ne pense pas que cette assertion aurait fait la joie de mes professeurs de maths en collège. D'ailleurs, c'est pour cette raison que la terminologie triangles égaux qui était bien pratique pourtant a été bannie de nos écoles. Le prix a payé est lourd puisqu'il a fallu introduire de nouveaux mots qui ne font pas partie du vocabulaire des élèves. On dit parfois que deux triangles sont isométriques ou encore congruents et on réserve le mot égal pour une situation caricaturale dans laquelle les triangles sont exactement les mêmes. On y gagne en précision mais on y perd en compréhension. Qui va demander à ses parents de bien couper le gâteau d'anniversaire en parts isométriques ?

À l'extérieur de l'école et du cours de maths, le mot égal reprend sa place car on le comprend bien, il n'y a pas d'ambiguïté et c'est

bien là tout ce qu'on demande à un mot. Un autre exemple : Est-ce que je peux dire que $3+2$, c'est la même chose que $1+1+3$? Pas vraiment car pour écrire $3+2$, je tape trois fois sur mon clavier alors que je dois taper cinq fois pour écrire $1+1+3$. Ce qu'on veut dire par cette égalité, c'est que ces deux choses sont égales au même nombre 5. Un peu comme notre unique carré qui s'incarnerait par ci par là en divers carrés. Le nombre 5 apparaît sous divers déguisements. $3+2$, $2+2+1$, 5, *cinquo*, *five*, etc. Alors faudrait-il inventer un nouveau mot comme l'Éducation nationale a fait pour les triangles ? Et si on interdisait de dire que $2+3=4+1$. Nous voilà donc dans une situation dans laquelle nous avons envie d'utiliser le mot “égal” dans un grand nombre de contextes différents, quitte à se permettre des abus de langage. Il faut pour ça suivre le conseil d'Henri Poincaré : “*faire des mathématiques*”, c'est donner le même nom à des choses différentes. Ce qu'il entend par là, c'est que la force des mathématiques est de déceler des situations qui n'ont a priori rien à voir, mais qui fonctionnent de la même façon au fond des choses. Extraire un fonctionnement commun et lui donner un nom, c'est un grand pas dans la compréhension. La force de presque tous les grands concepts mathématiques est de s'interpréter un peu partout. Nous utilisons les mêmes nombres pour compter des moutons, des carottes, notre âge, notre poids. C'est ce type d'abstraction qui a mené l'arithmétique et ses quatre opérations. J'utilise le même mot plus lorsque j'ajoute deux superficies ou deux poids et pourtant, il s'agit d'opérations différentes.

Revenons au mot *égal*. Il y a fort longtemps que les mathématiciens, les logiciens et les philosophes ont réfléchi et ont extrait du mot égal les propriétés qui le caractérisent. Toute chose est égale à elle-même. Si une chose est égale à une autre, cette dernière est aussi égale à la première. Deux choses égales à

une même troisième sont égales entre elles. Ces trois propriétés sont satisfaites, on parle de relations d'équivalence et on s'autorise à utiliser le mot *égal*. Cela permet de classer en regroupant les grandeurs par paquet de choses égales qu'on appelle souvent des classes. Exemple : deux salariés ne sont pas identiques en tant qu'êtres humains, mais leurs salaires peuvent être identiques. Deux personnes ayant le même poids n'ont pas pour autant les mêmes couleurs d'yeux ou de cheveux, etc. Deux triangles superposables par un déplacement du plan ne sont pas nécessairement les mêmes. Deux Français peuvent avoir les mêmes trois premiers chiffres dans leur numéro de sécurité sociale, c'est-à-dire le même sexe et la même année de naissance, et pourtant être des Français différents.

La Déclaration des droits de l'homme et du citoyen en 1789 commence par : *article premier, Les Hommes naissent et demeurent libres et égaux en droits*. Les révolutionnaires avaient les idées claires, jamais ils n'ont prétendu que tous les hommes sont identiques. Ils ont affirmé qu'ils sont égaux en droits, autrement dit, ils précisent ce qu'il faut entendre par ce terme. Le droit est le même pour tous. Auparavant, les

classes de la relation avoir les mêmes droits étaient nombreuses. Le clergé, la noblesse, le tiers état n'étaient pas régi par les mêmes lois. La Déclaration affirme qu'il n'y en a plus qu'une. Il faut lire que deux hommes sont égaux s'ils sont astreints aux mêmes lois. Il ne s'agit pas, bien sûr, d'une égalité stricte.

Finalement, les dictionnaires ne sont pas si mauvais. Et il ne faut pas s'inquiéter si on trouve beaucoup de définitions pour le mot égal. Tant qu'il s'agit d'une relation d'équivalence, et qu'on a bien expliqué la définition dans chaque cas particulier, il n'y a pas grand risque à utiliser un même mot pour des choses différentes. Au contraire... ●

FIN DU 1^{ER} ÉPISODE

Séance d'ouverture de l'assemblée
des États généraux, 5 mai 1789
Peinture d'Auguste Couder, 1839.



Épisode n°02

L'ADN AVEC MAXIME SCHWARTZ



MAXIME SCHWARTZ

est biologiste moléculaire. Professeur émérite à l'Institut Pasteur, il a été directeur général de cette institution et directeur de recherche au CNRS. Depuis 1987, il est correspondant de l'Académie des sciences.

Dire d'une caractéristique qu'elle est dans nos gènes ou dans notre ADN, ou encore qualifier une spécificité d'un parti politique comme son ADN, est-ce correct ? Qu'est-ce que l'ADN, de son vrai nom acide désoxyribonucléique ?

Dans ce deuxième épisode de la saison consacrée aux « mots scientifiques », Étienne Ghys, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences reçoit Maxime Schwartz, biologiste et ancien directeur de l'Institut Pasteur pour discuter de ce mot et de ses fausses interprétations.

ÉTIENNE GHYS Je suis avec Maxime Schwartz, biologiste et ancien directeur de l'Institut Pasteur. Nous allons discuter d'un mot qu'on entend partout, que les journalistes, les médias et même les gens que l'on rencontre dans la rue utilisent à tort et à travers : ce mot est ADN. Pourrais-tu, Maxime, me donner un ou deux exemples d'usages de ce mot qui te rend malheureux ?

MAXIME SCHWARTZ Dans une journée, si on écoute la radio, si on regarde la télé, il est utilisé à plusieurs reprises. On parle d'abord de l'ADN de quelqu'un. On dit que c'est dans son "ADN" d'agir d'une telle façon, de réagir face à tel comportement. Ou bien, on l'applique à des entités ; on dit : tel parti politique, c'est son ADN d'être antisémite, par exemple. Ou bien tel pays, telle société... Il est employé absolument tout le temps, et jamais à bon escient.

Explique-nous ce que signifie ADN, et pourquoi ça n'a pas de sens de parler de l'ADN d'un parti politique.

L'ADN est une molécule compliquée qui se trouve dans les chromosomes de chaque être vivant. C'est une très grande molécule qui contient le code transmettant les propriétés héréditaires de cet être. Cela se présente sous la forme de de très longues chaînes – comme un

collier – constituées de plus petites molécules, ces fameuses bases nucléiques qu'on a l'habitude de désigner par le terme ATGC¹. L'ordre d'apparition de ces petites molécules sur la chaîne fait le code qui détermine les propriétés héréditaires. Ces deux longues chaînes s'enroulent l'une autour de l'autre pour former la fameuse double hélice.

Mais les symboles qui sont écrits sur l'un des brins de la chaîne sont en relation avec les symboles qui sont sur l'autre brin de la chaîne. Donc il y a un peu du duplication d'informations.

Il se trouve que dans cette association des deux gènes, ce qui joue un rôle très important, est le fait que ces éléments, les fameuses bases nucléiques ATGC, peuvent s'apparier l'une à l'autre d'une façon spécifique. Quand dans une chaîne il y a un A, en face il va y avoir un T. Et quand dans une chaîne, il y a un G, en face, il va y avoir un C. Ce qui fait que, lorsque l'on connaît la succession des ATGC sur l'une des chaînes, cela détermine la succession sur la suivante. Cela explique le phénomène de réplication. Dès qu'une cellule se divise, elle obtient au bout du compte deux molécules d'ADN identiques à celle du début. Puisqu'il va se synthétiser sur chacune des chaînes, la chaîne complémentaire, il va donc restituer

.....

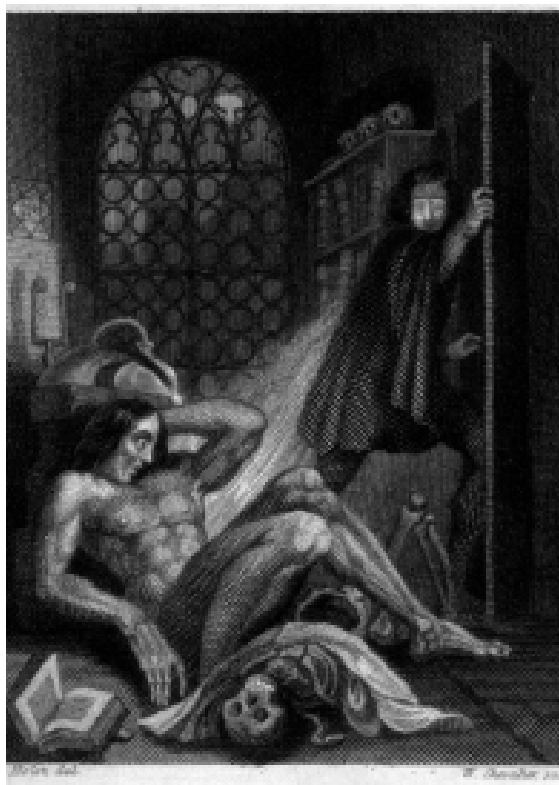
1. Acronyme utilisé pour nommer les quatre bases chimiques présentes dans une molécule d'ADN : Adénine, Thymin, Guanine et Cytosine. (Toutes les notes sont de la rédaction de Cortex Média.)



une double chaîne identique à celle des parents.

Donc chacune des deux chaînes est en quelque sorte une photocopie en négatif de l'autre. Nous savons maintenant ce qu'est l'ADN. Peux-tu me dire pourquoi mon ADN n'est pas le même que celui de mon fils, ou pourquoi mon fils ne possède pas le même ADN que ma femme ?

Il faut savoir que tout le monde n'a pas exactement le même ADN. Au cours des générations des mutations se sont accumulées, créant des différences d'un être humain à un autre – et ce serait vrai pour d'autres espèces vivantes.



Frontispice de la nouvelle édition de *Frankenstein ou le Prométhée moderne* (Mary W. Shelley), 1831. Gravure de William Chevalier, d'après un dessin de T. von Holst

La créature du Dr. Frankenstein s'adresse ainsi à son géniteur :

"Croyez-moi, Frankenstein : j'étais porté au bien ; mon âme respirait l'amour de l'humanité ; mais ne suis-je pas isolé, misérablement isolé dans la nature ? Vous m'abhorrez, vous qui êtes mon créateur ; quel espoir puis-je avoir en vos semblables, qui ne me doivent rien ? Ils me méprisent et me haïssent. [...] Partout je vois le bonheur, dont je suis seul irrévocablement exclus. J'étais bienveillant et bon ; le malheur m'a rendu semblable au génie du mal."

(Tome 2, chap. 09 – Trad. de Jules Saladin, 1821.)

Si on se penche spécifiquement sur le cas de figure que tu me présentes, tous les chromosomes fonctionnent par paire au sein de chaque cellule. Alors, tous les enfants hérite pour chaque cellule d'un chromosome issue du père et d'un chromosome issue de la mère.

On dit souvent que si on connaît l'ADN d'un enfant, on saura ce qu'il deviendra.

Cela rejoint l'usage qui veut c'est dans l'ADN de x ou y de se comporter de telle ou telle manière, etc. Il faut bien voir que chez un individu, il y a des caractéristiques strictement héréditaires codées dans l'ADN. Si on réfléchit notamment à la couleur des yeux ou des cheveux, elle résulte de l'association des gènes reçus de ses parents. Aujourd'hui, on peut déterminer quels sont les gènes intervenant sur la couleur des yeux ou des cheveux. Si on séquence l'ADN d'une personne – ce qui se fait désormais extrêmement rapidement – on peut le savoir. Mais même dans les caractéristiques physiques, certaines choses ne sont pas strictement héréditaires. Mettons, si on prend la taille d'un individu, elle résulte effectivement en partie de l'hérédité. C'est sûr, avec des parents de petite taille, on a moins de chance d'être grand physiquement. Si en plus, les données relevant de ce que l'on appelle l'acquis sont prises en compte (c'est-à-dire l'alimentation, toute une série de comportements, les environnements auxquels on a été exposé, etc.), on se rend compte qu'une caractéristique physique n'est pas entièrement déterminée par l'ADN, la plupart du temps. Ajoutez à cela les caractéristiques intellectuelles, psychologiques, et la chose devient beaucoup plus difficile à évaluer.

Jadis, on parlait du gène de l'alcoolisme.

Effectivement, mais en fait on ne sait pas exactement. Il y a probablement une composante héréditaire, mais il y a aussi une composante très importante de l'acquis. Prenons le cas de la tuberculose. Pendant

des années, on a considéré qu'il s'agissait d'une maladie héréditaire : si les parents étaient malades de la tuberculose, leurs enfants en seraient malades également. Puis au début du XX^e siècle, on a compris que la tuberculose était dû en réalité à un microbe, et que si les enfants souffraient de cette infection, c'était tout simplement que les parents leur avaient transmis le virus.

L'ADN n'est donc pas un déterminant strict du futur d'un individu ; savoir mesurer la proportion de l'inné et de l'acquis est une question débattue depuis des siècles. Où en est-on aujourd'hui ?

On progresse. On arrive à trouver des gènes qui ont un rôle, comme les gènes de prédisposition aux maladies. Pour la tuberculose, le point essentiel est la transmission des parents vers les enfants, ou des grands-parents vers les enfants. Mais on a aussi mis en évidence des gènes qui prédisposent à la tuberculose, c'est-à-dire qu'il y a des gens qui vont être plus sensibles que d'autres à l'assaut des bactéries.

Il y a quelques années, il y avait une boîte privée américaine qui proposait pour quelques dollars d'analyser notre ADN. Il t'envoyait un grand document dans lequel on te donnait ton origine géographique, les maladies par lesquelles tu pourrais peut-être être contaminé. Je crois que c'est devenu interdit aujourd'hui. Qu'est-ce que tu penses de ça ? Est-ce un beau cadeau qu'on peut faire à des parents qui viennent d'avoir un enfant ?

C'est un des gros soucis depuis qu'on sait faire des tests génétiques. Faut-il les autoriser ou pas ? Des gens risquent de vouloir faire un avortement si tel ou tel problème est détecté. On le fait pour la trisomie 21 depuis longtemps, mais faire une analyse pour une maladie grave telle que la maladie de Huntington, qui se dé-



Dilution d'une sonde lumineuse dans une solution aqueuse au pH neutre sous éclairage UV

clare à quarante ou cinquante ans, c'est plus problématique. Cela dit, ne pas dire est aussi un problème, c'est une maladie héréditaire et il est tout de même important de savoir pour la bonne santé des enfants...

“

SI LES DONNÉES RELEVANT DE CE QUE L'ON APPELLE L'ACQUIS SONT PRISES EN COMPTE (C'EST-À-DIRE L'ALIMENTATION, TOUTE UNE SÉRIE DE COMPORTEMENTS, LES ENVIRONNEMENTS AUXQUELS ON A ÉTÉ EXPOSÉ, TEC.), ON SE REND COMPTE QU'UNE CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE N'EST PAS ENTIÈREMENT DÉTERMINÉE PAR L'ADN, LA PLUPART DU TEMPS. ”





Si cette approche est contredite depuis longtemps par les progrès de la médecine, Zola en fit la colonne vertébrale de la saga des Rougon-Macquart (1871-1893), érigeant la théorie en thème littéraire. L'auteur associe toutefois la dégradation morale à l'environnement de ses personnages : l'industrialisation, le capitalisme triomphant et la classe ouvrière minée par la pauvreté dans le contexte de la révolution économique du Second Empire.

Quelle est la situation juridique aujourd'hui en France ?

Je crois qu'on ne peut pas, mais je ne connais pas le détail de la situation juridique. Je voudrais préciser néanmoins que les tests génétiques sont très utiles dans la police scientifique. Dans certains cas, on peut déterminer la région d'origine du coupable par exemple, comme tu as mentionné l'idée qu'on puisse savoir de quelle partie du globe on vient. Ce sont des choses qui peuvent être effectivement collectées par la police scientifique à partir de l'ADN.

Je me souviens d'un journaliste qui disait que l'on pouvait penser l'ADN un peu comme une télécommande. Un système compliqué comme téléguider une voiture : la voiture se promène dans son milieu avec des montées, des descentes, et avec ta télécommande, tu as accès à une partie du fonctionnement du véhicule. Que penses-tu de cette image ?

Cela me paraît raisonnable. Mais il faut quand même parler de l'utilisation de l'ADN pour des entités. Il est absurde de dire d'un parti politique qu'il est dans son ADN de faire telle ou telle chose, un parti politique n'a pas d'ADN. Des individus peut-être, mais pas une entité. Ce qui est plus absurde encore, c'est qu'il y a d'autres façons de d'exprimer rigoureusement la même idée. On peut dire que c'est une caractéristique essentielle par exemple, ou bien que c'est une valeur fondamentale, indissociable d'eux. Il y aurait trente-six manières de formuler la même phrase sans utiliser ce sigle ADN, qui est totalement non approprié.

Penses-tu que les gens se camouflent derrière un mot scientifique ?

Il y a des modes, ça fait bien de dire : *“c'est dans l'ADN de...”* parce que ça donne à penser que l'on sait ce qu'est l'ADN, alors que les trois-quarts des gens ignore que cela signifie “acide désoxyribonucléique”. Je ne pense pas qu'ils veulent se cacher particulièrement, c'est une mode qui va probablement disparaître

d'ici quelques années.

Quel est selon toi le degré de connaissance de ce que tu nous as raconté aujourd'hui, dans la population générale ?

Je pense pas qu'il soit très élevé, je ne saurais pas donner de proportion. Je pense toutefois que si on leur dit : *“C'est dans l'ADN de...”*, les gens comprennent une référence à l'hérédité. Une fois, j'avais été au Théâtre du Rond-Point pour un spectacle de Jean-Louis Barrault et Madeleine Renaud – ça date de pas mal d'années aujourd'hui, il se trouve que dans le foyer de ce théâtre, il y avait une molécule d'ADN installée en guise de lustre. Pour tester le serveur, je lui ai demandé : qu'est-ce que c'est ce truc là-haut, et il m'a répondu, c'est la molécule de la vie. Ce n'était pas mal répondu ! ●

FIN DU 2^E ÉPISODE

Épisode n°03

LE MAGMA AVEC CLAUDE JAUPART



CLAUDE JAUPART

est un géophysicien, professeur émérite à l'université Paris-Diderot et directeur de l'Institut de physique du globe de Paris. Membre de l'Académie des sciences depuis 2008, il est l'un des spécialistes mondiaux des risques naturels d'origine géologique.

Quand un volcan entre en éruption, est-ce de la lave ou du magma qui jaillit du cratère ? Quelle distinction faire entre les deux ? Si dans le langage courant, le « magma » évoque souvent un mélange confus et informe – qu’il soit sonore ou intellectuel –, en géologie, il désigne au contraire une matière d’une pureté remarquable.

Dans ce troisième épisode de la saison consacrée aux mots scientifiques, Étienne Ghys, Secrétaire perpétuel de l’Académie des sciences, reçoit le géophysicien Claude Jaupart, membre de cette même Académie, pour explorer le terme magma avec précision.

ÉTIENNE GHYS Je suis face à Claude Jaupart, géophysicien, qui s’intéresse à la Terre en général, en particulier à tout ce qui est à l’intérieur de la Terre et qui ne nous est pas accessible. Ensemble nous allons discuter d’un mot scientifique, souvent malmené dans le langage courant, ce mot est magma. Comme je suis mathématicien, je vais commencer par t’expliquer ce que ce mot signifie en mathématique. Un “magma”, c’est la structure algébrique la plus pauvre de toutes. Ce n’est rien du tout, un ensemble muni d’une opération interne. Si on a deux éléments, on n’en produit un troisième et rien de plus. Aucune propriété, une forme informe en quelque sorte. Cela correspond-t-il un peu à l’idée que tu te fais du magma ?

CLAUDE JAUPART C’est ce qui est usité, en cela c’est étonnant car en sciences de la Terre, sa définition est extrêmement précise : elle relève de ce qui recouvre des liquides. On sait exactement dans quelles conditions on peut employer ce mot-là, même s’il y a parfois des confusions que l’on corrige. Dans le langage courant, un “magma” a une définition tout à fait différente qui n’a rien à voir avec le terme géologique. Il est assez étonnant de voir que ces deux acceptations du mot coexistent depuis très longtemps et j’ignore d’où ça vient.

Peut-on dire que le langage courant a volé le

sens scientifique, ou inversement ?

C’est un peu plus compliqué que cela. Ce mot, qui a une origine grecque puis latine [μάγμα : *magma*] désigne originellement le résidu solide d’un mélange. L’exemple le plus simple est celui de la lie qui s’accumule au fond d’une bouteille de vin. La lie est du magma, au sens étymologique du terme. Et le géologue fait un contre-sens puisque le magma n’est pas le résidu solide d’un liquide compliqué, il s’agit au contraire du liquide qui s’extraie d’un solide.

Qui s’extraie d’un solide, ou est-ce un solide qui se liquéfie ?

C’est un solide qui se liquéfie. En géologie, on sait que les solides ne fondent jamais complètement, sauf dans des conditions extrêmement particulières. La fusion est partielle, on a un mélange de solide et de liquide, et ce liquide est le magma.

Cela veut dire que dans le liquide, il y a des petits bouts de solide ?

Parfois. Le magma est en principe le liquide extrait d’un solide, il peut porter avec lui quelques cristaux, c’est là que la géologie est moins précise que les mathématiques. On peut autoriser, tant qu’il reste un peu de cristaux dedans, que cela reste du magma. Ces petits cristaux forment un ensemble cohérent ayant des propriétés mécaniques bien définies à



grande échelle. Une fois les minéraux et les cristaux fondus, ils disparaissent complètement. Tu peux avoir parfois quelques petits résidus, mais en géologie on ne va pas te dire qu'un magma reste appelé comme tel tant qu'il y a moins ou plus de 0,1% de solide, il reste toujours des petits bouts.

Dans l'imaginaire collectif, le magma est ce qu'il se trouve dans les profondeurs de la Terre et que l'on voit parfois sortir par les volcans.

Ce qui sort d'un volcan n'est pas du magma, mais de la lave. C'est là que l'on fait la différence. Il est important de faire la différence, parce que le géologue ne voit pas le magma. Il peut le créer en laboratoire en fondant une roche, mais le magma naturel ne peut être vu car par définition, il reste en profondeur. Alors, pourquoi faire la différence ? Lorsque l'on est sur le terrain, il y a une distinction très nette entre une roche qui a été magmatique, qui va être cristallisée à petite échelle et qui donne un assemblage plus ou moins homogène – un granite, par exemple. C'est le résultat d'un magma qui a créé ces éléments, qui a fait des cristaux et qui donne l'impression de voir une roche homogène.

Il y a quelques années maintenant, je suis descendu très profondément dans une mine de charbon, à 1500 mètres de profondeur je crois. Ce qui m'entourait était du charbon solide. Penses-tu qu'il y avait du magma ?

Ah non ! Le charbon, d'abord c'est solide, et puis c'est une roche. C'est souvent interstitiel avec d'autres roches ; il y a des filons de charbon, l'extraction du charbon est d'ailleurs difficile puisqu'il faut extraire les zones où il y a du charbon par rapport à d'autres secteurs où il n'y en a pas, ce qui cause souvent des accidents. Mais il est bien question d'une roche. Il faut savoir que, sur la Terre, il n'y a pas de profondeur marquant l'apparition du magma en tout endroit de la Terre. Le magma n'existe que dans des endroits extrême-

ment particuliers de la Terre, il n'est formé que lorsqu'il y a des mouvements internes de la planète localisés à ces endroits. Si je descends sous Paris, j'ai beau descendre à 40, 50 km, je n'y trouverai pas de magma. Je peux encore descendre très profondément, je finirai par atteindre du liquide. Et lorsque j'aurais atteint le noyau terrestre, qui se trouve à plus de 3000 km de profondeur, nous ne parlons plus de magma. La fusion sous la Terre se produit dans la grande majorité des cas de manière très différente de la fusion que l'on réalise de manière courante chez soi. Chez soi, pour former du liquide, on prend un solide et on chauffe. Mais au centre de la Terre, ça ne se passe pas comme ça, c'est en décomprimant qu'on fait du liquide car la Terre est faite de roches très denses, donc lorsqu'on en voit en France, la pression augmente.

C'est de l'ordre de cinq kilos par décimètre cube ?

Ce chiffre est celui de la densité moyenne de la Terre, ce n'est pas pareil. La densité des roches est plutôt de trois kilos par décimètre cube en moyenne. Le noyau de la Terre est typiquement d'une densité de 12, et de 5 en moyenne. La moyenne est déterminée lorsque l'on utilise le champ de pesanteur de la planète pour calculer une densité standard, c'est de cette façon que l'on a su que la densité moyenne à l'intérieur de la Terre était très différente de celle observée à la surface. Il fallait forcément qu'à l'intérieur il y ait quelque chose de bien.

La densité du magma est-elle de l'ordre de trois kilos par litre, comme celle des roches ?

Le magma est plus léger pour qu'il monte, qu'il s'extrait. Lorsque je fonds une roche, je vais obtenir un mélange de solide et de liquide, ce liquide interstitiel va s'extraire tout simplement par la poussée d'Archimède grâce à sa légèreté.

Il lui faut donc un espace pour passer ?

S'il s'est formé sur une épaisseur suffisam-

Éruption du Piton de la Fournaise sur l'île de La Réunion, le 21 décembre 2021.



“ UNE ROCHE MAGMATIQUE OU UNE LAVE, LES DEUX SONT TRÈS DIFFÉRENTES.

ment importante, la différence de pression entre la colonne de liquide et la colonne de solide est telle que les roches se fracturent. Les liquides arrivent à la surface parce que plus légers et produits sur des volumes suffisamment importants pour qu'il y ait ces différences de pression.

Et quand ils arrivent à la surface, cela donne un volcan ?

Cela créer des volcans à l'arrivée à la surface, mais sous la forme de lave. Attention aux mots ! Je suis géologue, j'arrive sur le terrain, je vois une roche, et j'appelle cela une roche magmatique ou une lave, les deux sont très différentes. Une roche magmatique a été en profondeur et elle y est restée jusqu'au moment d'en être dégagée par l'érosion. Tandis que la lave est à proprement parler un liquide à la surface. Lorsque le magma sort à la surface, il porte des petites bulles de gaz, c'est ainsi que l'on peut voir se former des vésicules dans la lave. La lave se met en place à température ambiante – qui est typiquement de zéro degré – elle se refroidit extrêmement vite et se fige comme une pierre ponce. Ce n'est donc pas le même type de cristaux qui se forme en profondeur

UNE ROCHE MAGMATIQUE A ÉTÉ EN PROFONDEUR ET ELLE Y EST RESTÉE JUSQU'AU MOMENT D'EN ÊTRE DÉGAGÉE PAR L'ÉROSION. TANDIS QUE LA LAVE EST À PROPREMENT PARLER UN LIQUIDE À LA SURFACE. ”

Maintenant, peux-tu nous dire quelles utilisations du mot magma dans le langage courant ne te semblent pas appropriées ?

Dans le langage courant, le nom du magma est utilisé pour décrire des mélanges hétérogènes, confus, diffus, et peu ragoûtants de manière générale. On parle entre autres de magma d'idées lors de débats d'où aucune idée cohérente ne se dégage. On parle de magmas sonores lorsque des sons discordants sont mélangés. Alors que pour le géologue, le magma est quasiment l'entité la plus pure qui soit, le liquide qui a modelé les plus belles roches. Entendre le mot *magma* employé pour décrire finalement des ensembles peu recommandables est une chose manifestement assez péjorative et choquante pour le géologue.

C'est finalement assez proche du sens



mathématique : c'est une chose très peu structurée qui a juste une loi interne, assez proche d'autres mots tels que "chaos". On peut aussi parler de chaos en géologie, le terme chaos étant des roches disposées de manière totalement désordonnée.

Le chaos est en un certain type de formation présente à la surface de la Terre. À savoir, tu as des roches mélangées par l'érosion qui se retrouvent mélangées à du sable et qui finissent par former une seule entité. Des centaines

de millions d'années plus tard, elles ont eu le temps de te donner une seule roche. En général, c'est ce que l'on appelle une brèche. Tu y retrouves mélangées des particules qui n'ont rien à voir les unes avec les autres, avec des origines totalement différentes. L'ensemble existe, mais c'est un ensemble tellement hétérogène qu'il n'y a aucun sens à essayer de déterminer qu'elles en sont les différentes parties. Alors qu'avec un magma, tu sais parfaitement d'où il vient, comment il a cristallisé, son trajet peut être étudié de manière parfaite.

“ D'UN POINT DE VUE SCIENTIFIQUE, LE MAGMA EST UNE CHOSE QUASI PARFAITE, BIEN HOMOGÉNÉISÉE. VOIR CE MOT EMPLOYÉ POUR QUALIFIER DES EMSEMBLES AUSSI MOCHES QUE CRITIQUABLES A DE QUOI DÉSOLER LE GÉOLOGUE QUE JE SUIS. ”

Il y a aussi d'autres mots, comme le mot *tohu-bohu* qui évoque également ce mélange informe, mais ça on ne l'emploie pas en géologie.

Ah non, le *tohu-bohu* n'est pas un terme géologique.



Illustration d'André Riou pour l'édition originale du *Voyage au centre de la Terre* de Jules Verne, 1864.

Une musique ou un son qui est un magma, peut-on l'approcher de ce qu'on appelle le bruit blanc ?

Non, parce qu'on ne distingue pas les différentes composantes dans le bruit blanc. Alors qu'en parlant de magma, on sent bien que c'est dans le liquide qu'on retrouve ces parties différentes des autres, un peu molles. Tu ne sais trop comment les caractériser, mais elles se distinguent de suite.

Quel conseil donnerais-tu à l'Académie française, qui régit notre langue, pour corriger le sens du mot magma ?

Je ne suis pas sûr que je donnerais des recommandations. Je dirais simplement qu'il faut faire attention à ne pas laisser dériver ces mots vers des termes trop péjoratifs, c'est insultant pour la géologie et un brin dégradant. Du point de vue scientifique, le magma est une chose quasi parfaite, bien homogénéisée, qui joue un rôle essentiel dans la Terre. L'étude des magmas est essentielle à la géologie, et voir ce mot utilisé pour qualifier des ensembles aussi moches que critiquables a de quoi désoler le géologue que je suis.

Quelle musique pour illustrer le magma ?

J'avais pensé à un groupe qui s'appelle Magma - pourquoi ils ont choisi ce mot, je n'en ai pas la moindre idée. Mais c'est un groupe qui existe depuis très longtemps, très intéressant, avec des musiciens aux techniques absolument parfaites et un langage musical très particulier. Le batteur s'appelle Vandair, il est le fils d'un célèbre pianiste de jazz français du même nom, Maurice Vandair...

Tu dirais que cette "musique magma" est un peu désordonnée, ou au contraire qu'elle est structurée, parfaite pour les géologues ?

Elle est très structurée, et il est par ailleurs difficile aux musiciens d'y jouer. Je ne suis pas du métier, mais je trouve personnellement cette musique très structurée. C'est là

où on retrouve cette espèce d'ambiguïté qui traîne pour ce mot, qui est à la fois dans certains cas quelque chose de quasiment horrible de mélanger, puis quelque chose d'assez pur de l'autre côté. Donc, on se retrouve là, à la croisée des chemins. C'est assez étonnant.

C'est peut-être un mot pour conclure, le géologue s'intéresse à des choses finalement pas très loin de nous, à quelques kilomètres sous nos pieds, par essence inaccessibles. Est-ce un charme de la science, ou au contraire un peu terrifiant d'étudier des objets qu'on ne verra jamais ?

Pour moi, c'est ce qui rend les choses intéressantes, car je sais que je ne pourrais probablement jamais voir certaines roches mais si je peux deviner, étudier leurs propriétés et déterminer les conséquences qu'elles provoquent sans pouvoir les voir, c'est ce qui fait finalement la beauté de la Science. Il n'est pas obligé de toucher et de voir pour comprendre.

As-tu lu pendant ton adolescence le *Voyage au centre de la Terre* de Jules Verne ?

Bien sûr ! C'est un roman magnifique, mais totalement faux au niveau scientifique.

Ils sortent par un volcan et arrivent sur un rocher qui gicle du fond de la Terre.

Mais le fait qu'ils puissent se promener dans des galeries menant quasiment jusqu'au centre de la Terre est impossible, la pression exercée à cette profondeur ne le permet pas. Mais c'est magnifique, toute ma jeunesse a été imprégnée par Jules Verne ; c'est aussi une des raisons pour lesquelles je suis devenu scientifique, à mon sens.

Pour conclure, on va retenir que le magma est l'un des produits les plus purs qui puissent exister. ●

FIN DU 3^E ÉPISE

Épisode n°04

EXPONENTIEL AVEC CÉDRIC VILLANI



CÉDRIC VILLANI

est un mathématicien, professeur à l'université Lyon-1 et directeur de l'Institut Henri-Poincaré à Paris. Spécialiste de l'analyse mathématique, il est décoré de la médaille Fields en 2010 et élu membre de l'Académie des sciences en 2013.

*Aujourd'hui, tout semble exponentiel : les prix, les données, les crises...
Mais savons-nous vraiment ce que ce mot signifie ?*

Le mathématicien Cédric Villani nous éclaire sur la véritable nature de la fonction exponentielle, bien loin de son usage approximatif dans le langage courant. Pourquoi est-elle si souvent réduite à une simple idée de croissance ? Quelle est l'histoire de sa filiation dans l'histoire des sciences ? De Malthus, qui redoutait une explosion démographique, au rapport Meadows de 1972 sur les limites de la croissance, dont le premier chapitre s'intitule 'La fonction exponentielle', l'intuition de cette notion est « fondamentale » pour comprendre les évolutions du monde.

ÉTIENNE GHYS Je suis avec Cédric Villani, mathématicien, que tout le monde connaît, qui a choisi comme mot très souvent mal employé, le mot exponentiel.

CÉDRIC VILLANI Le mot *exponentiel* est entendu un peu partout ici et là, ça semble être devenu une sorte de synonyme pour grand, très grand ou croissant. Une chose que l'on n'arrive pas à se représenter, ou qui est effrayant par le seul fait que ce soit en croissance. Comme si *exponentiel* était un truc que l'on détient un peu, puis beaucoup, puis plus du tout, et ainsi de suite. Ce mot a pourtant un sens précis. *Exponentiel* a été inventé dans un chapitre fascinant de l'histoire des sciences. On peut donner deux filiations à l'exponentiel ; d'une part, au cours de l'étude des phénomènes de croissance, que ce soit la croissance économique ou la croissance des populations. Et d'autre part, sur le plan mécanique, il s'agit d'une façon de résoudre des problèmes de multiplication, de remplacer des multiplications par des additions. On peut la voir de plusieurs façons, mais elle a des propriétés remarquables, et magiques. Magiques et très importantes, c'est la dévaluer complètement, la vider de son sens que de juste dire que de la réduire au champ sémantique de la grandeur.

Explique-nous ce qu'est l'exponentielle.

Il y a plusieurs façons d'aboutir à l'exponentielle, mais en somme elle est un signal, une fonction : à x on associe y , y est égale à l'exponentielle de x . Ce même x a une propriété extraordinaire, quand il avance d'une quantité fixée, y est multiplié par cette même quantité. Autrement dit, si j'ajoute un truc à la variable, le résultat va être multiplié par une quantité fixée. C'est en cela que cette fonction est assez extraordinaire, on peut même se demander comment une chose pareil peut exister. De façon très claire, il n'y a qu'un certain profil très particulier de fonctions qui permet d'en arriver là, ce sont les fonctions exponentielles.

Je vais ajouter qu'il est possible de multiplier par une quantité fixée qui n'est pas forcément plus grande que 1 ; c'est-à-dire que l'exponentielle peut être aussi une décroissance.

Elle peut absolument être décroissante. Admettons que que l'on ajoute 1. Ce qu'on regarde est un signal qui dépend du temps, mettons que ce soit une mise à jour toutes les heures. Un signal exponentiel est par conséquent un signal qui sera divisé chaque heure par deux, c'est donc exponentiellement décroissant. Évidemment, au bout d'une heure il sera divisé de moitié, mais au bout de dix



“ **AU DÉPART, ELLE CROÎT DE FAÇON
RAISONNÉE, COMPRÉHENSIBLE.
MAIS SUR LE LONG TERME, ÇA ÉVOLUE
D'UNE FAÇON INCOMPRÉHENSIBLE
ET INARRÊTABLE. VOILÀ CE QU'EST
L'EXPONENTIELLE.**

heures, ça aurait été divisé par mille. L'effet cumulé sera extrêmement petit, en définitive. Réciproquement sur une exponentielle croissante, admettons ça double tous les jours : j'attends, un jour, ça va être multiplié par 2. J'attends dix jours, le chiffre aura multiplié par mille de puissance 10, grosso modo. Il y a deux exercices célèbres associés à l'exponentiel. Voici le premier : *dans une mare, des nénuphars prolifèrent très vite. Au début, il y a seulement un nénuphar. Chaque jour, la surface des nénuphars est multipliée par 2, ils croissent. Au terme de trente jours, la mare en est entièrement recouverte. Combien de temps at-il fallu pour que la moitié de*

la mare soit envahie ? Et bien d'abord, que se passe-t-il spontanément dans le cerveau ? À première vue, on en déduit qu'il faut trente jours pour couvrir l'intégralité de la surface du plan d'eau. Prenons alors la moitié de 30, on obtient 15 jours, la mare a donc été recouverte de moitié par les fleurs en quinze jours. C'est presque automatiquement la connexion qui se fait dans le cerveau, la linéarité. Mais

” en y réfléchissant une seconde fois, on se dit que non. Si une certaine surface est recouverte au bout de quinze jours, au seizième jour le double de cette surface sera couverte. Et donc, la mare se retrouverait couverte intégralement en un jour. En vérité, la réponse à ma question est vingt-neuf jours. Si en trente jours, toute la surface est envahie, en vingt-neuf la moitié du plan d'eau a été couverte. En relisant l'énoncé, on se dit que s'il suffit d'un jour pour doubler, c'est simple. Posons le problème dans la durée et il devient difficile à imaginer. C'est toute la difficulté de comprendre la fonction exponentielle. Au départ, elle croît de façon raisonnée, compréhensible. Mais sur le long terme, ça évol-

ÉPISODE N°04



Victoires d'Amazonie (*Victoria amazonica*),
nénuphars géants d'Amazonie couvrant un
étang du Rio Aritau, près de Manaus au Brésil.

ue d'une façon incompréhensible, inarrêtable. Ça commence d'une façon apparemment ap-
privoisée et ensuite la machine s'emballle. Voilà ce qu'est l'exponentielle. La deuxième
histoire, c'est celle de l'échiquier. C'est l'his-
toire d'un sage dans l'Antiquité, qui a accompli
quelque chose de merveilleux pour la nation
et son sultan. Le prince lui demande : *“Que
veux-tu pour récompense ?”* Le sage malicieux
lui répond : *“Écoute, je me contente de peu, je suis
un homme simple, aussi voici ce que je te propose :
prenons un échiquier. Sur la première case de l'échi-
quier sera posé un petit grain de riz. Sur la deuxième
case, deux grains de riz, sur la troisième case, quatre
grains de riz, etc. Je me contenterai modestement
des grains de riz qui pourront tenir sur cet échiquier
si on applique la règle énoncée jusqu'au bout.”* On
se dit évidemment, il est modeste, il réclame
seulement quelques grains de riz. Cependant,
un grain de riz sur la première case, deux sur
la deuxième, quatre sur la troisième, huit sur
la quatrième case, et ainsi de suite... Si on se
penche sur le nombre total de grains de riz
accumulés, une fois arrivé à la soixante-quar-
tième case, c'est bien plus que toute la Terre
ne peut en porter pendant des générations. La
façon dont le chiffre a crû est juste inimagi-
nable, c'est là vraiment une autre illustration
de la croissance exponentielle

**On peut donner une autre illustration : le
nombre d'humains vivants aujourd'hui est
comparable au nombre d'humains qui sont
morts.**

Absolument ! C'est une marque effectivement
de la croissance exponentielle, qui est tran-
sitoire. Les gens ne pourront plus le répéter
dans un siècle ou deux. Entre temps, on aura
connu le pic de la population mondiale, cette
population qui avait grandi de façon à peu
près exponentielle. À un moment donné, elle
va faire un pic, rencontrer une bosse et com-
mencer à retomber globalement. Et le régime
exponentiel dans lequel on a vécu jusque là va
s'arrêter au profit d'un autre régime.



Couverture française des
Limites à la croissance (dans un monde fini)
de Meadows & Randers, rééd. 2022.)

Pourrais-tu nous parler un peu plus de la théorie Malthus ?

Malthus dit : la croissance des ressources ma-
térielles ne peut être que linéaire, la crois-
sance humaine est alors exponentielle. Il va
falloir commencer à limiter la population sur
Terre et se poser la question des décisions
politiques à prendre, ce qui a été repris par
plein de monde ultérieurement. Il a été l'un
des ferments de l'eugénisme, très actif un peu
partout en Occident pendant le XIX^e siècle et
infiltré de tous côtés avec cette idée d'après
laquelle certaines classes ou populations
avaient davantage le droit moral de se repro-
duire que d'autres. Une vision moralement
horrible pour nous, et politiquement impos-
sible à porter. L'idée générale selon laquelle il
faut travailler à une atténuation ou limitation
globale de la population, est quelque chose
encore présente dans les années septante.
Quand on lit un texte très important dans la
pensée intellectuelle et écologique mondiale,
le rapport au Club de Rome (rapport Meadows



Lapins réunis autour d'un point d'eau sur Wardang Island, sud de l'Australie.
Photographie prise en 1938.

Un exemple de phénomène exponentiel : introduit à l'état sauvage sur le continent australien en 1859, le lapin domestique européen vit le nombre de ses congénères se multiplier en peu de temps. Des treize lagomorphes lâchés initialement en liberté, leurs descendants se comptent à présent au nombre de près de 200 millions répartis dans le pays.²

de 1972³), on retrouve la question de faire des progrès dans la limitation mondiale de la population – pour replacer dans le contexte de l'époque, la pilule contraceptive venait de se généraliser. Peu de temps auparavant, la question du planning familial était un sujet difficile et les militants pour la contraception aux États-Unis se faisaient emprisonner. Par conséquent, on sortait d'un contexte où le débat semblait beaucoup plus prenant. Maintenant, nous nous sommes habitués à voir les limitations de population comme une notion moralement attaquable et politiquement inef-

ficace, d'autant plus qu'il n'existe globalement aucun meilleur régulateur de population que le développement éducatif et économique. Et j'en profite pour dire, puisque je parle de ce rapport au Club de Rome – très beau rapport rédigé par Donnella H. Meadows, belle plume – le premier chapitre porte sur la fonction exponentielle. Il expose en quoi il est important de penser en terme exponentiel. On est face à des systèmes dynamiques la mise en équation du monde et il demande de comprendre les exponentielles positives, négatives, les rétroactions. Il sera suivi d'une autre très belle publication de Meadows,

.....

2. Source : Foundation for Rabbit-Free Australia Inc.
<https://rabbitfreeaustralia.org.au/rabbits-in-australia/>

3. Publié sous le titre *The Limits to Growth*, en français *Les Limites à la croissance (dans un monde fini)* (éd. Rue de l'échiquier, rééd. 2022)

Thinking in Systems: A Primer [‘Pour une pensée systémique’, éd. Rue de l’échéquier, rééd. 2023]. Elle insiste sur le fait que l’intuition de cette notion d’exponentielle est fondamentale pour appréhender les évolutions du monde. Un célèbre physicien a dit un jour que l’incapacité du cerveau humain à comprendre la notion d’exponentielle est l’une de nos malédictions. Ce sont des choses que l’on a pu entendre aussi pendant le Covid.

À ce propos, j’aimerais te raconter une petite anecdote et te demander ce que tu en penses. Pendant le confinement, je faisais du soutien scolaire via Zoom et j’ai eu l’occasion de travailler avec un brillant élève de première avec qui j’ai effectué des exercices sur l’exponentiel. L’exponentiel tel qu’il est défini dans les programmes scolaires est la fonction exponentielle et la seule fonction égale à sa dérivée, qui vaut 1 en x égal à zéro. Il a compléter les exercices et il les a tous réussis. À la fin de mon cours, je lui ai dit : “Quel est le rapport entre l’exponentielle dont on vient de parler à l’instant et ce qu’on voit sur toutes les télévisions, toutes les radios, tous les journaux, relatifs au Covid ?” Il ne le savait pas. Autrement dit, dans la situation actuelle, nos programmes scolaires mettent en place une fonction exponentielle totalement déconnectée de tout ce que tu as pu raconter aujourd’hui.

Tout à l’heure, quand tu m’as demandé la définition de l’exponentiel, je n’avais préparé ma réponse à l’amont, aussi j’ai hésité à la choisir parmi les différentes définitions possibles. J’ai envisagé une fraction de seconde d’utiliser la définition par la dérivée, mais elle est trop technique. Et là, tu me rappelles la définition officielle du programme. Les programmes sont ce qu’ils sont, l’enjeu et la noblesse du métier de la fonction de professeur est pré-

cisément d’arriver à faire la connexion entre toutes les définitions et toutes les façons de voir les choses. Il est important qu’à un moment dans le cursus, nous puissions faire le lien entre cette définition, la fonction exponentielle égale à sa dérivée avec une normalisation de sa valeur en zéro, et les autres façons de définir l’exponentiel. *In fine*, ça arrive toujours à la même et quand on maîtrise un peu, on arrive à voir justement comment on revient d’une définition à l’autre. Le programme est la résultante de tas de tensions contraires dans l’histoire de notre enseignement mathématique. On est passés à une situation où nous étions la France, Grande Nation des Mathématiques dans la deuxième moitié du XVIII^e siècle. La plus grande nation de mathématiques au monde, celle qui forme le plus de mathématiciens, celle qui a le plus d’exigences dans ses programmes, etc. Il y avait cette tendance à la complexité. Des générations entières se sont emparées de la définition officielle de la droite, telle qu’elle était dans certains programmes scolaires, façon Bourbaki⁴ hyper abstraite – sans nuance péjorative sur Bourbaki. Avec l’idée de la notion la plus abstraite, la plus précise possible, s’entend. Puis il y a eu ces vents contraires incitant à réduire la voile, à rendre l’enseignement plus concret, etc. J’étais élève en classe de terminale en 1990. On a coutume de dire qu’à la fin des années 80, le niveau des jeunes dans les lycées par rapport aux évaluations scolaires internationales était à son sommet. Mais les tensions étaient déjà très clairement présentes, et quand je suis arrivé en dernière année de lycée, la définition des limites venait d’être modifiée. ●

FIN DU 4^E ÉPISODE

4. **Nicolas Bourbaki** : nom d’un mathématicien imaginaire derrière lequel se réunit un groupe de mathématiciens qui a commencé à écrire et éditer des textes spécialisés dès 1935, à l’initiative d’André Weil [frère de la philosophe Simone Weil]. Son titre d’Association des collaborateurs de Nicolas Bourbaki, adopté dans les années 50, est celui sous lequel le groupe est toujours connu de nos jours.

Épisode n° 05

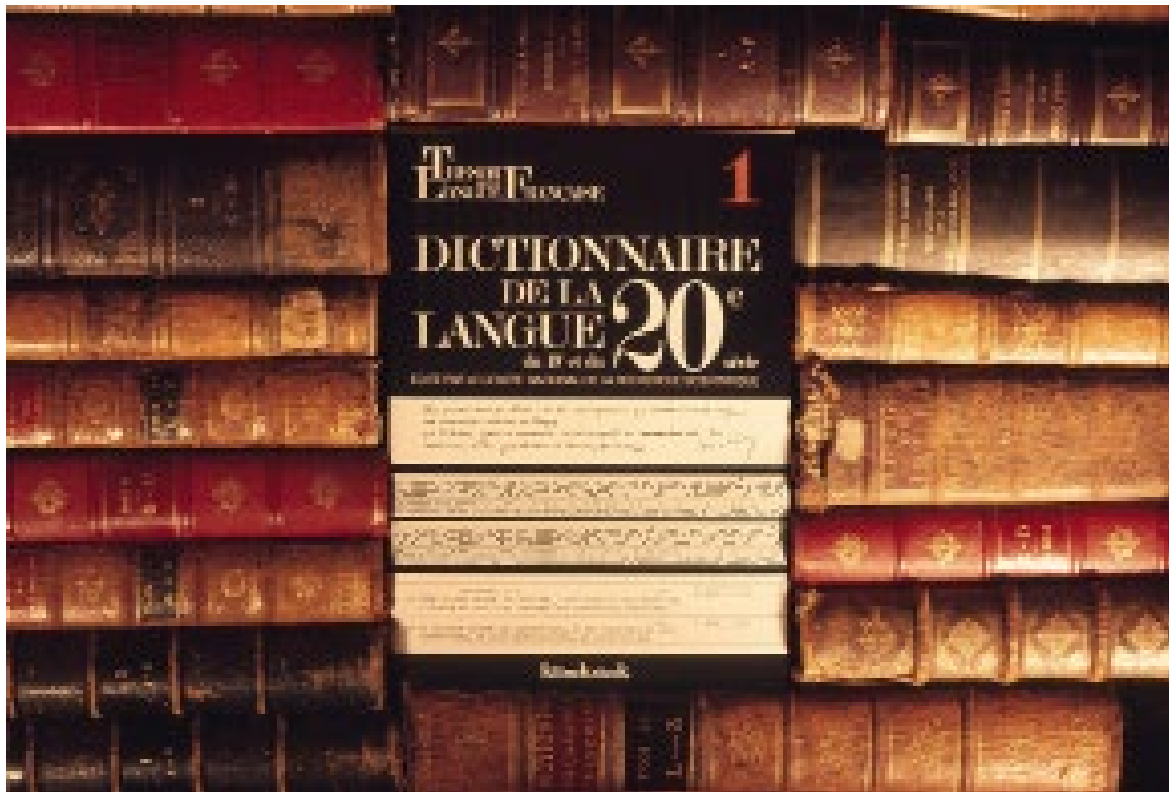
MILLE POUR CENT AVEC CÉDRIC VILLANI

ÉPISODE N°05

“

LORSQUE L'ON COMMENCE À VOULOIR DÉPASSER 100%,
ON PART DANS UN MONDE POUVANT ÊTRE POÉTIQUE, MAIS
DÉVALORISANT POUR SA SIGNIFICATION.

”



Peut-on réellement être d'accord « à mille pour cent » avec quelqu'un ? Ou motivé « à mille pour cent » ? Si l'expression est courante, elle fait tiquer bien des mathématiciens. Que signifie précisément pour cent ?

Après s'être penché sur le terme exponentiel, Cédric Villani explore cette inflation linguistique qui, en poussant les chiffres toujours plus loin, en vient paradoxalement à en affaiblir le sens.

ÉTIENNE GHYS Je suis avec Cédric Villani, mathématicien. Nous allons parler d'un mot, utilisé partout dans les médias, la radio, les journaux et qui agace un peu les mathématiciens parce qu'il est mal employé. Ce mot ou plutôt expression est 1 000%. Pourrais-tu, Cédric, donner un premier exemple dans lequel il est mal employé ?

CÉDRIC VILLANI Quand les gens veulent dire : “je suis à fond”, ou “je suis complètement d'accord avec toi”, ils disent : “Je suis d'accord avec toi à 1 000%”, “Je vais me donner à 1 000% pour ça”, etc. Là, ça n'a pas de sens. Si on veut le mettre en termes de pourcentage, on dit 100%. C'est une unité, on ne peut pas faire plus. Lorsque l'on commence à vouloir dépasser 100%, on

part dans un monde pouvant être poétique, mais dévalorisant pour sa signification. On a commencé à dire 150%, 200%, puis 300%, maintenant les gens disent 1 000%, voire 10 000%, qui sait où ça va s'arrêter. Ça dévalorise aussi le sens du nombre, alors que c'est un problème grave. Les jeunes qui arrivent en sixième sont incapables d'identifier 25% à un quart, incapables de placer un demi sur une échelle de nombres. On ne va pas leur jeter la pierre, ils sont ni plus, ni moins bêtes que les jeunes des générations précédentes. Ils ont été beaucoup moins exposés à cette espèce de gymnastique quotidienne et de rigueur, celle de faire les conversions entre les fractions, les nombres à virgules, les pourcentages.

J'ai cru comprendre qu'on essaye de changer l'enseignement des fractions. Qu'en penses-tu ?

On peut essayer toutes les méthodes possibles, tant qu'on n'aura pas résolu le problème majeur de l'éducation mathématique et de l'éducation nationale en général, c'est-à-dire, la crise de vocation et de sens du métier d'enseignant, on ira nulle part. Le problème est avant tout d'avoir des enseignants fiers de leur métier, bien payés, avec des moyens, des bonnes formations, formation initiale et formation continue accompagnée, des enseignants à qui la société donne toutes les bonnes conditions pour faire ce métier. Pour moi, la méthode qu'on emploie est un problème bien moins important que le fait d'avoir un corps professoral heureux, fier et avec des moyens.

Que dirais-tu d'un enseignant d'une classe de troisième qui donne comme exercice :

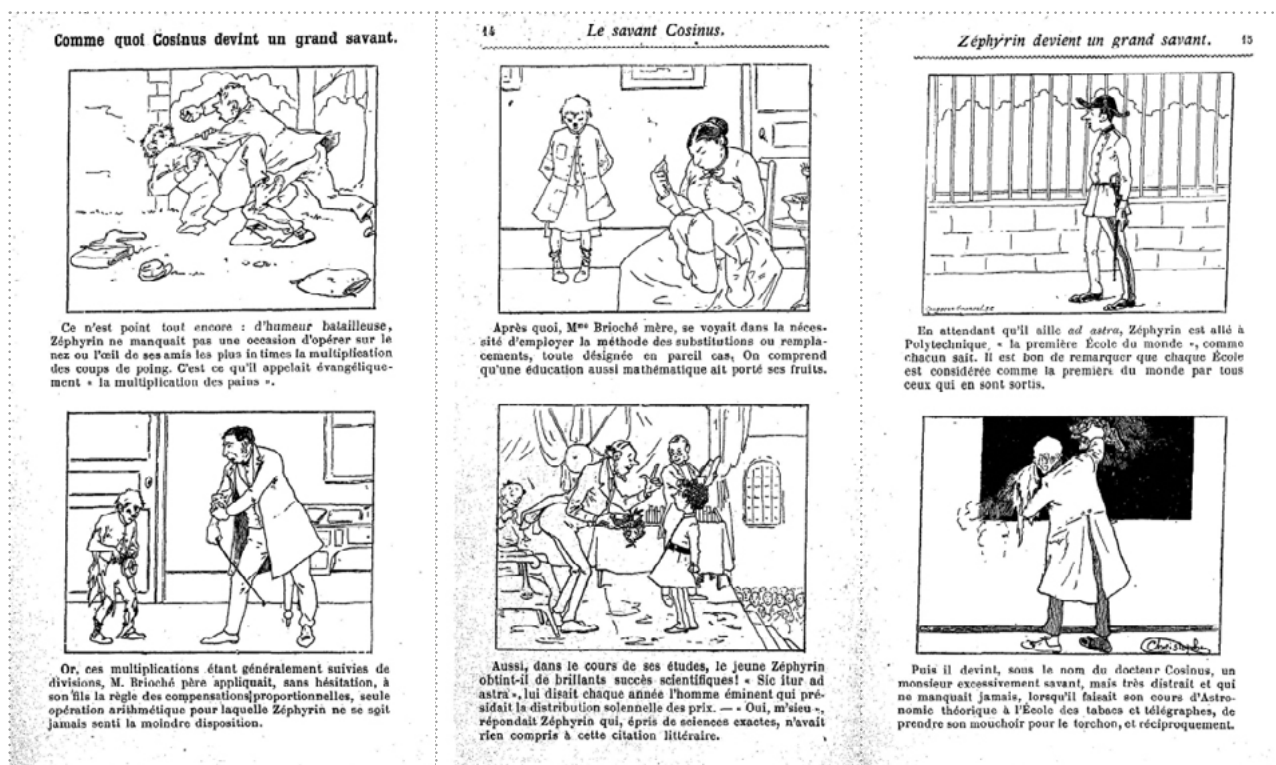
simplifiez $(\frac{1}{7}) + (\frac{1}{5})$ puis divisez le tout par $(\frac{3}{4}) + (\frac{7}{13})$?

Ça me rappelle exactement les exercices que j'avais en classe de troisième. Mon prof nous donnait un paquet d'exercices assez costauds mais aussi la discipline nécessaire pour simplifier les fractions. Une fois qu'on sait faire l'exercice, on a vraiment compris le concept de fraction. L'exercice a l'air difficile à première vue, mais si le professeur commence par des exercices simples puis des exercices compliqués, et si les élèves se sont suffisamment entraînés à la maison et en classe, alors cet exercice ne me choque pas.

Je t'avoue une de mes grandes faiblesses. Je suis incapable d'utiliser la touche pourcent d'une calculette.

Et moi, je ne l'utilise jamais. Il y a eu des grandes avancées dans l'histoire des calculatrices, avec les puissances, les extractions de racine car-

Trois pages extraites de *L'Idée fixe du savant Cosinus*.
Bande dessinée de Christophe (Marie-Louis-Georges Colomb), 1893.



rée mais je trouve que la touche pour cent sert pas à grand-chose. Les mathématiques sont probablement la discipline par excellence, celle où tant que tu n'as pas effectué des exercices, tu n'as pas compris. Et ce à tous les niveaux, de l'école primaire jusqu'à la thèse. Les exercices sont nécessaires pour comprendre le concept. Il y a des tas d'exemples que je pourrais citer, dans lesquels le fait d'avoir effectué un exercice m'a permis de comprendre que je n'avais pas vraiment saisi le concept. Tant qu'on n'a pas réussi à faire les simplifications compliquées de fractions, on n'a pas vraiment compris. En revanche, si on a la routine pour simplifier les fractions complexes, on est sûr d'avoir vraiment compris.

Ne penses-tu pas que les manuels scolaires vont dans le sens contraire, on trouve très peu de concepts et une multitudes d'exercices similaires ?

C'est vrai qu'ils sont remplis d'exercices et on y retrouve pleins de choses un peu tapageuses et surprenantes. J'ai souvenir de manuels plus austères. À vrai dire, peu importe le manuel, c'est plus une question humaine, des profs pros, une bonne relation élèves/profs, qu'une question technique.

Es-tu d'accord avec l'affirmation suivante : l'enseignement des mathématiques du CP jusqu'à la terminale consiste à comprendre la linéarité, la proportionnalité ?

Ce n'est pas seulement comprendre la linéarité et la proportionnalité. Il existe beaucoup de façons de voir la linéarité et la proportionnalité. Dans le temps, on parlait de règles de trois. Maintenant, on dit la règle de trois, qui permet de comprendre la proportionnalité. On peut le voir de plusieurs façons : à travers le formalisme des fractions, en posant l'équation, en faisant la méthode directe, comme

.....

“ LES MATHÉMATIQUES SONT PROBABLEMENT LA DISCIPLINE PAR EXCELLENCE, CELLE OÙ TANT QUE TU N'AS PAS EFFECTUÉ DES EXERCICES, TU N'AS PAS COMPRIS. ”

on aimait bien le faire dans le temps à l'école primaire. C'est important de voir et revoir un concept sous toutes les facettes. Pour moi, la question mathématique ne se résume pas à la linéarité et à la proportionnalité, mais c'est un élément majeur.

On le voit au théorème de Thalès ou autre qui n'est finalement que de la proportionnalité.

Le théorème de Thalès, c'est de la proportionnalité, mais c'est également la façon de se représenter la figure avec les relations les unes aux autres. De façon générale en géométrie, on va avoir les figures avec leurs différents côtés, on va les chercher en relation. Je me souviens, en classe de seconde, notre professeur de mathématiques aimait nous faire démontrer les énoncés de géométrie par différentes méthodes. D'une part avec le raisonnement de géométrie analytique, avec des équations, des proportionnalités, mais aussi avec la géométrie classique, comme au temps des Grecs, avec des théorèmes de Thalès, avec des droites qui se rencontrent et le tout sans jamais écrire un nombre. Et pour finir pourquoi pas avec la démonstration par barycentre⁵!

Mon professeur était aussi comme le tien, mais il disait : “C'est pour être plus sûr.”

Plus sûr, dans le fait que tu arrives exactement à la preuve. Avant de présenter mon article sur l'amortissement Landau, j'avais

5. **Barycentre** : point d'intersection des trois médianes (lignes centrales) d'un triangle, en géométrie.





vérifié toutes les démonstrations un grand nombre de fois. Malgré tout, j'étais encore un peu inquiet sur une éventuelle erreur restante dans une démonstration tellement longue et compliquée. Ce n'est seulement quand le *réf-vérif*⁶, comme on dit, a dit que tout était OK que j'étais enfin rassuré. Je l'ai été davantage quelque temps plus tard quand notre équipe de recherche est arrivée avec une autre démonstration au même résultat.

Une question quasiment philosophique, penses-tu qu'une vérité peut avoir deux démonstrations intrinsèquement différentes ?

Ma réponse est oui. Dans une démonstration, il y a la notion de chemin au travers des différents concepts. Le chemin que l'on prend est important. Il y a une citation d'Aristote que j'aime beaucoup et que j'utilise régulièrement dans les conférences. C'est traduit du grec, grosso modo il dit : *“Les trois attributs majeurs de la beauté sont la précision, l'ordre et la commensurabilité.”* Il fait le lien avec la question mathématique et il dit bien explicitement que le raisonnement mathématique est la plus

belle forme de raisonnement. La linéarité, la proportionnalité sont une partie importante de cette commensurabilité. Le fait de pouvoir rapporter telle dimension à telle autre, regarder comment les choses sont en proportion, les unes par rapport aux autres. Mais dans commensurabilité, même si ce n'est pas explicite dans le texte d'Aristote, j'aime bien penser aussi la commensurabilité entre les concepts. Et autant sur la proportionnalité, la linéarité, je vois bien l'aspect nombre de cette commensurabilité. Autant il me semble qu'il y a aussi la question de l'emmanchement des concepts les uns aux autres. Et pour les notion d'ordre et de précision, je pense que ce sont aussi des attributs supplémentaires qu'on peut lier ou pas à la linéarité.

Comment peut-on corriger cette erreur de 1 000 % ? Comment peut-on faire en sorte que les gens ne l'utilisent plus ?

Diantre, si seulement je le savais. En plus, les expressions se diffusent partout. Une communication de l'Académie française serait une erreur. Ça ne fera qu'agacer les gens et ils

.....

6. De l'anglais *Refproof* (“preuve de référence”), procédé de vérification sur les calculs mathématiques.

prendront un malin plaisir à l'utiliser. En plus, l'Académie française doit s'inspirer aussi de la façon dont les gens parlent vraiment pour mettre à jour les règles. J'ai envie de dire que c'est la responsabilité de nous, mathématiciens, de dire : *“Arrêter de déconner en utilisant 1000% sans arrêt, non seulement vous trahissez la belle langue mathématique dans l'articulation entre la pensée claire et le concept mathématique, l'une des grandes fiertés françaises, mais vous dévalorisez aussi l'expression.”* C'est une course sans fin, particulièrement 1000%, il y aura 10000% et ainsi de suite. On se retrouvera dans la même situation qu'avec un adjectif comme formidable, qui a une époque, voulait dire, quelque chose de terrifiant, et qui petit à petit est devenu un truc sympa, *“c'est chouette, c'est formidable.”* Donc une dévalorisation de la langue française, ce qui serait préjudiciable à

tout le monde.

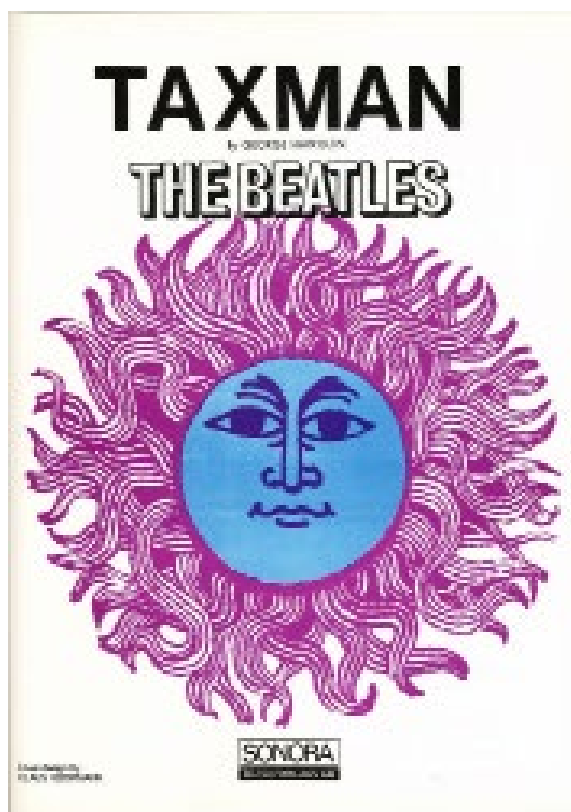
C'est donc notre rôle à nous mathématiciens de tenir ce genre de langage.

Mathématiciens et intellos.

Est-ce que pourcentage et musique t'évoque quelque chose ?

Je dirais la chanson *Taxman* des Beatles, une chanson anti-impôts qui parle de tout ce qui permet de taxer, taxer, taxer. ●

FIN DU 5^E ÉPISODE



Première de couverture de la partition imprimée de *Taxman* des Beatles, 1966.

Illustration de Klaus Voormann.

Épisode n°06

LES MOTS NUMÉRIQUES AVEC PATRICK FLANDRIN



PATRICK FLANDRIN

est physicien, directeur de recherche au CNRS ainsi que chercheur à l'École normale supérieure de Lyon. Membre de l'Académie des sciences depuis 2010, il en a été le président de 2021 à 2022.

Le choix des mots dans le monde numérique n'est jamais anodin. Saviez-vous, par exemple, que le mot ordinateur a été inventé en 1955 par le philologue Jacques Perret, à la demande d'IBM France⁷ ? Le terme, qui évoque l'idée de « mise en ordre », apparaît aujourd'hui comme bien plus créatif que le pragmatique computer des Anglo-Saxons.

Dans cet épisode, Étienne Ghys reçoit Patrick Flandrin, informaticien et membre de l'Académie des sciences, pour discuter de l'influence grandissante du vocabulaire numérique dans le débat public, et de la manière dont il transforme notre perception du monde.

ÉTIENNE GHYS Je suis avec Patrick

Flandrin, informaticien et spécialiste de la théorie du signal pour parler d'un mot très employé dans les médias, intelligence artificielle.

PATRICK FLANDRIN Aujourd'hui, impossible d'écouter la radio sans entendre ce mot *intelligence artificielle*, ou IA. En novembre 2022, on observe une irruption de l'IA grand public avec l'arrivée de ChatGPT. Beaucoup de choses existaient déjà avant mais on parlait plutôt d'apprentissage machine, de reconnaissance, de reconnaissance vocale. Ces IA génératives ont envahi le débat public pour des tas de bonnes raisons. Le mot IA est un mot révélateur du monde numérique dans lequel nous sommes mais un mot parmi tant d'autres. Si tu es d'accord, Étienne, j'aimerais étendre un peu le sujet, en parlant de la place des mots du monde numérique, de l'informatique. Des mots qui prennent une importance exagérée en modifiant notre propre langage. Un exemple typique c'est : *changer de logiciel*. Cette expression, issue du monde informatique, a envahi le débat public avant l'IA. On dit : "*Il se trouve que le PS a changé de logiciel*" ou "*Il serait temps de changer de logiciel pour faire mieux les choses*", ou encore il y a un *bug*.

Et beaucoup ne savent même pas que ce mot anglais *bug* veut dire une "puce".

La première occurrence de *bug* vient de Grace Hopper, informaticienne de Harvard. Les programmes de sa machine se sont arrêtés parce qu'il y avait un petit insecte qui était coincé dans le système. Comme elle notait ces expérimentations dans un carnet, ce jour-là, elle a noté le mot *bug*. Bon, c'est une anecdote.

On emploie aussi "ton disque dur".

On entend aussi : "*on est programmés pour faire quelque chose*" ou encore qu'on "*se reprogramme*", qu'on "*fait un reset sur le système*". On dit aussi de quelqu'un qu'il "*ne me calcule pas*".

Toutes ces expressions sont arrivées progressivement dans le langage courant.

Je dirais qu'il y a deux phases. Là, je fais référence à un petit livre très intéressant à ce sujet, qui s'intitule *LQI - Notre Langue Quotidienne Informatisée* du psychanalyste Yann Diener [éd. Les Belles Lettres, 2022]. Il explique justement de quelle façon les termes s'invitent dans le langage et aussi comment cela a transformé notre rapport au monde et notre rapport à beaucoup de choses. Dans un premier



7. **IBM** : *International Business Machines Corporation*, entreprise multinationale américaine présente dans les domaines du matériel informatique, du logiciel et des services informatiques (fondée en 1911).

temps, il a fallu inventer des tas de mots pour définir les termes de l'informatique, comme ordinateur. En 1955, IBM lance une gamme de machines. Ils ont demandé à Jacques Perret, philologue travaillant à la Sorbonne, des propositions de noms pour ces machines. Jacques Perret a répondu par une très belle lettre dans laquelle il écrit : *“Je pense qu’ordinateur ne serait pas mal, puisque c’est quelque chose comme ordination [...] mais bon finalement, je vois que beaucoup des opérations que vous faites sont attachées à des noms féminins, je me demande si on ne pourrait pas dire plutôt une ordinatrice. Et moi je serais assez favorable à appeler ces objets une ordinatrice électronique.”* Finalement, ils ont gardé le terme *ordinateur*.

Les Américains et les anglophones ont choisis *computer*, ce mot me semble moins bien qu’*ordinateur*.

Computer évoque la calculatrice, il se fixe sur le calcul. Quelques années plus tard, un ingénieur a inventé le mot *informatique* en français, une contraction d’*information* et d’*automatique*. Il faut créer un mot par rapport à une science et des objets qui se mettent en place.

En anglais, c’est *computer science*, beaucoup moins créatif que nous.

Exactement. Ce qui est intéressant, c’est que la langue se développe et crée ces nouveaux mots, et ces mots sont réappropriés dans le langage courant pour finalement parler d’autre chose, de manière imagée, tout en nous mettant dans un cadre d’expression et de réflexion qui finalement est celui de la machine.

Et ça, c’est beaucoup plus tard dans un deuxième temps.

Je dirais à partir des années 2000 lorsque l’on a commencé à changer de logiciel.

Et maintenant, on se retrouve dans une troisième étape.

Je dirais que ce n’est plus une simple question

de langage mais ça nous envahit tellement que ça nous donne une autre vision du Monde. L’IA la plus populaire est ChatGPT. Qu’est-ce que ChatGPT ? Une IA générative qui procède à partir de l’apprentissage, c’est donc quelque chose qui est fait de manière probabiliste. Ça donne quelque chose qui satisfait aux mêmes lois de statistiques ou de probabilités donc du plausible. Mais plausibilité ne veut pas dire vérité, il est là le problème avec ces IA. De plus, on leur associe le nom d’intelligence, on va donc penser qu’elles disent vrai.

Je parlais hier d’un exemple où l’intelligence artificielle fait des progrès incroyables, permettant de diagnostiquer précocement des cancers du sein. Dans ce cas précis, l’IA est probablement plus efficace que les radiologues, mais ce que faisaient les radiologues relevait aussi un peu de l’intelligence artificielle. Ils regardent une radio et se basent sur les radios vues par le passé avant de prendre une décision. Y-a-t-il eu finalement un changement conceptuel du radiologue à l’IA ?

Le changement se trouve essentiellement sur la capacité de la machine à traiter infiniment plus de données qu’un humain. Le diagnostic fait par la machine se base sur un nombre infiniment plus grand par rapport au nombre de personnes vues dans une vie d’un radiologue. Pour les IA, le résultat dépend beaucoup de la nature du corpus sur lequel a été fait l’apprentissage. Le radiologue va raisonner par rapport à un corpus de cas vus, bien circonscrits et qui lui permet de donner assez clairement son résultat. Les premiers exemples de grands succès de l’IA, qui ont été un peu controversés, c’était pour des détectations de problèmes de peau. Il y avait des résultats qui étaient effectivement meilleurs que ce que donnaient les praticiens, mais comme on dit : *“toute chose égale par ailleurs”*. Dès qu’on mettait la machine sur des peaux qui n’étaient pas dans le corpus d’apprentissage (une des populations en Inde, au Japon ou ailleurs), on avait

My Automated Conversation coach (MACH), agent de recrutement virtuel développé pour entraîner les étudiants aux entretiens d'embauche. Le projet fut mené en coopération avec le Massachusetts Institute of Technology (MIT)



“ LA MACHINE FAIT TRÈS BIEN CE QU'ON LUI DEMANDE. MAIS ELLE NE

PEUT PAS FAIRE MIEUX, ELLE NE PEUT PAS INVENTER PAR RAPPORT À DES DONNÉES QU'ELLE N'A PAS VUES. ”

des résultats très mauvais car on s'était entraînés essentiellement sur des peaux blanches. Le problème est dans la nature de la base d'apprentissage. La machine fait très bien ce qu'on lui demande de faire, mais elle ne peut pas faire mieux, elle ne peut pas inventer par rapport à des données qu'elle n'a pas vues.

Aujourd'hui, on fait confiance aux détections par l'IA qui se basent sur un corpus du passé, et si continue ainsi pendant 20 ans ou 30 ans, le corpus fera un bide.

Oui et non. Dans l'IA générative, on a des systèmes incroyables pour faire des générations d'images. On prompte : “Dessine-moi un Académicien” et on obtient un tas d'images. Quand on crée une image dite “nouvelle” à partir de toutes les images existantes que l'on a vues, on crée une image qui est de même nature statistique par rapport à ce corpus. On pense ce corpus réel, on pense alors avoir de vraies images. Si on augmente le corpus avec les images nouvellement créées, qui sont en réalité des images chimères, le même statut que les images de l'apprentissage précédent. Et à terme, si on a de plus en plus d'imag-

es créées qui ressemblent de plus en plus aux images qu'on avait avant, on va avoir de plus en plus d'images qui se ressemblent toutes. Ou alors, parfois, les systèmes se mettent à donner n'importe quoi car les algorithmes prévoient un petit degré de liberté, appelées hallucinations.

Ce “n'importe quoi” pourrait être génial !

Ce serait une porte ouverte sur la créativité. Le problème est quand même d'avoir une grande uniformité. Tout le monde est assez conscient que même si maintenant, ChatGPT et les autres ont progressé par rapport aux premières versions, que les textes en général sont très ennuyeux. Je pense qu'on ne peut pas attendre de ces systèmes de faire des textes plus littéraires. Dans la mesure où on est amené à construire sa proposition sur la base de ce qui existe déjà, et d'être cohérent de manière probabiliste, si on ne force pas l'écart, c'est difficile de créer. Je trouve que ce qui est le plus bluffant en ce moment, ce sont les sys-



tèmes d'IA qui génèrent des chansons, de la musique, du son. C'est incroyable parce qu'on peut effectivement donner un texte et on nous fabrique une chanson sur un rythme donné. Mais est-ce que le système a la capacité d'inventer un nouveau style de musique ? Un vrai nouveau style et pas simplement quelque chose qui ressemble à ce qui existe déjà ? L'avenir nous le dira.

mais je crois que je connais la réponse.
Quelle genre de musique on peut ajouter ?
Et peux-tu me recommander un logiciel qui créerait une chanson à ta gloire ?

Suno.

Alors je vais essayer ça... [Rires.] ●

FIN DU 6^E ÉPISODE

Je vais te poser la question traditionnelle



Le compositeur Lejaren Hiller face au super-ordinateur ILLIAC I
 Photographie de 1960

ILLIAC I fut la première machine capable de composer une œuvre musicale, la *Suite Illiac* - ou Quartor à cordes n°4 - sous la direction de Lejaren Hiller et Leonard Issacson, musiciens et professeurs à l'Université de l'Illinois Urbana-Champaign, en 1957.



Cyberpunk: Peach John (Rootport, 2023)

Premier manga dessiné par IA (Midjourney). La machine a complété en six semaines ce qui aurait nécessité un an de travail à un artiste humain.

Le Prochain Rembrandt, 2016.

Projet développé par l'agence de publicité J. Walter Thompson à Amsterdam, ce tableau fut généré à partir d'une synthèse de la production artistique entière du peintre Rembrandt van Rijn (1606-1669).



Néopolis : L'Aube de la liberté (Jean-Michel Claude, 2024)

Roman rédigé par le logiciel Claude 3.5 Sonnet dans le cadre d'une expérience menée par France Culture (Radio France).



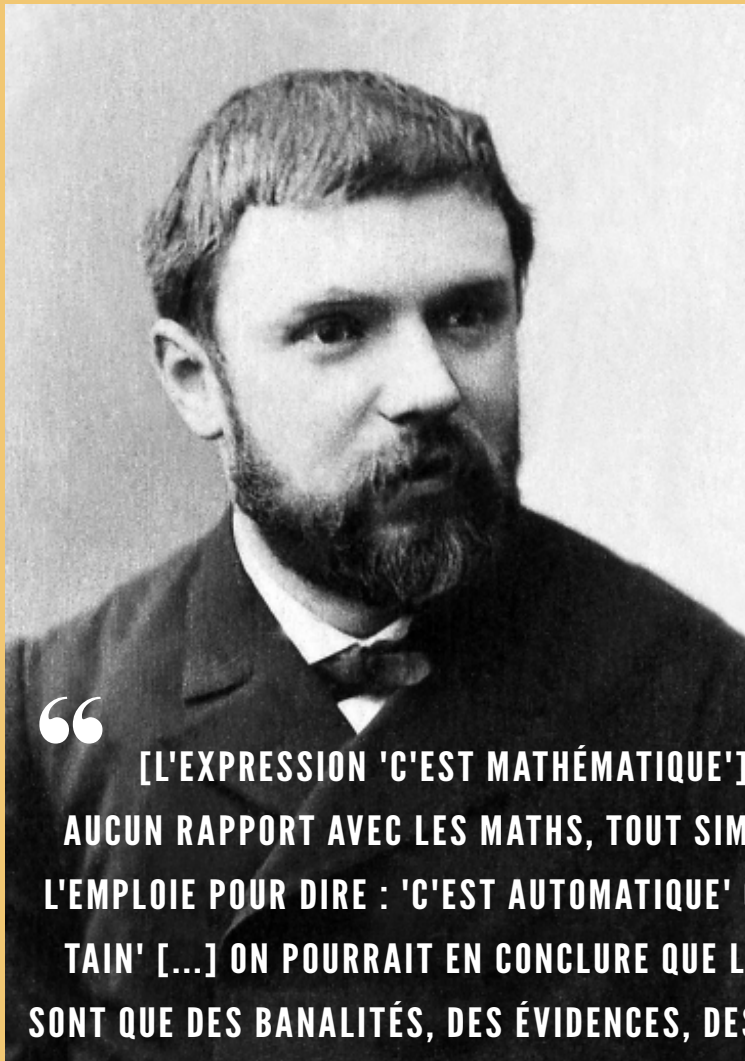
Next Stop Paris (Stuart Archer, 2025)

Court-métrage de 12 min, il s'agit du premier film dont les images sont entièrement le produit d'une IA – en s'appuyant tout de même sur de la prise de vue réelle réalisée au préalable par une équipe humaine.

Épisode n°07

C'EST MATHÉMATIQUE !

ÉPISODE N°07



“

[L'EXPRESSION 'C'EST MATHÉMATIQUE'] N'A PRESQUE
AUCUN RAPPORT AVEC LES MATHS, TOUT SIMPLEMENT. ON
L'EMPLOIE POUR DIRE : 'C'EST AUTOMATIQUE' OU 'C'EST CER-
TAIN' [...] ON POURRAIT EN CONCLURE QUE LES MATHS NE
SONT QUE DES BANALITÉS, DES ÉVIDENCES, DES TAUTOLOGIES.

”

L'expression : « C'est mathématique » est souvent utilisée pour désigner une évidence, comme si les mathématiques se limitaient à des vérités simples. Étienne Ghys, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, déplore cette simplification, qu'il considère réductrice pour la discipline. À travers plusieurs exemples, il nous montre que les mathématiques ne se résument pas à des certitudes banales, mais qu'elles ouvrent au contraire la voie à des raisonnements profonds. En abordant des démonstrations comme celle de l'infinité des nombres premiers, il nous invite à réévaluer le spectre des mathématiques.

Étienne, tu es mathématicien. Nous nous connaissons depuis notre naissance, puisque nous sommes nés au même endroit, le même jour et à la même heure.

Oui, un jumeau même si ta voix était un peu plus grave que la mienne.

Dans cette série de podcasts, on choisit un mot ou une expression qu'on voit un peu partout dans les médias mais qui est mal utilisé. Ce qui peut agacer les scientifiques Quel mot as-tu choisi ?

J'ai choisi l'expression : *«C'est mathématique.»* On l'entend à tout bout de champ et cela m'énerve.

Dans quel cas cette expression est-elle mal employée, et pourquoi ça t'énerve ?

Parce qu'elle n'a presque aucun rapport avec les maths, tout simplement. On l'emploie pour dire : *c'est automatique* ou *c'est certain*, *c'est inévitable*. Un exemple : un homme politique discute de l'insuffisance du budget de la santé, il va dire : *«Ça va coïncider, c'est mathématique.»* On est quand même extrêmement loin des mathématiques. Un autre exemple, un peu plus mathématique : ce parti politique est à 20% d'électeurs, l'autre à 10% et à deux, ils n'ont pas la majorité, c'est mathématique. Alors oui,

20+10 est inférieur à 50 est un fait mathématique, mais franchement ça ne mérite pas le nom de mathématique.

Tu exagères, 20+10 plus petit que 50, ce sont bien des maths.

C'est si élémentaire qu'on pourrait en conclure que les maths ne sont que des banalités, des évidences, des tautologies ; c'est un peu réducteur, presque humiliant pour ma profession. Un autre exemple intéressant : l'usage de cette expression par les commentateurs sportifs. Une équipe de foot, les Bleus par exemple, est en train de perdre 3 à 1. Il reste cinq minutes de jeu et le commentateur dit : *«Allez, les Bleus, mathématiquement vous pouvez gagner.»* Dans cette situation, ça ne veut plus dire : *c'est évident* ou *c'est clair*, ça veut dire : *il n'est pas impossible que...* Cette deuxième interprétation est presque le contraire de la première.

Est-ce que finalement, un raisonnement mathématique n'est pas toujours réduit à une suite d'évidences mises bout à bout ? Est-ce que ça une démonstration mathématique ?

Pour simplifier, raisonner c'est mettre bout à bout des évidences qui ne peuvent être contes-
tées par personne. Mais la force créatrice des maths réside précisément dans l'agencement



des maillons de ce raisonnement. C'est un peu comme si on réduisait la littérature aux mots. Or un écrivain doit être capable de les écrire dans un certain ordre. Certains le font de manière exceptionnelle et il n'est pas nécessaire d'avoir leur talent pour apprécier leurs romans. En maths, c'est pareil, certains raisonnements sont le résultat d'un travail créatif, brillant, exceptionnel, qui peuvent être appréciés par presque tout le monde. Presque tous ceux qui font l'effort d'essayer de comprendre.

Peux-tu donner un exemple de raisonnement que tu trouves intéressant mathématiquement ?

Voici un théorème qui n'est pas une évidence et dont la preuve date d'il y a plus de deux-mille ans. C'est un peu l'exemple fétiche pour tous les mathématiciens : Il existe une infinité de nombres premiers. Un nombre premier est un nombre qui ne peut pas se décomposer en un produit de deux nombres plus petits. Par exemple, 5 est premier alors que 9 ne l'est pas, car c'est 3×3 . Un nombre qui n'est pas premier est le produit de deux nombres plus petits. Si ces nombres plus petits ne sont pas premiers, alors on peut recommencer l'opération et les

décomposer eux-mêmes comme des produits de nombres plus petits. Et comme les nombres en question sont de plus en plus petits, il faut bien que ça s'arrête à un moment et on a déjà démontré un petit théorème. Tout nombre entier est le produit de quelques nombres premiers. Par exemple 90, c'est $2 \times 3 \times 3 \times 5$. La liste des nombres premiers commence ainsi : 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19. Mais est-ce possible que cette suite s'arrête, qu'il n'y ait qu'un nombre fini de nombres premiers ? Ça n'est pas évident du tout et pourtant je vais démontrer que ce n'est pas le cas et qu'il y a en effet une infinité de nombres premiers. Je pense que tu vas comprendre l'argument que je vais décrire maintenant. C'est ça les maths. Voilà, je veux te montrer qu'à chaque fois qu'on te donne une liste de nombres premiers, je peux en trouver un autre plus grand. C'est simple. Tu me donnes un paquet de nombres premiers. Je les multiplie et j'ajoute 1. Tout simplement. J'obtiens un nombre, disons n qui n'est divisible par aucun des nombres de la liste que tu m'as donnée. Quand je divise par l'un d'entre eux, il reste 1. Et pourtant nous avons vu que n est un produit de nombres premiers. Et aucun d'entre eux n'est dans ta liste. Voilà, j'ai montré qu'il



Chercheuse expliquant une proposition de protocole de vote électronique par équations.

existe des nombres premiers qui ne sont pas dans ta liste. Il y a une infinité de nombres premiers, CQFD. C'est ça, des maths ! Ça va, Étienne ? Tu as compris ?

Je crois que j'ai compris. Mais est-ce que nos auditeurs auront compris, on verra bien.

Tu viens justement d'employer le mot clé pour définir les maths : *comprendre*. Comprendre globalement un agencement de banalités placées dans un ordre pas banal, de même qu'un musicien apprécie un agencement de notes de musique.

Mais alors, comment fait-on pour découvrir de nouvelles démonstrations, ou plutôt pour inventer de nouvelles démonstrations ?

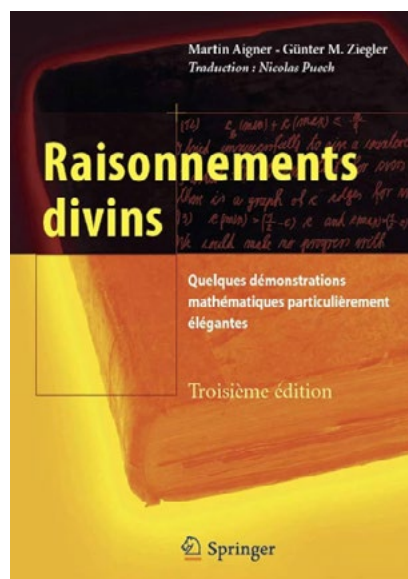
C'est un peu un mystère. Certains sont très doués pour ça et d'autres le sont moins. En maths, il existe quelques découvreurs, créateurs. Mais il y a aussi beaucoup de commentateurs, ceux qui comprennent et améliorent les arguments pour les rendre de plus en plus transparents. Ça me fait penser à un mathématicien célèbre, Paul Erdős, qui disait à ses collègues en plaisantant : *“Dieu a un grand livre qui contient toutes les démonstrations, et parfois, il en montre une page à un humain.”* Quand il est décédé, quelques-uns de ses élèves ont publié un livre intitulé *Raisonnements divins* (*Proofs on THE BOOK*)⁸. qui contient un certain nombre de pages imaginées par Erdős, un peu comme un recueil de poèmes.

Pour résumé, tu reproches à l'expression “C'est mathématique” de n'utiliser que le niveau zéro des maths, celui des banalités, un peu comme si on disait “C'est de la littérature” en lisant une dépêche de l'AFP [Agence France-Presse].

Tu as tout compris.

.....

8. Martin Aigner & Günter M. Ziegler, *Raisonnements divins – Quelques démonstrations mathématiques particulièrement élégantes*, éd. Springer Verlag France, rééd. 2013.



Couverture française des *Raisonnements divins* d'Aigner & Ziegler, rééd. 2013

Pour conclure, quelle serait la musique que tu proposerais pour illustrer les mathématiques ?

Je n'avais pas pensé à ça. Bon, ma réponse assez banale mais adaptée, serait le clavier bien tempéré de Jean-Sébastien Bach. Je crois que ça illustre bien mon histoire. C'est écrit avec des do, ré, mi, fa, sol, la, si, do, posés dans un certain ordre sur une partition, mais alors, quel ordre ?

Merci beaucoup, Étienne, pour cet entretien. Peut-être que la prochaine fois, c'est toi qui m'intervieweras ! ●

FIN DU 7^E ÉPISODE

Épisode n°08

ALGORITHME

AVEC CLAIRE MATHIEU



CLAIRE MATHIEU

est une informaticienne et mathématicienne connue pour ses recherches sur les algorithmes d'approximation, les algorithmes en ligne, et la théorie des enchères. Elle est chercheuse à l'Institut de recherche en informatique fondamentale et travaille en tant que directrice de recherche au CNRS en informatique.

Algorithme : un mot omniprésent, souvent mal compris et associé à une mécanique opaque et inhumaine. Pourtant, derrière chaque algorithme, il y a des choix humains.

L'informaticienne Claire Mathieu revient sur l'histoire de ce terme, de ses racines arabes aux débats contemporains sur son usage. Avec Étienne Ghys, elle explore les enjeux de transparence et de compréhension des algorithmes, qu'ils calculent l'impôt, orientent les étudiants via Parcoursup ou façonnent nos fils d'actualité sur les réseaux sociaux.

ÉTIENNE GHYS Je suis avec Claire Mathieu, informaticienne et un peu mathématicienne comme elle vient juste de me le préciser.

Nous allons échanger autour d'un mot de Science souvent galvaudé, le mot **Algorithme**. Claire, pourrais-tu nous expliquer l'origine de ce mot ?

CLAIRE MATHIEU Algorithme est un mot qui vient à l'origine du nom du mathématicien arabe⁹ Al-Khwārizmī [محمد بن موسى الخوارزمي : *Muḥammad ibn Mūsā al-Khwārizmī*, latinisé *Algoritmi*]. Al-Khwārizmī a formalisé des règles pour résoudre des équations linéaires à deux inconnues, et il a expliqué aussi comment faire des multiplications. Les textes qu'il a écrits sont assez étonnants, puisqu'il explique comment résoudre des équations sans utiliser de variables, de nombres, il n'y a pas de x . C'est intéressant à lire.

C'était donc au Moyen-Âge ?

Oui, à la grande époque des mathématiques arabes.

Par quelle merveille ce mot s'est transformé en un sens informatique, aujourd'hui ?

Prenons l'exemple des multiplications. À l'école primaire, on nous donne une méthode qui permet de multiplier deux nombres pour obtenir le résultat. Avec cette méthode, on est capables de trouver le résultat de la multiplication de deux grands nombres en décomposant ce problème compliqué en apparence,

en une suite d'opérations simples, à savoir faire des multiplications de chiffres puis des additions.

Donne-moi un exemple d'un usage du mot algorithme entendu dans les radios, les télévisions, qu'on lit dans les journaux, et qui ne te plaît pas.

Quand quelqu'un demande : "Mais pourquoi on m'a donné ceci et pas cela", on lui répond : "C'est l'algorithme". Quand les gens se plaignent et disent : "Ah, les algorithmes nous pourrissent la vie ! " Quand on nous dit : "Regardez ça, on va demander à l'algorithme et il nous le dira."

Ou encore : "C'est l'algorithme de Facebook qui prend les décisions." Ça ne te plaît pas, parce que c'est faux, parce que c'est l'algorithme prend une mauvaise décision, ou bien parce que c'est toi qui ne comprends pas l'algorithme mis en place ?

Ce sont les connotations dans l'usage du mot *algorithme* qui me déplaisent, elles sont très péjoratives. Si on fait un micro-trottoir pour demander à quels mots les gens associent le terme *algorithme*, je pense qu'on verra surgir des mots comme *inhumain*, *dépersonnalisé*, *opaque*, *mystérieux*, *sombre*. On donne une intention à la machine. Ce n'est pas l'humain qui décide, c'est la machine. Voilà l'image que les gens ont des algorithmes.



“ **ON DONNE UNE INTENTION
À LA MACHINE. [MAIS]
L'ALGORITHME A ÉTÉ CONÇU PAR UN
ÊTRE HUMAIN. C'EST UNE MÉTHODE POUR
RÉSoudre UN PROBLÈME, RÉFLÉCHIE PAR
UN HUMAIN. UN ALGORITHME EN LUI-
MÊME N'A D'AUTRE INTENTION QUE CELLE
DE SON CONCEPTEUR.** ”

Pourtant l'algorithme a été écrit par un être humain.

L'algorithme a été conçu par un être humain. C'est une méthode pour résoudre un problème, réfléchi par un humain. Un algorithme en lui-même n'a d'autre d'intention que celle de son concepteur.

Les algorithmes qui nous gouvernent devraient-ils être plus transparents ?

C'est très important que les algorithmes qui nous gouvernent, soient transparents pour

permettre à chacun de vérifier qu'il a été traité de façon équitable.

Ce n'est pas vraiment le cas pour Facebook, ce n'est pas vraiment le cas pour l'algorithme qui gère mon compte en banque ?

Il y a quelques années, est sortie une publication de l'algorithme employé au calcul de l'impôt sur le revenu.

Le calcul de l'impôt n'a pas toujours été public ?

Le calcul de l'impôt se fait de façon automatique. Donc avec du code, ce code implémente un algorithme. Cet algorithme met en place toutes les règles des décrets légaux. Mais cette façon d'exécution n'était pas public comme l'algorithme a été construit au fil des années. Maintenant, il est public. D'ailleurs, ce travail d'explicitation de l'algorithme a conduit à un nettoyage du code et a permis de découvrir des cas où il y avait un non-déterminisme, une ambiguïté. Il y avait des cas où certaines règles s'appliquaient. Chez certains, on enlève tant au revenu déclaré. Pour d'autres, on baisse l'impôt de 10%. Et si les deux s'appli-



Du 3 au 11 mai 1997, Garry Kasparov affronte aux échecs l'ordinateur Deep Blue pour la seconde fois. Si le champion du monde avait remporté la partie l'année précédente, la machine gagnera lors de cette deuxième rencontre.

quent, selon l'ordre dans lequel on applique les règles, on obtient un résultat différent à la fin. Le fait donc d'explicitement l'algorithme a permis de se rendre compte qu'il y avait des règles pour lesquelles on avait besoin de définir une priorité.

Alors, le citoyen qui apprend que l'algorithme qui calcule l'impôt est public et transparent, va-t-il matériellement le comprendre ou c'est écrit dans un langage qui est tellement inaccessible que de toute façon, il n'a aucune chance de comprendre.

Les algorithmes sont faits pour être lus par des êtres humains. Le code est fait pour être implémenté par une machine, mais l'algorithme lui-même est fait pour un être humain. Il y a une explication rigoureuse : une métaphore pour un algorithme est comme une recette de cuisine. Les recettes de cuisine sont lues par des humains, donc théoriquement, un algorithme est accessible à toute personne. En réalité, il y a des présupposés. Si vous reparez de vieux livres de recettes de cuisine, on suppose que le lecteur a l'habitude de cuisiner au quotidien donc on utilise des mots sans donner de définition, comme *blanchir* un aliment. Pour savoir ce que signifie blanchir, il faut déjà connaître un peu la cuisine.

C'est comme pour les mathématiques.

L'auteur des livres de mathématiques présuppose un certain nombre de connaissances de la part de son lecteur.

Exactement. Et si on prend l'algorithme de Parcoursup, dont les détails ont été publiés sur le site du ministère, c'est écrit de façon à être accessible à un public de niveau L1, L2, en informatique, ou en maths, ou en sciences. Donc c'est accessible à ce public mais c'est difficilement lisible.

Parlons précisément de Parcoursup puisque tu connais bien cet algorithme. Comment

ressens-tu les réactions du public vis-à-vis de Parcoursup ? On entend beaucoup que Parcoursup est spécifiquement très inhumain, très incompréhensible, laissant les jeunes dans le désespoir alors que tu viens de dire que c'est tout à fait transparent.

Je viens de dire que c'est transparent, à condition d'être lu par le bon public. Une des spécificités de Parcoursup, c'est que c'est une application qui touche tout le monde, toute la société en France. Et donc, une grande partie de gens n'ont pas vraiment accès facilement à l'algorithme.

Alors la théorie du complot va s'imposer immédiatement, on va penser que c'est malveillant.

On peut penser que c'est malveillant. Il faut des intermédiaires de confiance pour que ça

UNE MÉTAPHORE POUR UN ALGORITHME EST COMME UNE RECETTE DE CUISINE. LES RECETTES DE CUISINE SONT LUES PAR DES HUMAINS, DONC THÉORIQUEMENT UN ALGORITHME EST ACCESSIBLE À TOUTE PERSONNE. EN RÉALITÉ, IL Y A DES PRÉSUPPOSÉS.

puisse marcher. Il n'est pas bon que l'algorithme ne soit pas public, cela crée de la méfiance naturellement. Mais s'il est public, il n'est accessible qu'à une certaine partie de la population. Il faut alors que ces personnes-là puissent s'en emparer et qu'elles-mêmes diffusent le contenu, en expliquant qu'il n'existe aucune intention malveillante dans la conception d'algorithmes. Les professeurs de maths, par exemple.

Est-il possible d'expliquer l'algorithme de



Parcoursup, non pas dans les détails mais d'une manière générale accessible à tous.

Le principe général de Parcoursup est très simple, avec un peu de bonne volonté on comprend.

Penses-tu qu'il existe suffisamment d'explications à ce sujet ?

Non, je pense qu'il n'y a pas eu assez d'explications, mais je vais te les donner. Pour Parcoursup : qui prend les décisions ? Les décisions sont prises par les formations qui regardent les candidatures et font un classement des candidatures. Ensuite, la grande question est : comment à partir de ça, on fait des propositions aux candidats ? En fait, chaque formation descend dans sa liste, dans son classement, fait des propositions dans l'ordre de classement. Un étudiant reçoit plusieurs propositions. Il choisit celle qu'il préfère et dit non aux autres. Ainsi, des places se libèrent et on peut continuer à descendre dans la liste. C'est tout, et c'est ça, l'algorithme.

On aurait pu concevoir aussi l'algorithme opposé, où c'est l'étudiant qui choisit.

Tout à fait, il aurait été possible de prendre l'algorithme opposé. Cet algorithme a toutes sortes de propriétés, mais il en existe aussi des variantes, tels que des quotas pour les étudiants boursiers. Mais la base de l'algorithme, je l'ai expliqué en trois phrases. Et dans ces trois phrases, on voit bien que le cœur de la décision sont les classements par les formations.

En revanche, les autres algorithmes dont on parle beaucoup, Instagram, Facebook, sont un peu confidentiels, voire complètement confidentiels.

Les algorithmes de recommandation sur Facebook sont d'une part, un peu confidentiels. D'autre part, ils utilisent des méthodes d'intelligence artificielle qui utilisent un apprentissage à partir de données. Nous avons donc une boîte, une méthode algorithmique qui consiste à donner des poids à certaines

dimensions, certains paramètres, certaines caractéristiques, de façon que les résultats correspondent à ce qu'ils devraient être pour les données. Donc, on utilise ces données pour trouver les bons coefficients pour chaque paramètre, et ensuite, ça nous définit l'algorithme. Une fois les poids définis, on détermine comment le calcul sera fait. Le problème est que le résultat ne peut pas vraiment être expliqué. Qu'est-ce qui fait d'un résultat qu'il est juste, vrai ou faux, juste ou pas juste ? Sur ce point, il n'y a pas d'explication, ni de moyens faciles de vérifier ; il n'y a même pas de moyens très faciles de définir ce que veut dire *juste*.

En ce sens, ce ne sont pas des algorithmes dans la définition précise d'algorithmes.

Ce sont des algorithmes, dans le sens où lorsque l'on a la définition des poids à donner à chaque coefficient, on donne une entrée. Par exemple, on a une phrase avec des mots, on peut se représenter ces mots comme des nombres, donc ces nombres ont des coefficients. On applique le calcul de combinaison linéaire, on regarde si ça passe à seuil, on recommence une dizaine de fois ou plus, et à la fin on obtient un résultat, et donc on applique une suite de règles. À la base c'est une somme avec des coefficients ou une fonction de seuil, et ça nous donne un résultat, et appliquer une suite de règles c'est bien un algorithme. Le problème est que quand on regarde cet algorithme, on ne sait pas ce qu'il signifie, il y a donc la question du sens. Quand on applique une recette de cuisine, on peut l'appliquer à l'aveugle, donc on suit mais sans savoir pourquoi on fait chaque étape, ou on peut l'appliquer comme un cuisinier expérimenté en disant : *"Tu fais telle chose, parce que le cas échéant, voilà ce qu'il se passera."* Et pour ces algorithmes d'apprentissage automatique avec réseau neurones profonds, on ne sait pas encore expliquer pourquoi on fait telle chose plutôt que telle autre.

Maintenant je te donne un défi très



Programmation d'un robot Nao (SoftBank Robotics) utilisé dans le cadre de Rob'Autisme

compliqué, peux-tu en quelques phrases, nous expliquer la théorie informatique des algorithmes : pourquoi certains algorithmes fonctionnent et d'autres non ? Comment peut-on vérifier qu'un algorithme va se terminer ?

Dans le contexte d'une école maternelle, les algorithmes consistent à confectionner un collier de perles avec des règles. La règle n'est pas explicite, elle est donnée par cet exemple : on commence le collier pour l'enfant, on le lui donne à compléter et il poursuit l'ouvrage de son côté. Une perle verte, une rouge, une verte, une rouge, une verte, une rouge, une verte, une rouge... La question suivante étant, quand faut-il stopper le processus de fabrication ? Quand on arrive au bout du cordon, quand il n'y a plus de perles disponibles ? En général, il faut une règle pour savoir quand s'arrêter. Mais si l'algorithme ordonne : *"tant que vous pouvez avancer, continuez"*, peut s'arrêter à jour ? À priori, ça n'est pas évident quand on regarde l'algorithme, il en existe même pour lesquels on ne sait trop s'il est possible de les mettre à l'arrêt. Ici se pose alors une véritable question : peut-on choisir un algorithme – mettons,

DANS LE CONTEXTE D'UNE ÉCOLE MATERNELLE, LES ALGORITHMES

CONSISTENT À CONFECTIONNER UN COLLIER DE PERLES AVEC DES RÈGLES. ON COMMENCE LE COLLIER POUR L'ENFANT, ON LE LUI DONNE À COMPLÉTER ET IL POURSUIT L'OUVRAGE DE SON CÔTÉ. LA QUESTION SUIVANTE ÉTANT, QUAND FAUT-IL STOPPER LE PROCESSUS DE FABRICATION ?

”

un texte – l'analyser et estimer à la fin s'il est possible d'en voir la fin ? En réalité, il n'y a pas d'algorithmes qui puissent permettre de faire ça.

Les informaticiens – ou plutôt, les logiciens à l'époque – ont dû le ressentir comme une tragédie. Cette impossibilité de vérifier si un algorithme termine, ça a dû être presque une catastrophe, non ?

Je ne sais comment les gens l'ont ressenti à l'époque. Quand j'étais en classe prépa, il y avait une question très importante sur les





Portrait de Jean-Sébastien Bach à l'âge de 61 ans
Peinture d'Elias Gottlob Haussmann, 1748.

intégrales¹⁰ : “Quand on calcule une intégrale, il faut voir qui va jusqu'à l'infini, il faut voir si on a le droit d'appliquer les règles ou pas.” Cela vait le don de m'agacer, je suis très terre-à-terre, j'aime le concret et pour moi, une intégrale se calcule toujours. Alors toutes les situations dans lesquelles on n'arrive pas à décider, sortent un peu de mon univers, je ne me sens pas concernée.

Il me semble que beaucoup de mathématiciens sont ainsi, ils connaissent ce théorème que tu viens de citer, mais se détournent avec effroi de la vérité. Merci beaucoup, Claire, pour tes explications. Es-tu musicienne ?

Je fais un peu de musique, oui.

Quel type de musiques écoutes-tu, et laquelle pourrais-tu me recommander pour un algorithme ?

Du Bach, évidemment. Les fugues de Bach.

C'est drôle, beaucoup des personnes que j'interroge répondent à peu près la même chose. Bach est si mathématique, si algorithmique. Une fugue précise, dis-moi ?

Ce n'est pas une fugue, mais une toccata pour orgue, tu connais ? [Toccata et fugue en ré mineur, BWV 565] On l'exécute au pédalier, sur les claviers, les voix se répondent les unes aux autres, il y a des échos, des relations entre les différentes voix. Ces relations, ces enchaînements suivent des règles un peu algorithmique sans pour autant que tout soit déterminé. ●

FIN DU 8^E ÉPISODE

.....
10. Intégrale : résultat d'une opération mathématique, effectuée sur une fonction (relation entre deux groupes de chiffres) appelée “intégration”.

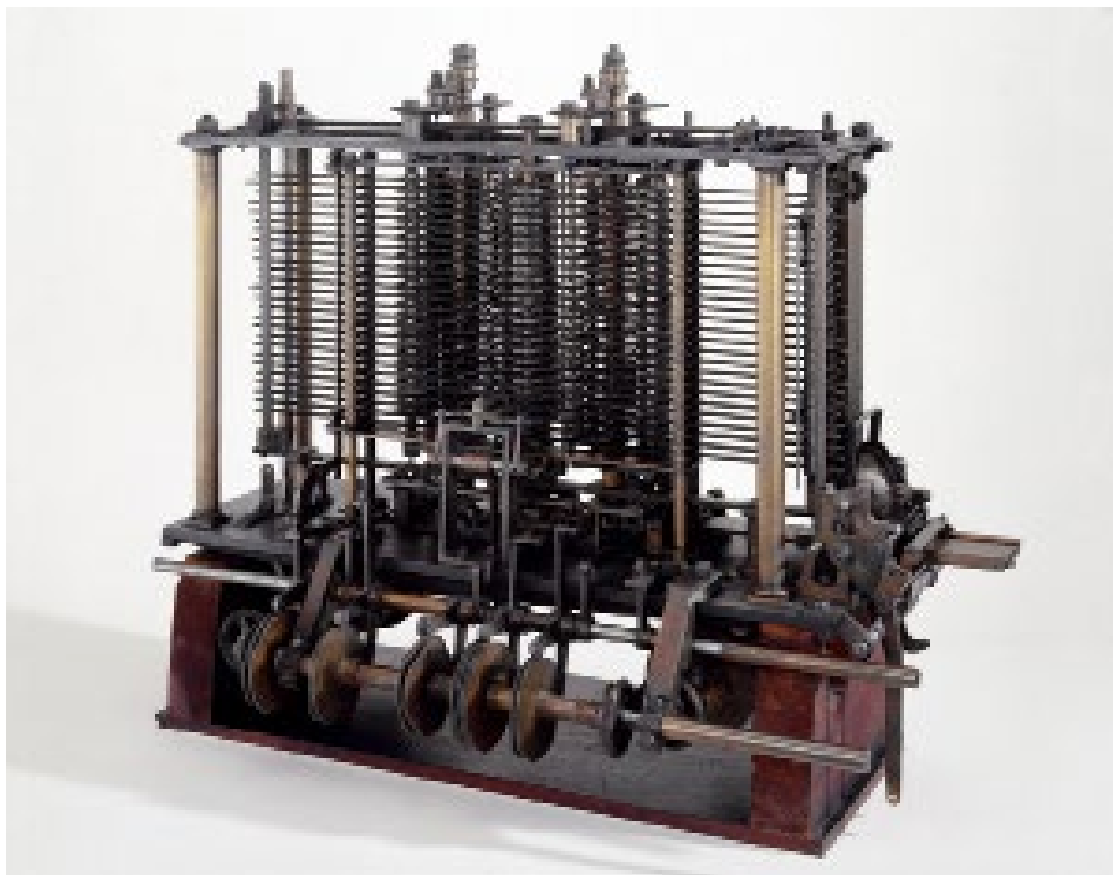


Diagram for the computation by the Engine of the Numbers of Bernoulli. See Note G. (page 773 of sup.)

Number of operations.	Number of operations.	Number of operations.	Number of operations.	Number of operations.	Statement of Results.	Data.												Working Variables.				Result Variables.				
						u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}	u_{17}	u_{18}	u_{19}	u_{20}	
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
2	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
3	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
4	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
5	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
6	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
7	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
8	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
9	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
10	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
11	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
12	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
13	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
14	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
15	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
16	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
17	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
18	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
19	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									
20	$u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = u_8 = u_9 = u_{10} = u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{14} = u_{15} = u_{16} = u_{17} = u_{18} = u_{19} = u_{20} = 0$																									

This follows a repetition of Operations thirteen to twenty three.

(ci-dessus) Machine analytique de Charles Babbage, 1871. L'appareil serait le premier ordinateur de l'Histoire.

La mathématicienne Ada Lovelace se chargea d'écrire le programme de cette machine dont elle avait suivi la construction de près. De fait, il s'agit aussi du tout premier algorithme, connu aujourd'hui sous le nom de "note G". (ci-contre)

Épisode n°09

SCIENCE AVEC XAVIER DARCOS



XAVIER DARCOS

de l'Académie française, est un professeur agrégé en lettres et sciences humaines, haut-fonctionnaire et politicien. Il a été sénateur puis Ministre de l'Éducation nationale. Depuis 2006, il est également membre de l'Académie des sciences morales et politiques, et Chancelier de l'Institut de France à partir de 2018.

Philosophe faisant un exposé sur le planétaire
Peinture de Joseph Wright of Derby, 1766.



*Après algorithme, exponentiel ou encore magma,
Étienne Ghys, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, reçoit
Xavier Darcos, Chancelier de l'Institut de France, pour commenter le mot science.
Comment ce terme se distingue-t-il du savoir ? Faut-il parler de « la science » ou
« des sciences » ?*

*Dans cet échange, les deux académiciens interrogent le rôle de la raison face au
relativisme contemporain, la place du scientifique dans le débat public et la manière
dont la science reste un rempart essentiel contre les
dérives de notre société.*

ÉTIENNE GHYS Je suis avec Xavier Darcos, chancelier de l'Institut de France, membre de l'Académie française, de l'Académie des sciences morales et politiques. Xavier, tu as beau ne pas être scientifique, pourrais-tu me proposer une définition du mot science ?

XAVIER DARCOS Avant de le définir, je rappellerai qu'il y a une ambiguïté connue dans l'histoire de la langue sur les mots science et savoir. "Savoir" contient la racine latine *saper*, supposant la sensation ou renvoyant à sagesse, goût, intuition. La "science" se fixe au contraire des objectifs beaucoup plus rationnels, elle est la connaissance définie à partir de pro-

cessus très objectifs, tels que l'expérimentation, la vérification, l'universalisation. Nous sommes là dans le domaine de la raison et de la preuve, tandis que le savoir est beaucoup plus nuancé. Dans les sciences humaines, une deuxième difficulté se présente : le mot science au singulier et le mot sciences au pluriel ne signifient pas exactement la même chose. La science rassemble à la fois la connaissance et l'ensemble des connaissances. Le pluriel, lui, permet d'échapper à ce cadre très rigoureux, il offre un peu plus de souplesse à la définition de la science ; on parle de sciences humaines, sciences de la nature, sciences morales, sci-



ences politiques.

Comment ressens-tu cette façon de trahir la science ?

Je constate avant tout chose que la science est perçue comme l'opposé du libre arbitre, du droit de dire ou de faire n'importe quoi. Pour le malheur de la société moderne, toute parole quelle qu'elle soit émise à partir de quelques processus que ce soit de communication, est validée. Un savant digne de ce nom passe énormément de temps à exposer son sujet de manière sophistiquée, il est attendu de l'auditeur qu'il soit

Penses-tu que les scientifiques en font suffisamment pour porter leur parole ?

Certains scientifiques font parler d'eux. Certaines sciences sont aujourd'hui entendues : les sciences médicales, la cybernétique, l'informatique, et cela va continuer de plus belle avec l'intelligence artificielle. D'autres sciences plus complexes telles que la cosmologie sont difficiles à cerner pour l'intelligence commune, peut-être par manque d'intérêt. En revanche, en ce qui concerne les progrès de la science contre les cancers, sur l'imagerie médicale, la prévention, les gens écoutent ce qui a trait aux progrès techniques !

“ **LA SCIENCE SOUFFRE DU RELATIVISME ABSOLU DANS LEQUEL NOUS VIVONS DE NOS JOURS, ET DE LA PRISE DE PAROLE INCONTRÔLÉE. SUR LES PLATEAUX DE TÉLÉVISION, LE SCIENTIFIQUE EST L'INTERVENANT QUI A LE PLUS DE MAL À SE FAIRE ENTENDRE, SES PROPOS NÉCESSITANT UN CERTAIN NIVEAU D'ATTENTION DE LA PART DU PUBLIC.**

très attentif pour tout comprendre. La science souffre du relativisme absolu dans lequel nous vivons de nos jours, et de la prise de parole incontrôlée. Le virtuel et le réel se mêlent d'une manière parfois impossible à discerner, sur les plateaux de télévision lors de débats, le scientifique est l'intervenant qui a le plus de mal à se faire entendre, ses propos nécessitant un certain niveau d'attention de la part du public. Et assises à côté de lui, la personne qui raconte n'importe va soulever les foules, parce que tout le monde comprend ce que raconte le baratineur, le montreur d'ours.

L'Académie des sciences a publié une tribune à propos des événements récents aux États-Unis, dans laquelle la science y est défendue comme garante de la société. Une sociologue m'a écrit récemment pour me dire son désaccord : la science ne doit pas s'occuper de la société, seulement de la connaissance. La science doit se contenter d'être utile à la société.

Le scientifique a pour rôle d'être savant, je ne le conteste pas. Mais en France, le texte fondateur pour nous est le texte préliminaire à l'Encyclopédie, rédigé par Jean Le Rond d'Alembert en 1759. Trois notions en ressortent : la notion de science, la notion de progrès et la notion de société. Savoir permet de progresser, ce qui induit à une société meilleure. Pour nous autres Occidentaux, considérer que le scientifique ne doit pas s'occuper de la société qui l'entoure semble difficile. Tout progrès scientifique, toute connaissance nouvelle, impacte évidemment l'évolution du monde, de même que les relations interpersonnelles qui s'établissent dans la société.

Tu as été, ou peut-être encore un peu un homme politique, tu as donc dû discuter de la Science dans la société. Trouves-tu que les politiques tiennent suffisamment compte des scientifiques



Éducation de Gargantua
Illustration pour Gargantua (François Rabelais), 1542.
Gravure de Gustave Doré, 1854.

Comment Pantagruel, étant à Paris, reçut lettres
de son père Gargantua, et la copie d'icelles :

*“Mais parce que, selon le sage Salomon, sapien[s]
n'entre point en âme [malveillante], et science sans
conscience n'est que ruine de l'âme, il te convient
servir, aimer et craindre Dieu et en lui mettre toutes
tes pensées et tout ton espoir, et par foi, formée de
charité, être à lui adjoint, en sorte que jamais n'en sois
[séparé] par péché.”*

(Gargantua & Pantagruel, Livre II – Transcript. de Henri Clouzot, 1913.)

aujourd'hui ? À l'époque napoléonienne, un nombre significatif de ministres était de grands scientifiques ; ce n'est plus le cas aujourd'hui. Que penses-tu de cette situation ?

Je pense que la politique a vécu le malheur de toutes les disciplines, que sont la démagogie, la vulgarisation, la mise en scène de la pensée. Il y a en effet un affaiblissement de la dignité, de la fonction politique, de la parole politique elle-même, sans parler des pitreries qui se passent aux États-Unis. Même dans des pays comme les nôtres, on tient à la médiatisation des choses. Je pense qu'aucune personnalité politique ne vient aux affaires pour faire le mal de l'humanité sciemment, tout le monde souhaite réussir, faire en sorte que son département ministériel apporte un progrès. Mais cette médiatisation exige que l'on avance vite, de produire des résultats rapidement. Certaines phrases vont être très vite répétées dans la presse, alors que les grandes réformes, notamment celles qui touchent la question du savoir, requièrent un peu plus de temps, parce qu'il faut les penser puis réfléchir à leur diffusion. Quand tu occupes le poste de ministre de l'Éducation nationale, tu peux te retrouver à devoir prendre une décision dont tu sais qu'il te faudra au moins dix ans pour la mettre en place concrètement. Or, les citoyens

attendent des résultats pour le mois suivant. La difficulté est donc moins liée au métier d'homme politique ou à la fonction politique, qu'à la mise sous le regard de toute action publique. Une culture journalistique que je n'apprécie guère.

Comment se comportait le petit garçon Xavier vis-à-vis des sciences, as-tu toujours été un littéraire ?

“ DANS DES PAYS COMME LE NÔTRE, ON TIENT À LA MÉDIATISATION DES CHOSES. MAIS CETTE MÉDIATISATION EXIGE DE PRODUIRE DES RÉSULTATS RAPIDEMENT, ALORS QUE LES GRANDES RÉFORMES, NOTAMMENT CELLES QUI TOUCHENT À LA QUESTION DU SAVOIR, REQUIÈRENT UN PEU PLUS DE TEMPS. ”

Curieusement, j'étais un assez bon élève en sciences. Au lycée, j'étais dans la section dite "à prime", un bon élève un peu guidé par la famille et par l'orientation. Mais je dois reconnaître que, pour moi, le monde des sciences, notamment celui des mathématiques ou de la physique, était un univers très abstrait qui m'ennuyait, au fond. Alors que lire un livre... Et plus que tout, j'aimais l'histoire, la littérature, l'art, la musique. J'étais un élève convenable, ce n'était toutefois pas du tout ma direction.

aux mathématiques. Le "clavier bien tempéré" de Bach passe tous les temps possibles en majeur et en mineur, soient vingt-quatre. Pour chaque fugue, il y a un choix qui relève d'une recette mathématique. Alors pour répondre à ta question, je choisis la fugue de la Grande Suite *Toccata Adagio et Fugue en do majeur [BWV 564]* de Bach. ●

FIN DU 9^E ÉPISODE

Mais aujourd'hui, tu as un peu de respect pour les scientifiques ? [Rires]

J'ai le plus grand respect pour les scientifiques, et même plus encore pour tous ceux que je ne comprends pas. Je respecte énormément les scientifiques, ils ont le grand mérite. Je pense à Georges Charpak¹¹, que tu as bien connu. J'ai eu la chance d'être son ami à la fin de sa vie. Il me disait : "*Quand tu enseignais, tu devais mettre 11,5 ou 12,5 à un devoir ou à une dissertation. Mais quand tu fais une soudure, tu as le choix entre zéro et 20, il n'y a jamais 17.*" Il défendait cette rigueur, cette véridiction, cette épreuve de vérité qu'est la science par rapport aux disciplines plus souples, plus évasives telles que sont la littérature.

Pour ma dernière question, j'aimerais que tu me donnes la musique qui illustre le mieux ton image de la science.

Une fugue, car c'est une forme rythmée par des forces mathématiques. Un thème, un sujet, un contre-sujet, et l'art de créer une sorte de canon avec le même sujet plusieurs fois, les renversements ensuite thématiques et la strette à la fin. J'écoute beaucoup Bach et je suis toujours frappé par cette hyper-structure de la musique de Bach, elle est profondément fondée sur un ordre du monde qui ressemble

.....

11. Georges Charpak (1924-2010) : physicien français spécialisé dans la physique nucléaire. Chercheur au CNRS, entre autres honneurs il fut élu membre de l'Académie des sciences en 1985 et récompensé du prix Nobel de physique en 1992 pour ses travaux sur les détecteurs de particules à hautes énergies.



Faust dans son laboratoire
Photographie de Frédéric Boissonnas, 1899.

Épisode n° 10

MODÉLISATION AVEC BERTRAND MAURY



BERTRAND MAURY

est un mathématicien récompensé par la médaille d'argent du CNRS en 2022. Professeur au laboratoire de mathématiques d'Orsay (Université Paris-Saclay), il a été rattaché au laboratoire de mathématiques (DMA : Département de Mathématiques et Applications) de l'École Normale Supérieure de Paris de 2014 à 2024

De Pythagore, nous retenons l'idée que « tout est nombre ». Bertrand Maury, mathématicien, modélisateur et membre de l'Académie des sciences, va plus loin : « tout est structure ». C'est dans cette perspective que la modélisation s'impose comme un outil clé pour décrypter le monde qui nous entoure.

Dans cet épisode, il explique comment les mathématiques permettent d'analyser le réel à travers des exemples variés : des avalanches aux phénomènes de foule, en passant par la prévision du climat. Mais attention, la modélisation n'est pas une boule de cristal ! Si elle aide à décrire les mécanismes en jeu, elle ne permet pas de prédire l'avenir avec certitude.

ÉTIENNE GHYS Je suis avec **Bertrand Maury, mathématicien et modélisateur.** Nous allons parler du mot *modélisation*. Pourrais-tu nous en donner une première définition approximative ?

BERTRAND MAURY La modélisation est à l'extérieur des mathématiques, mais elle permet de faire le pont entre les mathématiques et le monde extérieur. Les mathématiques ne doivent rien au réel, mais par ses concepts, ses équations, elles facilitent le raisonnement avec la réalité extérieure. La modélisation fait le lien entre la réalité, une réalité qu'on peut vivre tous les jours. On peut parler de ce qu'on observe évidemment dans la physique, le comportement des fluides, des grains, le comportement des solides, donc une réalité physique au sens traditionnel du terme, et puis des choses un peu plus exotiques, comme le comportement social, le comportement des voitures, et ainsi de suite. Des choses que nous pouvons observer, dont nous pouvons chercher à encoder des mécanismes élémentaires. Pour être plus clair, pensons à la modélisation de systèmes d'entités en interaction. Ces entités peuvent être des objets, des billes, des cailloux, ce que les physiciens appelleraient des particules passives.

Tu n'as pas la prétention d'expliquer le comportement des humains ?

Je n'en ai pas la prétention, mais il est fécond d'essayer de mathématiser une partie de ce comportement. Je me suis particulièrement intéressé ces dernières années aux comportements des foules ou de façon plus générale, aux comportements d'êtres sociaux, de gens, au travers de la propagation d'opinions. Prenons un phénomène qu'on observe en général partiellement, comme les voitures sur la route. Nous allons chercher à mathématiser ce que nous voyons en écrivant des équations. Nous identifions d'abord ce qu'on appelle des variables mathématiques. Pour des voitures sur une route, ce sera la position des voitures au cours du temps, et nous cherchons à encoder les mécanismes qui pourraient expliquer ce qu'on observe.

Comprendre ou prédire ?

Les deux, mais je préfère comprendre. Pouvoir prédire est chose très difficile. Un modèle est-il prédictif ? C'est une question très délicate. Nous y reviendrons peut-être. Dans cette situation, il s'agit plutôt de comprendre un point de vue qualitatif, c'est-à-dire d'écrire ces équations, d'écrire ce qu'on pense être les mécanismes. Si deux voitures se suivent, on va écrire une certaine fonction : le fait que la vitesse de la voiture de derrière va dépendre de la distance au véhicule qui précède.





“ NOUS ESSAYONS PLUTÔT D'AVOIR
UNE SORTE DE MODÈLE QUI SERAIT

UNE VISION SIMPLIFIÉE DU RÉEL MAIS
PROPREMENT MATHÉMATISÉE, DONT ON
VA ÉTUDIER LE COMPORTEMENT. ”

Tu aimerais comprendre les embouteillages ?

Typiquement, ce serait l'émergence de phénomènes plutôt macroscopiques à grande échelle, que nous allons observer à l'aide de mécanismes encodés au niveau de la particule ou de l'entité du véhicule. Pour reprendre un mot employé en économie, on parlerait de *bottom-up* : on part du bas, du fonctionnement élémentaire de ces entités (ces véhicules) et on va chercher à écrire des équations. Nous aurons ensuite un système d'équations avec l'ensemble des degrés de liberté pouvant être la position des milles voitures sur une route. Ensuite, on va étudier ces équations. Comme les mathématiciens sont obsédés par l'idée d'existence, d'unicité, on va essayer de vérifier que le problème est bien posé : si on se donne une condition initiale, on va avoir une solution bien définie.

Tu ne cherches pas réellement à résoudre ces équations, mais à avoir une idée globale du comportement des solutions.

Effectivement, et le modèle d'ailleurs, pour anticiper un peu sur ce caractère prédictif, ne saurait prétendre prévoir le mouvement d'une particule. Nous essayons plutôt d'avoir

une sorte de modèle qui serait une vision simplifiée du réel mais proprement mathématisée, dont on va étudier le comportement. En s'aidant de simulations numériques, on va chercher à montrer que cet ensemble d'équations permet de retrouver les phénomènes qu'on observe, comme la circulation en accordéon. Ce qui permettra éventuellement d'identifier certains paramètres conditionnant l'importance de ces instabilités.

Est-ce proche de cette question de physique : l'air qui m'entoure est constitué d'un nombre immense de molécules se baladant dans tous les sens, qui s'entrechoquent ? Il n'est pas question de comprendre le mouvement de chacune d'entre elles, mais de comprendre plutôt ce qu'il se passe dans l'air.

Ça n'aurait aucun sens, aucune utilité de prévoir le mouvement d'une particule unique. En écrivant des systèmes, en les simplifiant, et en voyant les choses de façon globale, on essaye de reproduire des phénomènes. L'idée est la même lorsque l'on observe la mécanique des fluides à très grande échelle au niveau des courants d'air, sans plus se préoccuper de la position de telle ou telle particule.

Y-a-t-il un lien avec les modèles réduits avec lesquels je jouais quand j'étais petit ?

C'est une version un peu simplifiée et carica-

turale. Prenons une voiture possédant toutes les caractéristiques principales. Une façon de squelette va être identifiée par un moteur d'intelligence artificielle comme étant une voiture – ou tout du moins un objet ayant la forme d'une voiture réelle – avec une partie fonctionnelle et les quatre roues. On en obtient une version simplifiée. Évidemment, il n'y a pas de moteur thermique ou électrique mais l'objet obtenu en possède certaines caractéristiques.

Est-ce qu'aujourd'hui encore, on fait de la modélisation dite analogique comme pour les tests sur les ailes d'avion ?

Les souffleries ont essentiellement été remplacées par la modélisation. L'écriture des équations de la mécanique des fluides, leur résolution numérique, a donné lieu à un domaine des mathématiques à part entière. On l'appelle parfois le calcul scientifique, la résolution effective de ces équations, ou l'analyse numérique qui permet de préciser, de montrer qu'on a effectivement une approximation de la solution exacte. Et l'essentiel des souffleries, dont le coût revenait par ailleurs très cher, ont été remplacées par de gros ordinateurs assurant le travail sur des prototypes virtuels. Certaines souffleries persistent toutefois à être utilisées en recherche. Les avalanches, les éboulements de terrain sont des phénomènes très difficiles à étudier, on les reproduit en laboratoire pour les étudier. L'avantage de ce dispositif expérimental, si on dispose d'un instrument de mesure précis, repose sur sa capacité à fournir une meilleure compréhension des mécanismes, du déclenchement et de l'évolution du phénomène, par rapport à une observation sur le terrain avec une avalanche réelle. Ce n'est pas contradictoire avec l'utilisation de modèles conceptuels mathématiques, mais ce dispositif est très utile surtout dans des domaines comme les avalanches, dont on ne connaît pas parfaitement la physique. Dans

la mécanique des fluides, on sait ce qui se passe : les modèles sont solides, ils sont compliqués mais d'une certaine manière, ils sont admis comme le sont les équations de Navier-Stokes utilisées pour modéliser la circulation de l'air présent dans cette pièce, l'air dans les poumons ou encore l'eau des océans. Quand on sait résoudre ces modèles numériquement avec précision, on retrouve effectivement la réalité. C'est difficile, mais il n'y a pas d'ambiguïté sur



CERTAINES SOUFFLERIES PERSISTENT À ÊTRE UTILISÉES EN RECHERCHE.

L'AVANTAGE DE CE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL REPOSE SUR SA CAPACITÉ À FOURNIR UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES, DU DÉCLENCHEMENT, DE L'ÉVOLUTION DU PHÉNOMÈNE. CE N'EST PAS CONTRADICTOIRE AVEC L'UTILISATION DE MODÈLES CONCEPTUELS MATHÉMATIQUES, MAIS CE DISPOSITIF EST TRÈS UTILE DANS DES DOMAINES DONT ON NE CONNAÎT PAS PARFAITEMENT LA PHYSIQUE.



les modèles. Quand on est dans des situations un peu intermédiaires, les lois physiques ne sont pas si claires – c'est le cas d'ailleurs des sciences sociales où la modélisation se situe au niveau de l'entité. Peut-être même qu'elle n'existe pas, ou si elle existe, c'est de façon très imparfaite. On va simplement en faire une caricature du comportement, assimiler un conducteur automobile à une sorte de robot qui agit en fonction de ce qu'il voit, mais de façon assez rudimentaire. Dans ce cas-là,



si on arrive à avoir un modèle qui reproduit les phénomènes expliqués, on peut penser qu'on a capturé l'essence de ce phénomène, la cause du phénomène, et on peut en contrôler les effets. Comme pour la circulation en accordéon, si on s'arrange pour que les conducteurs aient un comportement différent, on va diminuer la probabilité que cette circulation en accordéon apparaisse. Donc on peut agir sur le système.

“ **LE MODÈLE PRÉDICTIF EST CONDITIONNÉ À LA VALIDITÉ DES INGRÉDIENTS QUI Y ONT ÉTÉ INTRODUITS. CEPENDANT, SI ON APPLIQUE CE MODÈLE À UNE SITUATION RÉELLE, ON PEUT ÉVIDEMMENT AVOIR UNE CONNAISSANCE ABSOLUE DU COMPORTEMENT DE CHACUN.**

Si je comprends bien, tu n'es absolument pas un physicien mais un mathématicien. Tu n'es pas un expérimentateur, tu fais des expériences de pensée, en quelque sorte.

Ce sont effectivement des expériences de pensée, et ce travail ne se fait pas tout seul. J'ai énormément de contacts avec des scientifiques d'autres disciplines, ou des gens qui ne se revendiquent pas des sciences académiques à proprement parlé. Dans les sciences sociales, c'est un avantage, on est son propre objet. Il m'arrive d'être moi-même conducteur, je peux donc modéliser mon propre comportement et regarder ce que donne un système constitué de mille copies de moi-même. Et de voir si je retrouve le comportement observé en pratique. Ça peut paraître un peu paradoxal, comme je suis professeur dans un laboratoire de mathématiques. Mais, comme je disais tout au début, la modélisation est à l'extérieur des

maths. Alors on pourrait se demander pourquoi faire de la modélisation quand on est mathématicien ? Je pense qu'il y a quelque chose de très fécond dans l'idée de faire des allers-retours entre ce monde à l'extérieur des mathématiques, ce pont entre la réalité et les mathématiques, et puis les mathématiques elles-mêmes. C'est pour cette raison que la modélisation est difficile à enseigner en tant que telle. Comme les règles du jeu ne sont pas très claires, les étudiants sont souvent troublés quand on passe d'une démarche de modélisation qui, par essence, est informelle, tâtonnante, et à certains moments on obtient un système qui est clair mathématiquement. On peut l'étudier en tant que tel. Son intérêt mathématique peut être fort et être complètement déconnecté du réel. Un mauvais modèle en tant que représentant de la réalité, mais un modèle intéressant, comme objet mathématique.

” **Quelle confiance tu te donnes dans un modèle ?**

Ça dépend beaucoup de la situation. Je ferais quand même une différence essentielle entre le monde des entités passives et celui du monde physique, pour lequel la démarche est quand même bien balisée. On peut faire des comparaisons très précises avec des expériences. Quand on a un modèle, on peut le tester, le confronter à la réalité, éventuellement à la réalité observée dans la nature ou concevoir des expériences de façon à comparer, à maîtriser parfaitement les conditions initiales. Dans ce cas, on peut avoir des modèles relativement prédictifs, en particulier en mécanique des fluides. Si cela se passe bien, on peut parler parfois de l'effet papillon. On ne décrit pas chaque micro-tourbillon apparaissant sous la clocher de Notre-Dame, mais sur les quantités globales, on va avoir des systèmes assez fiables permettant, à l'heure actuelle, sur le long ou le semi-long terme, d'obtenir des prévisions météo relativement

fiables à huit ou dix jours. Cela peut aller aussi sur des prévisions à beaucoup plus long terme, avec des objets de modélisation différents sur la prévision en termes de climat, même si on ne prétend pas avoir modélisé le mouvement de chaque tourbillon, de chaque molécule d'air.

En revanche pour les choses de nature sociologique ?

Alors là on a un problème dans la constitution du modèle. Le modèle prédictif est conditionné à la validité des ingrédients qui y ont été introduits. Si je modélise des conducteurs, je le fais selon un mécanisme tel qu'une courbe de comportement qui va venir préciser la relation entre la distance au véhicule qui précède et la vitesse que j'ai. On peut prendre en compte des conducteurs plus ou moins prudents ; je ne rentrerais pas dans les nationalités ou les préjugés qu'on peut avoir sur les différents pays, mais on sait que les conduites sont différentes. Cependant, si on applique ce modèle à une situation réelle, on peut évidemment avoir une connaissance absolue du comportement de chacun. On ne peut pas être sûr de la réal-

ité, on ne peut que rester à un niveau relativement qualitatif. Ça marche relativement bien pour l'apparition au non de circulation en accordéon, de bouchons. En revanche la modélisation du mouvement du CO² comme proxy des molécules, des petites particules de l'ordre de 1 micron émises par les gens, est régie par des équations de fractions qui sont bien connues, mais qui sont très compliquées à résoudre. Modéliser très précisément dans les heures qui viennent l'air dans cette pièce, n'est pas à la portée des scientifiques actuels. Cependant, paradoxalement, ces modèles extrêmement compliqués en moyenne se comportent de façon assez simple. On peut vérifier dans le cas du CO², que finalement le gaz carbonique, le dioxyde de carbone que j'émetts, se diffuse par convection, il va donc y avoir une diffusion naturelle qui est assez négligeable. Mais le brassage de l'air va permettre d'uniformiser en une fraction de minutes ou quelques minutes le CO² dans cette pièce. Donc, les mécanismes sont extrêmement compliqués, mais à la fin on observe quelque chose de relativement simple si on ne s'intéresse pas au détail.

La chercheuse Sandra Lavorel réalise une modélisation spatiale des services écosystémiques du massif des Écrins

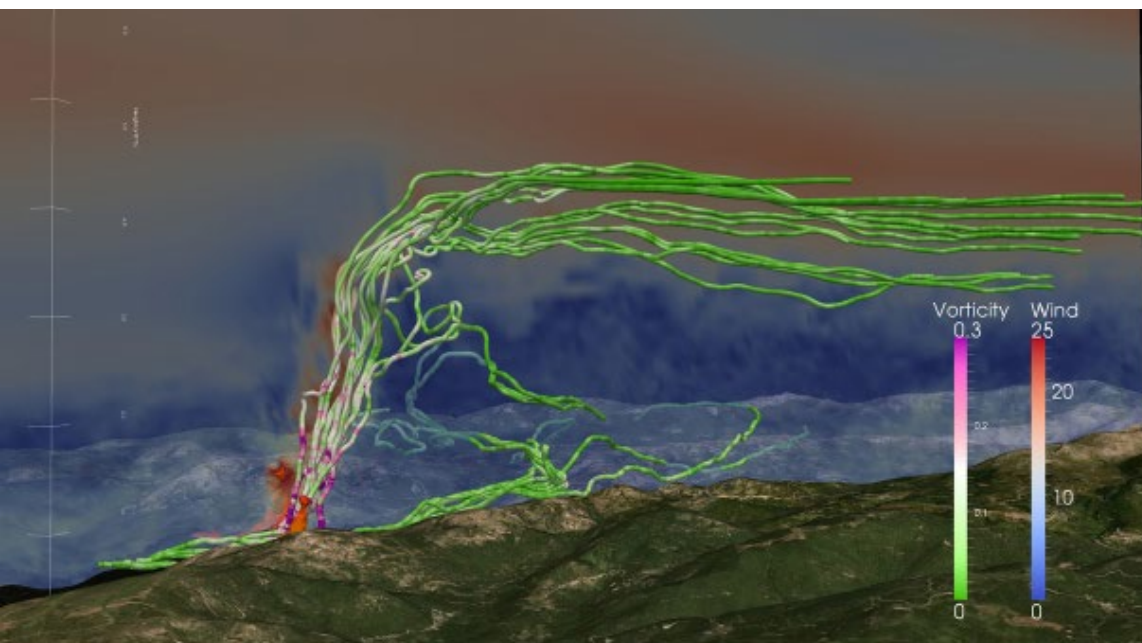


Qu'est-ce qui t'intéresse dans ta profession, le fait d'être mathématicien, le fait d'avoir des interactions avec des gens très différents, de frotter à des cultures différentes ?

Je suis vraiment très attaché à la modélisation elle-même, ce qui peut sembler un peu étonnant comme ce n'est pas dans ma fiche de poste au départ. Je pense que la vie de mathématicien telle que je la conçois est beaucoup plus riche quand on participe à cette démarche de modélisation, même si elle est à l'extérieur. Je serais un peu frustré de travailler uniquement sur des problèmes directement mathématisés en faisant des études et je respecte tout à fait le travail des gens qui font ça. Mais à titre personnel, j'aime assez cette position entre deux chaises, d'être un peu à la bordure de ce monde merveilleux et éthéré des mathématiques, et d'en sortir parfois pour aller piocher des choses que j'essaie de mathématiser et à partir des résultats des modèles mathématiques, de les reconfronter au réel. C'est une démarche qui peut être assez pénible, assez difficile, assez longue, parfois pas très valorisante académiquement, mais qui est passionnante..

L'autre jour, à l'issue d'une tes conférences, une personne est venue me voir pour me poser une question que je te pose aujourd'hui. Crois-tu que tout est modélisable ?

J'aurais tendance à dire, d'une certaine manière, oui. Je ne veux pas dire que tout est mathématisable, on peut construire un modèle prédictif de tout. Mais je pense que tout ce qu'on peut concevoir, se mathématise d'une manière ou d'une autre. L'impression que j'ai au fil des années, est que quand on se donne les moyens de le faire, on trouve toujours un concept mathématique, et s'il n'existe pas, on le crée et celui-ci résonne d'une certaine manière avec la réalité observée. Encore une fois, il ne s'agit pas de dire qu'on peut mettre dans un ordinateur tout ce qu'on observe, en particulier dans le cas des mouvements sociaux, et avoir un modèle prédictif de ce qui va se passer. Il existe simplement une résonance entre la réalité. Ça a été vérifié au fil des siècles derniers pour ce qui est de la physique, avec des mathématiques, ces objets conceptuels qui collent quand même étonnamment bien, qui sont extrêmement féconds pour modéliser la réalité physique passive.



Modélisation de l'incendie d'Aullène en Corse-du-Sud, le 23 juillet 2009

En clair, tu es en train de dire comme**Pythagore : tout est nombre.**

Oui d'une certaine manière, tout est structure. Les mathématiques sont un univers parallèle qui pourrait en soi nous déconnecter du réel, c'est ce qui fait sa beauté aussi. Mais il existe des correspondances, parfois plus ou moins mystérieuses, et le fait de passer par des mathématiques permet de faire le lien entre des phénomènes de la réalité. On observe donc par le concept, on arrive à subsumer la réalité en des concepts. Tu m'as interdit d'utiliser des mots compliqués, mais j'en utilise quand même un.

On va conclure avec une dernière question.

Apprécies-tu la musique et si oui, pourrais-tu trouver un morceau qui pourrait illustrer ce dont on vient de parler ?

Je fais du piano depuis plus de 40 ans et on me pose souvent cette question. Les gens essaient souvent de me faire dire qu'effectivement il y a un lien entre le goût pour les mathématiques et le goût pour la musique. Et en fait, plus j'évolue en temps, plus je trouve que ce qui est intéressant dans la musique, c'est plutôt ce qui n'est pas mathématique. Mais ça n'empêche pas de remarquer de façon flagrante qu'il y a des choses mathématiques en musique. Il y a une structure assez forte. Évidemment, on pense à Bach, aux fugues de Bach. Il existe d'ailleurs des exercices intellectuels dans l'art de la fugue. Mais paradoxalement, ces fugues sont belles, bien qu'elles soient mathématiques, et pas parce qu'elles sont mathématiques.

J'en ai joué, il n'y a pas très longtemps de ces fugues où on retrouve ces thèmes. La première fugue de l'art de la fugue est relativement simple. Il n'y a qu'un seul sujet qu'on va retrouver. Effectivement avec cette sorte de principe de contrepoint, une sorte de canon généralisé donnant une impression à la fois de plénitude, c'est bien mathématique. Et on ressent

de l'émotion à faire des mathématiques. Bach a réussi à faire de la musique émouvante et pourtant extrêmement formelle. C'est le miracle de Bach ! ●

FIN DU 10^E ÉPISODE

Épisode n° 11

RIGUEUR AVEC TADASHI TOKIEDA



TADASHI TOKIEDA

時校正

*est un mathématicien japonais,
expert en physique mathématique.
Il a été directeur des études en
mathématiques à Trinity Hall
(Université de Cambridge) avant
d'exercer en tant que professeur de
mathématiques à l'université de
Stanford, à San Francisco.*

La rigueur est au cœur des sciences et en particulier des mathématiques et de la physique. Mais que recouvre réellement ce mot ? Pour beaucoup, elle évoque une logique implacable et une démonstration sans faille.

Pour le mathématicien et physicien Tadashi Tokieda, la rigueur ne se résume pas à cela. Il la définit comme la volonté de « réduire au maximum le risque de se berner ». Selon lui, la rigueur, ce n'est pas seulement respecter des règles formelles : c'est aussi une forme d'honnêteté intellectuelle, un rapport lucide à ses propres limites. Être rigoureux, c'est avant tout accepter l'erreur comme une étape nécessaire du raisonnement. Car c'est justement en se trompant que l'on apprend à raisonner avec précision. Aux côtés du mathématicien Étienne Ghys, il interroge notre rapport à l'erreur, au raisonnement, et à la manière dont on enseigne les mathématiques.

ÉTIENNE GHYS Je suis avec Tadashi

Tokieda. Tadashi, tu es physicien mais aussi mathématicien. Quel mot souhaites-tu qu'on décortique aujourd'hui ?

TADASHI TOKIEDA Avant le mot, une petite anecdote. Dans un musée d'histoire naturelle, un guide montre un immense squelette de dinosaure aux visiteurs :

- Le dinosaure qui se trouve devant vous a 150 millions et quinze ans.
- C'est très précis, ça, monsieur !
- Oui, c'est que j'ai un esprit rigoureux. Lorsque j'ai commencé à travailler ici, il y a quinze ans, on m'a assuré que ce dinosaure avait 150 millions d'années.

Le mot que j'ai choisi est rigueur.

C'est un mot qui fait un peu peur.

Exactement, la rigueur d'un hiver ne pardonne pas. J'ai fait la rencontre d'un professeur de physique qui dictait son cours phrase par phrase, virgule par virgule, on disait qu'il faisait un cours d'une rigueur exemplaire. Mais je pense qu'on faisait référence à une méthode préparée de façon intransigeante. Les mathématiciens parlent beaucoup de rigueur, je caricature peut-être un peu mais en mathématiques, ça représente plutôt le fait de pouvoir

tracer une ligne, une chaîne non brisée de démonstrations, une espèce de généalogie qui remonte jusqu'à la théorie axiomatique des nombres.

Un fil qui part du début et qui va jusqu'à l'affirmation.

C'est une façon d'assurer le bien fondé d'un énoncé, mais ce n'est pas la seule. J'opère entre deux communautés, celle des physiciens et celle des mathématiciens.

Les mathématiciens, tels des gorilles, se tapent sur la poitrine en disant : "Je suis très rigoureux." Les physiciens se tapent sur la poitrine en disant fièrement : "Je ne suis pas rigoureux", c'est un peu puéril. Qu'est-ce que la rigueur ? Pour moi, c'est une collection d'astuces ou de bonnes pratiques que l'humanité a développé pour réduire au minimum le risque de se berner. Chacun, selon sa discipline ou son métier, a une rigueur qui lui est propre.

Pourquoi ne pas vouloir se berner ?

Parce que dans le jeu, comme dirait Saint-Exupéry, les grandes personnes de notre société veulent berner tout le monde, n'est-ce pas ? Parce qu'on s'adonne à ce jeu social de vanité et de pouvoir, et on croit souvent que



dans cette immense organisation qu'on appelle société, il faut dominer les autres humains. Et pourquoi donc ne pas se berner ? C'est parce que je pense que même si on croit à ce jeu de la société, ce serait quand même bien de temps en temps de connaître le maximum de vérités face à la nature. Ce que vous faites avec les autres humains, c'est votre affaire personnelle qui relève de l'éthique, qui relève des questions pratiques. Mais moi, je ne suis pas très éthique, je peux être méchant envers les autres personnes, mais je veux quand même rester honnête envers moi-même. Et là, je ne veux pas me berner. Je veux connaître la vérité. La vérité est souvent inaccessible. Mais comment réduire au minimum le risque de se berner ? C'est ça, la rigueur. Chacun veut être honnête envers soi-même, et c'est ce qui est le plus difficile.

Mais ce que tu veux dire, quand même, c'est que cette rigueur, si elle est individuelle, doit être en cohérence avec la rigueur des gens qui sont autour de toi.

Il faut trouver des gens qui veulent aussi être rigoureux dans ce sens. Être rigoureux, ça

“ **LA RIGUEUR PEUT S'APPRENDRE. NON PAS DE HAUT EN BAS, MAIS EN SE TROMPANT, EN SE BRÛLANT LES DOIGTS DE TEMPS EN TEMPS. POUR POUVOIR APPRENDRE LA RIGUEUR, IL FAUT ÊTRE PRÊT À DIRE : JE ME SUIS TROMPÉ.** ”

peut être une pratique professionnelle. Dans chaque situation, dans chaque pratique, dans chaque problème, il faut se demander si on est rigoureux ou si on s'entend pour l'être.

Alors, je reprends ton exemple initial : est-ce que le professeur qui impose à ses élèves de prendre note est une bonne pratique pour apprendre aux élèves à se fabriquer leur propre rigueur ?

Ça dépend du contexte et du but qu'on se donne. Mais prendre note un peu à l'aveuglette, ligne par ligne, virgule par virgule, est-ce que ça cultive l'esprit qui cherche à se détromper ? La réponse est non, parce qu'on tombe dans une espèce d'hypnose. En fait, on ne s'aperçoit de rien. Quand ce qu'on est en train de copier ou recopier sur le papier ne fait pas sens, on est comme un automate...

Alors je vais poser la question différemment : est-ce que la rigueur s'apprend ?

Je dirais que la rigueur peut s'apprendre. Non pas de haut en bas mais en se trompant, en se brûlant les doigts de temps en temps. Pour pouvoir apprendre la rigueur, dans le sens où j'entends ce mot, il faut être prêt à dire : je me suis trompé. Lorsque j'ai commencé à assister à quelques cours à Tokyo, j'ai été ahuri par un cours d'algèbre assez élémentaire de M. Valda. Il allait écrire au tableau et un élève a dit : *“Monsieur, je pense qu'il y a une erreur là.”* Il a regardé l'élève, il a regardé le tableau, et il a dit : *“Ah oui, vous avez raison et j'ai tort.”* Il a effacé et a continué. Je n'avais jamais entendu un grand professeur ou une autorité dire ça si simplement et si bêtement.

Ceci me rappelle l'anecdote d'Henri Lebesgue qui assistait au cours de Gaston Darboux sur les surfaces développables, dans lequel il démontrait que les surfaces développables sont réglées et contiennent des droites. On raconte que Lebesgue a levé la main et a dit : “Professeur, ça n'est pas vrai. Mon mouchoir est développable puisqu'il était encore plat ce matin. Il est dans ma poche plié et mon mouchoir ne contient pas de droite.” Et là, c'était le début d'une théorie de surfaces irrégulières. Et ce qui est assez

remarquable, c'est que Darboux a pris ça très au sérieux et a fait publier l'un des premiers articles de Lebesgue dès le lendemain au compte-rendu de l'Académie des sciences. Il a donc reconnu son erreur.

Je pense qu'on peut apprendre l'égo mais peut-être qu'il y a une question de tempérament et aussi une ouverture d'esprit qui vous prépare à être rigoureux.

Ce qui m'inquiète un peu dans ton discours, si je peux me permettre, c'est qu'on a l'impression que tu es en train de promouvoir le fait que la rigueur de l'un peut ne pas être la rigueur de l'autre.

Non, c'est l'accord entre deux humains. Je pense que c'est ça qui manque le plus, plutôt que l'accord entre humains. Si oui ou non, vous avez la possibilité de dire : *“Tiens, ce que j'ai fait, c'était faux”*, et c'est très dur. Et surtout pour les grandes personnes, encore une fois, comme dirait Saint-Exupéry. Parce que nous sommes devenus les grandes personnes en accumulant des autorités, faisant semblant de ne pas nous tromper, parce qu'on peut se dire que se tromper est très dangereux. Et donc, on a tendance

à cacher ou rafistoler ses fautes. Et si même face à soi-même, on commence à ne pas reconnaître qu'on a commis une erreur, ça commence à éroder la vie privée

“

ON A TENDANCE À CACHER OU RAFISTOLER SES FAUTES. ET SI MÊME FACE À SOI-MÊME, ON COMMENCE À NE PAS RECONNAÎTRE QU'ON A COMMIS UNE ERREUR, ÇA COMMENCE À ÉRODER LA VIE PRIVÉE AUSSI. DÈS QUE L'ESPRIT COMMENCE À SE REFERMER, IL N'Y A PLUS DE POSSIBILITÉ DE DÉVELOPPER LA RIGUEUR.

”

aussi. Dès que l'esprit commence à se refermer, il n'y a plus possibilité de développer la rigueur. Bien sûr que dans de telles actualités, dans une telle culture, une telle époque, il peut y avoir un problème d'ordre social. Mais je commence vraiment à un niveau plus personnel, parce que je pense que c'est ce qui est une question plus éternelle. C'est-à-dire : *“Est-ce que nous pouvons être rigoureux”*, mais au sens, encore une fois, où je l'entends : *“Est-ce qu'on peut cultiver”*, et ça peut être un procédé joyeux. On peut être fier de sa compétence technique, cet ensemble de protocoles qui nous aide à réduire au minimum le risque de nous berner.

Est-ce que dans ta carrière, tu as fait



La licorne de Leibniz
Protogaea - De l'aspect primitif de la Terre de Gottfried Wilhelm Leibniz, 1691 (publ. 1749)
 Gravure anonyme, d'après un possible dessin de Johann Mäyer (ou Mayer)

Quand le manque de rigueur scientifique s'allie aux connaissances restreintes d'une époque : le philosophe Leibniz se rendit en 1686 sur le site grotte de Scharzfeld (actuelle Basse-Saxe) où des ossements de licornes, disait-on, avaient été retrouvés au siècle passé. En réalité, ces fossiles correspondaient aux restes de près de 70 espèces d'animaux différentes, la caverne ayant servi d'abri à des prédateurs depuis le Paléolithique supérieur. Inconscient de ces origines disparates, Leibniz joignit avec le plus grand sérieux à son *Protogaea* le prototype dessiné d'un squelette de licorne. Prototype conçu à partir de ce que l'on sait être aujourd'hui les vestiges d'un mammouth et d'un rhinocéros laineux.





Christ régner sur l'univers
Mappemonde extraite d'un psautier anglais disparu, c. 1260
Artiste anonyme

Les Européens ont longtemps réfléchi le monde à l'aune de leurs observations, des récits bibliques et des croyances régionales. En témoigne cette carte où Jérusalem est définie en tant que centre du monde, encadrée d'anges et de créatures du folklore médiéval telles que deux wyvernes (petits dragons). Il y figure également un Jardin d'Éden alimenté par le Gange, les portes d'Alexandre le Grand, le duché de Cornouailles ou la ville de Troie.

des erreurs dans une contribution mathématique ou physique ?

Ah oui. Tu veux que je te donne un exemple ?

On va transformer cette interview en un confessionnal. [Rires] Tadashi parle d'un problème de physique qu'il avait résolu mathématiquement, pourrait-on dire, mais sans s'attacher à la réalité physique. Des contestations sont apparues chez des collègues, et Tadashi a dû reconnaître que son résultat aurait pu être mieux présenté. Bref, une erreur, même si Tadashi rechigne quand même à dire que c'était une erreur...

L'une des manières d'apprendre la rigueur, c'est d'être témoin de professeurs ou de gens qui possèdent ces rigueurs et qui reconnaissent leurs erreurs. Parce que l'élève, voyant le professeur reconnaître son erreur, apprend.

Et ça cultive un grand respect envers ce professeur. Quelqu'un qui ne fait pas d'erreur, c'est peut-être quelqu'un qui fait une erreur, la reconnaît, et en fait sort de son propre tour. Ça, c'est vraiment impressionnant.

Ce qui m'intéresse dans ce que tu dis, c'est le caractère personnel de la rigueur. J'avais

toujours en tête l'universalité de la rigueur.

Et justement, c'est pour ça que je me suis servi d'un verbe réflexif : ne pas se berner pour éviter de se berner.

Il y a une question que je pose à tout le monde, c'est la musique qui, selon eux, est plus appropriée pour leur discours.

Je ne suis pas très éduqué musicalement. J'ai fait beaucoup d'expériences de genres, j'ai des amis musiciens vraiment de très haut niveau et ils ont la gentillesse de jouer pour moi de temps en temps. Et après, ils me disent : *“Ah oui, j'ai fait plein d'erreurs, c'était terrible, j'ai mal joué, excuse-moi, c'est impardonnable.”* Alors que moi je trouvais ça très beau. C'est une expérience. Et en fait, j'ai des expériences réciproques, c'est-à-dire que quand je fais des conférences, je reconnais parfois : *“Oh là là, je me suis gouré, je me suis mis le doigt dans l'oeil, alors que les gens sont enchantés.”* Je n'ai pas de musique en tête, peut-être une qui est très belle mais où l'interprète peut faire des erreurs sans que toi ou moi ne nous en rendions compte.

Ah, c'est bien. Parce qu'en général, les gens que j'interroge me disent : “Oh, tu vas mettre du Bach.” Mais Bach, dès qu'il y a une erreur, ça ne va pas.

C'est exactement ça !

Donc une musique pas trop rigoureuse ?

Non, la musique où la rigueur tient à la personne de l'interprète. Où on peut être aussi rigoureux qu'on veut, mais c'est un choix personnel. C'est un ensemble d'astuces personnelles. Et c'est une étude. Tu entendras ce mot bien sûr, entre mathématiciens, la stabilité structurelle de la musique.

C'est intéressant. La différence est consciente chez les musiciens ?

Alors, j'ai assisté à beaucoup d'expériences et mes amis musiciens me disent : *“Ah oui, j'ai fait...”* ou d'autres disent : *“Non, non, non, c'était*

bien.”

J'ai demandé à un musicien de l'Académie des Beaux-Arts ce qu'il pensait de cette question. Il m'a raconté qu'un copiste n'arrivant pas à lire une note dans une partition de Pierre Boulez avait demandé des explications, et Boulez avait répondu : “Mettez ce que vous voulez, ce n'est pas très important.”

Vrai ou pas vrai, je n'en sais rien. ●

FIN DU 11^E ÉPISODE

Épisode n°12

COULEUR

AVEC GUY PERRIN



GUY PERRIN

est docteur en astrophysique et techniques spatiales et astronome. Il occupe actuellement un poste de chercheur au Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA) de l'Observatoire de Paris.

De Tintin à Pink Floyd, la lumière que Newton décomposa au XVII^e siècle continue de nourrir l'imaginaire des scientifiques comme des artistes. Dans cet épisode, l'astrophysicien Guy Perrin explique au micro d'Étienne Ghys les mécanismes à l'origine des couleurs. Saviez-vous que l'œil humain ne perçoit essentiellement que trois couleurs, alors que le chat ou le papillon voient bien au-delà ?

À travers l'exemple des étoiles et des galaxies, Guy Perrin nous initie à la classification spectrale des astres — une science où la couleur devient révélatrice de température et de composition. Car si, à l'œil nu, la plupart des étoiles paraissent blanches, elles sont en réalité rouges, jaunes ou bleues, selon leur température. Munis de jumelles, la nuit étoilée ressemblerait bien davantage à un tableau de Van Gogh...

ÉTIENNE GHYS Je suis face à Guy Perrin. Guy, vous êtes astronome ou astrophysicien ?

GUY PERRIN Je suis astronome de métier et de fonction, mais aussi astrophysicien de métier.

Quelle est la différence ?

La différence est historique. Au départ, il n'y avait que des astronomes. L'arrivée de la décomposition de la lumière — en couleurs par exemple — a permis de faire de la physique à partir de ces observations spectroscopiques. On a alors créé l'astronomie physique, qui est devenue l'astrophysique. Il y a eu une sorte de querelle des anciens et des modernes : les anciens étaient plutôt astronomes et les modernes plutôt astrophysiciens.

Quel mot souhaites-tu qu'on décortique aujourd'hui ?

Le mot *couleur*.

Magnifique, dis-nous d'abord : qu'est-ce qu'une couleur ?

Une couleur, c'est relatif à la lumière et la lumière est une onde. En tout cas, on peut en avoir une description ondulatoire. Et à cette onde est associée une fréquence, une période ou une lon-

gueur d'ondes. Des ondes à différentes longueurs d'ondes ou différentes fréquences, c'est des ondes à différentes couleurs. Ça, c'est pour des ondes monochromatiques à une seule couleur. Mais on peut faire des ondes polychromatiques qui définiront d'autres couleurs, elles-mêmes composées d'ondes monochromatiques et d'ondes de couleurs parfaitement pures.

Il y a donc une infinité de couleurs différentes, puisqu'il y a une infinité de longueurs d'ondes différentes. En revanche, notre œil ne capte essentiellement que trois couleurs et leurs combinaisons.

Absolument, notre sensibilité va du violet au rouge.

Cela veut dire qu'on peut avoir deux lumières totalement différentes mais que nous percevons de la même façon. C'est assez mystérieux. Les autres animaux, par contre, ont plus de sensibilité que nous aux couleurs ?

Il est vrai que certains animaux voient des couleurs que nous ne voyons pas.

Les papillons, m'a-t-on dit !

Les papillons ou les chats par exemple. Si on prend l'exemple du chat, il peut être plus sensible



“ **DE CETTE ÉTUDE DE LA RÉPARTITION DE LA LUMIÈRE EN FONCTION DE LA COULEUR, ON PEUT EN DÉDUIRE LA TEMPÉRATURE D'UNE ÉTOILE, LA VITESSE D'UN OBJET OU ENCORE DES PRESSIONS. ON PEUT MÊME EN DÉDUIRE DES VALEURS DE CHAMPS MAGNÉTIQUES.** ”

aux télécommandes, tandis qu'on ne l'est pas.

Et si je peux me permettre une petite critique des astronomes, ils sont vendeurs de très très belles images, aussi surprenantes que magnifiques. C'est le cas des récentes images du télescope James-Webb par exemple. Ce qui m'agace un petit peu, c'est qu'il prend essentiellement des images dans l'infrarouge, c'est-à-dire que nous ne pouvons pas voir. Et ensuite, elles sont retouchées pour pouvoir rentrer dans notre champ visuel et que nous puissions les admirer. Mais on entend rarement des astronomes dire : “Attention, ces images ne sont pas des réalités.”

Ça dépend de ce qu'on entend par astronome. Il y a l'astronome qui fait son travail et qui fait sa publication scientifique. Et il y a l'astronome en lien avec une institution qui doit partager ce travail avec le grand public.

C'est surtout de ce second type d'astronomes dont je parlais.

Prenons le cas d'images en infrarouge. Nous ne les voyons pas. Il faut bien traduire l'infrarouge en image pour voir avec du vert, du bleu, du rouge et donc il y a une échelle de couleurs qui traduit en fait ce que l'on v.

La traduction est-elle la même pour toutes les images ? Dit-on que ça va être plus beau

si je mets du bleu là, ou du rouge ici ?

C'est une question assez personnelle parce que ça dépend aussi de ce qu'un individu souhaite voir ou de comment il perçoit le mieux et ça peut définir une traduction aux couleurs qui est propre à l'individu.

Est-ce que vous, astronomes, vous avez une table de correspondance entre les longueurs d'ondes infrarouge visibles ou non pour nous et à partir de laquelle vous traduisez à chaque coup ?

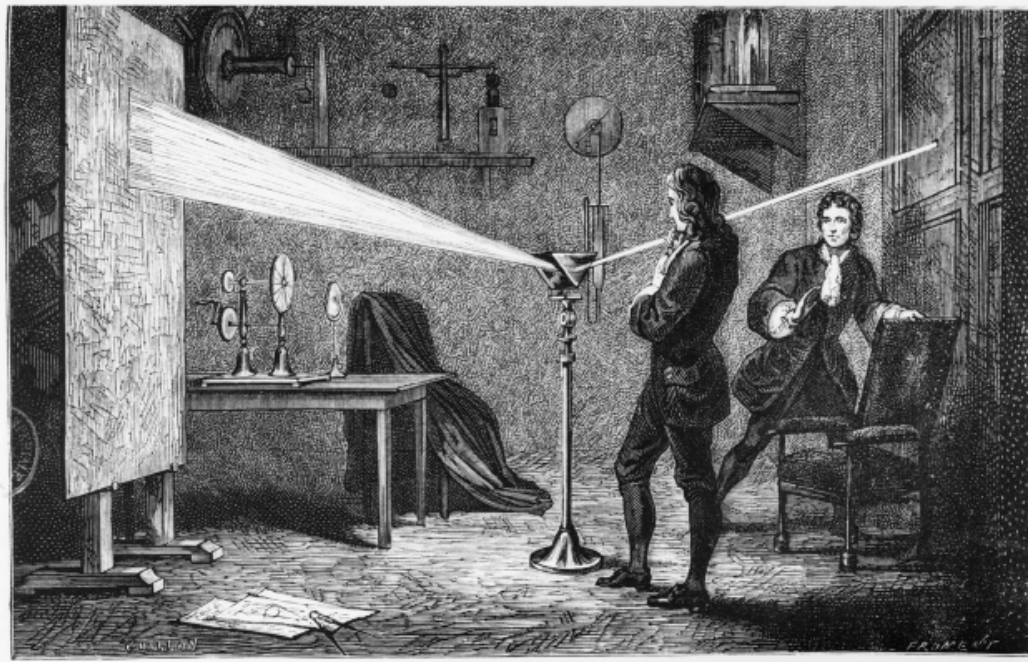
Non, il n'y a pas de code couleur.

Dis-moi quelques mots sur l'album de Tintin *L'Étoile mystérieuse*. On y voit cet astronome avec des spectres, peux-tu me dire ce que c'est, exactement ?

Un spectre, c'est la distribution de la lumière en fonction de la longueur d'onde. C'est justement là où on est passé de l'astronomie à l'astrophysique.

Comment ça fonctionne, et à quoi ça sert ?

Si on diffuse la lumière avec un prisme par exemple, on obtient un spectre. C'est comme ça qu'on décompose la lumière, à l'image de la pochette de *The Dark Side of the Moon* des Pink Floyd. On voit les couleurs dans le ciel qui émergent du prisme. Ça permet de décomposer la lumière en longueurs d'ondes individuelles et donc en couleurs individuelles. De cette étude de la répartition de la lumière en fonction de la couleur, on peut en déduire des caractéristiques physiques des objets. On peut en déduire, par exemple, la température d'une étoile, la température d'un milieu, la vitesse d'un milieu, la vitesse d'un objet ou encore des pressions. On peut même en déduire des valeurs de champs magnétiques, par exemple. C'est pour ça que la lumière, et sa décomposition en couleurs, est extrêmement importante pour les astrophysiciens.



Newton décompose la lumière au moyen d'un prisme
Illustration pour *La vie des Savants Illustres*
(Louis Figuier), 1868.
Gravure d'Adolphe Guillon et Eugène Froment

On peut déterminer le type d'étoiles en regardant la distribution d'énergie par fréquence.

Absolument, c'est comme ça que se fait la classification des étoiles en spectre d'étoiles.

Ça me rappelle cette classification ancienne des étoiles, avec cette numérotation très sexiste que tu dois connaître, non ?

Celle qui donne : *Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me!* (O-B-A-F-G-K-M). Alors, je te signale que ça donne aussi : *Oh, Be A Fine Guy!* Ça marche pour les hommes comme pour les femmes.

Donc, ce n'est pas aussi sexiste que ce que l'on m'a dit lorsque j'étais adolescent.

Ça ne l'est plus, pour être honnête.

Donc le O correspond aux étoiles les plus chaudes ?

C'est ça, et les étoiles M sont les plus froides.

Les plus chaudes sont les plus jaunes ?

Ce sont même les plus bleues. Et les plus froides sont les plus rouges. C'est exactement l'inverse de la convention de l'eau chaude et de l'eau froide.

Parle-moi un peu du télescope James-Webb, pourquoi a-t-on choisi les infrarouges plutôt que d'autres zones du spectre ?

Il y a plusieurs raisons. On peut en donner quelques-unes. Par exemple, on veut aller voir des objets très anciens. Et comme l'univers est en expansion, les objets très anciens sont très rouges. Ils sont rougis par l'expansion de l'univers. Plus on va voir loin dans le passé, plus les objets sont rouges. Donc on a intérêt à avoir un télescope qui voit plutôt vers le rouge. Il y a d'autres raisons scientifiques. Par exemple, quand on veut voir certaines planètes, il est plus commode d'aller les voir autour d'étoiles, qui sont des naines rouges. Ce sera plus facile de les voir sous certaines conditions. Donc c'est un autre argument.

Peut-être qu'on peut revenir sur l'idée initiale de ce podcast et des mots qui sont mal compris. Est-ce que tu penses que le public général comprend ces choses ? Est-ce que les gens savent qu'une étoile a une ou des couleurs, ou a un spectre et qu'à partir de cette information, on peut déduire des tas de choses ?

Déjà, non pas comprendre, mais constater que les étoiles ont des couleurs, ce n'est pas si facile que ça... si on ne le sait pas. Parce qu'en fait,



quand on regarde le ciel – un ciel vraiment pur, admettons – par une nuit noire, sans nuage et sans pleine lune, notre œil voit plutôt des choses blanches. Si on voit la Voie lactée, on va voir une traînée blanche. C'est pour ça que ça s'appelle la Voie lactée, d'ailleurs. On sait tous que, si on fait une photo en couleur, on verra qu'il y a des couleurs dans la Voie lactée. C'est dû à notre perception, et au fait qu'au fond de notre œil, il y a des cônes et des bâtonnets : les cônes voient les couleurs, les bâtonnets voient en noir et blanc, pour faire simple. Et donc, quand il y a peu de luminosité, ce sont les bâtonnets qui entrent en jeu, et on va voir plutôt du noir et blanc, ou des nuances de gris. Et donc, généralement on perçoit les étoiles comme si elles étaient blanches parce qu'elles sont trop faibles pour notre œil. Mais certaines parmi les plus brillantes ont des couleurs. On voit, par exemple, si on regarde une des étoiles les plus brillantes du ciel : Bételgeuse. Personnellement, je vois Bételgeuse dans une teinte orangée. Je sais qu'elle est rouge, mais je la vois orangée. On verra Rigel bleue. Elle est opposée dans la constellation d'Orion et est une étoile de type O, Bételgeuse étant une étoile de type M. Voilà. Donc on voit ces couleurs... si on le sait.

Quel conseil me donnerais-tu, si je voulais montrer la couleur d'une étoile à un adolescent ou un adulte ? Est-ce qu'il faut un appareil spécial ou on peut voir ça à l'œil nu si on le sait ?

Pour ces étoiles-là, ça se voit à l'œil nu. On peut voir la couleur des étoiles les plus grosses et les plus proches, donc celles qui apparaissent les plus brillantes.

Sinon, avec des jumelles, on voit quelque chose ?

Ah oui, avec des jumelles, ça change tout parce que la taille de la pupille est beaucoup plus grosse que celle de la pupille de l'œil qui fait quelques millimètres. Le diamètre de la pupille de l'optique d'entrée, ça va être plusieurs centimètres, donc on est beaucoup, beaucoup plus sensible.

Donc le conseil c'est de prendre des jumelles et regarder le ciel et là on verra Van Gogh ?

C'est depuis la fin du XIXe siècle, essentiellement, qu'on a commencé justement à pointer des spectrographes sur les étoiles et qu'on a observé cette distribution de lumière.



Observation de la Voie Lactée depuis le toit de la station de planétologie des Pyrénées

C'est comme ça, par exemple, qu'on a compris qu'on allait pouvoir détecter des atomes et des molécules dans le spectre des étoiles. C'est aussi comme ça que l'hélium a été détecté et "inventé". D'ailleurs, dans "hélium", il y a *helios*, le soleil.

Quand j'étais adolescent, mon prof de physique m'avait dit une chose qui m'avait un peu perturbé. Il m'avait dit qu'il y avait comme un paradoxe, puisque quand on regarde le ciel, il y a une infinité d'étoiles, que chacune envoie de la lumière et que normalement, nous devrions être totalement éblouis pendant la nuit. Et ça portait un nom : le paradoxe d'Olbers, c'est ça ?

C'est le nom d'un physicien allemand, je crois.

Comment on comprend ce paradoxe ?

D'abord, il n'y a pas une infinité d'étoiles, il y en a beaucoup, beaucoup, beaucoup, en très grande quantité. En gros, il y a plusieurs centaines de milliards de galaxies. Dans une galaxie, il y a une centaine de milliards d'étoiles, ou quelques centaines de milliards d'étoiles. Ça fait un très grand nombre d'étoiles. Et une des raisons pour lesquelles on ne voit pas un ciel intégralement lumineux, mais seulement des petits points localement, c'est que l'univers est en expansion. C'est une des conséquences du Big Bang.

Elles s'éloignent de nous, en fait.

Elles s'éloignent de nous, et elles n'ont pas toutes la même couleur, justement. Les étoiles les plus éloignées de nous, comme elles sont décalées vers le rouge à cause de l'expansion de l'univers, on ne les voit pas. On n'a pas l'impression de voir une couleur blanche comme ça, et pour certaines, on peut même imaginer que leur spectre sorte du spectre de sensibilité de l'œil. C'est pour ça qu'on ne voit pas toutes ces étoiles à la même distance.

Dis-moi, en quelques mots, comment le petit enfant Guy est devenu intéressé par l'astronomie ? Parce que le petit enfant Etienne était très intéressé par l'astronomie, mais la vie ne m'y a pas mené. Mais j'ai une espèce de fascination, comme beaucoup de mathématiciens, je pense, pour l'astronomie.

Quelle trajectoire as-tu suivi ?

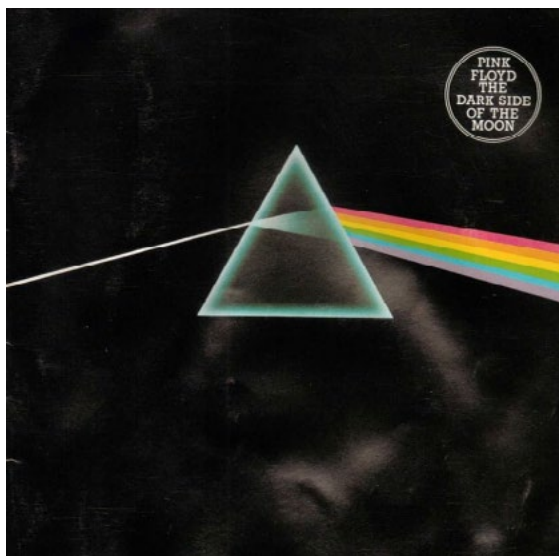
C'est presque exactement l'inverse. Je suis devenu intéressé par l'astronomie assez tardivement, à vingt-et-un ans. Et c'est par une rencontre que je n'avais pas du tout prévue. Pendant mon service militaire, j'ai fait une école militaire. Et j'avais un camarade de promotion qui, lui, voulait devenir astronome professionnel, et qui est aujourd'hui professeur en astronomie. Il s'appelle Alain Lecavelier des Étangs, et il est à l'Institut d'astronomie de Paris. Une de mes grand mères m'avait offert un livre de Hubert Reeves, et c'est comme ça que la conversation a démarré. Alain m'a parlé de ce qu'il faisait en astronomie. Puis, petit à petit, au fil des trois ans d'école, j'en suis venu à me dire que j'allais faire, dans un premier temps, une thèse en astronomie. C'est comme ça que ça a commencé, par hasard, ce n'était pas du tout ce que j'avais imaginé.

DE MANIÈRE GÉNÉRALE, ON PERÇOIT LES ÉTOILES COMME SI ELLES ÉTAIENT BLANCHES PARCE QU'ELLES SONT TROP FAIBLES POUR NOTRE ŒIL. MAIS CERTAINES PARMİ LES PLUS BRILLANTES ONT DES COULEURS.

Est-ce qu'aujourd'hui, tu as une composante mathématique, ou théorique en tout cas, qui est importante dans ton travail ?

Oui, j'ai conservé cette appétence particulière.





Pochette de l'album *The Dark Side of the Moon* des Pink Floyd, 1973.

Illustration de Hipgnosis et George Hardie

J'ai même publié un article en mathématiques appliquées l'année dernière.

Donc on peut dire que jadis, l'enseignement de l'astronomie et des maths étaient concomitants.

Absolument, pendant longtemps, l'astronomie a d'abord été une astronomie de position, et donc on avait besoin à la fois de la théorie physique et des mathématiques pour pouvoir faire de l'astronomie. Ensuite, ça ne s'est pas arrangé, si je puis dire, avec la relativité générale, les ondes gravitationnelles, ou encore la physique théorique, dont on a besoin aujourd'hui pour faire de l'astronomie à très haut niveau.

Tu me parlais de Hubert Reeves, qui a été au début de ton intérêt pour l'astronomie. Je vais te citer un autre grand physicien astronome que j'ai lu quand j'avais douze ou treize ans et que je trouvais exceptionnel. Il s'agit de [George] Gamow, il a écrit *M. Tompkins*¹², cette série de livres que tu

connais peut-être.

Oui, mais je ne l'ai pas lue.

Gamow a écrit, je le connais presque par cœur tellement il m'a impressionné, *Un, deux, trois... l'infini*¹³. Il explique à la fois des maths, de l'astronomie, les étoiles, le spectre dont tu parlais. Moi, je trouve que c'est important qu'il y ait des gens de cette nature, que ce soit Hubert Reeves ou Gamow, qui puissent planter la petite graine chez les adolescents.

Absolument, c'est très important et il est essentiel que les gens te découvrent et réalisent aussi l'impact scientifique de ces matières, mais aussi les liens scientifiques entre elles. Tu as parlé des mathématiques, en astronomie il y a aussi la physique ou la chimie. On espère, dans pas trop longtemps, y inclure la biologie, on parle d'exobiologie, il y a l'informatique évidemment, on parle d'intelligence artificielle... Enfin, on peut imaginer beaucoup de domaines qui se retrouvent dans l'astronomie, et donc c'est aussi une source de curiosité. Et il faut exciter cette curiosité.

La question que je pose à tout le monde, c'est est-ce qu'une musique pourrait illustrer ton propos ? Est-ce qu'une musique peut illustrer la couleur ?

Je pense que oui. Tout à l'heure j'ai évoqué justement la dispersion de la lumière par le prisme des Pink Floyd dans *The Dark Side of the Moon*. Sinon, on parlait tout à l'heure de la lumière des étoiles. Il y a une chanson des Beatles, *Here Comes The Sun*, qui parle évidemment du lever du soleil ou en tout cas de l'influence du soleil sur la vie d'une personne. La soleil, les étoiles, c'est une source d'inspiration pour beaucoup de musiciens. ●

FIN DU 12^E ÉPISODE

12. M. Tompkins *au pays des merveilles : Histoire de c, G et h*, éd. Dunod, 1953. (Premier tome de la série en français)

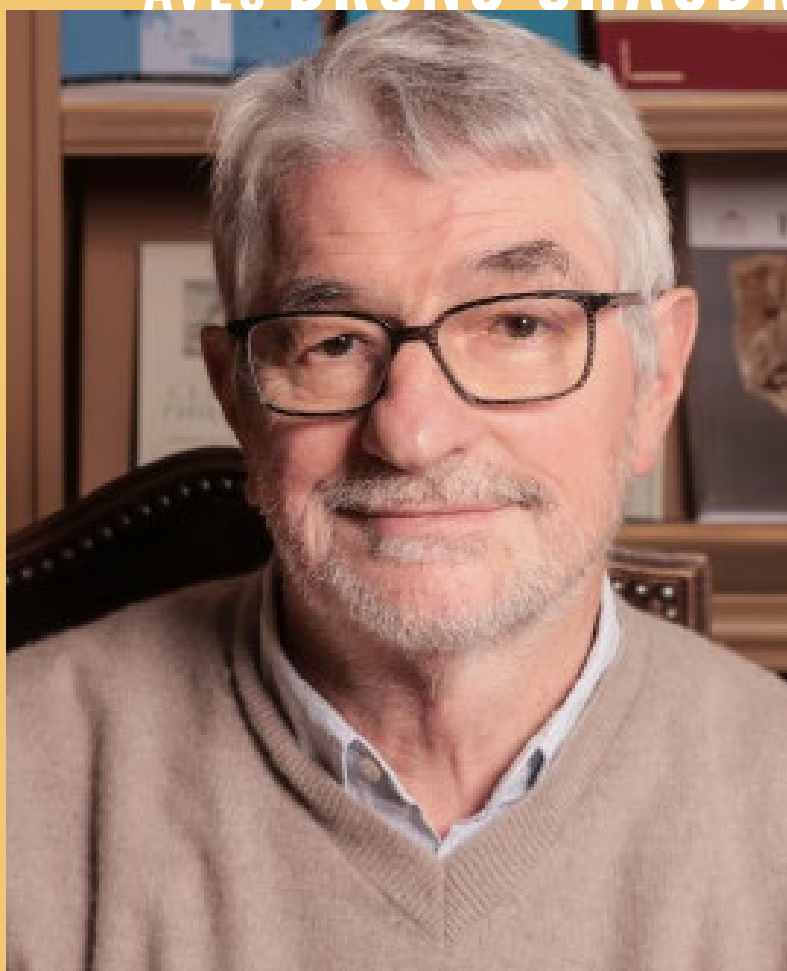
13. Éd. Cassini, 1955 (rééd. 2018)



L'amas stellaire NGC 346, située dans la galaxie du Petit Nuage de Magellan (constellation du Toucan), capturée en 2022 par le télescope James-Webb.

Épisode n° 13

C'EST CHIMIQUE ! AVEC BRUNO CHAUDRET



BRUNO CHAUDRET

est un chimiste, spécialiste de chimie organométallique notamment des interactions entre l'hydrogène et les métaux de transition, et directeur de recherche au CNRS. Il est élu membre de l'Académie des sciences en 2005.

« C'est chimique » : une expression souvent utilisée, rarement bien comprise. Dans cet épisode, Étienne Ghys reçoit le chimiste Bruno Chaudret pour interroger ce que l'on met derrière ce mot. Du yaourt industriel aux molécules dites « naturelles », tout est chimie — mais tout n'est pas perçu comme tel. Pourquoi associe-t-on si vite « chimique » à « artificiel » ou « toxique » ? Et comment mieux transmettre ce que la chimie permet de voir, de faire, de comprendre.

ÉTIENNE GHYS Je suis avec Bruno Chaudret, chimiste. J'aimerais qu'on discute aujourd'hui de l'expression : « C'est chimique. » Je suis souvent surpris quand j'entends dire : « Ne bois pas de Coca, c'est chimique. » En revanche, manger du fromage ou boire du vin paraît naturel. Que veut dire chimique ? Où se situe la limite entre le chimique et le naturel ?

BRUNO CHAUDRET Tout d'abord, cette expression m'énerve aussi depuis longtemps. Mes enfants l'utilisaient aussi quand ils étaient petits. Je leur disais que la chimie était une belle science, je leur expliquais le mouvement des électrons, etc. Eux, ce qu'ils retenaient, c'est que c'était vert et que ça avait un drôle de goût. Ça m'a toujours laissé un peu pantois, parce que tout est chimie. Il y a une trentaine d'années, on voulait faire un plaidoyer pour la chimie en disant : « La chimie, c'est la vie. » Ça n'a pas fonctionné du tout. Et je crois que ça ne peut pas fonctionner dans le monde actuel parce qu'à peu près tout ce qui nous entoure fait appel à la chimie : les vêtements, les transports, la nourriture, etc. Ça ne fait pas rêver. On a récemment observé un signal lumineux datant de 300 millions d'années après le Big Bang. Là, ça ne fait plus rêver.

Je ressens dans ton discours une chose que j'ai déjà remarqué chez beaucoup de chimistes : une espèce de sentiment d'être un peu les mal aimés parmi les scientifiques. C'est un peu plus que mal aimés.

D'abord, on pense qu'on fait de la physique si on n'est pas capable d'être amateur. Et on fait de la chimie si on n'est pas capable d'être un physicien. [Rires] Dans mon cas, ce n'est pas du tout ça. Mon ambition a toujours été d'être chimiste. J'ai découvert cette science et son approche expérimentale grâce à un professeur en première. On a fait des expériences extraordinaires, dont la chloration des alcanes en phase gazeuse, qui m'a marquée. Pour ça, on prend un hydrocarbure gazeux, on le mélange avec du chlore et on prend un ruban de magnésium qui va initier la réaction. Tout cela est maintenant interdit en raison du principe de précaution, donc on ne suscite plus de vocation.

Où placerais-tu une frontière entre ce qui est chimique et ce qui est naturel ?

Tout ce qui est naturel est chimique, c'est-à-dire que le naturel est composé de molécules chimiques fabriquées par la nature. A contrario, tout ce qui est produit de l'industrie chimique n'est pas naturel. Parfois, ce sont les mêmes molécules. Parfois, on crée aussi des molécules dont l'intérêt n'est pas avéré et qui peuvent conduire à des pollutions. On rend la chimie responsable de toutes les pollutions qu'on rencontre autour de nous. Il est vrai que ce sont des produits chimiques. Mais en général, l'usage de ces produits n'est pas chimique. On nous place comme responsables de tous les maux de la Terre. On l'a pas forcément volé mais c'est quand même un peu exagéré.



Si vous êtes les mal aimés, comment peut-on faire pour changer cela ? Est-ce que, selon toi, l'enseignement de la chimie en France est à la hauteur ? Si on regarde un peu l'enseignement au lycée, on se rend compte qu'on regroupe des disciplines qui ne sont pas les mêmes : l'histoire et la géographie ou la physique et la chimie.

Oui, c'est quand même assez différent. En général, la physique étudie alors que la chimie crée. On crée un produit comme une molécule ou un matériau, mais on va aussi l'étudier bien sûr. L'application n'est jamais loin de la chimie, alors que dans la physique, on peut rester à l'aspect purement théorique, en particulier pour la physique nucléaire ou subnucléaire.

J'entends souvent dire que les chimistes sont un peu comme des enfants qui jouent aux Lego, qui mettent des pièces bout à bout pour faire de jolies constructions.

Pas tout à fait, parce qu'on part quand même généralement d'une idée pour créer. Les plus beaux assemblages de Lego qu'on ait faits en chimie consistaient à reproduire des substances naturelles, souvent parce qu'on percevait un intérêt à le faire. On peut penser au

Taxotere, un anticancéreux utilisé tous les jours.

Qu'est-ce que tu me conseillerais de dire lorsque ma fille ou tes enfants disent : "c'est chimique" ?

On peut répondre que comme tout est chimique, ils ont forcément raison. Si on revient au naturel, il y a le naturel qui est bon et le naturel qui ne l'est pas. En fait, la chimie est un peu la science qui fait la sous-traitance du progrès. On a eu besoin pour faire avancer les sociétés de plus de déplacements, de plus de biens de consommation ou de plus de produits pour convertir l'électricité. Là, les chimistes ont inventé des matériaux comme les matières plastiques, ce qui a été considéré comme formidable. Maintenant, on les remet en cause en pointant du doigt les microplastiques qui se baladent partout, par exemple. Quand il y a un besoin, on demande à la chimie ; et quand il y a un problème, on accuse la chimie. Mais ce n'est pas toute la vérité. Il y a la production chimique, les industries de transformation et les besoins matériels auxquels on doit répondre. Peut-être qu'il n'y a pas que la chimie à incriminer.

“ LES CHIMISTES ONT INVENTÉ DES MATÉRIAUX COMME LES MATIÈRES PLASTIQUES, CE QUI A ÉTÉ CONSIDÉRÉ COMME FORMIDABLE. MAINTENANT, ON LES REMET EN CAUSE EN POINTANT DU DOIGT LES MICROPLASTIQUES QUI SE BALADENT PARTOUT, PAR EXEMPLE. QUAND IL Y A UN BESOIN, ON DEMANDE À LA CHIMIE ; ET QUAND IL Y A UN PROBLÈME, ON ACCUSE LA CHIMIE. ”

Essayons d'être plus positifs. Est-ce que tu penses que la communauté des chimistes français, par exemple, fait ce qu'il faut pour transmettre le message que tu viens d'énoncer au plus grand nombre ?

La communauté chimique a essayé de le transmettre de diverses façons. Jean-Marie Lehn a notamment expliqué que la chimie créait son objet et que c'était une science formidable. Mais ça ne passe pas.

Je reviens sur la question de l'éducation. J'ai l'impression que les professeurs de physique-chimie dans les lycées français mettent plus l'accent sur la physique que sur la

chimie.

C'est généralement vrai parce que la physique, on la met en équation, on peut poser des problèmes dont on a la solution, et donc c'est plus facile. Et il y a autre chose : la chimie est une vraie science, c'est-à-dire que ce n'est pas le simple fait de mélanger des trucs et d'attendre que ça explose.

Très drôle. [Rires]

La chimie, c'est comment des cortèges électroniques vont s'assembler ou se dissocier pour donner des molécules ? Comment ça se passe ? Il y a de la chimie quantique qui explique tout ça maintenant. Et il y a matière à rêver, là aussi, quand on comprend le sort des cortèges électroniques. La chimie, c'est la science des électrons.

Pour terminer cette discussion, je vais poser la même question qu'à tout le monde. Est-ce que tu aimes la musique ? Est-ce que, selon toi, il y a un lien entre la musique et la chimie ? Ou est-ce que, au moins, tu peux me recommander une musique qui, selon

toi, entre en résonance avec la chimie ?

C'est une question très intéressante. C'est la Symphonie n°2 de Mahler qui me vient à l'esprit, "Résurrection" [GMW 30]. C'est une symphonie à la fois construite, mais où il y a des moments d'inquiétude, et de "résurrection" car l'inspiration est la mort. La chimie ne va peut-être pas jusque là, mais c'est une science du doute. Et je pense que, si tu veux passer cette symphonie en entiere, ça prend du temps. Il y a cette inquiétude... [Rires]

Est-ce que la musique joue un rôle dans ta vie de scientifique ?

Elle ne joue pas un rôle très important dans ma vie. Mais dans ma vie de scientifique, quand j'entends Mahler, quand même, ça...

Ça te conforte dans le fait que tu es un chimiste. [Rires] ●

FIN DU 13^E ÉPISODE

ÉPISODE N°13

Mise en place d'une réaction de photochimie pour produire des hélicènes, molécules en forme d'hélice, dans le cadre de recherches menées par la chimiste Jeanne Crassous





VOIR LA SCIENCE AUTREMENT

4€⁹⁹ / MOIS

WWW.CORTEX-MEDIA.TV

**ACCESSIBLE
SOURD ET MALENTENDANT**

WWW.CORTEX-MEDIA.TV

FEMMES DE SCIENCE

UNE SÉRIE DE
LUCILLE MICHON ET SANDRINE BROTONS



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Cortex

TV5MONDE



ABONNEZ-VOUS À LA DIFFÉRENCE

WWW.CORTEX-MEDIA.TV