

L'esprit curieux et les yeux mauvais

Comprendre le monde par la démarche scientifique

D^r Sébastien “Elzen” Dufromental

29 juin 2022

Révision b2dc017e3868ee1ba49a5c5b70c1f9338fe3d1d5

Cette œuvre est mise à disposition sous licence Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions 2.0 Générique. Pour voir une copie de cette licence, écrivez à Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA, ou visitez

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.fr>

© Sébastien “Elzen” Dufromental



ISBN: 978-2-493255-13-6

Dépôt légal juin 2022

© La Route de la Soie - Éditions

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Avant-propos

En réponse à un journaliste qui lui demandait « quoi de neuf du côté des sciences ? », Albert Einstein aurait un jour demandé si ce journaliste estimait que tout avait déjà été écrit en ce qui concerne les sciences *anciennes*. C'est qu'il y a, en effet, encore beaucoup à écrire à leur sujet.

Mais beaucoup de livres, que les sciences dont ils traitent soient anciennes ou nouvelles, ne parlent que des connaissances issues de la démarche scientifique – en n'abordant, le plus souvent, qu'un seul domaine. D'autres, hélas plus rares ou moins accessibles aux profanes, parlent des méthodes utilisées pour obtenir ces connaissances, mais le font de manière abstraite, sans faire de liens avec les connaissances qui en découlent.

Je considère pour ma part qu'il est plus intéressant de faire les deux en même temps : ce livre-ci s'efforcera donc de présenter les règles de la démarche scientifique en prenant, pour illustrer chaque aspect, un exemple de découverte où il joue un rôle majeur. Pour cela, nous irons piocher nos exemples dans de nombreux domaines scientifiques différents, en visant davantage un état des lieux solide que des « scoops » encore incertains.

La première partie de ce livre vise à présenter le fonctionnement interne de la démarche elle-même, et la seconde à discuter d'enjeux plus externes concernant le contour et le pilotage des sciences. Chacun de ces deux points sera traité en six chapitres, et, à chaque étape, nous mobiliserons ainsi des connaissances scientifiques autant que des connaissances sur les sciences elles-mêmes.

Plusieurs personnes, parmi celles qui tiendront ce livre en main, se demanderont sans doute à quel titre je parle, aussi vais-je commencer, à toute fin utile, par me présenter.

Je suis titulaire d'un doctorat en informatique, au cours duquel j'ai donc fréquenté le monde de la recherche et fait connaissance avec les processus de validation des connaissances scientifiques. J'avais, auparavant, effectué une – très brève – carrière de professeur des écoles, ce métier étant notamment caractérisé par le fait de devoir gérer ensemble toutes les matières et mettre les savoirs en relation.

Mais je suis avant tout, et indépendamment de toute qualification, simplement doté d'un esprit curieux (ainsi que d'yeux mauvais, nous y reviendrons), ce qui est à mes yeux un motif suffisant pour s'intéresser aux sciences dans leur ensemble. C'est en tout cas une légitimité suffisante pour pouvoir en parler, car la science est un bien commun, qui nous appartient donc à toutes et tous.

Je tiens, depuis une dizaine d'années, un blog « de culture générale » dont une section est dédiée à la vulgarisation scientifique. Plusieurs des points que j'aborderai dans ce livre y ont déjà été traités, souvent sous un angle différent. Les personnes intéressées en trouveront l'adresse dans ma bibliographie, fournie (et commentée) en fin d'ouvrage.

Précisons encore que, présentement médiateur scientifique au Planétarium de Bretagne, je n'ai, à ma connaissance, aucun conflit d'intérêt en ce qui concerne les différents domaines que je vais aborder, notamment ceux qui peuvent sembler faire polémique.

Je m'intéresse à de nombreux sujets, et j'ai passé un certain temps à me pencher sur tout ce que je vais aborder ici. Je n'en reste pas moins un être humain comme un autre, susceptible de faire des erreurs et n'ayant pas « la science infuse », quoi que cela puisse signifier.

Je me suis efforcé, naturellement, de fournir les explications les plus claires et les plus fiables, en vérifiant mes informations. Chaque chapitre de ce livre a été relu par d'autres que moi, davantage spécialistes du domaine abordé et qui m'ont aidé à rectifier ce qui a eu besoin de l'être.

Il s'agit, néanmoins, d'un ouvrage de vulgarisation : il m'a été parfois nécessaire d'opérer des simplifications qui, si elles vous permettront (du moins, je l'espère) de mieux comprendre certains aspects, peuvent s'éloigner un peu trop de l'exactitude. Et, surtout, ce que nous allons étudier ensemble est le reflet des connaissances actuelles, qui pourront peut-être, comme nous le verrons, s'avérer fausses au regard des connaissances futures.

Ne prenez donc pas le contenu de ce livre pour un exposé définitif et sans défauts, et, comme d'autres l'ont avancé, «doutez de tout, surtout de ce que je vais vous dire». Il n'est d'ailleurs pas anodin qu'il vous soit proposé sous une licence *Creative Commons* : libre à vous de le reprendre et de le modifier pour en corriger les erreurs résiduelles, et peut-être présenter les choses mieux que je ne pourrai le faire.

La seule contrainte notable qui vous est posée pour cela est de conserver les mêmes conditions d'usage, car ce dont nous allons parler relève d'une démarche entreprise au nom de l'humanité toute entière, et la connaissance qui en résulte se doit donc de rester universelle (nous reviendrons sur cet aspect au cours du dernier chapitre).

Pour leurs retours et leur soutien dans la rédaction de ce livre, je remercie (en vrac et dans le désordre) Antoine Fougerit, Florent Fayolle, Loïc Blet, Hélène Dufromental, "Mit-Mit", Sophie Ruiz, Joël Gaudrain, Aube Richebourg, Dmitri Royer, Yann Kervan, Julien Biaudet, Sylvain "grim7reaper" Laperche, Christophe "Mornagest" Rosy, Patricia Bonnet, Clara Germann, Romain Deville et "quota_atypique".

Je tiens par ailleurs à remercier Guillaume Lecointre, dont les ouvrages et conférences (voir notamment ma bibliographie) m'ont inspiré la rédaction de ce livre. Et, naturellement, je remercie Sonia Bressler d'avoir bien voulu éditer ce livre en conservant sa licence ouverte et certaines de mes bizarreries de style, ce qui n'était pas gagné d'avance. Un salut particulier également à Élisabeth Feytit, pour son excellent podcast *Méta de Choc* et parce qu'elle m'a mis en relation avec Sonia.



Sur Internet, je suis habituellement représenté par ce portrait de magicien repris de l'excellent jeu vidéo de stratégie *The Battle for Wesnoth*.

Quelques unes des images que j'utiliserai seront, comme celle-ci, traitées avec le logiciel The GIMP (en utilisant en particulier l'effet « photocopie ») pour obtenir un simili-dessin au trait, ce qui passe plus facilement à l'impression. Les origines des différentes images sont précisées dans la bibliographie en fin d'ouvrage, avec quelques compléments d'informations lorsque ça me semblait pouvoir être utile.

Les illustrations présentes dans cet ouvrage ont été, pour la plupart, assemblées par mes soins à partir d'images dessinées par d'autres (et dans d'autres contextes), mes propres talents en dessin étant beaucoup trop incertains pour pouvoir être réellement utiles ici. J'ai pu le faire parce que ces images étaient placées sous licence libre (ou s'étaient élevées dans le domaine public), et je remercie donc vivement toutes les personnes qui ont choisi de mettre ces images à disposition.

J'adresse un salut particulier à Simon "Gee" Giraudot pour son blog *Grise Bouille*, dont le lien est fourni dans ma bibliographie, et d'où proviennent la plupart des images de base. Gee n'a cependant pas travaillé directement avec moi pour cet ouvrage, pas plus que les autres personnes dont j'ai repris les dessins.

Pour prévenir d'éventuels désaccords

On m'a, plusieurs fois, conseillé une approche humoristique. C'est devenu une sorte de cliché : un ouvrage de vulgarisation se doit d'être drôle pour que le message passe. D'autres personnes ont cependant adopté ce type d'approche avec beaucoup plus de brio que je ne pourrais le faire (je n'ai pas suffisamment confiance en mon humour pour vous infliger ça).

Par ailleurs, il me semble aussi important de varier les approches. Les sciences peuvent en effet être un bon sujet de blagues, mais elles ne sont pas que ça, et je préfère faire le pari qu'on peut rendre les choses intéressantes sans pour autant devoir systématiquement les rendre drôles. Je vous laisse juger si j'y parviens ou non.

Les personnes préférant l'approche humoristique, toutefois, trouveront dans ma bibliographie commentée quelques références m'ayant personnellement beaucoup fait rire.

Je vais donc exposer ici les principes de la démarche scientifique. Je ne défends pour autant pas la technologie, l'industrie, ni même l'institution scientifique dans sa forme actuelle. Si je suis profondément convaincu de l'intérêt de la démarche elle-même – comprendre le monde qui nous entoure, ce qui nécessite, nous le verrons, de se doter d'une méthode rigoureuse –, j'appelle au contraire mes semblables à demeurer critiques vis-à-vis des applications qui peuvent être faites de cette compréhension.

Critiques dans un sens comme dans l'autre : si la technologie entraîne parfois des conséquences nuisibles, elle peut également en avoir de positives. Le point n'est donc pas d'accepter ou de rejeter les choses en bloc : il est au contraire de s'approprier suffisamment ces choses pour que la réflexion collective décide dans quelle direction nous voulons mener la société. La science produit, nous le verrons, des éléments qui me semblent indispensables à cette réflexion, mais ne la remplace pas : il y a et y aura toujours un choix *politique* à faire en fonction des données.

Peut-être me faut-il également préciser que je ne m'oppose à aucune croyance, qu'elle soit religieuse ou d'une autre nature, tant que cette croyance accepte de laisser leur place aux *faits*. Soigner les maladies bénignes à l'aide exclusive de simples morceaux de sucres, décider quoi faire en fonction de la position du Soleil par rapport aux autres

étoiles ou prier une licorne rose invisible (voire même un monstre en spaghetti volant) d'exaucer nos souhaits sont tout à fait légitimes, à partir du moment où les tenants et aboutissants réels d'une telle pratique sont dûment connus.

Après tout, l'un de mes T-shirts préférés l'expose fort bien :

« *Science is like magic, but real.* »

Il se trouvera sans doute certaines personnes pour me reprocher l'usage des points médians dans le titre du dixième chapitre. Je pourrais consacrer un chapitre entier à leur répondre (des éléments de réponse se trouvent déjà sur mon blog), mais ce n'est pas l'objet de ce livre. Par ailleurs, les personnes qui auront réellement lu ce livre constateront que je n'ai fait usage de cette abréviation qu'à des fins de concision, le corps du texte faisant appel aux autres méthodes d'inclusivité.

Je me contenterai donc de considérer à ce sujet que si quatre occurrences (en comptant la table des matières) d'un caractère choisi précisément pour être aussi léger que possible à l'œil sont tout ce que vous retenir d'un livre illustré de 200 pages abordant de multiples sujets, le problème ne vient vraisemblablement pas de ma façon d'écrire.

Sommaire

AVANT-PROPOS	3
SOMMAIRE	9
NOS SENS NOUS TROMPENT	11
LE MONDE EXISTE	25
DE LA MÉTHODE	39
APPUYER SUR LES CHOSES	53
REVOIR SA COPIE	67
CAUSE(S) ET CONSÉQUENCES	81
HAUT EN COULEURS	95
RÊVER LOIN	109
ADMETTRE NOTRE IGNORANCE	123
RESTER VIGILANT·E·S	137
CONTEXTE ET PERSPECTIVE	151
PARTAGER LE SAVOIR	165
POUR NE PAS CONCLURE	179
BIBLIOGRAPHIE COMMENTÉE	185

Licence CC BY-SA 4.0 international



Avertissement: ceci est un résumé (et non un substitut) de la licence, qui en présente les éléments clefs de façon humainement compréhensible mais n'a pas de valeur juridique propre. Merci de vous référer au texte complet de la licence, disponible notamment à l'adresse suivante :

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.fr>

Vous avez l'autorisation de :

Partager – copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats.

Adapter – remixer, transformer et créer à partir du matériel pour toute utilisation, y compris commerciale.



L'Offrant ne peut retirer les autorisations concédées par la licence tant que vous appliquez les termes de cette licence.

Selon les conditions suivantes :



Attribution – Vous devez créditer l'Œuvre, intégrer un lien vers la licence et indiquer si des modifications ont été effectuées à l'Œuvre. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que l'Offrant vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Œuvre.



Partage dans les Mêmes Conditions – Dans le cas où vous effectuez un remix, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Œuvre originale, vous devez diffuser l'Œuvre modifiée dans les mêmes conditions, c'est à dire avec la même licence avec laquelle l'Œuvre originale a été diffusée.



Pas de restrictions complémentaires – Vous n'avez pas l'autorisation d'appliquer des conditions légales ou des mesures techniques qui restreindraient légalement autrui à utiliser l'Œuvre dans les conditions décrites par la licence.

Notes :

Vous n'êtes pas dans l'obligation de respecter la licence pour les éléments ou matériel appartenant au domaine public ou dans le cas où l'utilisation que vous souhaitez faire est couverte par une exception.

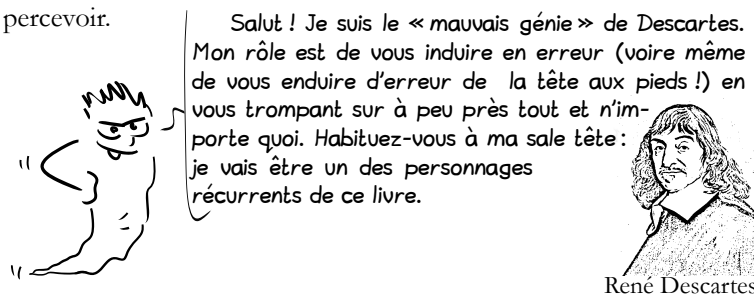
Aucune garantie n'est donnée. Il se peut que la licence ne vous donne pas toutes les permissions nécessaires pour votre utilisation. Par exemple, certains droits comme les droits moraux, le droit des données personnelles et le droit à l'image sont susceptibles de limiter votre utilisation.

Première partie : Nos sens nous trompent

« Je pense, donc je suis ». Cette phrase de cinq mots simples¹ est l'une des conclusions les plus fondamentales de la réflexion humaine. On la doit à René Descartes, en 1637, dans un ouvrage intitulé le *Discours de la méthode*, qui expose la façon dont il entend travailler.

La méthode dont Descartes discours dans ce texte a un objectif : produire des connaissances sur le monde qui pourront être partagées et réutilisées. Pour cela, dit-il, il est nécessaire de soumettre tout ce que l'on croit savoir à l'épreuve du doute, afin de ne garder que ce qui est suffisamment sûr. Le doute de Descartes (on parle de *doute cartésien*) se distingue donc de celui d'autres philosophes, comme le sceptique grec Pyrrhon, par le fait qu'il ne s'agit pas d'une fin en soi, mais d'un point de départ : il est le premier outil dont nous nous servons pour juger de la véracité des choses.

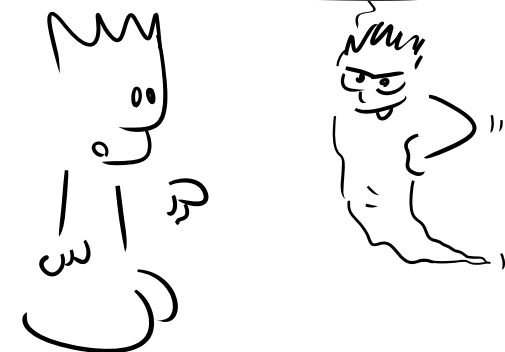
Afin de pousser l'épreuve du doute jusqu'au bout, Descartes a recours à l'hypothèse d'un « mauvais génie », une entité toute puissante employant son énergie à nous tromper sur tout ce que nous pourrions percevoir.



¹Trois seulement dans la version latine de cette phrase : « *Cogito, ergo sum* ». Le *Discours de la méthode*, où apparaît pour la première fois l'expression, a été rédigé en français, mais le latin était la langue « savante » de l'époque, et Descartes a réutilisé sa formule dans plusieurs textes latins par la suite, d'où le fait qu'on y fasse parfois référence dans cette langue.

Si l'on accepte cette hypothèse, il n'est donc pas possible de se fier à notre vue, à notre ouïe, ni même à notre mémoire... mais il reste pourtant une chose que même ce « mauvais génie » ne parvient pas à faire vaciller : il ne peut nous tromper que parce que nous existons.

Je suis sûr de ça, je l'ai lu dans des livres.)
 (J'ai glissé plein d'erreurs, dans ces livres.)
 Mais je l'ai vu de mes yeux, donc ça va.)
 (Sauf que je fais passer des mirages devant tes yeux.)
 Et si j'y ai touché, ça compte ?)
 (Eh non, je peux tromper ça aussi.)
 De quoi je peux être sûr, alors ?)
 (Bah, de rien. C'est à ça que je sers.)
 ...)
 (Cherche pas : je te trompe sur tout.)
 Mais pour que tu me trompes comme ça, il faut quand même bien que je sois là.)
 (Ah, mince, oui, bien joué.)
 Donc il y a au moins une chose dont je peux être sûr : j'existe.)
 (Bah, ouais, du coup.)



C'est là le sens fondamental de cette jolie formule : même si l'on suppose que tout ce que nous apprennent nos sens est faux, le simple fait que nous parvenions à nous poser la question nous suffit pour savoir qu'au moins, nous sommes là. C'est une certitude assez légère, certes, mais elle nous fournit une base suffisamment solide pour construire nos réflexions.

Ces réflexions peuvent ensuite prendre des formes assez variées. Dans ce livre, nous n'en aborderons qu'une seule, mais qui est tout de même assez ambitieuse : comprendre, malgré l'influence du « mauvais génie », la façon dont fonctionne le monde à propos duquel il nous trompe. C'est ce que nous appelons « démarche scientifique » ou, plus simplement, « science ».

Descartes s'y est livré lui-même : son Discours est accompagné de trois traités scientifiques². Mais avant de nous pencher sur ce genre de sujets, peut-être est-il préférable de comprendre en quoi son « mauvais génie » est effectivement susceptible de nous mettre quelques bâtons dans les roues.

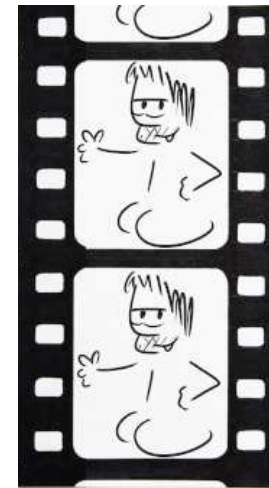
En effet, l'une des plus grandes difficultés que nous allons rencontrer dans notre démarche de compréhension du monde est que ce qui nous paraît évident ne l'est pas forcément. Comprendre les choses, c'est bien souvent devoir aller à l'encontre de ce qui nous semble vrai au premier regard, car ce que nous apprennent nos sens est parfois simplement faux. Il suffit, pour nous en convaincre, de pénétrer dans une salle de cinéma.

En effet, vous savez sans doute déjà qu'un film est constitué d'une série d'images fixes – c'est d'ailleurs de là que vient ce terme de « film »,

² Qui sont intitulés *la Dioptrique*, *les Météores* et *la Géométrie*. Descartes indique lui-même que, s'il a tâché de rendre les deux premiers intelligibles à tout le monde, le troisième nécessite certaines connaissances sur le domaine. Il se trouve que, dépassés de loin par les connaissances actuelles, ces traités n'ont pas grand chose d'intéressant à étudier dans le contexte de ce livre.

qui désigne à l'origine une pellicule photographique. Comment, alors, pouvons-nous voir les choses bouger devant nos yeux ?

Il se trouve en fait que ceux-ci ne sont pas parfaits. Si l'on coupe brusquement la lumière qui leur arrive, l'image qu'ils recevaient va persister un court instant (à peu près $\frac{1}{24}$ secondes) avant de disparaître.



Une pellicule cinématographique contient une série d'images très similaires les unes aux autres. Lors de la projection, le dispositif va couper la lumière vingt-quatre fois par seconde. Pendant le noir ainsi obtenu, la pellicule va être déplacée pour afficher l'image suivante, puis la lumière reviendra.

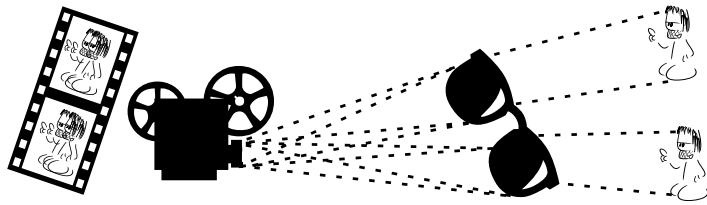
Comme la seconde image est affichée précisément à l'emplacement de la première, l'œil humain ne perçoit rien de ce déplacement, mais a l'impression de voir une seule image qui se modifie légèrement « en continu », créant ainsi l'illusion d'un mouvement.

Ajouter ou retirer des images (en projetant toujours à 24 images par seconde) modifie d'ailleurs le rythme de ce mouvement.

Cette persistance est due au fait que notre œil est quelque chose d'assez complexe (nous y reviendrons dans un chapitre ultérieur), et que capter et transmettre l'information prend un certain temps. Il existe cependant un second type de persistance, dû à la fatigue : plus vous passez du temps à fixer une image, plus les récepteurs concernés mettront du temps à « s'en remettre », et continueront à vous faire « voir » un négatif de l'image après que vous ayez cessé de la regarder (mais ceci n'a pas de rôle au cinéma).

Si le fonctionnement de base du cinéma repose sur ce qu'on peut considérer comme un défaut de notre vision (le fait que celle-ci ne soit pas instantanée), des effets visuels plus avancés ont besoin de « ruser » en détournant des aspects un peu plus avancés de la façon dont nous voyons.

Pour la «3D»³, par exemple : hors du cinéma, nous voyons le relief parce que nous avons deux yeux, qui ne sont pas exactement au même endroit. Chacun de nos deux yeux «voit» donc une image légèrement différente, et notre cerveau se charge ensuite de recombinaison une image en relief à l'aide de ce décalage. Pour obtenir du relief à l'écran, il faut donc se débrouiller pour que nos deux yeux reçoivent chacun une image différente. C'est le rôle de ces drôles de lunettes : deux images sont superposées sur la pellicule, et des filtres en masquent une de chaque côté. L'idée n'est d'ailleurs pas jeune, puisque le premier film réalisé de cette manière (même si les technologies ont, bien sûr, beaucoup évolué depuis) date en fait de 1936!



Mais le temps et le relief ne sont que les éléments de base : ce qui compte est la façon dont nous interprétons l'histoire qu'on nous raconte. Pour cela, d'autres «trucs» de ce genre sont nécessaires. Pour nous faire comprendre qu'une scène se passe de nuit, par exemple, il faut, naturellement, que la luminosité soit plus faible qu'en plein jour.

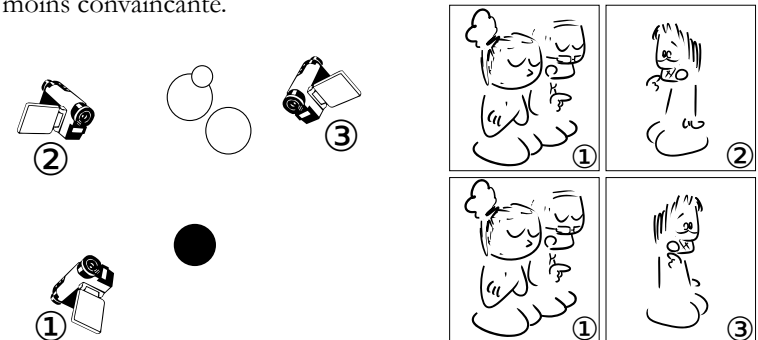
Ça, c'est relativement simple : s'inspirant de la façon dont fonctionne la pupille de nos yeux, nous avons doté nos caméras d'un diaphragme, un dispositif avec un trou au centre dont on va pouvoir

³ On devrait en fait dire «4D» : en plus des trois dimensions spatiales, on peut compter une quatrième dimension, le temps. Le cinéma «plat» classique est donc, en quelque sorte, déjà en «3D», puisqu'il ajoute le temps à la longueur et à la largeur d'une photographie (on peut d'ailleurs noter que la photo «3D», incluant la profondeur grâce à des lunettes comme pour les films, est apparue avant le cinéma, dès 1891). On pourra difficilement faire mieux : étant nous-mêmes en quatre dimensions, il nous est assez difficile d'en représenter cinq ou plus. Physique et maths peuvent tout de même y avoir recours, mais ça rentre un peu trop dans les détails pour ce livre.

régler la taille pour laisser passer plus ou moins de lumière. S'il fait vraiment sombre, on peut donc ouvrir ce diaphragme assez pour bien y voir, même s'il faut quand même prévoir quelques projecteurs pour y voir suffisamment. S'il fait trop clair, en fermant au maximum ce diaphragme, on diminue d'autant la luminosité récupérée... mais on a besoin, pour cela, que la luminosité extérieure soit d'autant plus forte pour arriver quand même à marquer la pellicule. Tourner une scène de nuit, que le tournage se passe vraiment de nuit ou non, demande donc bien plus d'éclairage que de la tourner de jour!

Quand on veut imiter la nuit en tournant de jour, cependant, fermer le diaphragme ne suffit pas : ça donne seulement un jour mal filmé. Il faut y ajouter un filtre bleu, et quelques petites retouches sur l'image, pour que notre cerveau interprète ce que lui transmettent nos yeux comme étant des images de nuit. C'est ce que l'on appelle une «nuit américaine».

Beaucoup d'autres choses dépendent de l'interprétation que nous en faisons. Pour une scène de discussion entre deux personnages, par exemple, on va généralement nous les montrer tous les deux, successivement, filmant à chaque fois celui qui est en train de parler. Il faut cependant, dans ce cas, faire bien attention à la façon dont on déplace la caméra (ou dont on les pose s'il y en a deux) : si l'angle n'est pas le bon, nous n'avons plus l'impression que les deux personnages sont en train de se regarder mutuellement, et cela rend la scène beaucoup moins convaincante.

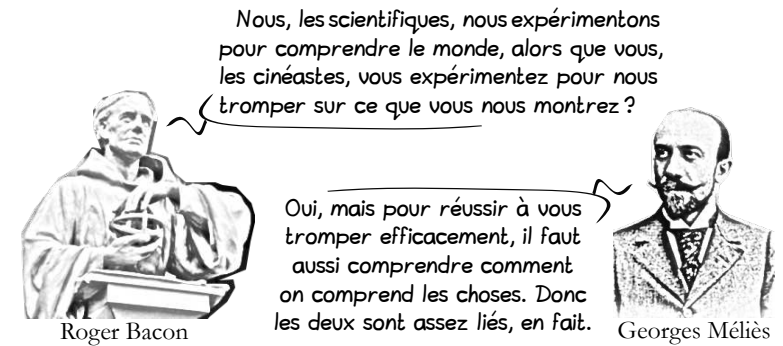


Toutes ces règles de fonctionnement n'ont pas été livrées déjà écrites avec la notice d'utilisation de la toute première caméra. Il a fallu procéder à de nombreux essais, et commettre de nombreuses erreurs, pour parvenir à comprendre, au fil du temps, ce qui fonctionne et ce qui ne fonctionne pas. Le cinéma est donc lui-même le résultat d'une *démarche expérimentale*.

Nous allons retrouver cette manière de fonctionner tout au long de ce livre, car elle est essentielle dans le fonctionnement des sciences. Roger Bacon, au XIII^e siècle, est d'ailleurs considéré comme l'un des «pères» de la démarche scientifique, pour avoir mis l'expérience au centre de sa méthode de travail à une époque où la plupart de ses collègues préféraient baser leurs raisonnements sur des textes anciens sans jamais les confronter à l'observation du monde. Se baser sur l'expérience, de manière *empirique*, ne suffit cependant pas toujours, car ce qui nous semble à première vue fonctionner mérite parfois qu'on s'y penche d'un peu plus près.

Le plus classique des exemples, au cinéma, de ces choses à regarder à deux fois est sans doute celui de *Star Wars*, et d'autres films du même style, où ça ne nous choque pas le moins du monde d'entendre l'explosion d'un vaisseau lointain lors de combats spatiaux... alors que le son, comme toutes les ondes mécaniques (nous y reviendrons), ne peut pas se propager dans le vide : ce serait simplement impossible dans la réalité.

Il faut dire que les libertés que prend le cinéma vis-à-vis de la réalité sont sans doute pour beaucoup dans ce qui fait son charme. Georges Méliès, prestidigitateur de métier, trouva ainsi dans le cinéma des débuts l'occasion d'expérimenter toutes sortes de nouveaux trucages pour surprendre ses spectateurs. Un certain nombre de ces trucages auront ensuite une très belle vie devant eux.



On peut notamment mentionner la technique de l'*arrêt de caméra* (dont Méliès ne fut pas l'inventeur, mais qu'il expérimenta avant d'essayer ses propres trucs). Le principe est simplement de mettre l'enregistrement sur pause le temps qu'un personnage entre ou sorte du cadre (ou qu'on déplace un objet), le reste de ce qui est filmé ne bougeant pas. Cela donne l'impression d'une apparition, disparition ou autre téléportation de manière assez efficace.

De nos jours, n'importe quelle caméra est capable de gérer un tel «truc» assez simplement. À l'époque de Méliès, les choses étaient un peu plus compliquées, car laisser la caméra en pause conduisait à sur-exposer une partie des pellicules : on «perdait» donc quelques images au moment de l'opération, et il fallait ensuite couper et raccorder la pellicule pour éviter que la projection ne montre une fraction de seconde d'images blanches, ce qui aurait forcément été davantage remarqué.

Peut-être est-ce en procédant à ces quelques rafistolages que Méliès eut l'idée de quelques autres de ses trucages, obtenus en allant directement retoucher la pellicule. Un certain nombre des trucages «artisanaux» de Méliès sont les ancêtres de nos effets spéciaux modernes, les moyens techniques ayant changé mais la logique restant la même. Quand ces effets sont bien réalisés, nous n'avons aucune

difficulté à croire ce que nous voyons, bien que nous sachions pertinemment que ce serait impossible hors de l'écran.

Il faut dire que notre cerveau est assez doué pour accepter tout et n'importe quoi et faire son affaire avec. Ainsi, en complément des films réalisés à partir de « vraies » photographies, nous pouvons sans problème regarder des dessins animés et visualiser ça aussi bien que s'il s'agissait d'images « réelles ». Ce n'est pas qu'une question de contexte : nous pouvons même regarder des films comme *Qui veut la peau de Roger Rabbit* où des personnes réelles et des personnages dessinés se partagent l'écran sans que cela ne nous choque le moins du monde.

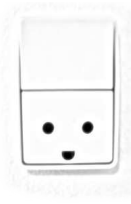
Car, pour notre cerveau, un vrai être humain, une photographie ou un dessin, c'est un peu pareil : nous cherchons du sens partout où nous le pouvons, et tout ce qui peut être interprété comme quelque chose de connu aura tendance à l'être. C'est ainsi que nous pouvons imaginer sans difficulté des formes dans les nuages ou autres décors du quotidien, par exemple.



« Visage » de profil
dans des rochers



Sous-marin (ou cachalot?)
dans les nuages



« Visage » sur une
prise de courant

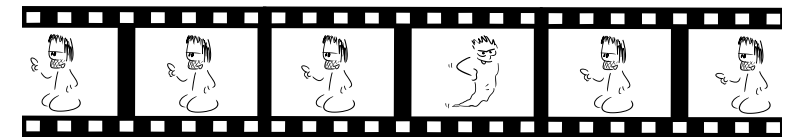
Ce phénomène, appelé *paréidolie*, est généralement sans gravité et assez amusant. Il n'est pas que visuel, d'ailleurs : nous avons également tendance à interpréter des « paroles » compréhensibles à partir de bruits divers. Là encore, ça peut être assez drôle : un sous-titrage au clip d'une chanson permet de changer significativement ce que nous y entendons, à plus forte raison (mais pas seulement) si les sous-titres

et les paroles d'origine ne sont pas dans la même langue (votre site de vidéos favori vous trouvera sans doute pas mal d'exemples de ces « *misheard lyrics* » si ça vous intéresse).

Ça peut devenir un peu plus préoccupant quand ces interprétations fantaisistes sont prises au sérieux. Ainsi, aux USA, certaines chansons de rock ont déjà été menacées de censure parce que, en les *passant à l'envers* (ce qui n'est *a priori* pas le but initial!), on pouvait interpréter certains passages comme des propos qui ont eux-mêmes été considérés comme « satanistes ».

Ça peut devenir encore plus préoccupant quand on réalise que c'est ce même cerveau, avec la même tendance à interpréter les choses de travers, que nous utilisons pour tenter de comprendre le monde, et pour prendre des décisions en fonction de ce qu'on en a compris.

Les choses peuvent même être encore pires, car notre cerveau peut aussi décider que certaines choses ne méritent tout simplement pas notre attention. Pour illustrer cela, revenons dans notre salle de cinéma : nous avons vu que la pellicule défile à vingt-quatre images par seconde, chaque image étant très similaire à la précédente pour que nous puissions voir le détail des mouvements. Mais que se passe-t-il si, au milieu de ces images successives, on en intègre une qui n'a strictement rien à voir ?



Eh bien... rien. L'information est correctement captée par nos yeux et transmise à notre cerveau, lequel décide purement et simplement de l'ignorer et de reprendre le fil de ce qu'il suivait jusque là dès que l'image suivante arrive. Enfin, non, c'est un peu plus compliqué

que ça : notre cerveau traite l'information et analyse cette nouvelle image comme il le ferait pour n'importe quelle autre. Mais dès lors qu'il se rend compte qu'il ne s'agissait que d'une anomalie passagère et que le reste du film reprend correctement, il décide que ça n'en valait pas la peine et n'informe pas notre conscience de ce qui vient de se passer.

Car notre cerveau et notre conscience sont deux choses différentes. Ou, plus exactement, la conscience n'est qu'une toute petite partie de l'activité de notre cerveau. Il se charge aussi de gérer, par exemple, notre respiration, la vitesse de battement de notre cœur⁴, notre digestion, et tout un tas d'autres fonctions du corps, par l'intermédiaire des systèmes nerveux et hormonal. Et, hormis parfois la respiration, rien de tout ça ne nécessite, heureusement, d'intervention consciente de notre part.

Mais le cerveau peut donc décider, sans que nous n'y puissions rien, que certaines choses ne nécessitent pas d'être transmises à notre conscience, comme c'est le cas de ces images dites *subliminales*. Le terme a tendance à évoquer un certain nombre de choses : on a prétendu que les images subliminales pouvaient influencer nos comportements, voire plus. La plupart du temps, cependant, il n'y a rien de plus que ce que nous venons de voir : ces images sont simplement ignorées par notre cerveau.

Il faut, en fait, être déjà dans une disposition d'esprit particulière pour qu'une image subliminale puisse avoir un véritable effet (quoiqu'assez limité) sur notre comportement. Si des détails à ce sujet vous intéressent, mais que vous n'avez pas envie de vous plonger dans des travaux scientifiques, vous pouvez simplement regarder l'excellent

⁴ Le cœur est le seul muscle de notre corps à disposer d'un système nerveux complètement autonome, c'est-à-dire pouvant continuer de fonctionner correctement même en étant totalement coupé du cerveau (et de la moelle épinière, puisque c'est elle qui se charge de gérer les réflexes). Néanmoins, livré à lui-même, notre cœur bat un peu plus vite que sa vitesse «de repos» : hors nécessité particulière du reste de l'organisme, notre cerveau est donc continuellement en train de lui demander de ralentir.

épisode *Subconscient* (*Double Exposure* en version originale) de la série télévisée *Columbo* (il s'agit de l'épisode 4 de la saison 3), qui montre que le cinéma peut vraiment nous apprendre pas mal de choses assez intéressantes.

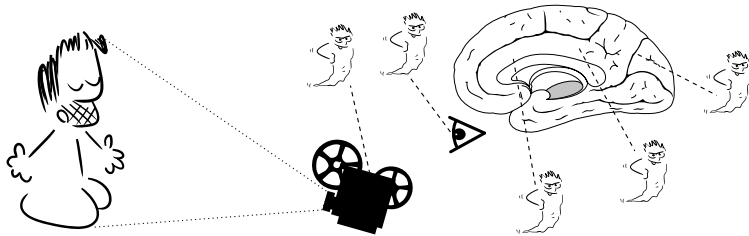
Terminons ce petit tour d'horizon cinématographique en abordant le fait, sur lequel nous reviendrons également plus loin, que ce que nous croyons savoir dépend beaucoup du contexte. Ainsi, pour une personne ayant grandi en France, il n'y a généralement pas de doute sur le fait que le cinéma est une invention française, que l'on doit aux frères Auguste et Louis Lumière.

Les personnes qui vivent outre-atlantique, cependant, attribuent plus volontiers cette invention à un certain Thomas Edison, qui mit au point un *kinétographe* (autrement dit, une caméra) et un *kinétoscope* (permettant de visionner des films enregistrés par le précédent) en 1889, soit tout de même six ans avant l'invention du cinématographe par les frères Lumière (qui se sont inspirés de ses travaux).

Quels détails techniques donnent raison à l'un ou l'autre de ces points de vue ? On considère généralement (du moins du côté français) que l'un des points essentiels a été que le kinétoscope était un outil individuel, tandis que le cinématographe permettait une *projection* publique, qui allait devenir caractéristique. Nous ne nous pencherons pas davantage sur cette controverse ici, mais contentons-nous de noter que le contexte dans lequel certaines découvertes ont lieu et nous sont transmises peut avoir une influence assez notable sur notre capacité à les accepter facilement ou non.

Ce n'est là que l'un des très nombreux défauts de perception dont souffre notre cerveau, et qui mériteraient assurément un livre leur étant dédié (il en existe en fait déjà quelques uns, ainsi que quelques très intéressantes chaînes de vulgarisation en vidéo, la bibliographie en fin d'ouvrage donnant quelques pistes à ce sujet).

Mais chaque chose en son temps : si ces biais sont la raison pour laquelle nous avons besoin d'une démarche particulière pour comprendre le monde malgré eux, ils sont aussi l'un des objets d'étude de cette démarche. Commençons donc par apprendre les règles qui nous permettront ensuite de les étudier dans le détail.



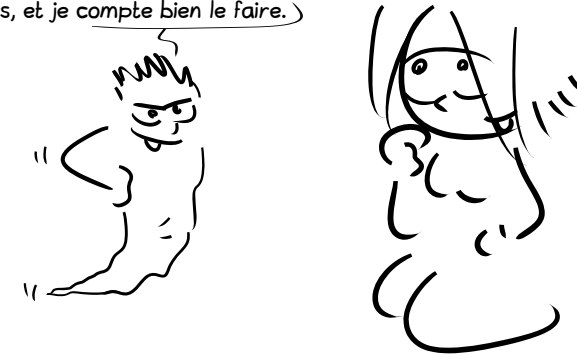
L'exemple du cinéma est très intéressant parce qu'il montre que le « mauvais génie » de Descartes, si omniprésent soit-il, peut parfois être « apprivoisé » pour que son action soit pour nous d'un certain intérêt, au moins récréatif. Il n'empêche que, volontairement ou non, il est bien là pour nous piéger sur à peu près tout et n'importe quoi.

Ceci nous montre donc que nos sens ne sont pas fiables. Pour parvenir à notre objectif de comprendre le monde, observer empiriquement les choses et généraliser ce que l'on voit est donc loin d'être suffisant. Bernard Le Bouyer de Fontenelle, scientifique des XVII^e et XVIII^e siècles (il est mort presque centenaire) résumait cette situation en une autre jolie formule, qui m'a bien sûr inspiré le titre de ce livre :

« Toute la philosophie n'est fondée que sur deux choses :
sur ce qu'on a l'esprit curieux et les yeux mauvais. »

Il faut comprendre ici « philosophie » comme étant la « philosophie naturelle », qui est le nom que l'on donnait à son époque à la science⁵. Les yeux mauvais représentent le piège de nos sens – même si, nous l'avons vu, notre cerveau en est en fait bien plus responsable que nos yeux. Mais parce que nous avons tout de même l'esprit suffisamment curieux pour vouloir comprendre, nous avons, progressivement, mis en place une démarche rigoureuse nous permettant de combattre le « mauvais génie » de Descartes et d'obtenir des connaissances fiables. Nous allons maintenant nous pencher sur les différentes règles qui composent cette démarche.

Méfie-toi, quand même. Je peux encore te jouer plein de mauvais tours, et je compte bien le faire. *Finalem^{ent}, une fois qu'on t'a apprivoisé, tu as l'air plutôt sympathique.*



⁵ Depuis au moins la Grèce antique jusqu'à Descartes et ses collègues, philosophe et scientifique ont été considérés comme un même métier. Nous avons tendance, de nos jours, à les distinguer, comme on distingue la sagesse du savoir : les règles et les champs d'application de ces deux démarches sont différentes. Gaston Bachelard, qui fut professeur de physique-chimie avant de devenir philosophe des sciences, nous rappelle cependant que les rapports entre les deux sont très intéressants à étudier.

Deuxième partie : Le monde existe

Comprendre le monde va, naturellement, nécessiter qu'il y ait un monde à comprendre. Est-ce bien le cas ? Descartes nous a appris que, malgré les pièges posés par nos sens trompeurs, nous sommes bien là pour tenter l'opération. Mais rien ne nous prouve qu'il existe bien une réalité en dehors de nous, indépendante des efforts que nous faisons pour la comprendre.

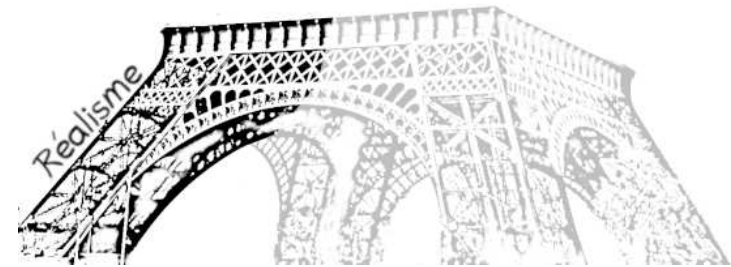
Toutefois, nous ne pourrions pas faire grand chose si ce n'était pas le cas. Il nous faut donc supposer qu'il existe bien une réalité objective sur laquelle nous pourrions nous mettre d'accord. C'est, au sens premier de ce terme, ce que l'on nomme le *réalisme*, qui est donc l'un des quatre piliers qui composent notre démarche et que nous allons ici détailler.

Le terme «réalisme» peut prendre des sens assez différents selon le contexte⁶, mais celui que nous utilisons ici se retrouve, par exemple, dans le *Dictionnaire de la langue française* d'Émile Littré, qui en donne la définition suivante: «Doctrine qui suppose que nous connaissons le monde extérieur comme une réalité objective, par opposition à la doctrine de Berkeley, qui déclare qu'en rien nous ne connaissons que nos impressions.»

Nous ne nous étendrons pas ici sur cette doctrine de Berkeley. Il est possible de considérer que cette réalité n'existe pas, et que ce que les scientifiques nomment «objectivité» n'est qu'une «intersubjectivité», une vision du monde partagée par plusieurs personnes mais qui ne pourrait réellement atteindre l'universalité. Force nous est cepen-

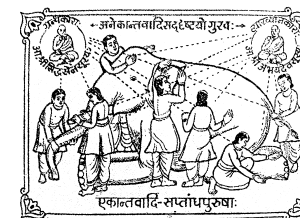
⁶ Le vocabulaire nous aide ici d'autant moins qu'une bonne partie des scientifiques de notre époque se reconnaissent dans un courant philosophie appelé «anti-réalisme»... et qui, malgré ce nom, est une déclinaison du «réalisme» au sens où nous l'entendons ici. Nous reviendrons sur ce point au chapitre dix.

dant de constater que, jusqu'à présent, l'hypothèse du réalisme n'a pas été prise en défaut et que les résultats de la démarche scientifique sont bien ceux que nous en espérons.



Le réalisme est le deuxième⁷ des quatre piliers sur lesquels la démarche scientifique s'appuie pour tenir bien droit. Il s'agit de l'hypothèse de l'existence d'une réalité objective, c'est-à-dire qui, mise dans les mêmes conditions, va toujours se manifester de la même manière, indépendamment de la personne qui l'observe.

À la base, nous ne sommes pas d'accord sur la façon de décrire le monde.



(Anekantavada)



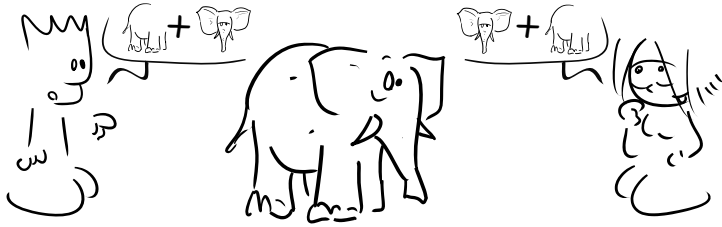
On peut se dire que c'est le « mauvais génie » qui trompe chaque personne de façon différente, pour que ce soit plus efficace.



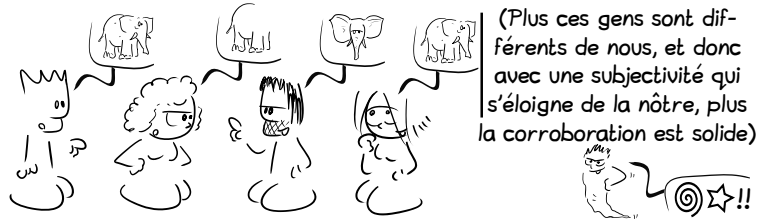
(Dit autrement, c'est parce que tout le monde a une expérience différente que notre façon d'interpréter les choses va varier d'une personne à l'autre)

⁷ Deuxième, car nous avons en fait déjà abordé quelques aspects du premier pendant le chapitre précédent. Nous le détaillerons toutefois davantage au chapitre cinq, ainsi qu'aux chapitres dix et onze.

Ce qui fait que, pour savoir à quoi le monde ressemble réellement, il faut qu'on arrive à dépasser nos subjectivités personnelles.



La science est donc, par définition, une activité collective: pour pouvoir être considérée comme objective, la connaissance doit nécessairement être validée par d'autres gens.



Les découvertes scientifiques importantes ne sont d'ailleurs jamais le fait d'un génie isolé: d'une façon ou d'une autre, tout apport s'appuie sur les travaux qui l'ont précédé, et sera corrigé par des travaux ultérieurs.

Parmi les nombreux exemples de ce sujet que nous livre l'Histoire des sciences, la découverte de la pression atmosphérique est assez caractéristique: elle illustre quatre étapes de la démarche expérimentale, chacune d'entre elles portée par une personne différente.



Galileo Galilei

Evangelista Torricelli

Blaise Pascal

Otto von Guericke

L'histoire débute en 1638, à Florence. Les fontainiers de la ville travaillent à pomper l'eau du fleuve Arno pour alimenter des logements situés en hauteur. Les pompes à eau sont des dispositifs bien connus à l'époque:



Quand on place un tube doté d'un piston au contact d'une étendue d'eau, puis qu'on tire le piston, l'eau semble « aspirée » par ce dernier et s'élève elle aussi dans le tube. Tout le monde peut faire l'essai avec une simple seringue dans un verre ou une tasse.

Jusqu'à 1638, on considérait que l'eau était bien aspirée, afin d'empêcher un vide de se former (perspective qui semblait alors très gênante).

Mais les progrès techniques de l'époque font que l'on tente de créer des pompes pour amener l'eau de plus en plus haut, et voilà qu'une désagréable surprise apparaît: au dessus d'environ dix mètres trente-trois, l'eau cesse brusquement de monter. Malgré toutes les tentatives d'ajustement des pompes, rien ne semble pouvoir l'amener plus haut.

On décide alors de demander de l'aide. Il se trouve qu'un certain Galilée habite dans les environs: nul doute qu'un brillant scientifique comme lui saura résoudre le problème, ou au moins comprendre ce qui ne fonctionne pas. Les fontainiers lui expliquent donc la situation.

Galilée, cependant, est vieux et en mauvaise santé, en plus d'être occupé à de nombreux autres travaux: il se penche bien sur le problème, mais ne s'y consacre pas à plein temps. Il fournit cependant une première analyse: les connaissances d'alors stipulaient que « la nature a horreur du vide »; Galilée déclare, d'après ces observations, que « l'horreur du vide a ses limites ».

La phrase peut sembler d'une portée limitée. Elle est sans doute prudente, de la part d'un homme qui a déjà subi un procès pour s'être

opposé à ce qui était alors considéré comme vrai (nous évoquerons un peu plus en détails «l'affaire Galilée» dans un chapitre ultérieur). Mais elle est tout de même d'une importance capitale : le vieux maître reconnaît le caractère problématique des représentations de son époque, et la nécessité de trouver une explication nouvelle pour dépasser ces limites.

En d'autres termes, Galilée *pose le problème*. Il y ajoute par ailleurs une possible proposition (qu'il exprime d'ailleurs par une équation, ce qu'il est l'un des premiers physiciens à faire) en supposant que la hauteur maximale atteinte pourrait être «inversement proportionnelle à la densité de l'eau⁸».

Cinq ans se passent néanmoins sans grand progrès. Si bien qu'en 1643, les fontainiers de Florence s'adressent à l'un des disciples de Galilée, un certain Torricelli. Celui-ci s'engage à travailler activement sur la question et à leur fournir une réponse l'année qui suit.

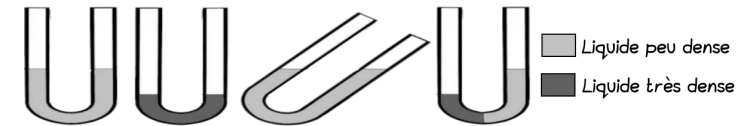
Reprenant la première hypothèse de son maître, Torricelli va commencer par tester des liquides de différentes densités. Le mercure, le liquide le plus dense qu'il a à sa disposition, se montre bien plus capricieux que l'eau : il s'arrête pour sa part à 76 centimètres, plutôt qu'aux 1033 de cette dernière.

Toricelli va donc poursuivre ses expériences en utilisant du mercure à la place de l'eau, le changement de hauteur le rendant beaucoup plus facile à manipuler. Il a par ailleurs l'idée de changer la forme du dispositif : plutôt qu'une étendue d'eau dans laquelle il va pomper le liquide, il décide d'utiliser des tubes en forme de U.

Classiquement, dans un tel tube, le liquide va être au même niveau dans les deux colonnes. Torricelli essaie cependant de mettre deux

⁸ Pour préciser le vocabulaire : il s'agit en fait de la *masse volumique*. La densité est un rapport entre la masse volumique de quelque chose, et une masse volumique de référence. Or, il se trouve que celle choisie pour référence est précisément celle de l'eau. Sa densité vaut donc toujours 1, ce qui rend son inverse assez peu intéressante.

liquides différents (et qui ne peuvent se mélanger) dans un même tube, et remarque que les hauteurs diffèrent alors : le liquide le plus dense arrive bien plus bas dans sa colonne que le liquide le moins dense dans la sienne.



Ce à quoi se livre Torricelli dans ces travaux est ce que l'on appelle aujourd'hui une *modélisation* : pour comprendre un phénomène naturel, il tente de le reproduire «en conditions de laboratoire», puis fait varier les paramètres petit à petit pour en étudier le détail. La démarche scientifique revêt alors l'aspect d'un jeu de Cluedo : pour parvenir le plus rapidement possible à la solution, on demande les cartes en fonction de ce que l'on connaît déjà, pour limiter au maximum le niveau d'incertitude.

Cette modélisation permet d'ailleurs à Torricelli d'identifier un possible coupable : l'atmosphère. Ce mélange de divers gaz, dont en particulier le diazote et le dioxygène (qui nous permet de respirer) est soumis, comme le reste de ce qui nous entoure, à la pesanteur, et les quelques dix kilomètres d'atmosphère au dessus de nos têtes exercent donc une pression qui équivaut à celle d'une dizaine de mètres d'eau.

Si l'eau monte dans la seringue, ou dans la pompe à eau, ce n'est pas le piston qui l'attire : c'est l'air qui pousse la surface du réservoir. Lorsque l'eau est montée si haut que sa propre pression compense celle de l'atmosphère, le déplacement s'arrête, et du vide peut alors apparaître.

La pression atmosphérique est un concept qui nous paraît aujourd'hui familier. Toute personne qui a déjà pris l'avion, par exemple,

a eu l'occasion de sentir les effets d'un brusque changement d'altitude (la voiture peut avoir le même effet en montagne). Mais le XVII^e siècle ne compte aucun moyen de transport suffisamment rapide pour éprouver cet effet. Il ne s'agissait donc pas, à l'époque, d'un phénomène humainement perceptible. Comme souvent lors des grandes découvertes scientifiques, les travaux de Torricelli nous dévoilent donc quelque chose qui contredit ce que nous apprennent nos sens.

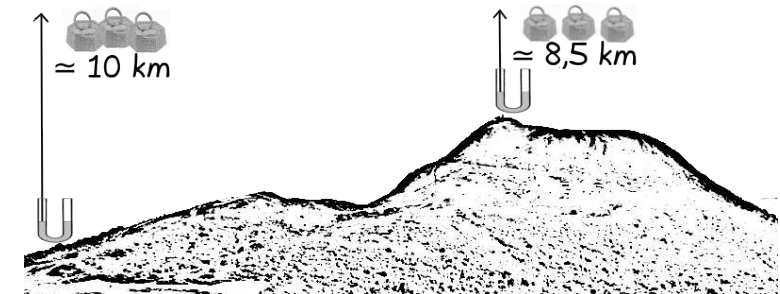
Il semble que les fontainiers de Florence se soient satisfaits des explications que Torricelli leur a apporté suite à ses expériences, expliquant le fonctionnement et les limites de leurs pompes. Scientifiquement parlant, cependant, la modélisation ne suffit pas à conclure. Une étape reste nécessaire : celle de la vérification des hypothèses avancées.

Pascal, mis au courant des travaux de Torricelli, se penchera sur le sujet au cours de l'année 1647. L'idée à laquelle il arrive est relativement simple : si c'est la pression d'une « colonne » importante d'atmosphère qui fait monter l'eau, ou le mercure, alors faire varier la hauteur de cette colonne devrait nécessairement faire varier la hauteur à laquelle l'eau, ou le mercure, s'arrêtera. Il « suffit » donc de reproduire l'expérience des fontainiers de Florence à un endroit où l'atmosphère est moins épaisse.

Où trouver pareil endroit ? Pascal suppose qu'une montagne, où le sol est plus élevé, devrait donc avoir moins d'air au dessus d'elle⁹. Ainsi, au sommet du Puy-de-Dôme, haut de 1 465 mètres, la colonne d'air appuyant sur la surface du liquide devrait être d'autant moins importante, et donc faire s'élever le liquide d'autant moins loin. Pascal organise l'expérience avec son beau-frère Florin Périer, demeurant

⁹ Nous savons maintenant que la hauteur de la colonne d'air n'est, en pratique, pas la seule chose qui joue à ce niveau : l'air en altitude est également moins dense (raison pour laquelle les alpinistes doivent s'équiper de respirateurs pour atteindre les plus hauts sommets). Ces deux effets se cumulent, mais il était nécessaire de connaître le premier pour envisager le second, que Pascal ignorait donc.

à Clermont-Ferrand : on mesure la hauteur maximale atteinte par le mercure (plus pratique à évaluer que l'eau, puisqu'un mètre de tube suffit), à peu près au même moment, à la base et au sommet de la montagne.



L'expérience est réalisée en 1648, soit dix ans après l'observation problématique, et elle confirme les hypothèses établies : le mercure, soumis à une pression atmosphérique moindre, monte plus bas au sommet du mont qu'à son pied. Ce résultat a, scientifiquement, valeur de preuve, parce que l'expérience cumule plusieurs caractéristiques :

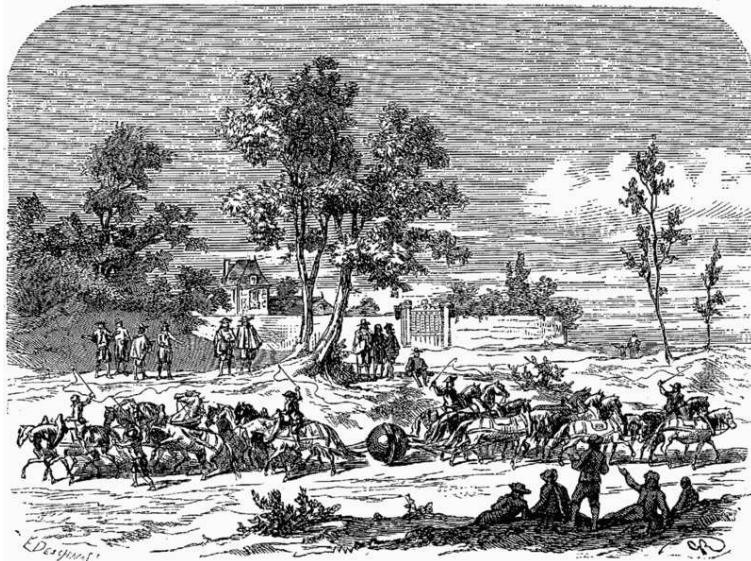
- Elle est, d'abord, le résultat d'une *prédiction*. La théorie évaluée ne se contente pas de fournir une explication *a posteriori* à des phénomènes déjà connus, mais permet d'*anticiper* un phénomène nouveau, qui n'avait jusqu'alors jamais été observé.
- Elle est, de plus, réalisée de façon contrôlée : les conditions sont choisies spécifiquement pour observer un phénomène précis, limitant l'incertitude ; et la hauteur de mercure dans le tube mesurée aussi précisément qu'il est possible à l'époque.
- Elle n'est, enfin, pas le fait d'une intervention humaine directe : contrairement aux expériences de laboratoire où Torricelli pouvait faire varier les conditions à loisir, c'est ici le cadre extérieur qui est seul responsable de l'effet observé, indépendamment de la personne qui réalise l'expérience.

En d'autres termes, on se met en situation de limiter au maximum l'influence du «mauvais génie», mais c'est bien à la nature seule que revient la charge d'«expliquer» la nature: c'est ce mode de fonctionnement, et le fait que l'expérience puisse être reproduite à l'identique par des personnes différentes, qui est gage d'objectivité.

Mais la démarche scientifique ne s'arrête pas à la preuve: il reste à tirer des conséquences de ce savoir nouveau. Les hypothèses de Torricelli et l'expérience de Pascal n'ont servi qu'à expliquer un phénomène physique précis; il devient maintenant possible d'aller plus loin.

C'est là qu'intervient notre quatrième larron, Guericke: puisque la connaissance obtenue par ses prédécesseurs rend théoriquement possible l'existence du vide, il s'emploie à en tirer une application pratique.

Il s'attèle à la tâche en 1650, et fait brillamment la démonstration de la première «pompe à air» (ou «machine pneumatique», dont les pompes à vide moderne sont une évolution) quatre ans plus tard, par l'expérience dite des «hémisphères de Magdebourg», où vingt-quatre chevaux n'arrivent pas à séparer deux hémisphères entre lesquels la machine de Guericke a «fait le vide».



Notre homme ne se limite cependant pas à une «simple» réalisation technique: il reprend également l'étude du tube à mercure de Torricelli. On peut en effet remarquer que la hauteur atteinte par le mercure n'y est pas toujours exactement la même, mais peut varier légèrement selon les jours. Guericke fait le lien entre ces variations et le temps qu'il fait, et explique comment cet instrument – que l'on nommera par la suite *baromètre* – peut être utilisé pour les prévisions météorologiques.

Parlons maintenant d'une autre expérience célèbre, dans laquelle l'expérimentation «en situation contrôlée» a demandé un travail humain préalable plus important: celle de la mesure de la masse de la Terre, en 1798.



Ératosthène



Sir Isaac Newton



Sir Henry Cavendish

À l'origine de cette mesure se trouve la théorie de la gravitation universelle, établie par Newton, et dont nous reparlerons brièvement par la suite. Celle-ci indique que la force qui nous maintient les pieds au sol a une portée plus générale: tout objet attire les corps qui l'environnent, la force étant d'autant plus puissante que l'objet est massif¹⁰. Newton exprime, dans ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* parus en 1687, la formule selon laquelle s'exerce cette attraction:

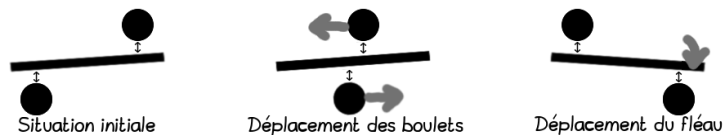
$$F = G \times \frac{m_1 \times m_2}{d^2}$$

¹⁰ Cette fois encore, cela s'oppose à ce que nous enseignent nos sens: la seule attraction que nous ressentons est celle qui s'exerce entre nous et la Terre, parce que la Terre est le seul objet à la fois suffisamment massif et suffisamment proche pour que nous nous apercevions de quelque chose sans aller spécifiquement le chercher.

En d'autres termes, la force d'attraction vaut le produit des masses m_1 et m_2 des deux objets considérés, divisé par le carré de la distance d qui les sépare, le tout multiplié par une constante, qu'il nomme G .

Newton ne fournit cependant pas la valeur de cette constante. Plusieurs autres scientifiques s'y essayeront par la suite, mais il faudra attendre plus d'un siècle pour que Cavendish parvienne à un résultat. Pour cela, il utilise un *pendule (ou balance) de torsion*, auquel il fixe deux boulets de plomb dont la masse est précisément connue. Afin de s'assurer que rien ne viendra perturber son expérience, Cavendish fait construire autour de son pendule une sorte de bâtiment sans porte ni fenêtres, puis attend trois jours pour que tout se calme à l'intérieur de ces murs.

Ces trois jours écoulés, on perce (avec précaution) deux trous, un de chaque côté du bâtiment, afin de pouvoir observer précisément la position du pendule. Puis, on active un mécanisme qui vient déplacer les deux boulets, de manière à ce que l'attraction s'inverse, ce qui fait que le fléau du pendule va pivoter dans une nouvelle direction :



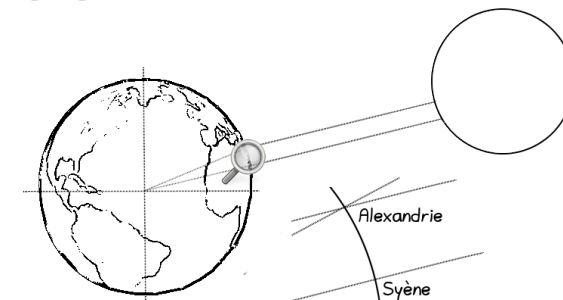
Les masses et positions des boulets étant précisément connues, et les murs construits tout autour permettant d'éviter toutes les perturbations extérieures ou presque, la mesure du déplacement de ce fléau permet de déterminer, par un rapide calcul, celle de la constante gravitationnelle.

Cette fois encore, la mesure de la constante gravitationnelle est intéressante pour elle-même, mais surtout pour les usages qu'on en fait. L'objectif de Cavendish, en réalisant l'expérience, était d'estimer la masse de la Terre. Pour cela, outre la masse et le poids, aisément

mesurables à l'aide des instruments classiques, il est nécessaire de connaître la distance précise qui sépare l'objet que l'on prend comme référence et le centre de la Terre. Ce qui, lorsque l'objet est posé au sol, revient à connaître le rayon de notre planète. Pour cela, il n'y a plus grand chose à inventer en 1798 : une méthode efficace est connue depuis environ deux millénaires.

Ératosthène, mathématicien égyptien (on le considère habituellement comme grec, car il vécut sous la dynastie lagide, remontant à la conquête de l'Égypte par Alexandre le Grand), n'était pas le premier à s'être attelé à cette tâche, mais sa méthode est la plus ancienne à nous être parvenue. En faisant mesurer la longueur de l'ombre d'un gnomon (le bâton d'un cadran solaire) le même jour et à la même heure dans deux villes différentes, on peut déterminer l'angle qui sépare ces deux villes.

Connaissant ensuite la distance précise entre elles (que l'on peut estimer de diverses manières¹¹), un peu de calcul permet d'estimer la circonférence de la planète, et de là son rayon. Ératosthène avait probablement (il y a quelques incertitudes sur la longueur précise du «stade» qui lui servait d'unité de mesure) trouvé aux alentours de 39 400 kilomètres, quand la mesure effectuée avec les moyens actuels est d'un peu plus de 40 000 kilomètres.



¹¹ La légende veut qu'Ératosthène ait utilisé le pas, très régulier, d'un chameau pour effectuer cette mesure. Il semble cependant que cette information n'ait pas été précisée dans les écrits retrouvés jusque là, et d'autres méthodes pouvaient être envisagées, comme la simple évaluation du temps de trajet et de la vitesse.

Fort de ces différentes mesures, Cavendish, qui avait trouvé une valeur de $6,754 \times 10^{-11}$ (en unités du système international, c'est-à-dire $N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$) pour la constante gravitationnelle, estima donc la masse de notre planète à $5,980 \times 10^{24}$ kilogrammes. L'aspect intéressant, et qui témoigne de la reproductibilité de son expérience (ce qui est notre meilleur gage d'objectivité), est que sa technique est encore celle utilisée de nos jours pour déterminer la valeur de la constante gravitationnelle.

La seule différence notable entre l'expérience d'origine et celle pratiquée actuellement est que les progrès des outils de mesure nous permettent de miniaturiser les objets utilisés (le pendule de Cavendish, pour que le déplacement du fléau soit mesurable à l'œil nu, mesurait deux mètres, avec des boulets de trente centimètres. Les dispositifs les plus petits, actuellement, tiendraient dans l'espace d'un seul de ces boulets), ce qui permet d'éviter d'avoir à maçonner autour (on se « contente » habituellement de salles de laboratoire plus modernes).

Comme souvent, l'augmentation de la précision de nos instruments de mesure a permis d'affiner les chiffres obtenus: on estime de nos jours la constante gravitationnelle à $6,674 \times 10^{-11}$ u.s.i., ce qui nous donne une masse de la Terre d'environ $5,974 \times 10^{24}$ kilogrammes. Cette valeur reste néanmoins très proche de celle déterminée à l'époque par Cavendish.

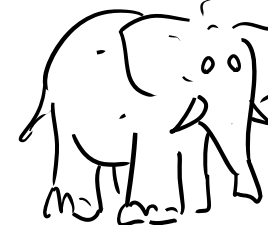
Les chiffres et les équations, peu présents dans les travaux de Torricelli et Pascal, l'ont été davantage dans ceux de Cavendish. C'est chose normale: si le réalisme scientifique veut que l'on laisse la nature « expliquer » elle-même la nature, il faut la laisser pour cela parler sa propre langue.

Or, comme l'écrivait Galilée dans son ouvrage *L'Essayeur* (dont la publication remonte à 1623): « La philosophie est écrite dans cet immense livre qui se tient toujours ouvert devant nos yeux, je veux

dire l'univers, mais on ne peut le comprendre si l'on ne s'applique d'abord à en comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et autres figures géométriques, sans le moyen desquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot. »

Avant d'aller plus loin dans notre démarche de compréhension du monde, il nous sera donc nécessaire de nous pencher sur un peu (juste ce qu'il faut!) de mathématiques. Après avoir accordé une certaine importance à l'observation, ce sera l'occasion de nous familiariser avec l'autre versant de notre démarche, l'interprétation.

Et n'oubliez pas : vous ne voyez peut-être que ma trompe, mes défenses ou mes pattes, mais je suis bien là tout entier. Il suffit de prendre quelques précautions pour que le « mauvais génie » arrête un peu de vous embêter, et vous pourrez me trouver plus facilement. Alors n'hésitez pas à me montrer aux autres gens que vous croisez : plus c'est reproductible, plus c'est objectif.



Troisième partie :

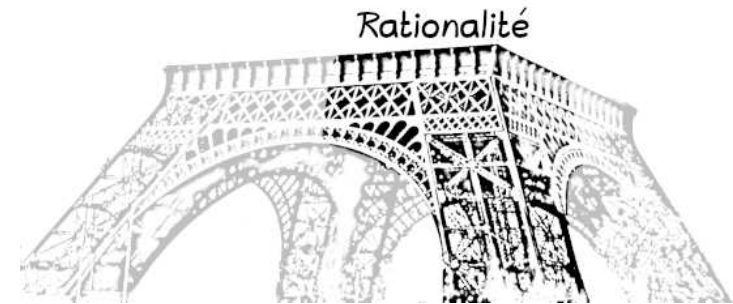
De la méthode

L'objectif de la démarche scientifique est de parvenir à comprendre le monde, à expliquer la façon dont il fonctionne d'une manière qui soit indépendante des personnes qui se livrent à cet exercice. Il nous faut cependant constater que l'exercice est difficile, car nos sens sont trompeurs, et que l'interprétation que nous pouvons faire, sans prendre de précautions particulières, de ce qu'ils nous apprennent est bien souvent biaisée.

Prendre des précautions nous est donc nécessaire pour parvenir à notre objectif. Nous avons abordé certaines de celles qui concernent l'observation dans le chapitre précédent. Le second versant de la démarche, l'interprétation, en nécessite d'autres, car il s'agit surtout ici de *raisonner* en enchaînant les idées les unes aux autres par des relations de causalité.

Pour cela, nous allons maintenant nous pencher sur une discipline dans laquelle ce mode de fonctionnement est central : les mathématiques. Les personnes à qui ce mot fait peur peuvent tout de même se rassurer en considérant que nous allons surtout nous intéresser à la façon dont on construit les raisonnements sans entrer dans des aspects trop avancés de ce domaine.

Précisons tout de même que, si ce mode de raisonnement est dit *rationnel*, ce mot (comme celui de «réalisme» au chapitre précédent) peut prendre plusieurs sens selon le contexte. Nous allons parler ici d'un élément nécessaire à la démarche scientifique, sans préjuger de ce qui peut être, ou non, intéressant dans d'autres cadres.



Le troisième pilier de la démarche scientifique est la rationalité : les théories scientifiques, pour être considérées comme recevables, doivent tenir la route d'un point de vue logique et se montrer les plus cohérentes possibles (ce qui nécessite également, nous y reviendrons dans un prochain chapitre, d'économiser les hypothèses gratuites).

Être rationnel, c'est comme jouer à faire des cascades de dominos.



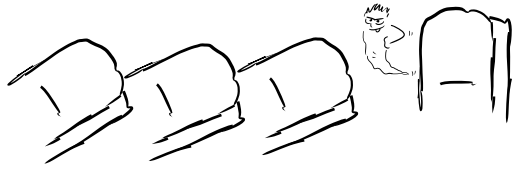
Mettons qu'il y ait un domino, tout là-bas, que vous voulez faire tomber, mais votre seul point de départ possible est à l'autre bout de la pièce.



Il faut alors poser d'autres dominos, un par un, de façon à ce que faire tomber le premier entraîne le suivant, puis que celui-ci entraîne celui d'après, et ainsi de suite, jusqu'à celui qu'il va falloir faire bouger.



S'il y a la moindre faute de logique dans votre cascade, la réaction en chaîne va s'arrêter, et le domino que vous aviez pour cible ne pourra donc pas bouger. On rencontre alors un échec théorique.



Par contre, si la cascade est bien construite, il suffit de faire tomber le premier domino (mesurer le déplacement du fléau ou la hauteur de mercure) pour que le dernier de la chaîne tombe aussi (calculer la masse de la terre ou prouver l'existence du vide, par exemple).

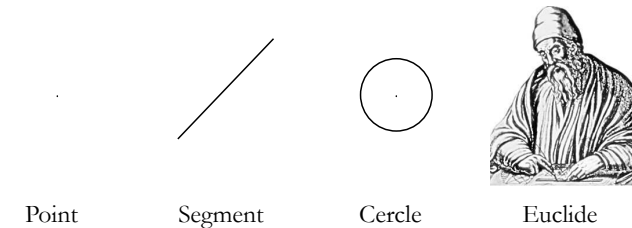
La méthode dont nous allons parler maintenant n'est pas toute jeune: elle date d'il y a au moins deux mille trois cents ans. C'est à cette époque (ou à peu près, nous ne connaissons pas précisément la date) qu'un certain Euclide publie un livre qui sera d'une importance capitale pour les mathématiques: les *Éléments de géométrie* (ou «les Éléments» en bref).

Dans cet ouvrage, Euclide fait l'inventaire des connaissances de son époque en matière de géométrie. Mais il fait bien plus que cela: il ordonne ces connaissances, les structure, et *démontre* ce que l'on ne faisait jusqu'alors qu'admettre (c'est-à-dire accepter comme vrai simplement parce que «jusque là, ça a l'air de marcher», sans garantie que ça marchera toujours). En d'autres termes, Euclide invente¹² et met en place le *formalisme* qui sera caractéristique du raisonnement mathématique.

Voyons donc un peu la façon dont il s'y prend. Tout d'abord, chaque chapitre de cet ouvrage commence par une série de *définitions*, posant les concepts qui lui serviront par la suite. Listons quelques unes d'entre elles:

¹² Précisons bien «en l'état actuel de nos connaissances». Il est tout à fait possible qu'Euclide n'ait rien inventé, et que d'autres aient publié des livres reposant sur la même structure bien avant lui. Simplemment, celui d'Euclide est le plus ancien de ce type que nous ayons retrouvé jusque là.

1. Un point est ce qui n'a ni parties, ni dimensions.
2. Un segment est une longueur sans largeur.
3. Les extrémités d'un segment sont des points.
- [...]
15. Un cercle est une figure du plan contenue par une seule ligne, appelée circonférence, caractérisée par le fait que tous les segments tracés d'un certain point à cette circonférence sont de même longueur;
16. Ce point particulier est appelé le centre du cercle.
17. Un diamètre d'un cercle donné est un segment passant par le centre de ce cercle, et dont les deux extrémités sont situées sur sa circonférence. Un rayon d'un cercle donné est un segment tracé du centre du cercle jusqu'à sa circonférence.



Celles-ci nous suffiront, mais il y en a en tout trente-cinq dans le seul premier chapitre. Ce travail de définition peut sembler fastidieux et peu utile au premier abord, mais il est au contraire primordial: définir les concepts avant de les manipuler permet de lever les ambiguïtés et les incompréhensions. À titre d'exemple, considérons le mot «science» lui-même.

Nous avons, au premier chapitre, défini ce mot comme désignant la *démarche scientifique* qui est l'objet de ce livre. C'est en ce sens que nous continuerons de l'utiliser ici; mais il y a d'autres manières de le comprendre. On peut, par exemple, l'utiliser pour désigner l'*ensemble*

des connaissances d'une personne ou d'une société à un instant donné, comme dans l'expression populaire «étaier sa science». D'autres usages lui font plutôt désigner l'ensemble des personnes, professionnellement organisées, qui travaillent à appliquer cette démarche, et donc à produire ces connaissances, c'est-à-dire l'*institution scientifique*, ou bien les *applications* qui sont issues de cette connaissance (l'association d'idées «sciences et techniques»).

On voit aisément que, si le sens qui est utilisé dans un contexte donné n'est pas clairement précisé, cela peut facilement donner lieu à des quiproquos: un résultat erroné, par exemple, ne remet pas en cause la démarche générale –comme nous allons le voir, la démarche procède au contraire par remise en cause permanente. De même, la volonté de comprendre le monde n'implique pas nécessairement celle de vouloir agir sur lui d'une façon ou d'une autre. Mais nous reviendrons plus en détail sur ce dernier point dans la seconde partie de ce livre, aussi, pour l'instant, revenons à nos Éléments.

Après les définitions, Euclide présente ses *postulats* et ses *axiomes*. Les seconds sont des énoncés considérés comme suffisamment évidents pour n'avoir pas besoin d'être démontrés. Ainsi, Euclide commence par nous proposer les axiomes suivants :

1. Deux choses qui sont toutes deux égales à une troisième sont égales l'une à l'autre.
2. Si deux grandeurs données, égales entre elles, sont ajoutées à deux autres grandeurs elles aussi égales entre elles, alors les sommes sont elles aussi égales entre elles.
3. Si deux grandeurs données, égales entre elles, sont soustraites à deux autres grandeurs elles aussi égales entre elles, alors les différences sont elles aussi égales entre elles.

Les premiers, en revanche, sont des énoncés moins évidents ; mais il s'agit des énoncés de départ à partir desquels il va construire son

cadre de travail. Quoiqu'ils ne soient pas démontrés formellement, il nous demande donc de les accepter pour lui permettre de développer le reste. Listons, là encore, les premiers postulats qu'Euclide nous propose :

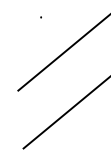
1. Un segment peut être tracé depuis un point donné vers n'importe quel autre point.
2. Un segment peut être prolongé indéfiniment pour donner une droite.
3. Tout segment peut être le rayon d'un cercle dont l'une de ses extrémités est le centre.

Dans le cadre général de la démarche scientifique, le réalisme, désigné au chapitre précédent comme une hypothèse, relève plutôt de la notion mathématique de postulat : nous ne pouvons pas le démontrer formellement, mais il s'agit d'un énoncé essentiel à nos travaux de compréhension.

La question de savoir s'il est possible de démontrer les postulats peut d'ailleurs être posée. On peut mentionner en particulier le dernier postulat d'Euclide, aussi appelé «postulat des parallèles», dont la position dans l'ouvrage peut laisser penser qu'Euclide a tenté de le démontrer mais n'y est finalement pas parvenu.

Deux droites sont dites *parallèles* quand elles ne se croisent en aucun point. Le dernier postulat d'Euclide pose que, par n'importe quel point pris hors d'une droite, il est possible de faire passer une autre droite parallèle à la première.

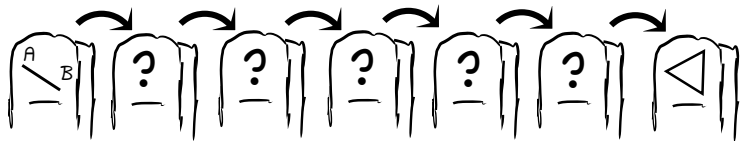
Il a été démontré au XIX^e siècle que cet énoncé est indémontrable, et que l'on peut construire des géométries (que l'on va donc désigner comme « non-euclidiennes ») dans lesquelles tous les autres postulats d'Euclide sont vrais, mais où celui-ci est faux.



Après les postulats et les axiomes, Euclide attaque les *problèmes*. Pour chacun d'eux, il va poser ses hypothèses de départ, c'est-à-dire les données initiales sur lesquelles il travaille. Ici encore, la question de la définition est importante : une hypothèse, au sens mathématique, n'est pas quelque chose que l'on va chercher à vérifier, mais ce dont on va chercher à tirer des conséquences. Ce sont nos dominos de départ.

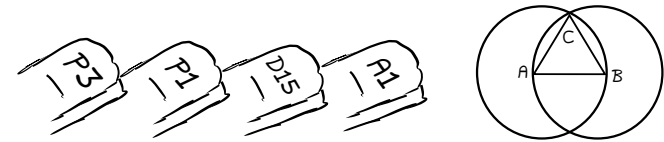
Par exemple, le premier problème auquel s'attaque Euclide est celui de la construction d'un triangle équilatéral (c'est-à-dire dont les trois côtés sont de longueur égale) à partir d'un segment donné. Son hypothèse de départ est donc «soit $[AB]$ un segment». La résolution du problème consiste ensuite en le fait d'enchaîner les énoncés (les dominos) de telle sorte à arriver au résultat désiré, chaque étape s'appuyant sur celles qui la précèdent.

Un problème de ce type, une fois correctement posé, peut en fait être considéré comme une sorte de jeu de construction. Vous connaissez le point de départ ($[AB]$ est un segment), et le point d'arrivée (un triangle doit être équilatéral). Toutes les étapes intermédiaires ont été listées parmi les définitions, postulats et axiomes présentés ci-dessus. Le tout est «simplement» de trouver dans quel ordre les enchaîner. Vous pouvez, si vous le désirez, tenter d'y arriver vous-mêmes avant de passer à la page suivante.



Partant de l'hypothèse de départ, le troisième postulat permet de construire deux cercles dont le segment $[AB]$ est un rayon, l'un dont le centre est le point A , l'autre dont c'est le point B . Ces deux cercles se croisent en un point, que nous appellerons C . Grâce au premier postulat, nous savons pouvoir tracer les segments $[AC]$ et $[BC]$. Nous avons donc un triangle ABC . Reste maintenant à démontrer qu'il est équilatéral.

D'après la définition quinze, $[AB]$ et $[AC]$, reliant deux points d'un cercle au centre de ce dernier, sont donc de même longueur. De même sur l'autre cercle pour $[AB]$ et $[BC]$, toujours d'après cette même définition quinze. Le premier axiome nous permet donc de conclure que $[AC]$ et $[BC]$, tous deux égaux à $[AB]$, sont donc également égaux entre eux. Les trois côtés du triangle ABC étant égaux, celui-ci est donc bien équilatéral.



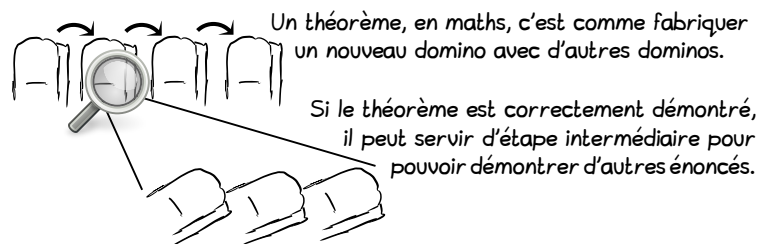
Le procédé est le même pour les problèmes suivants : poser des hypothèses, puis, en appliquant successivement définitions, axiomes et postulats, avancer jusqu'à tirer des conclusions. Nous apprenons ainsi comment tracer un segment égal à un autre segment à partir d'un point donné, puis comment on peut couper un segment à la longueur d'un second segment plus court que lui, et ainsi de suite.

À chaque fois, c'est donc le *raisonnement logique* qui nous permet de passer d'une étape à l'autre. De la même manière qu'une énigme paraît simple à partir du moment où elle a été résolue, une démonstration bien construite paraît aller de soi quand on la lit (et qu'on maîtrise le niveau de mathématiques requis, évidemment). Comme vous avez pu vous en rendre compte si vous avez essayé l'exercice, les choses sont plus délicates si vous devez établir la démonstration vous-mêmes.

La difficulté, naturellement, est encore accrue lorsque l'on ne nous fournit pas ces définitions et ces énoncés de base. C'est là le cœur du métier de scientifique : pour produire des connaissances sur le monde, il est souvent nécessaire de commencer par fixer le cadre, en déterminant les outils à utiliser pour cela. Poser formellement le problème, si simple que cela ait pu paraître dans notre exemple du chapitre précédent, est généralement au moins aussi dur que de le résoudre.

Certains des problèmes suivants aboutissent à poser des *théorèmes*, c'est-à-dire des énoncés supplémentaires qui, une fois correctement démontrés, viendront enrichir notre boîte à outils et pourront être réutilisés dans d'autres démonstrations. En d'autres termes, démontrer un théorème, c'est fabriquer un nouveau domino, que l'on pourra ensuite utiliser pour former de nouvelles cascades et prouver d'autres choses.

Euclide termine ainsi son premier chapitre en démontrant le célèbre théorème de Pythagore¹³, à savoir le fait que, étant donné un triangle rectangle, l'aire d'un carré ayant pour côté l'hypoténuse (le côté opposé à l'angle droit du triangle) est égale à la somme des aires de deux carrés ayant chacun pour côté l'un des deux côtés restants du triangle. Si vous gardez quelques souvenirs d'exercices de géométrie de collège, vous devez savoir que ce théorème lui-même est utilisé dans plusieurs autres démonstrations.



¹³ On lui donne le nom de ce philosophe grec ayant vécu deux siècles avant Euclide, mais il n'en fut pas l'inventeur : bien que la plus ancienne démonstration formelle que nous connaissions soit celle présente dans les *Éléments*, il semble que l'énoncé ait été connu, en Mésopotamie, un millénaire entier avant Pythagore.

Nous allons toutefois en rester là pour ce qui concerne la lecture des *Éléments* d'Euclide (ce qui ne vous empêche pas, si l'exercice vous a plu, de vous en procurer un exemplaire pour tenter de voir, étant donné les définitions, postulats et axiomes qu'il pose, si vous parvenez à résoudre ses différents problèmes), et envisager rapidement d'autres points.

Commençons en soulignant que le « mauvais génie » est à l'œuvre ici aussi. Son travail consiste essentiellement à nous faire manquer des étapes dans le raisonnement. Ainsi, certaines parties du travail d'Euclide ont dû être consolidées au fil du temps. On peut notamment mentionner les travaux de Moritz Pasch et David Hilbert, qui ont complété la géométrie « euclidienne » en y ajoutant des axiomes restés jusque là implicites.

Mais l'exemple le plus marquant à ce sujet est sans doute l'anecdote d'une note de travail du mathématicien Pierre de Fermat, jamais publiée par lui mais retrouvée après sa mort, dans laquelle il énonçait un théorème avec le commentaire suivant : « j'en ai découvert une démonstration véritablement merveilleuse que cette marge est trop étroite pour contenir ». Or, ce théorème ne fut finalement prouvé que *trois siècles et demi plus tard*, par Andrew Wiles, qui eut pour cela besoin d'utiliser des outils mathématiques qui n'existaient simplement pas du temps de Fermat.

Mais les maths ne sont pas que de la géométrie. Il y a aussi beaucoup d'équations. Et peut-être vous demandez-vous pourquoi les personnes qui travaillent dans les maths semblent aimer mettre des lettres dans tous les sens. La raison est en fait la même pour les équations et pour la géométrie.

Dans l'exemple qui précédait, nous aurions pu nous contenter de dire « deux cercles ayant pour centre chacune des deux extrémités du segment » ou « le point où les circonférences de ces deux cercles se croisent ». Hélas, quand un problème inclut plus de trois points (ce

qui est assez fréquent), on s'y perd assez rapidement, et donner un nom aux points aide beaucoup à s'y retrouver. On pourrait, bien sûr, les appeler Pierre, Michel et Raymond, mais il se trouve que A, B et C sont plus rapides à écrire.

Le principe est le même pour les équations : on peut utiliser de longues périphrases, mais quelques lettres bien choisies rendent la lecture plus aisée. Un exemple assez célèbre, à ce sujet, est l'épithaphe du mathématicien Diophante d'Alexandrie, que l'on a été jusqu'à mettre en vers¹⁴ :

*« Passants, sous ce tombeau repose Diophante,
Ces quelques vers, tracés par une main savante,
Vont te faire savoir à quel âge il est mort :
Des jours, assez nombreux, que lui compta le sort,
Le sixième marqua le temps de son enfance,
Le douzième fut pris par son adolescence,
Des sept parts de sa vie, une encore s'écoula,
Puis, s'étant marié, sa femme lui donna
Cinq ans après un fils qui, du Destin sévère,
Reçut de jours, hélas !, deux fois moins que son père.
De quatre ans, dans les pleurs, celui-ci survécut,
Dis, si tu sais compter, à quel âge il mourut. »*

Le texte est beau, mais compter en lisant peut assez vite s'avérer délicat. Or, il s'agit ici d'une « simple » équation à une inconnue (on pourrait considérer que l'âge du fils de Diophante en est une seconde ; mais le rapport entre l'âge du fils et celui du père est suffisamment explicite pour qu'on s'en passe directement). Si l'on désigne par « x » l'âge du mathématicien, tout ce texte peut ainsi se résumer de la façon suivante :

$$x = \frac{x}{6} + \frac{x}{12} + \frac{x}{7} + 5 + \frac{x}{2} + 4$$

Vous pouvez maintenant tenter de résoudre également ce problème, ce qui ne demande en fait que des opérations plutôt simples.

¹⁴ Mettre des maths en poèmes est plus fréquent qu'on ne le croit. Citons ainsi les premiers vers d'un poème dans lequel le nombre de lettres de chaque mot vaut la décimale correspondante du célèbre nombre π : « *Que j'aime à faire apprendre un nombre utile aux sages ! Immortel Archimède, artiste, ingénieur, Qui, de ton jugement, peut priser la valeur ? Pour moi, ton problème eût de pareils avantages...* »

Le plus pratique est sans doute de commencer par mettre toutes ces fractions au même dénominateur, ce qui se fait assez bien quand on remarque que $12 = 6 \times 2$, et qu'on peut donc limiter le nombre de multiplications :

$$\begin{aligned} x &= \frac{(2 \times 7) \times x}{(2 \times 7) \times 6} + \frac{(7) \times x}{(7) \times 12} + \frac{(2 \times 6) \times x}{(2 \times 6) \times 7} + 5 + \frac{(6 \times 7) \times x}{(6 \times 7) \times 2} + 4 \\ &= 5 + 4 + \frac{14x + 7x + 12x + 42x}{84} = 9 + \frac{75x}{84}, \text{ soit } x - \frac{75x}{84} = 9 \end{aligned}$$

On obtient cette dernière égalité en passant tous les x du même côté pour que ce soit plus pratique. Or, comme $x = 1 \times x = \frac{84x}{84}$ et que $84 - 75 = 9$, nous avons donc $\frac{9x}{84} = 9$. Ce qui revient à $\frac{x}{84} = 1$, en divisant par 9 de chaque côté, et nous permet donc de conclure que Diophante est mort à $x = 84$ ans. Sous cette forme chiffrée, il « suffit » donc de maîtriser quelques règles d'algèbre pour pouvoir trouver la réponse.

Revenons maintenant sur les deux notions d'*hypothèses* que nous avons abordées jusque là. Au sens usuel, une hypothèse est une possibilité qui reste à vérifier (elle pourra s'avérer vraie ou fausse). Au sens mathématique, il s'agit d'une donnée de base à partir de laquelle nous allons raisonner. Dans le contexte général de la démarche scientifique, ces deux sens, absolument pas contradictoires, sont en fait complémentaires l'un de l'autre.

Le travail scientifique, en effet, vise à comprendre le monde : il n'a de sens que si, comme Pascal sur le Puy-de-Dôme, on soumet la validation de nos travaux à l'épreuve de la réalité. Observer le monde sans essayer de raisonner à partir de ce que l'on voit ne permet pas d'en construire une compréhension très solide ; mais raisonner « dans le vide », sans rattacher ces réflexions au monde, ne le permet pas davantage.

À ce titre, dès que l'on sort du domaine des mathématiques pures, les travaux scientifiques doivent impérativement contenir des hypothèses au sens usuel, qu'il faudra vérifier pour tester la validité de l'ensemble. Ces hypothèses au sens usuel sont généralement les conséquences logiques d'hypothèses au sens mathématique (celles de Torricelli, par exemple). Elles peuvent également servir elles-mêmes de bases à d'autres constructions logiques (l'hypothèse de Pascal a ouvert la voie aux travaux de Guericke).

Cette situation nous conduit à aborder une notion qui sera incontournable par la suite, celle de *réfutabilité*¹⁵, théorisée particulièrement par Karl Popper. Une affirmation est considérée comme réfutable à partir du moment où elle accepte la possibilité d'une observation qui la rendrait fautive (observation directe, ou expérience dont le résultat n'est pas celui prédit par le raisonnement logique). Cette condition est essentielle pour que l'énoncé puisse lui-même servir de base à autre chose.

Ainsi, déclarer que toute action est nécessairement égoïste n'est pas réfutable : on pourra avancer que toute action altruiste vise à faire plaisir à la personne qui s'y livre, et est donc *in fine* égoïste. Puisque l'énoncé n'admet pas de possibilité de réfutation, il n'est pas possible de le prouver. Et donc, qu'il soit vrai ou pas ne change en fait strictement rien.

Les énoncés scientifiques reposent sur le mode de fonctionnement inverse. Ainsi, pour conclure sa mesure de la Terre évoquée au chapitre précédent, Ératosthène aurait choisi une formulation très parlante : « si la Terre est ronde, alors sa circonférence est de... »

Nous savons que la Terre est ronde par ailleurs : une preuve en

¹⁵ On croise parfois « falsifiabilité », transcription directe de l'anglais « *falsifiability* ». Il s'agit toutefois d'un faux-ami, et donc d'une traduction bancal : « falsifiable », en français, ne veut pas dire « réfutable » (de même que « digital » ne veut pas dire « numérique » ou que « pingouin » ne veut pas dire « manchot »).

avait déjà été avancée par Aristote¹⁶, un siècle et demi avant le scientifique égyptien. Pour les gens qui l'ignoreraient, cette preuve repose sur l'ombre projetée par la Terre sur la Lune lors d'une éclipse : celle-ci est systématiquement circulaire, quelles que soient les positions dans l'espace des trois astres qui entrent en jeu. Or, si la Terre était par exemple un disque plat, l'ombre projetée, dans la plupart des cas, serait de forme ovale.

Cette formulation, de la part d'Ératosthène, ne doit donc pas être prise comme l'expression d'un doute vis-à-vis de la sphéricité de la Terre : il faisait simplement état de l'hypothèse de départ, réfutable par nature et confirmée par les faits, dont son résultat est une conséquence logique.

Notons que cette règle de fonctionnement, sur laquelle nous basons le reste, qui laisse à la nature la tâche de réfuter ou non les hypothèses, est également un critère important pour déterminer ce qui relève de la science et ce qui n'en relève pas, comme nous allons le voir dans le prochain chapitre.

C'est la chute du premier domino qui fait tomber tous les autres en cascade. Si à aucun moment on ne peut appuyer dessus pour voir s'il tombe ou pas, la cascade qui le suit n'a aucun sens.



Sir Karl Popper



¹⁶ Pour une bonne partie d'entre eux, les travaux à visée scientifique d'Aristote ont été invalidés ou dépassés depuis son époque (notamment parce que la méthode de travail a considérablement évolué depuis) ; mais cet argument-ci a résisté à l'évolution des connaissances. Voilà un rappel efficace du fait que, si personne n'a le privilège d'avoir toujours raison, personne n'a, non plus, le privilège de toujours se tromper.

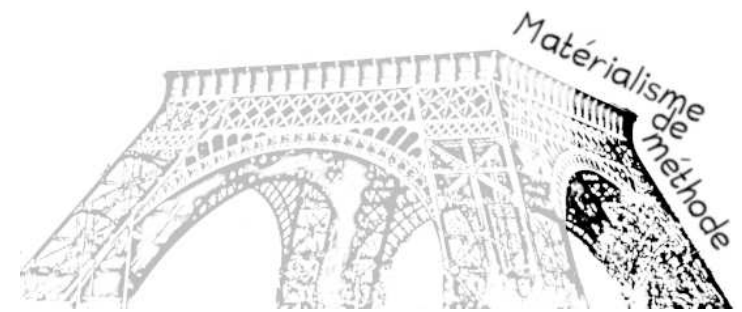
Quatrième partie : Appuyer sur les choses

Le *réalisme* à la base des travaux scientifiques est le postulat selon lequel il existe avant tout une réalité objective qui, si l'on parvient à dépasser les subjectivités personnelles, devrait donc se manifester de la même manière à tout le monde. Tout travail scientifique doit donc intégrer au moins une hypothèse *testable*, logiquement reliée au reste. Selon le résultat d'une expérience effectuée en situation contrôlée (par exemple, en déplaçant le matériel là où les conditions vont être différentes, comme au sommet d'une montagne, ou en maçonnerant autour du dispositif expérimental pour éviter les perturbations extérieures), les conclusions sont soit validées, soit invalidées.

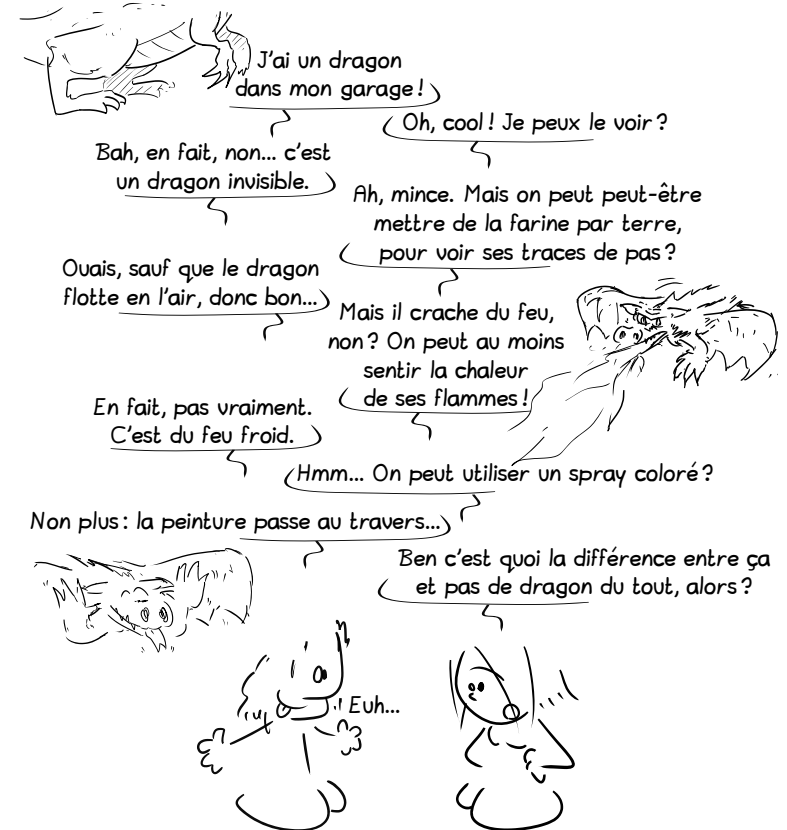
En d'autres termes, la vérification, en sciences, va se faire en *appuyant sur le monde* pour observer la façon dont il va réagir. Dans ce contexte, être réaliste revient à poser que la *personne* qui appuie n'a pas d'importance: tant que l'on appuie *de la même manière*, la réaction observée sera nécessairement la même. Mais une conséquence intéressante de ce pré-requis est que, de fait, cela limite le champ de l'activité scientifique au monde matériel, c'est-à-dire à l'ensemble des choses qui réagissent quand on appuie dessus.

Il faut toutefois préciser que ce *matérialisme* est à portée limitée. Au sens philosophique, le matérialisme pose que seule la matière existe, et s'oppose à d'autres courants philosophiques comme le spiritualisme. Au sens scientifique, le matérialisme se limite à poser une contrainte méthodologique. Il ne s'oppose à aucun de ces courants philosophiques, mais se borne à constater, humblement, que nous ne savons pas travailler scientifiquement avec autre chose que la matière.

Cette contrainte est en fait indispensable. Ann Druyan et Carl Sagan l'ont explicité dans leur livre *The Demon-Haunted World* en présentant l'hypothèse d'un dragon vivant dans un garage.



Le quatrième pilier de la démarche scientifique est le matérialisme méthodologique, c'est-à-dire le fait de ne mobiliser, pour travailler, que des entités et éléments sur lesquels il est a priori possible d'appuyer pour observer une réaction, cette réaction étant précisément ce qui est étudié.



On se rend assez rapidement compte, étant donné les réponses apportées à toutes les tentatives de vérification, que l'hypothèse de ce dragon n'est pas *réfutable*, et que, finalement, un dragon invisible, flottant dans l'air, ne crachant que du feu froid, que la peinture traverse, etc., revient très exactement, d'un point de vue scientifique, à pas de dragon du tout.

Mais il est intéressant de noter, dans cet échange, toutes les propositions qui sont faites pour trouver un moyen de se rendre compte de sa présence dans le garage. Chacune de ces propositions est une tentative d'«appuyer» sur le dragon, à la recherche d'une réaction que l'on pourrait observer. C'est très exactement la façon dont fonctionne le matérialisme scientifique.

Une entité immatérielle, sur laquelle on ne peut, par définition, pas «appuyer», ne produira donc aucune réaction observable, et par là, ne se pliera pas à l'étude scientifique.

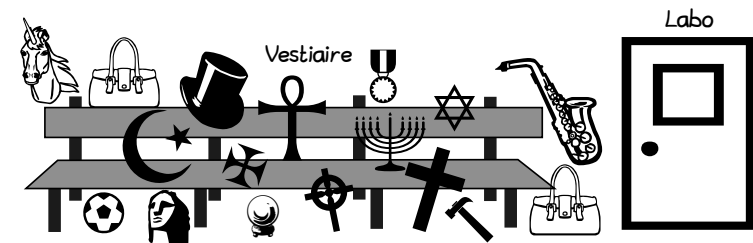
Ainsi, Dieu, tel qu'il nous est présenté par la plupart des religions, est un être extérieur à notre univers (puisqu'Il l'a créé) avec lequel on ne peut interagir que par la prière, sans certitude qu'il y réponde: par définition, la science est donc impuissante à confirmer ou infirmer son existence.

Elle peut en revanche parfaitement étudier la façon dont, selon ces différentes religions, Dieu se manifesterait au monde. Ainsi, plusieurs travaux scientifiques tendent à montrer que les fameuses «plaias d'Égypte» décrites dans la Bible pourraient avoir été les conséquences (quelque peu romancées) d'une éruption du volcan Santorin qui fut particulièrement dévastatrice.

Considérer, ou non, que cette éruption, et surtout le moment où elle est survenue, aient pu être le fruit d'une volonté divine est un acte de foi: la méthode scientifique ne permet simplement pas de trancher à ce niveau.

Il n'y a donc pas d'opposition entre sciences et religions, dès lors que ces dernières ne prétendent pas dicter à la science les conclusions auxquelles elle devrait arriver (ce qui, malheureusement, n'est pas toujours le cas).

En fait, l'espace du laboratoire est un espace tacitement laïque: les convictions théologiques des scientifiques n'y sont pas mobilisées (athéisme y compris), ce qui permet de travailler sereinement entre personnes ayant des points de vues parfois franchement opposés sur ce sujet. Ce qui est une bonne chose: comme nous l'avons vu précédemment, plus nos subjectivités personnelles sont éloignées, plus le résultat commun sur lequel nous nous mettons d'accord peut prétendre à l'objectivité.



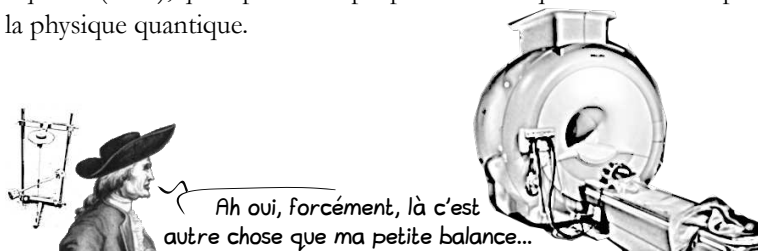
Laisser les différentes options métaphysiques au vestiaire avant d'entrer dans le laboratoire n'est, bien sûr, pas si facile à réaliser: naturellement, nos convictions nous orientent dans le choix des hypothèses que nous formulons. Cela concerne d'ailleurs les convictions autres que religieuses: ainsi, au cours de la guerre froide, deux thèses s'opposaient concernant la formation du système solaire, qui reposaient manifestement sur les présupposés idéologiques d'un «bloc» et de l'autre.

Une telle situation, difficilement contournable, n'est heureusement pas problématique, dès lors que toutes les personnes concernées comprennent que la nature n'est pas là pour nous faire plaisir: lorsque

l'expérience proposée invalide nos hypothèses de départ, il devient alors nécessaire d'en changer, si séduisantes qu'elles aient paru jusque là (de manière assez compréhensible, il n'est malheureusement pas si facile en pratique d'abandonner des hypothèses séduisantes, même lorsqu'elles ont été clairement invalidées, mais nous y reviendrons dans la seconde partie).

Il faut toutefois noter qu'«appuyer» sur les choses n'est pas forcément toujours facile à faire, et ce pour deux raisons. La première est que les objets étudiés dans certains domaines scientifiques ne sont pas évidents à «toucher». Un atome, par exemple, n'est pas exactement quelque chose que l'on peut toucher du doigt. Pour parvenir à observer de sa part une réaction que l'on va pouvoir interpréter, il est nécessaire de passer par un «accélérateur de particules», qui lui envoie de l'énergie à l'aide d'un champ magnétique ou électrique. On détecte alors les signatures énergétiques dues, par exemple, aux collisions qui peuvent avoir lieu dans ces conditions.

Même dans des cas où il reste facile d'«appuyer», la réaction peut être difficile à voir sans un équipement spécialisé. Pour étudier en direct les zones activées par tel ou tel stimulus dans notre cerveau, par exemple, nous avons recours à une «imagerie par résonance magnétique»¹⁷ (IRM), qui exploite des propriétés atomiques découvertes par la physique quantique.



¹⁷ Il existe d'autres techniques, nécessitant un appareillage moins coûteux, tels que l'électro- ou la magnéto-encéphalographie. Hélas, si celles-ci permettent de suivre l'activité cérébrale en temps réel, elles permettent plus difficilement de situer l'origine précise d'un signal dans le cerveau. Pour interpréter correctement les résultats, on a donc tout de même besoin de les croiser avec des données spatiales acquises par IRM.

La nécessité de tels dispositifs expérimentaux est bien sûr problématique, au sens où cela empêche la plupart des gens, qui n'ont pas les moyens d'avoir leur propre accélérateur, de participer à la démarche scientifique, qui devrait, dans l'idéal, être ouverte à tout le monde. Il reste, heureusement, beaucoup d'autres moyens de contribuer pour les personnes intéressées¹⁸.

L'autre raison correspond en fait précisément à la difficulté inverse : certains autres objets d'études sont en fait si faciles à «toucher» qu'il est nécessaire de prendre beaucoup de précautions pour observer précisément ce que l'on veut et pas autre chose. L'exemple typique, à ce sujet, est sans doute celui des sondages et autres questionnaires : plusieurs décennies de pratique nous ont montré qu'il est extrêmement facile de suggérer assez efficacement des réponses, et donc de fausser les résultats.

Entre autres éléments à ce sujet, on peut mentionner *l'effet de halo* : une prise de position, même anodine, sur les premières questions va conditionner les réponses qui suivront. Par exemple, si on commence par demander un avis global sur un film, des questions plus précises (sur le scénario, la musique, les effets visuels, etc.) arrivant ensuite seront orientées, la personne qui répond cherchant généralement, y compris inconsciemment, à être «cohérente» et donc à suivre sa position initiale.

Les formulations des questions et des réponses, ainsi que l'ordre dans lequel ces dernières sont proposées, jouent également : la personne qui répond a généralement tendance à privilégier les réponses les moins extrêmes («probable» est préféré à «certainement»), et une réponse arrivant systématiquement en première position sera favorisée quel que soit l'avis réel des individus interrogés.

¹⁸ L'un des moyens les plus simples de contribuer à la recherche scientifique, nous y reviendrons en abordant l'informatique au dernier chapitre, est l'installation d'un logiciel comme BOINC, qui permet d'allouer une partie des ressources inutilisées de votre ordinateur à contribuer aux calculs sur un projet scientifique de votre choix. Mais d'autres moyens seront évoqués à la fin de ce livre si ça vous intéresse.

Cela ne veut bien sûr pas dire qu'il serait impossible d'étudier de manière fiable le comportement humain: ce sont au contraire des études rigoureuses menées dans ce domaine qui ont conduit à prouver l'existence de ces différents biais. Mais les personnes qui travaillent dans les domaines scientifiques dont l'objet d'étude comprend des réactions humaines ont besoin d'adopter une méthodologie d'autant plus travaillée pour y parvenir.

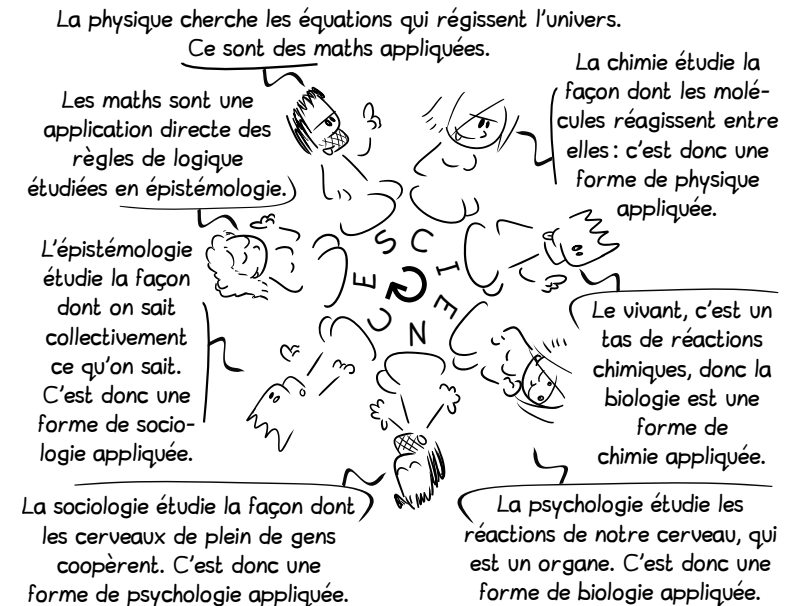
Néanmoins, l'opposition, que l'on rencontre couramment, entre les sciences dites «dures» d'un côté et «humaines» de l'autre ne relève pas d'une quelconque différence de nature: les règles que nous étudions ici, qui sont ce qui définit la démarche scientifique, s'appliquent aussi bien des deux côtés.

Il est, dans les deux cas, question de comprendre le monde (dont nous autres, êtres humains, faisons partie!), en ayant pour cela recours aux mêmes principes généraux. La différence réside seulement dans *ce qui est étudié*: d'un côté, les sciences «physiques» se penchent sur les constituants les plus fondamentaux de la matière, tandis que, de l'autre, les sciences «humaines» s'intéressent à des *propriétés émergentes* de cette matière.

On pourrait donc considérer, d'une certaine manière, que les différents champs disciplinaires sont imbriqués. Pour autant, décrire une chose aussi complexe qu'une société humaine par les interactions entre les atomes qui les composent serait sans doute assez infaisable en pratique, et il est largement préférable d'utiliser d'autres niveaux – et d'autres méthodes – pour y arriver.

Chacun de ces niveaux ouvrant de nouveaux champs d'études, les choses sont loin d'être aussi linéaires qu'on pourrait le penser. En fait, l'activité scientifique étant une activité humaine, et étudiable à ce titre, les rapports entre les différents domaines sont plutôt circulaires!

En étudiant le groupe social des scientifiques, et donc la façon dont fonctionne en pratique la recherche, la sociologie se penche en effet sur les règles que suit cette recherche et font que celle-ci fonctionne. En cela, elle rejoint la discipline la plus importante de toutes, l'*épistémologie*, c'est-à-dire l'étude de la connaissance, et donc de la démarche scientifique elle-même.



Ainsi, Pierre Bourdieu écrivait dans sa *Sociologie des Sciences* (1997): « Mais ce qui fait la spécificité du champ scientifique, c'est que les concurrents s'accordent sur des principes de vérification de la conformité au "réel", sur des méthodes communes de validation des thèses et des hypothèses, bref, sur le contrat tacite, inséparablement politique et cognitif, qui fonde et régit le travail d'observation. » Les règles de fonctionnement que nous détaillons dans ce livre forment une partie importante de ce « contrat tacite », qu'il est toujours bon de rendre plus explicite.

S'il n'y a pas de différence de nature entre l'activité scientifique des différents domaines, et si la méthodologie *générale* est la même pour l'ensemble des sciences, il est toutefois nécessaire d'ajuster les protocoles en fonction de ce que l'on veut observer. De ce fait, la pratique «au quotidien» de la recherche scientifique varie parfois beaucoup d'un «laboratoire» à l'autre.

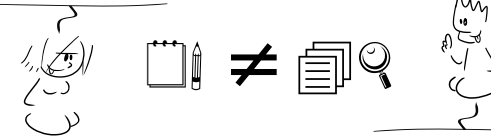
On peut tout de même relever de fortes ressemblances : tout ce qui relève de l'étude du passé lointain, par exemple, fait face aux mêmes difficultés expérimentales, et le régime de preuve s'ajuste donc en conséquence. De même, quantifier l'effet d'un phénomène donné sur une population constituée d'individus tous différents et qui vont donc réagir différemment se traite de la même manière, que le phénomène étudié soit l'effet d'un médicament sur la santé ou la réponse à une pression sociale : l'étude statistique «en double aveugle» utilisée en médecine est donc également le protocole standard pour une partie la psychologie sociale.

Nous détaillerons toutefois ces deux aspects un peu plus loin, aussi penchons-nous pour l'instant sur une méthodologie qui est assez spécifique aux sciences humaines : celle de l'analyse qualitative, c'est-à-dire l'analyse visant à comprendre les personnes impliquées dans une activité donnée, et la façon dont elles l'appréhendent, plutôt que les mécanismes régissant le fonctionnement de l'activité elle-même.

La première étape est naturellement de se poser une question particulière, et par là, de donner la définition initiale du problème sur lequel porteront les travaux. Initiale, car cette définition pourra être adaptée en cours de route, en fonction de ce vers quoi nous dirigent les données obtenues. Nous avons déjà vu ceci à l'œuvre : les fontainiers de Florence voulaient initialement savoir pourquoi leurs pompes ne fonctionnaient pas passée une certaine hauteur. Le problème, une fois formellement posé par Galilée, visait à comprendre les limites

de la supposée «horreur du vide» de la nature ; et la question finale à laquelle l'expérience de Pascal a répondu était de savoir si l'atmosphère exerçait bien une pression.

Sur un travail de longue durée, comme un doctorat, on ne sait pas dès le départ où on arrivera à la fin, donc le problème peut être redéfini en cours de route, en fonction des données.



Par contre, sur une expérience unique, le problème doit être clairement posé à l'avance et ne pas changer ensuite, sinon ça va fausser complètement les résultats obtenus.

Il faut ensuite acquérir des informations, et pour cela, discuter avec les personnes sur lesquelles porte l'enquête. Dans certains cas (quand la question est encore très imprécise, par exemple), on peut simplement laisser ces personnes parler sans instructions particulières, afin de déterminer les thèmes que ces gens évoquent spontanément et sur lesquels il va être intéressant de travailler.

Il ne faudrait néanmoins pas croire que ces entretiens, appelés «non-directifs», laissent les gens parler complètement librement : le simple fait d'être en situation d'entretien va avoir une influence sur leur manière de répondre. Le concept de «pur observateur» est en effet un mythe : au contraire, «observer, c'est perturber», et c'est précisément ce qui nous intéresse. Au minimum, l'analyste doit s'assurer de mettre la personne interrogée dans de bonnes dispositions pour parler (le lieu choisi pour l'entretien ne doit pas provoquer de stress particulier, par exemple).

L'usage le plus fréquent est cependant de préférer un entretien *semi-directif*, où l'analyste intervient davantage, pour orienter le discours dans la direction souhaitée (sans pour autant, naturellement, dicter les réponses). L'un des avantages de cette pratique est, en cas de besoin, de s'assurer que toutes les personnes interrogées abordent les

sujets les plus essentiels à évoquer, que certaines d'entre elles pourraient omettre sans cela.

Dans les deux cas, les propos de la personne interrogée sont intégralement enregistrés ou retranscrits, de manière à être ensuite finement analysés. La grande difficulté de l'exercice est en effet, pour les scientifiques qui s'y livrent, de parvenir à comprendre l'autre, et non de plaquer ses propres représentativités. Or, nous nous approprions les mots que nous utilisons d'une manière différente en fonction de notre subjectivité, et un même terme peut avoir des portées assez différentes selon les personnes qui l'utilisent.



Une des techniques utilisées pour cela est, par exemple, celle de l'*expérience de pensée*¹⁹. Pour citer à ce sujet le *Manuel d'analyse qualitative* de Christophe Lejeune (2014) : « L'analyste imagine des cas de figure dans lesquels ce vécu pourrait être différent. Ce faisant, il s'interroge sur les conditions et le contexte de l'expérience vécue par l'acteur (...) Ces comparaisons incitent le chercheur à se poser de nouvelles questions théoriques sur la façon dont varient les propriétés et sur le contexte et les circonstances qui les font varier dans un sens plutôt que dans un autre. »

Cela peut ensuite conduire à de nouveaux entretiens, si besoin est de préciser certaines choses. Mais l'analyse des textes ainsi recueillis se

¹⁹ Des expériences de pensée sont également utilisées dans d'autres domaines scientifiques (on peut par exemple mentionner le bateau de Galilée ou le canon de Newton en physique). Dans tous les cas, il s'agit d'une réflexion pour tenter d'appréhender quelque chose, et non d'une « véritable » expérience : il serait *irréaliste* de penser que notre imagination suffit à démontrer quelque chose sans autre forme de mise à l'épreuve.

fait aussi et surtout par un *étiquetage* du propos, qui permet de mettre en lumière les différents concepts nécessaires à la compréhension. Une schématisation permet ensuite de mettre en lumière la façon dont ces différents concepts sont liés entre eux (par exemple, la relation entre le dépassement de soi et la confiance en soi au cours de l'activité sportive). Si vous désirez davantage de détails à ce sujet, n'hésitez pas à consulter l'ouvrage précéemment cité, qui vise précisément à expliquer cette manière de faire.

Une fois l'analyse terminée, l'expérience de confrontation au réel se fait en présentant une synthèse de ses résultats, sous une forme aussi accessible que possible, aux personnes interrogées : si celles-ci s'estiment trahies par l'analyse effectuée, il est alors nécessaire d'identifier ce qui ne va pas et d'apporter les modifications requises. Dans le cas contraire, l'analyse peut être remise en forme pour être publiée (après relecture et examen par d'autres chercheurs ou chercheuses du même domaine, comme pour n'importe quelle autre publication scientifique).

L'une des caractéristiques principales de l'analyse qualitative est son important recours aux comptes-rendus, à la prise en note de chacune des étapes de la réflexion. En effet, dans ce domaine plus encore qu'ailleurs, la reproductibilité du *cheminement* amenant aux conclusions est au moins aussi importante que celle des conclusions elles-mêmes.

On pourra remarquer que les résultats d'une telle analyse, étudiant une situation très spécifique, ne sont pas forcément généralisables à d'autres situations impliquant d'autres gens. Néanmoins, certains aspects d'une analyse qualitative peuvent aider à comprendre des situations partiellement analogues autre part. De la même manière, l'étude d'un caractère commun à deux espèces en biologie ou à deux planètes en astronomie peut apporter des éléments de compréhension même si le reste est très franchement différent. Le tout étant, bien évidemment, d'avoir conscience de la portée et des limites de ces différentes comparaisons.

« La science consiste à faire ce qu'on fait en sachant et en disant que c'est tout ce qu'on peut faire, en énonçant les limites de la validité de ce qu'on fait. »



Pierre Bourdieu, *Questions de sociologie* (1984)

Par ailleurs, quand bien même une situation donnée serait (contre toute probabilité) trop atypique pour qu'aucun de ses aspects ne puisse être comparé à autre chose de connu, elle n'en formerait pas moins une facette de la société, et la comprendre aiderait donc tout de même à comprendre l'ensemble. En fait, une telle situation serait d'autant plus intéressante qu'elle est atypique, de la même manière qu'une galaxie aussi étrange et unique que l'objet de Hoag est particulièrement intéressante pour mettre à l'épreuve notre connaissance de la structure des galaxies.

Bien qu'une attention particulière soit portée, dans les sciences portant sur l'être humain encore plus que dans les autres domaines scientifiques, à éviter de laisser nos représentations initiales nous piéger en biaisant nos conclusions (Émile Durkheim insiste sur ce point dans *Les règles de la méthode sociologique*, en 1895), il arrive toutefois que certains de nos préjugés soient tellement ancrés que nous n'y prenons pas suffisamment garde (Durkheim lui-même, dans sa par ailleurs brillante étude de cas sur *Le suicide* (1897), se trompe ainsi dans l'interprétation des différences entre les genres).

Dans les domaines plus quantifiés, où la mesure occupe donc un aspect plus important, il est également possible que l'imprécision des instruments de mesure ait une influence. Ce fut par exemple le cas pour l'observation des étoiles à l'époque du procès de Galilée, nous y reviendrons.

Il se peut également que les progrès scientifiques viennent mettre en lumière des incohérences problématiques entre plusieurs blocs de connaissance. Ainsi, la relativité restreinte d'Albert Einstein, en 1905,

venait résoudre une incohérence entre les travaux de Newton et ceux, tout aussi fondamentaux, de James Maxwell. Sa relativité générale, en 1915, corrigeait à son tour une incompatibilité de la précédente avec d'autres aspects des travaux de Newton. Pour autant, dans les situations «de tous les jours», les calculs suivant les lois de Newton donnent une bonne approximation de ceux impliquant la relativité, et peuvent donc parfaitement *sembler* recevables.

Il est donc nécessaire de conserver, en permanence, un regard critique sur ce qui a été découvert jusque là : la science fonctionne par rectifications successives, comme nous allons le détailler dans le prochain chapitre.

En tout cas, c'est facile d'échapper à toute investigation scientifique : il suffit de poser qu'on est immatériel, et hop !, perché !

On a quand même des outils rationnels contre ça (on va en reparler). Et puis, s'il y a des effets observables, alors c'est matériel et on peut investiguer.

Mais ! Même pas drôle !



Carl Sagan

Anne Druyan

Cinquième partie : Revoir sa copie

La démarche scientifique repose sur un postulat simple : l'existence préalable d'un monde matériel que nous allons chercher à comprendre. Pour ce faire, nous avons exposé nos deux outils fondamentaux : la rationalité, qui assure que nos raisonnements fonctionnent, et le matérialisme, qui assure que ces raisonnements sont bien rattachés au monde. À chacune de ces étapes, cependant, nous avons vu à l'œuvre le «mauvais génie» de Descartes, travaillant à nous tromper sur de nombreux aspects.

Son influence est en fait si importante qu'il nous faut la prendre en compte à tous les niveaux : la règle la plus fondamentale de la démarche scientifique est la nécessité d'une remise en cause permanente des connaissances. C'est la raison pour laquelle nous avons commencé cet ouvrage en évoquant la méthode de Descartes et nos sens trompeurs : nous pouvons maintenant étudier plus en profondeur la façon dont fonctionne, en sciences, l'épreuve du doute.

La première chose à prendre en compte est qu'il est impossible de tout prouver. Étudions par exemple l'énoncé «tous les zèbres sont rayés». Il faudrait, pour s'en assurer, pouvoir passer en revue tous les zèbres du monde pour vérifier leurs pelages : même si ces animaux sont de relativement grande taille, il paraît difficile de pouvoir affirmer que nous les avons bel et bien tous vus. Il suffirait en revanche de trouver un seul zèbre non-rayé pour prouver que l'énoncé était faux. Si nous trouvons un tel zèbre, nous pouvons donc conclure, mais tant que nous n'en trouvons pas, la question ne peut que rester ouverte²⁰.

²⁰ Un tel énoncé, qui n'a pas encore été prouvé ou qui ne peut pas l'être, mais que de nombreuses observations ont systématiquement confirmé, est désigné, en mathématiques, par le terme de *conjecture*.



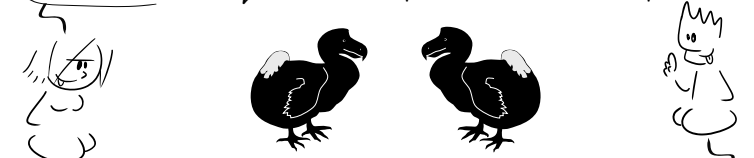
Le premier pilier de la démarche scientifique est le scepticisme : nous partons du principe qu'il est toujours possible que les conclusions qui ont été obtenues précédemment soient fausses. S'il arrive de nouvelles données qui les contredisent, il faut réétudier le tout.

(On a considéré longtemps, en Europe, que tous les cygnes étaient blancs.)



Puis on a découvert qu'en Australie, il y avait des cygnes noirs.)

(Nous sommes sûrs que le dodo a disparu. Mais comment le prouver ?)



Il suffirait de trouver un seul dodo vivant pour invalider cette hypothèse. Mais ne pas en retrouver du tout ne suffit pas à conclure.

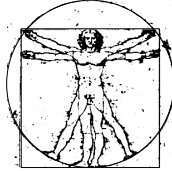
(Néanmoins, plus le temps passe, plus la probabilité d'en retrouver un devient faible (Et vu que le dernier spécimen aperçu, c'était en 1662, bon...))

D'ailleurs, pour l'anecdote, le père Armand David a été le premier européen à décrire scientifiquement un panda géant, hélas mort, en 1869.



Il fallu près de trente ans pour qu'un européen voit un spécimen vivant.) (Ils sont hélas encore peu nombreux et menacés d'extinction aujourd'hui...)

(En fait, on ne peut même pas prouver formellement que tous les êtres humains sont mortels.)



Mais ça, c'est compliqué dans les deux sens: même si on tombait sur un contre-exemple, il faudrait attendre un temps infini avant de conclure.

Restons un instant sur la biologie. Parmi les questions qui ont longtemps intrigué nos ancêtres se trouve celle de savoir pourquoi le vivant présente à la fois tant de diversité et tant de stabilité. Chaque être humain, par exemple, est différent; pourtant, nous nous ressemblons suffisamment pour qu'on distingue, au premier coup d'œil, un être humain d'un autre animal. Il en va de même pour nombre d'autres formes de vie sur notre planète.

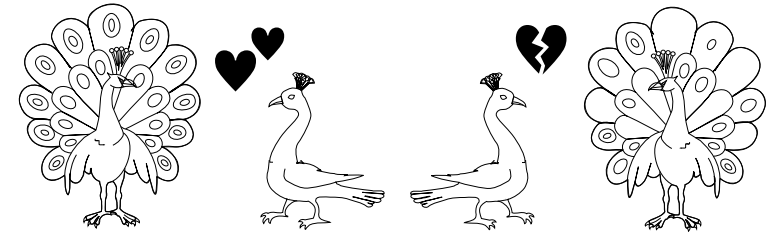
Une réponse possible à cette question, proposée notamment par Platon²¹ est qu'il existerait un «être humain conceptuel» dont chacun et chacune d'entre nous serait un reflet imparfait. Cette réponse, cependant, ne respecte pas les règles de la science: cela revient à postuler l'existence d'un monde des idées qui serait préalable au monde matériel, et cet *idéisme* s'oppose donc au réalisme scientifique.

Mais comment expliquer ces ressemblances et ces différences en nous basant uniquement sur le monde matériel? L'explication générale la plus convaincante jusque là a été proposée en 1859 par le naturaliste Charles Darwin, dans un livre intitulé *L'Origine des espèces*.

²¹ Il s'agit toutefois ici d'une lecture très réductrice de l'allégorie de la caverne: il convient de relever cette incompatibilité avec la démarche scientifique, mais il ne faudrait pas y limiter la pensée de Platon. Son propos y est aussi, et surtout, de nous encourager à aller examiner en détails la réalité des choses, en quittant pour cela notre zone de confort, ce qui rejoint pleinement notre démarche.

La proposition de Darwin est l'existence d'un mécanisme de *sélection*: les différences entre les êtres vivants font que certains vont avoir des avantages ou des inconvénients dans certaines situations, qui vont influencer sur leur aptitude à se reproduire ou, plus généralement, sur leur survie.

Ainsi, par exemple, les paons mâles ayant les plus belles roues vont plus facilement séduire les femelles; les girafes ayant les plus longs cous vont plus facilement manger les feuilles des hauts arbres; les papillons qui se camouflent le mieux dans leur environnement vont plus facilement échapper au regard de leurs prédateurs.



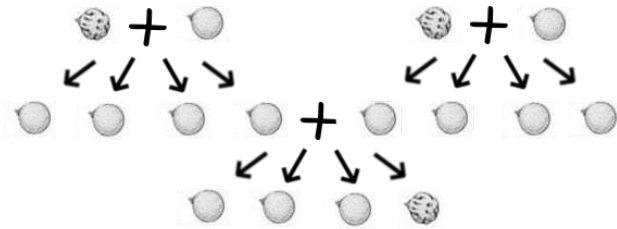
Darwin suppose que, si ces aptitudes sont *héréditaires*, c'est-à-dire se transmettent d'une génération à l'autre, alors les formes les plus avantageées se retrouvent dans la descendance des individus qui se sont le plus facilement reproduits, tandis que les formes les moins avantageées disparaissent peu à peu, faute de reproduction. Malgré les différences entre individus, cela conduit donc à observer des formes globales similaires relativement stables.

Cette notion d'*évolution* implique donc de considérer que la vie possède un aspect historique: la biodiversité que nous observons actuellement est le fruit de transformations dues au fait que l'environnement change avec le temps, faisant ainsi varier la sélectivité des différentes formes.

Il ne s'agit-là, bien sûr, que du principe général de l'évolution. Et ce principe général est d'ailleurs d'application très large: tout ce qui

présente la caractéristique de reproduction avec éventuelle modification d'une génération sur l'autre peut en fait subir une évolution de ce type. Parmi les cas plutôt bien connus, on peut par exemple noter le langage (les mots sont déformés à l'usage), les noms de familles (quelques fautes de frappe sont parfois commises), les programmes informatiques (corrections de bugs ou ajouts de fonctionnalités), ou encore... les connaissances scientifiques.

Mais c'est bien sur l'évolution appliquée aux êtres vivants que nous allons nous pencher ici. Aussi, nous allons commencer par nous intéresser aux mécanismes de base de l'hérédité dans les cas où il n'y a pas modification. On doit leur découverte au moine Johann Gregor Mendel, vers 1866²².

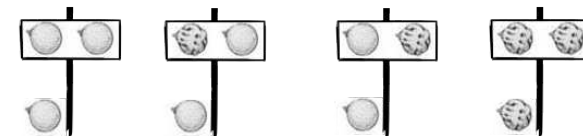


En testant méthodiquement de nombreuses combinaisons possibles pour la reproduction de quelques végétaux, en particulier les pois, Mendel arrive à la conclusion que certaines différences correspondent à des variantes d'une même information (Dans le vocabulaire moderne, on parle d'*allèles* différents d'un même *gène*, mais la notion de gène ne sera découverte qu'au cours du XX^e siècle). Chez le pois, on peut par exemple étudier la forme, ronde ou cossue, ou la couleur, jaune ou vert.

²² En fait, les travaux de Mendel passèrent relativement inaperçus à cette époque en dehors des milieux botanistes. Il fallut attendre les alentours de 1900 pour que trois autres scientifiques redécouvrent, chacun de son côté, les mêmes lois, confortées entre temps par d'autres découvertes intermédiaires. On exhuma à cette occasion les publications de Mendel, qui permirent d'éviter une querelle de paternité.

Pour ces différents caractères, chaque individu possède deux exemplaires de l'information, qui peuvent, ou non, correspondre à la même variante. Lorsque les individus se reproduisent, chacun des parents transmet l'une de ces deux informations à l'enfant. Si l'on croise, par exemple, un pois «doublement» jaune avec un pois «doublement» vert, on obtient systématiquement un pois disposant des deux informations. Dans ce cas, on constate que le pois enfant est systématiquement jaune.

En revanche, si l'on croise ces pois «de seconde génération» entre eux, on voit réapparaître des pois verts, dans une proportion d'environ un sur quatre. C'est parce que les parents, qui possèdent les deux variantes de l'information, transmettent chacun l'une ou l'autre, aléatoirement. Le pois de troisième génération peut donc avoir soit deux fois la variante «jaune», soit deux fois la variante «vert», soit un exemplaire de chaque variante. Comme pour ses parents, dès lors qu'il dispose de la variante «jaune», il est jaune, peu importe qu'il dispose de la variante «vert» ou pas. On dit, dans ce cas, que le jaune est *dominant*, et le vert *récessif*²³.



Ce mécanisme régulier semble ne pas laisser grand place à la sélection, mais c'est parce que Mendel s'est appliqué à tester méthodiquement les différentes combinaisons. Dans la nature, où les choses sont beaucoup moins cadrées qu'en laboratoire, l'une des deux cou-

²³ Notons toutefois que, si tous les caractères étudiés par Mendel étaient soit dominants, soit récessifs, les choses peuvent parfois être un peu plus compliquées. Notre groupe sanguin, par exemple, est codé par une même information comportant trois variantes : *A*, *B* et *O*. *O* est récessif, et donc, un individu *AO* sera de groupe A et un individu *BO* de groupe B. Mais *A* et *B* sont aussi dominants l'un que l'autre, et un individu qui porte ces deux variantes sera donc de groupe AB.

leurs sera probablement favorisée, faisant varier les proportions effectives dans l'ensemble de la population. C'est l'accès à la reproduction qui importe, chaque individu doté de deux variantes de l'information transmettant aléatoirement l'une ou l'autre.

Nous sommes ici face à un cas, assez classique, où deux travaux scientifiques, contradictoires à première vue, expliquent en fait chacun un aspect différent du problème. Les lois de Mendel expliquent le mécanisme «habituel» de la reproduction. Mais le processus est imparfait et, une fois de temps en temps, une erreur de recopie (ou *mutation*) survient, qui fait qu'une nouvelle variante apparaît (un pois rouge, par exemple). La sélection va ensuite travailler à stabiliser les choses, soit en faisant disparaître cette nouvelle variante, soit en la faisant devenir de plus en plus fréquente.

De nombreux exemples ont pu être observés dans la nature pour confirmer ces travaux, le plus célèbre étant celui de la *phalène du bouleau*, un petit papillon qui a connu un important changement de pression sélective au cours de l'industrialisation anglaise, soit précisément au moment où l'on commençait à travailler activement sur ces questions.

Toutefois, Mendel n'explique pas tout: on s'est rendu compte depuis qu'un certain nombre de caractères, comme par exemple la taille chez l'être humain, ne dépendent pas de variantes différentes d'un seul gène, mais d'une combinaison de plusieurs informations génétiques, ainsi que de facteurs environnementaux. D'autres caractères dépendent même bien davantage de l'environnement que des gènes! Ainsi, deux fourmis d'une même colonie partagent rigoureusement les mêmes informations génétiques, qu'elles aient une morphologie de soldate ou d'ouvrière.

Une observation qui ne correspond pas à la règle établie jusque là ne suffit donc pas à conclure que cette règle est entièrement fausse:

les lois de l'hérédité définies par Mendel sont bien exactes, mais seulement dans certains cas. La théorie a «seulement» eu besoin d'être enrichie pour expliquer ce qui se passe dans d'autres cas. C'est la raison pour laquelle les articles de presse sensationnalistes disant que tout ce que l'on croyait jusque là était faux sont généralement à prendre avec de grandes pincettes.



On reconnaît d'ailleurs un certain nombre de pseudo-sciences (sur lesquelles reviendrons dans la deuxième partie) au fait que, bien que les connaissances scientifiques aient évolué depuis l'époque où elles ont été proposées, les travaux sur lesquels elles sont basées, quelles que soient leur qualité au départ, ne sont jamais remis en question. Au contraire, les travaux de Darwin, comme ceux de Mendel, ont été corrigés par les scientifiques qui ont travaillé après eux. En particulier, les biologistes ont constaté qu'il fallait, pour expliquer complètement l'histoire de la vie, étudier un second mécanisme, aussi important que la sélection, que l'on appelle la *dérive*.

Le principe en est que la sélection n'est pas un mécanisme parfait: les formes désavantagées se reproduisent globalement moins, mais se reproduisent tout de même (il est d'ailleurs possible qu'un même individu soit avantagé pour un caractère donné et désavantagé pour un autre). Il y a donc une part d'aléatoire pur: la sélection va guider

l'évolution vers des formes aussi adaptées que possible à ce qui les environne, mais le simple hasard limite parfois ses effets. Sur les populations comptant un très grand nombre d'individus, le hasard est globalement assez peu efficace, et la sélection est donc le moteur principal de l'évolution. En revanche, le hasard a d'autant plus d'influence que les populations sont réduites, et ses effets peuvent, sur de petits effectifs, devenir plus importants que ceux de la sélection.

Cette influence du hasard, qui se fait à tous les niveaux (rappelons que l'apparition de nouvelles variantes de l'information est le résultat d'une erreur de recopie, elle-même aléatoire), fait qu'il est très difficile de prédire ce que donnera l'évolution future (les auteurs de science-fiction qui nous présentent «ce à quoi ressemblera l'être humain dans le futur» sont donc bien davantage dans la fiction que dans la science²⁴).

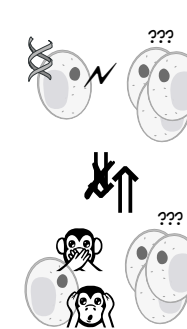
Cela n'empêche toutefois pas les prédictions, du moins au sens scientifique du terme, sur ce que l'on doit observer *dans le présent*. Ainsi, observant certaines fleurs, Darwin avait pu décrire certains insectes qui n'ont été effectivement découverts qu'ensuite. Fleurs et insectes fournissent en effet de bons exemples de ce que l'on nomme *associations mutualistes*: des formes vivantes qui évoluent l'une par rapport à l'autre en coopération plutôt qu'en compétition, ce qui fait que les caractères de l'une sont complémentaires à ceux de l'autre.

L'étude récente de l'évolution nous rappelle cependant que les travaux scientifiques ne mènent pas toujours vers un progrès indiscutable de notre connaissance du monde: il y a, parfois, des régressions collectives plus ou moins prononcées et plus ou moins persistantes.

²⁴ Ces auteurs aiment parfois faire disparaître notre auriculaire, par exemple, devenu d'après eux «inutile». Ce n'est pas comme ça que ça marche (notre appendice en témoigne): une mutation, *si elle apparaît*, ne s'impose que si elle apporte un avantage, ou que le hasard le décide. Notons d'ailleurs qu'il s'agit de transformations plutôt que de disparitions: la queue de nos lointains ancêtres est devenue, chez nous, un coccyx.

Ainsi, pendant toute la seconde moitié du XX^e siècle, dans le cadre de la théorie *synthétique* de l'évolution, une majorité des travaux en biologie a été réalisée en considérant que les mécanismes de l'évolution étaient un moteur de changement sur des espèces «idéalisées», stables par nature. Un contresens assez fâcheux sur les propositions de Darwin, qui visaient à expliquer comment la stabilité apparaît dans un monde en perpétuel changement.

Tout n'est bien sûr pas à jeter de cette époque: des progrès ont tout de même été réalisés sur de nombreux points. Néanmoins, la connaissance de certains mécanismes de l'évolution s'est grandement améliorée ces dernières années, depuis que la recherche scientifique s'est débarrassée de cette erreur de point de vue. Cela impacte notamment notre connaissance des cancers.



Un cancer est, grosso-modo, un groupe de cellules qui s'est désolidarisé du reste de l'organisme.

Dans la théorie synthétique de l'évolution, on considérait que tout partait d'une mutation génétique, et que le reste arrivait en conséquence. Cette idée de départ n'a jamais été remise en cause à cette époque.

Depuis qu'on envisage les choses autrement, on a pu se rendre compte que cela peut parfois venir d'abord un problème de communication entre cellules, ce qui ouvre la porte à de nouvelles façons de traiter certaines formes de cette maladie, qui seront sans doute plus efficaces.

Reconnaître ses erreurs lorsque l'on en commet est une étape essentielle si l'on veut progresser. Karl Popper lui-même en a d'ailleurs donné l'exemple: lors de ses premières publications sur le concept de réfutabilité, il présentait la sélection naturelle comme exemple (parmi d'autres) d'énoncé irréfutable, et donc sans valeur scientifique. Après discussions plus avancées avec des biologistes, il s'est déclaré heureux de pouvoir se rétracter publiquement à ce sujet.

En fait, le doute méthodique est un outil indispensable pour faire progresser nos connaissances en raison de deux aspects : tout d'abord, il est beaucoup plus efficace, pour (se) convaincre de la véracité d'un argument, de chercher à le démontrer et de constater qu'on n'y arrive pas, que de ne chercher qu'à le consolider. Ensuite, reconnaître et accepter l'incertitude de nos énoncés nous permet d'en changer plus facilement quand il arrive que les faits nous donnent tort.

Et les faits peuvent aisément nous donner tort lorsque l'on travaille à partir de connaissances très incomplètes. La biologie en est encore un bon exemple par son activité de classification du vivant.



Charles Darwin



Gregor Mendel



Carl von Linné

Il s'agit du troisième élément fondateur de la biologie moderne, avec l'hérédité de Mendel et l'évolution de Darwin. On peut citer, à ce sujet, le *Systema Naturæ* de Carl von Linné, paru en 1735 (et révisé jusqu'en 1770). Ce livre contient un recensement méthodique des formes de vies connues à l'époque, classées selon leurs ressemblances en ordres, genres et familles.

Ainsi, Linné range les animaux vertébrés (c'est-à-dire ceux qui disposent d'un squelette interne) en cinq grandes catégories : mammifères, reptiles, oiseaux, poissons et amphibiens. Dans sa vision non-évolutionniste des choses, ces cinq catégories, comme les espèces qu'elles contiennent, sont fixes et n'évoluent pas dans le temps.

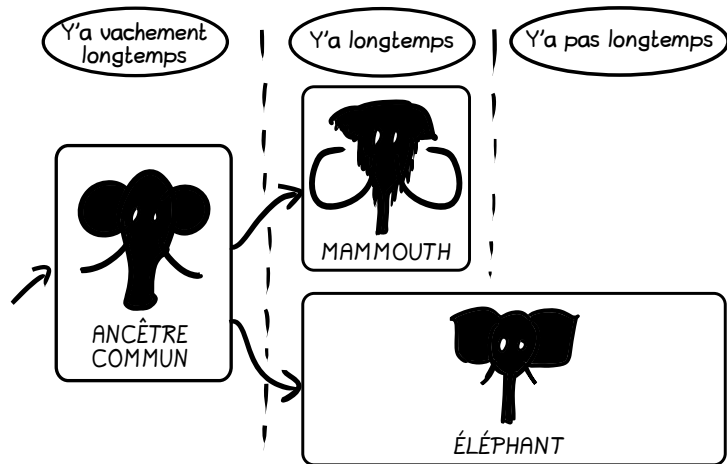
La méthode de classement proposée par Linné est toujours utilisée aujourd'hui ; mais l'évolution a changé considérablement la façon de l'interpréter. Si l'on continue de ranger le vivant selon les mêmes hiérarchies de cases, il s'agit maintenant de déterminer ces cases en fonction des branches d'un gigantesque arbre généalogique (en fait, un arbre *phylogénique*, parce qu'on cherche des apparentements et pas des descendances).

Ainsi, la catégorie «mammifères» continue d'avoir du sens : les animaux, dans cette case, sont rangés ensemble parce qu'ils possèdent tous des mamelles permettant de nourrir leurs enfants. Mais si toutes les espèces de mammifères présentent cette caractéristique, c'est parce qu'elle est héritée d'un ancêtre unique dont les mammifères actuels sont l'ensemble des descendants. C'est ce que l'on nomme un *groupe monophylétique*, ou *clade*.

En revanche, la catégorie «reptiles» a dû être abandonnée, car elle ne correspond pas à une branche unique du vivant : les crocodiles, par exemple, sont en fait beaucoup plus proches des oiseaux qu'ils ne le sont des lézards ou des tortues. On a donc de nouveau réparti les animaux qu'elle contenait en créant de nouvelles cases : les tortues forment maintenant un groupe à part, tandis que les serpents, lézards et varans sont réunis dans une nouvelle case : les «squamates». Les crocodiles, eux, sont maintenant rangés avec les oiseaux dans la catégorie «archosauriens»²⁵ (même si les oiseaux restent un groupe à part entière, qui forme une sous-catégorie de celle-ci).

De la même manière, les «poissons» ont été rerépartis : les thons, saumons et merlus partagent avec nous le caractère d'avoir un squelette en os, hérité d'un ancêtre commun que n'ont pas les raies et les requins (dont le squelette est entièrement fait de cartilage).

²⁵ Ce groupe contient également les célèbres dinosaures, dont les oiseaux font en fait partie. Plus précisément, les oiseaux sont des théropodes, comme les raptors (qui avaient eux aussi des plumes) ou le T-rex. En revanche, les ptérodactyles, comme les crocodiles, ne sont pas des dinosaures, même s'ils sont des archosauriens.



Pour classer une espèce nouvellement découverte dans l'arbre du vivant, les biologistes dressent une liste aussi précise que possible de ses caractéristiques (morphologiques autant que génétiques), puis cherchent, parmi les espèces déjà connues, quelles sont celles qui présentent les caractéristiques les plus proches: on va alors chercher la position précise en fonction des caractères communs et des différences.

Un caractère étant soit spécifique à une espèce donnée (c'est-à-dire qu'il est apparu avec cette espèce), soit légué par un ancêtre, le nombre de points communs et de divergences renseigne efficacement sur le nombre d'embranchements qui sépare une espèce d'une autre. La datation des fossiles permet également de préciser à quelle époque ces espèces ont vécu, et donc d'affiner ces relations (même si les biologistes considèrent, par précaution, qu'une espèce plus ancienne qu'une autre est *a priori* un cousin plus ou moins éloigné plutôt qu'un ascendant direct).

Comme nous ne connaissons qu'un nombre très réduit de fossiles (par comparaison au nombre d'espèces ayant peuplé notre planète),

certaines parties de l'arbre de la vie tel que nous le dessinons au regard de nos connaissances sont très peu détaillées, et il n'est pas rare que des erreurs soient commises, par exemple sur l'ordre d'apparition relatif de deux caractères (à la frontière entre les membres d'un groupe donné et leurs très proches cousins, par exemple). Ces erreurs sont ensuite corrigées lorsque l'on trouve de nouveaux fossiles qui remettent les choses à leur place.

Ça ne nous empêche bien sûr pas de savoir placer, avec une certaine précision, des bestioles aussi bizarres que peuvent l'être l'ornithorynque, l'axolotl, le moloch, le bipes, le tardigrade ou le rat-taupe nu, même si d'autres cas (les relations de parenté entre les amphibiens actuels, par exemple) sont encore très discutés.

Précisons toutefois que le mode de fonctionnement que nous venons d'évoquer repose sur un aspect important de la rationalité que nous n'avons pas encore détaillé: le principe de parcimonie. Nous allons donc maintenant nous pencher plus en détail sur ce dont il s'agit.

Beh... si vous vous organisez
comme ça, ce n'est plus drôle!

Ouais, à partir du moment où on sait
que tu es là, on se débrouille pour que
tu nous embêtes moins, c'est normal.

Fichus sceptiques qui ne veulent
même pas se laisser tromper...



Sixième partie : Cause(s) et conséquences

Les énoncés scientifiques, comme nous l'avons vu, reposent sur des liens logiques : partant d'une hypothèse de départ, on tire des conséquences qui vont permettre de construire de nouvelles connaissances. L'un, au moins, des éléments de cette construction (l'hypothèse de départ elle-même, ou l'une de ses conséquences logiques) va alors être mis à l'épreuve par une expérience sensible, qui permettra de confirmer ou d'infirmer l'ensemble.

Il peut cependant arriver que plusieurs constructions logiques décrivent la même situation et répondent aux mêmes expériences sensibles, nous empêchant ainsi de trancher «matériellement». Reprenons par exemple le classement des êtres vivants : à partir des mêmes faits, c'est-à-dire en l'occurrence des mêmes fossiles présentant des caractéristiques données, il est parfois possible de construire plusieurs arbres de parenté différents.

Pour trancher entre ces différentes possibilités, les scientifiques ont recours à un principe de *parcimonie*, ou d'économie d'hypothèses : si deux constructions logiques apportent exactement la même qualité d'explication, nous allons préférer celle qui mobilise le moins d'hypothèses arbitraires.

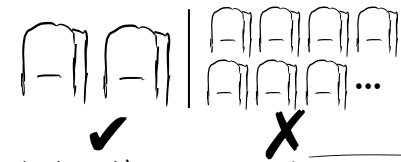
Ce principe est également appelé «rasoir²⁶ d'Ockham», du nom de Guillaume d'Occam (ou «rasoir d'Occam» du nom de Guillaume d'Ockham, les deux graphies étant couramment utilisées pour le nom de la ville d'où vient ce philosophe, et donc également pour celui du

²⁶ Rasoir, car il permet de «trancher» entre deux possibilités. Il existe quelques autres «rasoirs» qu'il est bon de savoir manier quand on veut exercer son esprit critique, comme le rasoir d'Hanlon : celui-ci pose qu'il n'est pas nécessaire de considérer des gens comme malveillants quand la bêtise suffit à expliquer leur comportement. Précisons qu'il s'agit de la bêtise «ordinaire», celle qui nous concerne également. Présupposer que les gens seraient spécialement stupides n'est en fait pas plus parcimonieux.

principe qu'il a énoncé). La formulation initiale proposée par Guillaume était «Les multiples ne doivent pas être utilisés sans nécessité».

On a vu qu'être logique, c'est faire des chaînes de dominos. Imaginons que, pour arriver à faire bouger le même domino, loin là-bas, vous ayez deux possibilités : soit pousser ces deux-ci, soit pousser ces quinze-là.

Rationnellement parlant, quel serait votre choix ?



Multiplier les hypothèses gratuites, c'est comme multiplier les dominos qu'il va falloir pousser soi-même au début de la chaîne : plus il y en a, moins on a de garanties que le domino du bout va bien bouger comme il faut à la fin.



Guillaume

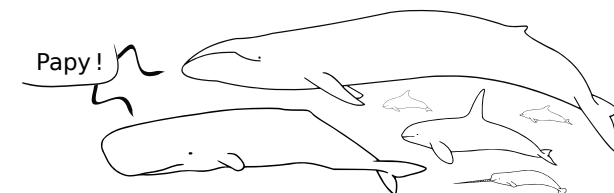
À titre d'exemple, complétons maintenant ce que nous avons vu au chapitre précédent concernant la classification du vivant :

Ce qui va séparer une branche d'une autre dans l'arbre du vivant, c'est l'apparition d'un nouveau caractère, qui résulte d'une mutation.



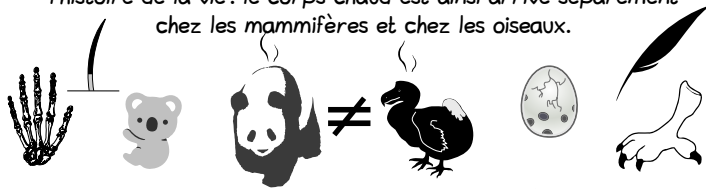
Une mutation donnant un caractère avantageux est un phénomène assez rare. Cela nécessite d'ailleurs souvent un changement d'environnement en plus de la mutation (elle n'est pas toujours bénéfique immédiatement).

Si on voit plusieurs espèces présenter des caractères en commun, il est donc plus raisonnable de supposer d'abord que leur origine est commune.

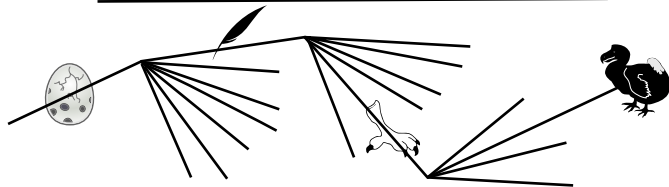


Et sont donc hérités d'un ancêtre commun à ces différentes espèces.

Un même caractère peut tout de même apparaître plusieurs fois dans l'histoire de la vie: le corps chaud est ainsi arrivé séparément chez les mammifères et chez les oiseaux.



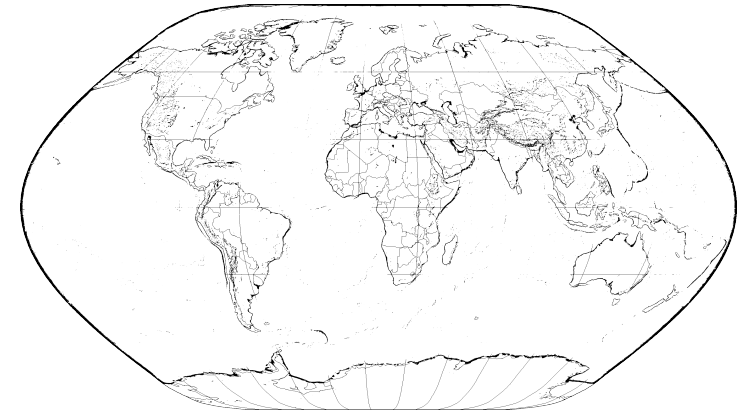
On appelle ça une «convergence évolutive»: un même environnement favorise les mêmes caractères chez plusieurs espèces différentes, ils sont donc sélectionnés des deux côtés. Mais il reste aussi beaucoup de caractères différents apparus entre temps entre ces espèces.



Considérer, chaque fois qu'on le peut, qu'un même caractère a été hérité d'un ancêtre commun plutôt qu'acquis séparément, c'est le moyen de rendre l'arbre du vivant le plus cohérent possible, et donc le plus difficile à contredire sans preuves importantes.

Preuves «importantes» car une chose essentielle à retenir est que toutes les déclarations ne se valent pas. Si j'ai une brûlure à la main, et que je déclare que je me suis renversé de l'eau bouillante dessus en faisant chauffer des pâtes, je n'ai pas besoin d'une démonstration particulièrement brillante pour vous convaincre. Si je déclare au contraire que cette brûlure me vient du feu (pourtant froid!) du dragon immatériel vivant dans mon garage, il va me falloir des preuves beaucoup plus solides.

Pour autant, l'eau des pâtes n'est pas forcément la bonne explication. Il se peut que ma brûlure soit réellement due au dragon, si celui-ci existe bien. De la même manière, une explication «coûteuse» est parfois meilleure qu'une autre. Le principe de parcimonie nous dit seulement que, tant que l'on n'a pas la nécessité de recourir à l'hypothèse du dragon, l'explication la plus simple sera préférable. La géologie nous en fournit un bon exemple avec la découverte de la tectonique des plaques.



Il «suffit» en effet de disposer d'une bonne carte des deux côtés de l'Atlantique pour remarquer que les côtes africaines et américaines sont curieusement complémentaires. L'hypothèse que ces deux continents n'en aient autrefois formé qu'un n'est pas jeune: on la trouve ainsi évoquée dans un ouvrage daté de 1596. L'idée de l'époque est que cette séparation, si elle a bel et bien eu lieu, serait le résultat d'un cataclysme très ancien, depuis lequel plus rien n'aurait bougé.

Comment supposer qu'il puisse en être autrement? La plupart du temps, nous ne sentons pas la terre bouger sous nos pieds. Constaté que les côtes ont des formes complémentaires est loin d'être suffisant pour affirmer qu'il existe un mouvement que nous ne pouvons percevoir. Le principe de parcimonie, à l'époque, nous fait trancher en faveur de l'immobilité, au moins actuelle, des choses.

Mais, comme toujours en sciences, des faits nouveaux viennent remettre en cause les connaissances précédentes. Darwin et ses collègues jouent ici un rôle: au cours de multiples fouilles, on découvre qu'en plus d'avoir des formes complémentaires, les côtes africaines et américaines renferment des fossiles similaires. Des espèces extrêmement proches, ayant suivi des évolutions remarquablement identiques, ont vécu des deux côtés.

Or, comme nous venons de le voir, qu'un caractère donné apparaisse plusieurs fois au cours de l'évolution arrive de temps à autres; mais que l'histoire évolutive entière, avec tout l'aléatoire qu'elle comporte, se répète à l'identique (et au même rythme) à deux endroits différents est quelque chose d'immensément plus coûteux: il est beaucoup plus raisonnable de supposer qu'il s'agit d'une seule et même histoire, et que donc, à l'époque d'où datent ces fossiles, les deux continents n'en formaient qu'un seul.

L'évolution ajoute donc beaucoup de poids à l'hypothèse d'un continent unique qui se serait séparé en deux. Elle n'apporte cependant pas grand chose pour justifier d'un éventuel mouvement qui se poursuivrait: sitôt que les côtes sont suffisamment séparées, peu importe la durée de ce phénomène, les histoires évolutives se séparent sans que cela n'y change grand chose.



Alfred Wegener



Un scientifique allemand nommé Alfred Wegener s'est rendu célèbre pour avoir présenté publiquement, au début de l'année 1912, un travail assez poussé en faveur d'un mouvement régulier, trop lent pour être humainement perçu, auquel il donne le nom de «dérive des continents».

Dans ce travail, Wegener reprend l'hypothèse d'un «supercontinent» regroupant l'ensemble des terres connues, auquel il donne le nom de *Pangée* (littéralement, «toute la terre» en grec²⁷). Il justifie son

²⁷ Πάνγκαια, ou *Pangaea* en latin. Beaucoup de noms scientifiques sont donnés dans ces langues «classiques», car le latin est resté pendant très longtemps la langue dans laquelle s'échangeaient, entre autres, les correspondances scientifiques (le grec, langue «savante» durant l'antiquité romaine, était utilisé en complément). Galilée fut l'un des premiers à écrire un ouvrage scientifique dans une langue «populaire», l'italien.

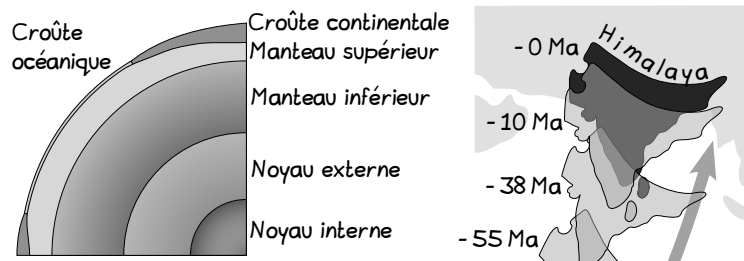
existence en se basant sur les fossiles, comme nous venons de le voir, mais aussi à l'aide d'arguments géologiques et paléoclimatiques.

Mais ses travaux vont plus loin en suggérant que ces mouvements ne se sont pas arrêtés à la dislocation de la Pangée et que nos chaînes de montagnes, en particulier, peuvent résulter d'un mouvement qui se poursuivrait de nos jours. Frank Taylor avait déjà supposé, quatre ans plus tôt, que la chaîne de l'Himalaya pourrait résulter d'une rencontre, assez violente, entre l'Inde et le reste de l'Asie. Wegener propose également des explications complémentaires pour d'autres chaînes, comme la Cordillère des Andes.

Pour chaque argument de ce travail, pris isolément du reste, il reste possible d'envisager une explication différente; mais l'ensemble forme un tout assez cohérent. Assez, mais toutefois pas complètement. Il manque en particulier à Wegener un moteur pour ce mouvement: il tente de l'expliquer par divers effets, dont notamment un effet de marée, comme celui qui met en mouvement nos océans²⁸. Mais l'ensemble cumulé de tous ces effets est très loin d'être suffisant pour obtenir les résultats qu'il décrit.

Le manque d'explication sur ce point crucial fait que Wegener ne convainc pas grand monde à ce moment: si cohérente que soit l'explication, puisque les déplacements n'ont jamais été constatés en pratique, mobiliser un mécanisme encore inconnu pour les expliquer reste une hypothèse trop lourde pour ne pas être écartée par le principe de parcimonie (il se trouve par ailleurs que ce qu'il propose va à l'encontre de ce qui était jusqu'alors admis, ce qui, indépendamment de la recevabilité scientifique, joue sans doute quelque peu aussi, mais nous y reviendrons dans la seconde partie).

²⁸ Il se trouve que des «marées terrestres» existent bel et bien: l'influence gravitationnelle de la Lune et du Soleil déforme très légèrement les terres au même rythme qu'elle déplace les mers. Cet effet est toutefois d'extrêmement faible importance, et ne provoque aucun déplacement à l'échelle des continents. Du moins sur Terre: Io, satellite naturel de Jupiter, subit des effets de marée suffisants pour déformer la matière solide... mais les effets ne sont pas ceux auxquels Wegener pensait, nous y reviendrons.

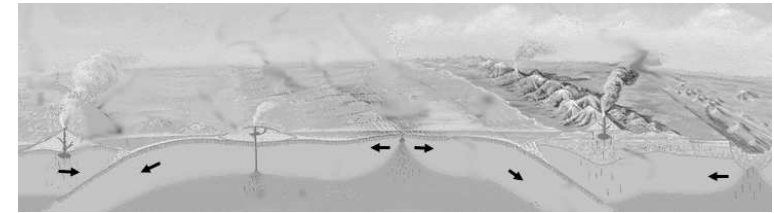


La balance commence à pencher en 1929, lorsque de nouvelles expériences suggèrent l'existence de mouvements de convections au sein du manteau terrestre, la partie de notre planète qui s'étend entre la croûte (sur laquelle se trouvent continents et océans) et le noyau. On pensait jusqu'alors que ce manteau était rigide ; on découvre alors qu'il est ductile, c'est-à-dire capable de se déformer sans cassures.

Si le manteau terrestre bouge, alors la croûte, qui repose sur lui, pourrait être entraînée par ce mouvement : il s'agit là d'un candidat intéressant pour servir de moteur au déplacement des continents proposé par Wegener. Les études sismiques effectuées durant les décennies qui suivent tendent à confirmer cette possibilité. Ces nouvelles données font que l'équilibre se déplace sur le fil de notre rasoir : trancher en faveur d'un déplacement des continents devient moins coûteux que de supposer leur immobilité.

La balance penche définitivement autour de 1960, lorsque l'étude de l'histoire magnétique de la Terre apporte la preuve que les continents ont bougé les uns par rapport aux autres au cours du temps : tous les éléments sont désormais réunis pour montrer que Wegener avait en fait raison.

...on montrera néanmoins vers la même époque qu'il se trompait : comme le nom de «dérive des continents» l'indique, la proposition de Wegener reposait sur l'idée d'un «glissement» des terres émergées sur le reste. Le géologue Harry Hess montre à l'époque que le fond des océans bouge également, et que c'est sans doute lui qui entraîne les continents.



L'état actuel des connaissances pose que la *lithosphère*, regroupant la croûte et une partie du manteau, est divisée en «plaques» qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Cela ne se fait pas sans heurts : aux zones de contact entre ces différentes plaques, l'activité sismique et volcanique est assez importante. Il suffit d'ailleurs de noter les lieux où se produisent la plus grande partie des séismes et où se trouvent la majorité des volcans (qui se recoupent assez bien), pour voir les limites de ces plaques.



Un volcan se forme quand une partie de la roche du manteau se met à fondre et remonte vers la surface. La lave s'accumule dans une chambre magmatique, puis remonte par la cheminée pour donner une éruption, qui peut être effusive (la lave coule sur les bords du volcan) ou explosive (des gaz et blocs de roche en fusion sont éjectés au loin), selon la composition du magma.



Si le volcan se trouve à l'intérieur d'une plaque plutôt qu'à ses limites (volcanisme de point chaud), la plaque peut se déplacer entre deux éruptions. C'est ainsi (à partir d'un volcan unique) que se sont formés des archipels comme les Canaries ou les Açores.

Dans les zones de rencontre entre ces plaques (on parle de *zones de subduction*), les différences de densité font que l'une va s'enfoncer sous l'autre (assez souvent une plaque océanique sous une plaque

continentale), ce qui provoque une activité sismique et volcanique intense, et l'apparition d'une chaîne de montage (c'est le cas de la Cordillère des Andes). Là où ces plaques, au contraire, s'écartent l'une de l'autre, comme au milieu de l'Atlantique (on parle de *zone d'accrétion*, ou de rift), d'autres chaînes de volcans (généralement sous-marines, d'où le nom de « dorsales océaniques ») ramènent des roches en surface, ce qui renouvelle la croûte.

Notons, cette fois encore, que la conclusion de cette affaire va à l'encontre de ce que nous montrent nos sens : ce mouvement est tellement lent que (en dehors des secousses provoquées par les tremblements de terre, pour les gens qui vivent aux limites des plaques), nous n'en percevons habituellement rien. Il se produit néanmoins en permanence, et ce depuis la naissance de notre planète : la Pangée était elle-même le résultat de la collision de plusieurs continents, qui résultaient de la séparation d'un supercontinent encore plus ancien, et ainsi de suite.

Comprenons bien que ce sont les travaux des scientifiques qui doivent être parcimonieux, ce qui n'implique en rien que les événements à décrire ne sont pas complexes ! Ainsi, pour citer le *Guide critique de l'évolution*, rédigé sous la direction de Guillaume Lecointre²⁹ et paru en 2009, « Le commissaire de police est, sur les écrans de télévision, le plus médiatisé des utilisateurs du principe de parcimonie. S'il reconstitue le meurtre avec économie d'hypothèses, ce n'est pas pour autant que le meurtrier a ouvert le moins de portes possible, tiré le moins de balles possible et économisé son essence pour se rendre sur les lieux du crime. »

Commissaires de police et scientifiques ont d'ailleurs en commun

²⁹ Citons tout de même les autres personnes à qui l'on doit ce livre : Corinne Fortin, Gérard Guillot, et Marie-Laure Le Louarn-Bonnet. Ainsi qu'Alain Bénêteau, Thomas Haessig et Dominique Visset, qui l'ont illustré. L'ouvrage complet fournit une mine d'informations passionnantes sur la biologie dans son ensemble, en précisant entre autres points les critères de scientificité (les numéros ici attribués aux quatre piliers de la démarche scientifique viennent de ce livre).

le fait de devoir remettre en cause leurs hypothèses et prouver leurs accusations. En l'occurrence, c'était à Wegener de prouver ce qu'il avançait (ce que les connaissances dont il disposait ne permettaient pas) et non aux gens qui n'étaient pas convaincus de prouver qu'il avait tort.

De la même manière, concernant le dragon de Sagan et Druyan : si, comme on l'a vu précédemment, aucune proposition ne permet de vérifier s'il existe ou non, alors on échoue autant à prouver son existence qu'à prouver son inexistence. C'est la personne qui déclare qu'elle a un dragon dans son garage qui doit amener des éléments de preuve, et non celle qui n'y croit pas qui doit démontrer cette hypothèse. On résume cette situation en déclarant que *la charge de la preuve incombe à la personne qui affirme*. (Toutefois, l'activité scientifique étant par nature collective, ces preuves seront discutées, et autant que possible reproduites).

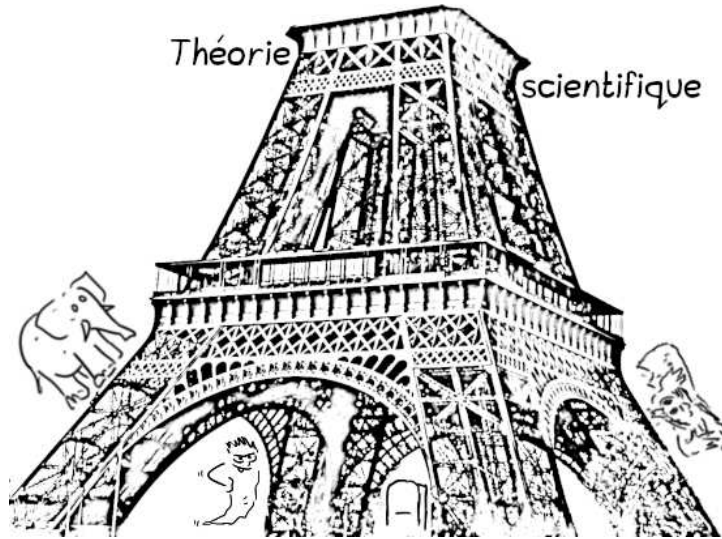
Et, de nouveau, plus l'affirmation sort de l'ordinaire, par exemple en contredisant une partie importante de ce qui était accepté jusqu'alors, plus les preuves à apporter doivent être solides et corroborées. Autrement, un autre rasoir joue, celui d'Hitchens : « ce qui est affirmé sans preuve peut être rejeté sans preuve ».

Voici donc l'ensemble des règles de base que suivent les travaux scientifiques pour parvenir à comprendre le monde malgré nos sens trompeurs. On pourrait, naturellement, approfondir sur de nombreux points ; mais entrer davantage dans le détail demanderait d'augmenter déraisonnablement la taille de ce livre (de nombreux autres ouvrages, suggérés dans la bibliographie, vous permettront d'aller plus loin si vous le désirez).

Contentons-nous pour l'instant de remarquer que ces quatre piliers que sont le scepticisme initial, le réalisme, le matérialisme de méthode et la rationalité (qui rassemble la logique et le principe de parcimonie) forment une base solide sur laquelle reposent l'ensemble des

travaux scientifiques : si la science demande une remise en cause perpétuelle des *connaissances*, la *méthode* par laquelle on les obtient est, pour sa part, beaucoup moins sujette à discussion³⁰. En fait, prétendre faire un travail scientifique en dérogeant à l'une de ces quatre règles tient tout simplement du mensonge (ou, au mieux, de l'ignorance... mais prétendre faire de la science sans en connaître les règles de base n'est généralement pas bon signe).

En revanche, un travail scientifique étayé, cohérent, respectant ces quatre règles et permettant d'améliorer notre connaissance du monde porte un nom : c'est ce que l'on appelle une *théorie scientifique*.



En effet, bien que le langage courant utilise souvent ce terme comme un simple synonyme d'«hypothèse» (et nous retrouvons ici

³⁰ Il y a tout de même quelques controverses et points d'amélioration possibles, comme pour toute construction humaine. On peut notamment évoquer la question de la meilleure méthode statistique, fréquentiste ou bayésienne. Une vidéo de la chaîne Hygiène Mentale, intitulée *La pensée bayésienne*, est disponible à ce sujet sur PeerTube (par l'instance skeptikon.fr), ainsi que sur YouTube.

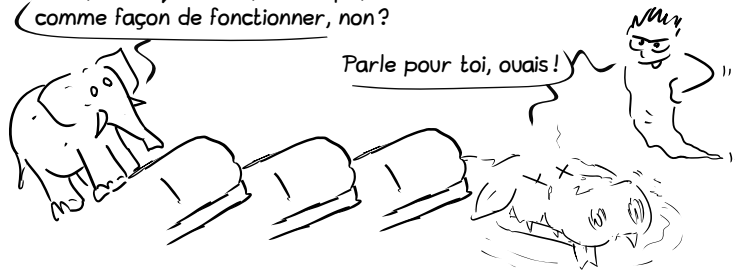
l'importance de bien préciser les définitions), le mot «théorie», dans le domaine scientifique, a un sens plus fort, désignant une construction logiquement solide et en lien avec les faits. Plusieurs branches des mathématiques portent ce nom (théorie des nombres, des jeux, des codes). L'évolution est une théorie, au même titre que la théorie de la relativité ou la théorie quantique. Les travaux de Wegener, en revanche, n'en sont devenus une que lorsque la «dérive des continents», simple spéculation basée sur l'observation, a laissé sa place à la tectonique des plaques, cadre de travail et d'expérimentations.

Les notions de fait et de théorie sont en fait indissociables : d'un côté, une théorie ne reçoit ce nom que par sa confrontation avec les faits ; de l'autre, des faits n'ont de signification propre qu'au sein d'une théorie. Un fait n'est jamais isolé : soit il est expliqué par une théorie existante, et s'y intègre donc, soit il sera la raison qui va nous pousser à adapter la théorie ou à en chercher une nouvelle. Le zoologue Charles Otis Whitman résumait la situation à ce sujet en déclarant «une théorie sans faits n'est qu'une fantaisie, mais des faits sans théorie ne sont que chaos».

Il ne faut pour autant pas oublier notre scepticisme : si les faits sont indiscutables, parce que toujours vérifiables³¹, les théories, pour leur part, sont le reflet de notre interprétation, et seront vraisemblablement modifiées, sinon remplacées, au fur et à mesure des progrès que nous accomplissons pour comprendre le monde. Ainsi, la théorie de la gravitation de Newton a laissé place à celles, successives, d'Einstein. La relativité générale et la théorie quantique, incompatibles entre elles, laisseront elles aussi leur place à une nouvelle théorie qui résoudra ce problème, mais que nous ne pouvons actuellement qu'envisager, faute de faits vérifiés.

³¹ Encore faut-il toutefois aller réellement les vérifier en pratique. Fontenelle, auteur déjà évoqué de la citation qui sert de titre à ce livre, rapporte par exemple l'anecdote d'un enfant auquel on a prétendu qu'il avait poussé une dent en or. Plusieurs penseurs de l'époque ont disserté sur les causes que pouvait avoir un tel phénomène, avant qu'un orfèvre ne vérifie et ne conclue que ce n'était qu'une feuille d'or appliquée sur sa dent, sur laquelle il n'y avait donc rien de particulier à dire. La chaîne Hygiène mentale consacre également une vidéo à ce sujet, *La dent d'or de Fontenelle*.

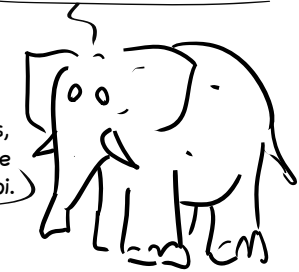
N'empêche que c'est plutôt sympa,
comme façon de fonctionner, non?



(Parcimonie et rasoir d'Hitchens font qu'une entité immatérielle comme le dragon dans le garage n'est jamais mobilisée dans une explication scientifique: il n'y aura jamais de preuve de leur existence, et il n'y aura jamais de réelle nécessité à les faire intervenir.)

Nous avons donc spécifié les règles de fonctionnement interne de la démarche scientifique. Celle-ci reste néanmoins une activité humaine, qui ne s'applique pas indépendamment du monde qui l'entoure: une définition de la science qui se limiterait à sa mécanique interne sans se pencher sur les contours externes et le pilotage de cette activité serait bien incomplète. La seconde partie de ce livre sera donc consacrée à cet aspect, complémentaire du précédent, à commencer par les raisons qui nous poussent à investir tant d'efforts pour tenter de comprendre le monde.

Oui, tiens, d'ailleurs, pourquoi vous tenez tant que ça à savoir à quoi je peux bien ressembler, au juste?



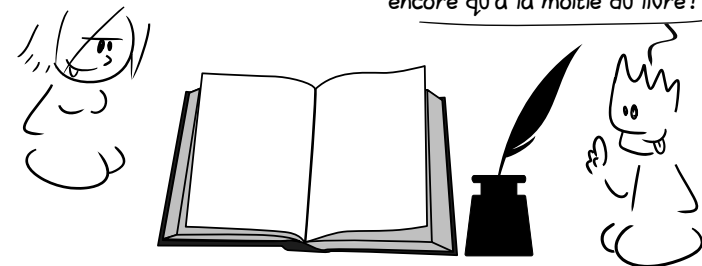
Parce que même si nos yeux sont mauvais, nous avons l'esprit curieux: comprendre le monde qui nous entoure, c'est un but en soi.



Bernard Le Bouyer de Fontenelle

Après, si ça ne vous suffit pas, il y a aussi des raisons plus pratiques. Comme le fait que c'est utile en plus d'être beau, par exemple.

Mais patience: nous n'en sommes encore qu'à la moitié du livre!

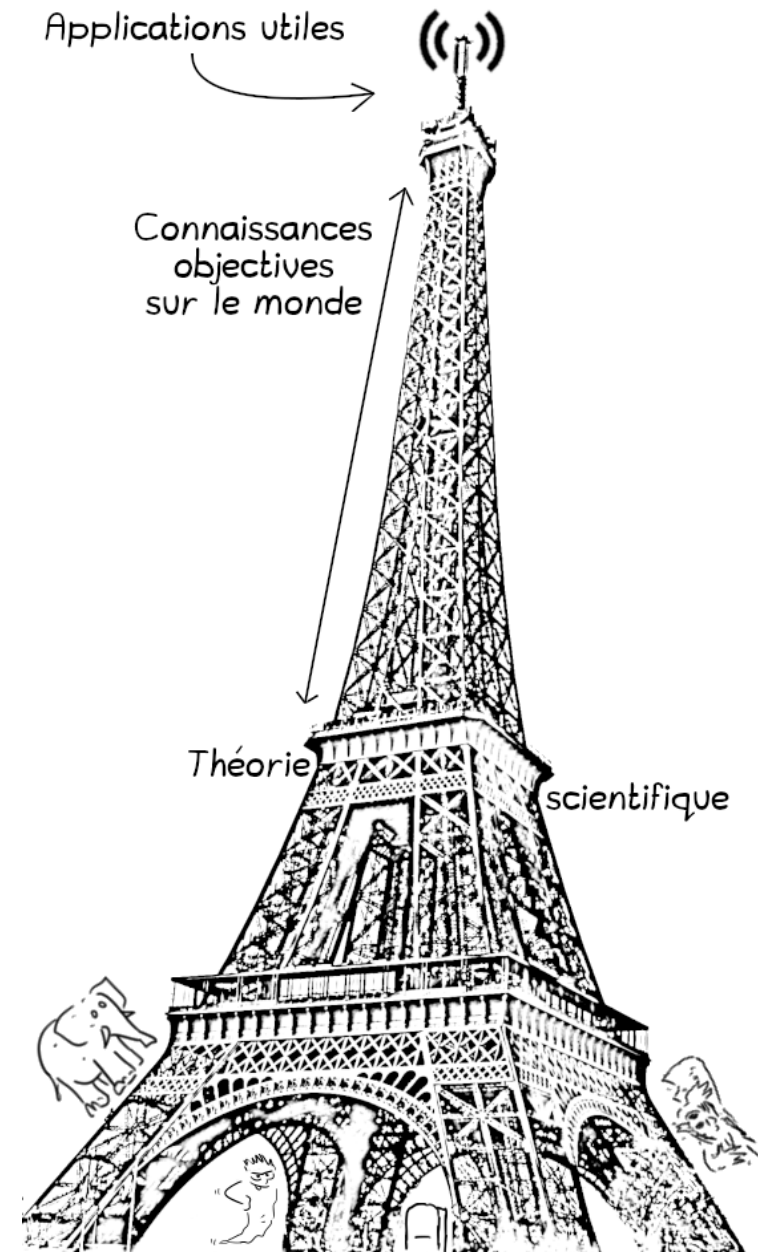


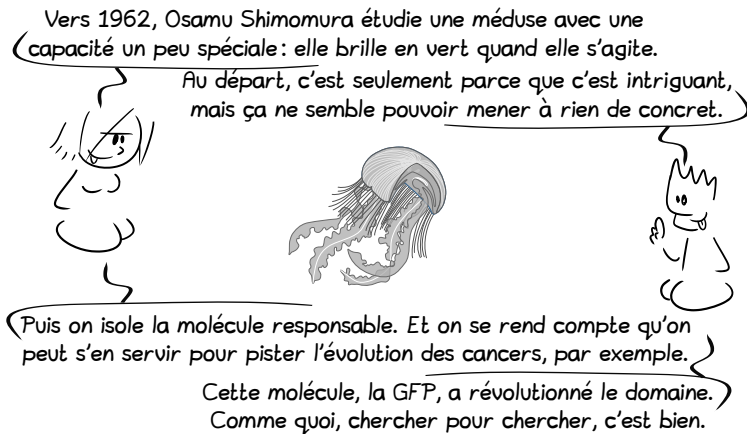
Septième partie : Haut en couleurs

Nous avons, au cours des chapitres précédents, dressé les grandes lignes du fonctionnement de la science. Celle-ci repose solidement sur ses quatre piliers : le scepticisme initial sur les faits et leurs interprétations, le postulat réaliste, la rationalité, et le matérialisme de méthode. Cette assise permet de construire des théories qui, si elles sont par nature réfutables et seront très vraisemblablement, dans l'avenir, précisées ou remplacées par d'autres théories plus fiables, sont néanmoins suffisamment solides pour expliquer le monde en résistant à l'épreuve du doute.

Nous n'avons, cependant, que très peu parlé des raisons pour lesquelles nous nous livrons à ce type d'activités. La raison la plus couramment invoquée est aussi la plus simple : *ça marche*. Cette méthode permet de comprendre le monde assez efficacement pour en tirer des applications on ne peut plus utiles : utiliser les résultats d'une démarche scientifique permet de soigner des gens, de construire des habitations qui résisteront aux tremblements de terre, et une myriade d'autres choses qui ont un impact positif direct sur nos vies facile à constater.

Mais se limiter à ça, c'est peut-être en oublier la plus grande partie. D'un strict point de vue applicatif, la Tour Eiffel a une fonction simple : il s'agit d'un support pour des antennes de radio et de télévision, et sa hauteur la rend très efficace pour cela. Ce n'est cependant pas pour cette raison que des millions de personnes la visitent chaque année : avant d'avoir une utilité pratique, la Tour Eiffel a une construction architecturale intéressante, et donne à celles et ceux qui y grimpent un magnifique point de vue sur la ville qui l'entoure. De la même manière, la science, avant d'avoir une utilité pratique, est intéressante pour la façon dont elle est construite et pour le point de vue qu'elle nous donne sur notre monde.



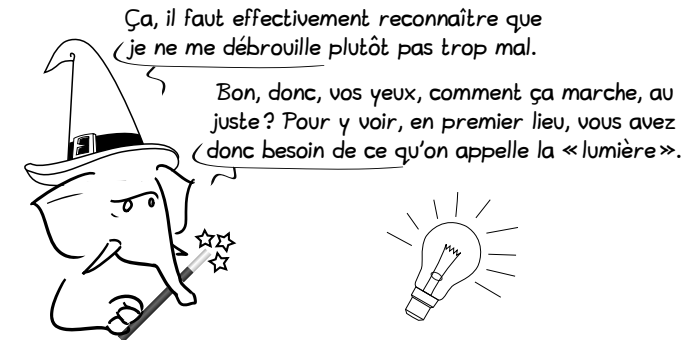


Certaines personnes semblent considérer que le monde qui nous entoure est quelque chose de triste, et qu'expliquer scientifiquement ce monde le serait plus encore. Il nous faudrait ainsi mobiliser du «*surnaturel*», de l'«*extraordinaire*», du mystère, pour rendre le monde attractif. Quoique cela n'ait rien d'obligatoire, les scientifiques ont tendance à trouver, au contraire, qu'un monde que nous comprenons est beaucoup plus enthousiasmant, et qu'exercer notre esprit à cette tâche est une activité assez passionnante.

On entend parfois qu'«un bon magicien ne révèle jamais ses secrets». On peut pourtant y objecter (et des illusionnistes le font) que, si le tour est réellement bien exécuté, peu importe que l'on partage ou pas ces secrets: l'effet visuel reste aussi beau. Connaître le «truc» et n'y voir tout de même que du feu est même encore plus impressionnant. Or, quoiqu'il arrive, la réalité, elle, exécute toujours aussi bien ses tours: en connaître le «truc» ne peut donc que rendre les choses encore plus belles.

Néanmoins, comprendre les choses dans les détails reste un processus long et complexe. Et, comme Wegener, nous avons souvent besoin de recourir à de nombreux domaines différents pour parvenir à comprendre les choses dans leur ensemble. À titre d'exemple

illustratif, rendons grâce à nos yeux: comme nous l'avons déjà évoqué, résumer nos sens trompeurs en disant que ce sont eux qui sont mauvais est beaucoup trop réducteur.



Ce que c'est, au juste, que la lumière, c'est un peu trop compliqué pour être détaillé ici, mais disons que, grosso-modo, ça se comporte comme une onde, ce qui va amplement nous suffire pour cette explication. Une onde, c'est quelque chose qui oscille. Ce quelque chose peut être de la matière, et on parle alors d'onde «*mécanique*», comme le son, les secousses d'un tremblement de terre ou les cheveux qui ondulent parce que vous le valez bien. Mais dans le cas qui nous intéresse ici, ce «quelque chose», c'est de l'énergie, et on parle dans ce cas d'une onde «*électromagnétique*», ou, plus simplement, «*lumineuse*».

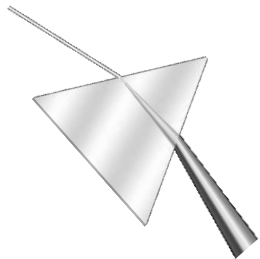
Toutefois, si l'on excepte le fait que le «quelque chose» est de nature différente, une onde électromagnétique et une onde mécanique se comportent de façon assez analogue: une petite particule fait la ola puis revient à sa place, passant le relai à sa voisine qui se met à faire la ola à son tour, et ainsi de suite. C'est donc une perturbation très localisée, qui est transmise de proche en proche, à une «*vitesse*» que l'on appelle la *célérité* de l'onde.



Faire claquer un fouet, par exemple, c'est propager une onde tout au long de sa lanière. Une fois l'onde passée, la lanière est revenue à sa place (sauf si vous continuez de l'agiter), bien que l'oscillation se soit propagée sur toute sa longueur.

La célérité d'une onde mécanique dépend du type d'onde dont il s'agit et du milieu dans lequel elle se propage (celle du son est de 340 mètres par seconde dans l'air, par exemple). Celle des ondes électromagnétiques ne dépend que du milieu : dans le vide, elle est de 299 792 458 mètres par seconde³², ce qui est, en l'état actuel de nos connaissances, la vitesse la plus élevée atteignable dans notre univers.

La célérité n'est cependant pas la seule chose à étudier pour une onde donnée : il faut, de plus, considérer sa *fréquence*. Il s'agit du nombre de fois qu'une particule donnée va osciller en une seconde. Pour le son, cela va différencier les notes : plus la fréquence est élevée, plus le son sera aigu. Pour la lumière, c'est ce qui va différencier les couleurs. Sir Isaac Newton, en plus de ses travaux sur la gravité, est célèbre pour avoir montré que la lumière que nous considérons comme « blanche » est en fait composée de multiples couleurs différentes.



Quand elle change de milieu (ici, en passant de l'air au verre puis du verre à l'air), une onde change légèrement de direction. C'est ce que l'on appelle la *réfraction*. L'angle de cette réfraction varie légèrement selon la fréquence, ce qui fait qu'un *prisme* comme celui-ci permet de décomposer la lumière blanche pour montrer les multiples couleurs qu'elle contient.

³² En arrondissant, la lumière va donc un million de fois plus vite que le son, d'où par exemple le décalage entre le moment où l'on voit l'éclair et celui où l'on entend le tonnerre. Notons d'ailleurs que, la lumière nous parvenant en une fraction de seconde, et le son mettant trois secondes à parcourir un seul kilomètre, il suffit de compter le nombre de secondes entre l'éclair et le tonnerre et de le diviser par trois pour connaître approximativement la distance qui nous sépare de la foudre.

Tout ce que nous venons de voir relève des sciences physiques. Mais ce qui concerne notre vision ne s'arrête pas là : il est également nécessaire, pour comprendre l'ensemble, d'étudier comment fonctionnent nos yeux eux-mêmes, ce qui relève cette fois du domaine des sciences de la vie.

L'œil est loin d'être une innovation récente dans l'histoire de la vie : la forme complexe dont nos yeux actuels sont issus est vraisemblablement apparue au début du Cambrien, il y a quelques 500 millions d'années. Et elle dérive elle-même d'une forme plus simple qui permettait déjà à des ancêtres encore plus lointains de distinguer les variations de luminosité.

C'est une histoire évolutive suffisamment longue pour permettre aux yeux de plusieurs embranchements de se spécialiser différemment³³, aussi concentrons-nous simplement sur le cas de l'être humain.

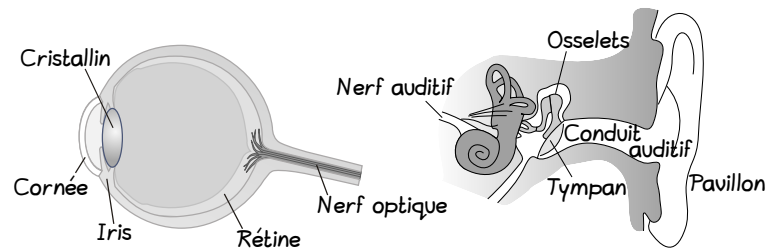
Nos yeux sont d'abord un dispositif permettant de collecter efficacement la lumière : ils contiennent une petite lentille appelée *crystallin* qui permet de focaliser la lumière qui pénètre dans l'œil sur les zones où se trouvent les récepteurs sensoriels. Ceux-ci sont toutefois assez sensibles : trop de lumière risquerait de les endommager. Heureusement, celle qui pénètre dans nos yeux passe par la *pupille*, un trou dans une membrane appelée *iris* qui va se rétrécir ou se dilater par réflexe pour laisser entrer plus ou moins de lumière et ainsi s'adapter à la luminosité ambiante. Il reste toutefois préférable d'éviter de trop fixer les fortes sources lumineuses (ou les pointeurs lasers).

Ce fonctionnement adaptatif est assez efficace (ce fut d'ailleurs notre source d'inspiration pour inventer le diaphragme de nos appa-

³³ Les yeux des insectes et des araignées, d'une structure très nettement différente de celle des nôtres, sont toutefois très probablement apparus dans leur propre lignée de manière indépendante des yeux des vertébrés, tout en restant dérivés des mêmes formes simples ancestrales que l'on retrouve également chez certaines bactéries.

reils photos et caméras, évoqué dans le premier chapitre). On peut regretter que nos oreilles soient moins bien protégées : elles ne disposent que d'un système d'amplification, impliquant notamment le *tympa*n, une membrane qui vibre avec le son reçu et entraîne trois petits os qui mettent le reste en mouvement. Il est donc conseillé de se boucher les oreilles de façon artificielle (avec un casque, par exemple) lorsque l'on est exposé à des bruits intenses.

Notre oreille est plus « simple » que notre œil sur un second aspect : ses récepteurs, qui enregistrent les vibrations répercutées par les osselets sur le liquide qui les environne, sont tous de la même sorte. Dans nos yeux, il y a plusieurs sortes de capteurs différents, pour récupérer plusieurs types d'information. D'abord, les *bâtonnets*, qui déterminent l'intensité lumineuse, puis les *cônes*, qui déterminent la couleur. Ces cônes sont un peu moins sensibles que les bâtonnets, raison pour laquelle nous percevons moins bien les couleurs quand il fait sombre.



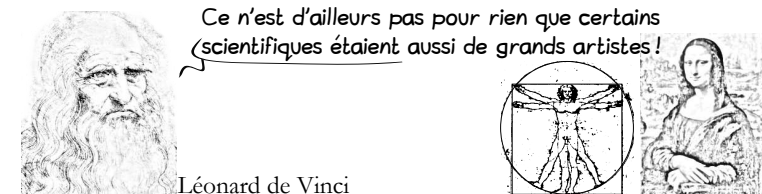
Dans tous ces cas, les informations acquises par ces récepteurs sont transmises au cerveau par les nerfs, dont le fonctionnement est également très intéressant à étudier biologiquement, mais que nous ne détaillerons pas ici pour ne pas allonger excessivement ce chapitre. C'est donc le cerveau qui interprète le tout, et, comme nous l'avons vu précédemment, c'est lui qui se trompe dans la plupart des cas. Nos yeux ne sont donc, finalement, pas si mauvais, quoique nos sens restent trompeurs.

Nous n'avons ici fait que survoler les mécanismes élémentaires de la vision. Penchons-nous maintenant plus en détails sur les couleurs,

ce qui nécessite de se pencher cette fois sur la chimie. Nous avons vu que la lumière « blanche » est constituée d'un grand nombre de couleurs différentes. Cette lumière ne fait pas vibrer que nos cônes et nos bâtonnets : chaque molécule d'un objet que l'on éclaire va être agitée par l'onde d'une manière spécifique, en fonction des éléments chimiques qui la composent.

Une plaque de cuivre, par exemple, va vibrer d'une certaine manière, qui fait qu'elle va renvoyer les ondes de certaines fréquences données et absorber tout le reste. Quand on regarde une plaque de cuivre éclairée, on ne reçoit donc que la petite partie de couleurs qu'elle renvoie, et on associe à l'objet la couleur liée à la fréquence que nos yeux perçoivent : la plaque de cuivre nous apparaît rougeâtre. Si on laisse le cuivre à l'air trop longtemps, des atomes d'oxygène vont se coller aux atomes de cuivre pour former des molécules qui vont absorber différemment la lumière : ce sont cette fois-ci les fréquences que nous appelons « vertes » qui vont être renvoyées, et nous verrons quelque chose qui ressemble à la Statue de la Liberté.

Une partie importante de l'art des peintres réside dans le choix des pigments utilisés : fabriquer un pigment, c'est réaliser une composition chimique qui va absorber et renvoyer les ondes des bonnes fréquences pour produire la couleur désirée. Tester méthodiquement toutes les combinaisons d'éléments de base pour voir quels résultats donnent une couleur intéressante et quels autres n'ont aucun intérêt pour l'œuvre désirée relève autant d'une démarche scientifique que de croiser méthodiquement des pois jaunes et verts (ou ronds et cossus) pour voir quels aspects auront les descendants.



Léonard de Vinci

Mais au fait, cette lumière, d'où vient-elle, au juste? Il existe plusieurs manières d'en produire. Certaines réactions chimiques peuvent par exemple en générer. C'est le cas, notamment, de la *bioluminescence* de certains êtres vivants comme les lucioles. Mais ce que nous croisons le plus fréquemment est sans doute la lumière issue des corps chauds.

Tout objet un minimum chaud³⁴ émet en effet de la lumière. Celle-ci n'est cependant pas forcément visible, car nos yeux ne sont pas sensibles à toutes les fréquences. Les objets qui restent à des températures raisonnables, comme par exemple notre corps, à environ 37 °C, émettent des ondes électromagnétiques dont la fréquence est trop faible pour que nos yeux puissent la capter. De la même manière qu'on parle d'*infrasons* pour désigner les sons de fréquences trop basse pour que notre oreille puisse les capter, on parle, pour ces lumières imperceptibles, d'*infrarouges* (le rouge étant la couleur visible dont la fréquence est la plus basse).

Il faut atteindre une température de 500 °C pour qu'un objet (par exemple, un filament de tungstène porté à incandescence dans une ampoule de verre) se mette à émettre de la lumière visible. Cette lumière est d'abord de couleur rouge (qui est donc, contrairement à l'appellation classique, une couleur «froide»!), et passera ensuite au jaune, puis au «blanc» (donc à l'ensemble du spectre visible) si la température continue d'augmenter.

Les corps les plus chauds (la température externe de notre soleil, qui reste une étoile relativement froide, dépasse déjà les 5 000 °C!) se mettent à émettre des ondes dont la fréquence est trop élevée pour être perçue (des *ultraviolets*, de la même manière que l'on parle

³⁴ Précisons que la température est une mesure de l'agitation des molécules : notre 0 °C est très nettement au dessus de leur éventuelle immobilité ! Notons par ailleurs que s'il existe une limite minimale à la température (le fameux «zéro absolu», -273,15 °C), il existe également une température maximale : celle à laquelle ces molécule s'agitent tellement qu'elles atteindraient la vitesse de la lumière. Ces deux températures limites sont toutefois inatteignables en pratique.

d'*ultrasons*)... et qui commence à être tellement élevée qu'elle peut provoquer des dégâts sur notre corps, raison pour laquelle il est préférable d'utiliser un écran solaire quand on passe trop longtemps à s'exposer à la lumière extérieure.

Notons que certaines molécules, comme la GFP évoquée au début de ce chapitre, possèdent une caractéristique assez particulière : en recevant une lumière d'une certaine fréquence, elles en renvoient une d'une fréquence différente. C'est ce que l'on nomme la *fluorescence*, et c'est ainsi que fonctionnent, par exemple, certains de nos tubes «à néon» (qui, le plus souvent, ne contiennent pas vraiment de ce gaz) : la surface intérieure du tube est couverte d'une substance qui convertit les ondes électromagnétiques invisibles produites à l'intérieur en lumière visible.

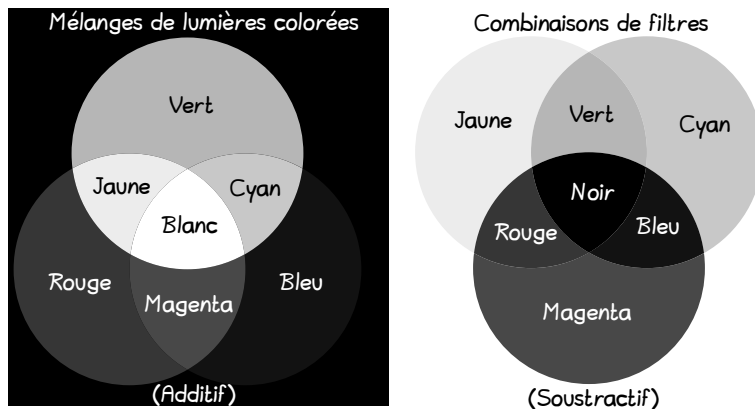
Allons encore un cran plus loin en remarquant qu'un prisme ne nous montre pas toutes les couleurs possibles : on voit assez bien le dégradé qui s'étale du rouge au vert (en passant par l'orange et le jaune), puis du vert au violet (en passant par le cyan et le bleu) ; mais aucune trace, par exemple, de rose. En fait, de la même façon que pour le blanc, la lumière rose n'existe pas directement : il s'agit d'un mélange de fréquences de plusieurs couleurs³⁵. En l'occurrence, on peut l'obtenir en mélangeant (par exemple) beaucoup de rouge, un peu de bleu, et un peu de vert.

D'autres couleurs peuvent être dans les deux cas. Ainsi, un mélange de vert et de bleu nous apparaît identique à un cyan «monochrome». Cela vient de la façon dont fonctionnent nos cônes (les récepteurs de couleur de nos yeux). Il en existe trois sortes, chacune

³⁵ En fait, si on utilise bien la fréquence pour parler des sons (l'oreille humaine peut ainsi entendre des sons allant de 16 à 16 000 Hertz), on utilise plus fréquemment la *longueur d'onde* pour la lumière. Les deux reviennent au même : on obtient la longueur d'onde en divisant la célérité de l'onde (fixe dans un milieu donné) par sa fréquence, et réciproquement. Le spectre visible va de 780 à 380 nanomètres, avec le rouge vers 700, le jaune vers 580, le vert vers 510, le cyan vers 490 et le bleu vers 440nm.

sensible à une certaine plage de longueur d'onde. Les cônes qui reçoivent très bien le vert, par exemple, sont également légèrement sensibles aux fréquences correspondant au jaune et au cyan. Un mélange de lumière rouge et de lumière verte excitera deux sortes de cônes³⁶ de la même façon qu'une lumière jaune pure, et notre cerveau aura donc les mêmes données à interpréter dans ces deux cas.

Une conséquence intéressante est que nous pouvons donc reconstituer n'importe quelle couleur que notre cerveau est capable d'interpréter en mélangeant simplement des lumières rouges, bleues et vertes, en variant un peu les proportions. C'est ainsi, par exemple, que fonctionnent les écrans de nos ordinateurs: chacun de leurs pixels est constitué de trois petites lampes qui sont plus ou moins allumées. Gardons toutefois à l'esprit que ceci est assez spécifique à nos yeux humains: d'autres êtres vivants, dont les yeux gèrent différemment les fréquences, ne voient pas du tout les mêmes choses que nous en regardant ces machins bizarres.



Mélanger les trois couleurs primaires permet de reconstituer toutes les autres. Mais on peut également arriver aux mêmes résultats par soustraction, en filtrant de la lumière blanche.

³⁶ Le cas des teintes roses est intéressant: c'est la façon de notre cerveau d'interpréter ce qui se passe quand les cônes rouges et bleus réagissent comme si on recevait une lumière verte, mais que les cônes verts, eux, ne réagissent pas (ou pas autant).

Même au sein de l'espèce humaine, les choses peuvent être assez différentes d'un individu à l'autre. Car en plus des aspects physiques, chimiques et biologiques, il faut également prendre en compte les aspects *sociaux*.

Les personnes qui enseignent en petite et toute petite section de maternelle, ou qui ont des enfants de cet âge, savent en effet que notre perception des couleurs est loin d'être innée: comme énormément d'autres choses, reconnaître les couleurs est le fruit d'un apprentissage.

Quoique dotés des mêmes yeux, d'autres sociétés peuvent «voir» les choses de plusieurs manières. Nous pouvons notamment prendre l'exemple des Mursis, peuple semi-nomade du sud de l'Éthiopie connu pour avoir un rapport aux couleurs assez différent du nôtre. Entre autres aspects, ils et elles ne font pas de différence sémantique entre une couleur unie et un motif particulier: «rayé» est ainsi considéré sur le même plan que «brun». Leur définition des couleurs reposant sur l'aspect des animaux, leur vocabulaire ne comprend pas de mot spécifique pour désigner le vert ou le bleu, qui sont indissociables³⁷ du gris. Les informations que captent leurs cônes sont les mêmes que pour nous, ce qui change est la façon dont le cerveau a appris à interpréter ces signaux, qui est donc encore une fois essentielle.

Si l'on veut réellement comprendre comment fonctionne le monde qui nous entoure, il ne faut donc pas se limiter aux sciences «de la matière»: comprendre comment nous fonctionnons, nous, est également nécessaire.

³⁷ Le vocabulaire concernant les couleurs est plus ou moins riche selon les langues: typiquement, le français possède des noms précis pour beaucoup de couleurs proches du rouge (orange, rose, jaune, maron, mais aussi carmin, bordeaux, sépia, corail, vermillon, écarlate...); tandis que le bleu et le vert sont plus fréquemment désignés par le nom général de la couleur suivi d'un adjectif qualificatif.

Et si vous vous demandiez: plusieurs études ont déjà permis de mettre en évidence une corrélation entre l'usage ou non de termes précis pour désigner certaines teintes et la capacité pratique à les distinguer les unes des autres. Il y a donc réellement une différence de perception associée à cette différence de vocabulaire.

(Le spectre des couleurs visibles a un curieux aspect converti en niveaux de gris, non?)

Toujours est-il que les progrès scientifiques et techniques réalisés autour de notre compréhension des couleurs ont ouvert énormément de portes. Nous disposons d'outils permettant de capter des fréquences que nous ne pouvons pas voir à l'œil nu³⁸, comme par exemple les « caméras infrarouges ».

Nous avons également, dans nos ordinateurs, développé des modèles colorimétriques différents de celui que nous utilisons pour afficher les images à l'écran. Au modèle « rouge, vert, bleu » classique s'ajoutent donc des modèles « cyan, magenta, jaune, noir » ou « teinte, saturation, valeur », qui permettent de réaliser des traitements plus ou moins avancés sur les images.

Tout cela, qui est issu de plusieurs domaines de la recherche scientifique, concerne donc bien d'autres domaines de l'activité humaine, tels que les arts (tout ce qui touche, notamment, à la retouche photographique, mais aussi la restauration d'œuvres anciennes, par exemple). Certaines applications qui sont issues de cette connaissance ne sont pas sans poser quelques problèmes de société (au niveau de la vidéosurveillance, notamment), même si d'autres ont des effets plus positifs (on peut évoquer en particulier la chirurgie des yeux au laser, permettant à certaines personnes de bien voir en se passant de lunettes, et qui est issue à plusieurs niveaux des travaux mentionnés dans ce chapitre).

Alors, où placer la limite entre ce qui relève d'un domaine et ce qui

³⁸ À ce sujet, précisons que la classification complète est un peu plus détaillée que « infravisible, visible, ultravisible » : les infrarouges forment une catégorie de fréquences en dessous desquelles on trouve encore les micro-ondes, puis les ondes radio. De même, au delà des ultraviolets, on trouve les rayons X, puis les rayons γ . Les fréquences plus élevées que la lumière visible (UV, X et γ) sont dangereuses, car elles font vibrer nos molécules (dont l'ADN) si fort que des cassures peuvent se produire. À des fréquences plus basses, en revanche, le seul effet connu sur la matière est de la faire chauffer.

relève d'un autre ? Contentons-nous pour l'instant (nous nous pencherons plus en détail sur la séparation importante entre science et politique dans un prochain chapitre) de circonscrire la science à la volonté de comprendre le monde : dès lors qu'il s'agit de créer quelque chose à partir de cette connaissance, on rentre dans le domaine, proche, mais néanmoins distinct, de la technique et de l'ingénierie.

Pour le reste, les distinctions entre les différents domaines, au sein de la science (y compris, répétons-le, entre les sciences dites « dures » et « humaines ») sont davantage une affaire de spécialité des personnes qui y travaillent que de différences de nature. Il n'est d'ailleurs pas rare que des recherches initiées dans un domaine donné amènent à se poser des questions (ou à apporter des éléments de réponse) qui relèvent d'un autre domaine. Isaac Asimov, vulgarisateur scientifique et auteur de science-fiction, avait évoqué ce point, notamment, dans sa nouvelle *Les cendres du passé*.

Notons d'ailleurs que l'existence de ce courant littéraire qu'est la science-fiction prouve, si besoin était, que la science ne se contente pas d'amener de la beauté dans notre vision du monde en nous permettant de comprendre ce que l'on constatait déjà : elle ouvre également la porte vers de nouveaux imaginaires, notamment par l'étude des étoiles et des planètes lointaines à laquelle nous allons maintenant nous intéresser de plus près.

On est d'accord, un mystère, c'est bien... parce que ça nous donne une raison de faire marcher nos têtes !



Comprendre quelque chose, c'est quand même beaucoup plus satisfaisant, non ?



(Toute énigme a une solution !)

Huitième partie : Rêver loin

Lever les yeux au ciel ne nécessite pas forcément de démarche scientifique, et les gens n'ont pas attendu les gros progrès en sciences de ces derniers siècles pour le faire. Durant l'Antiquité, par exemple, l'astronomie était considérée comme un art (Uranie, l'une des neuf muses grecques, présidait à cette discipline).

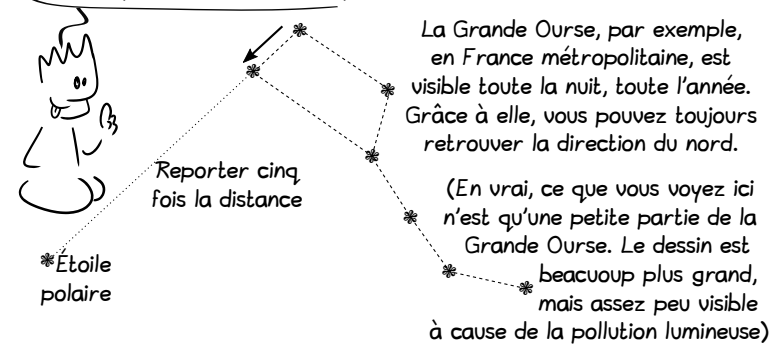
Néanmoins, l'observation rigoureuse du ciel et de ce qui s'y passe est probablement l'une des formes de science dont l'influence sur l'humanité a été la plus grande, en permettant entre autres à nos ancêtres³⁹, il y a de ça une grosse dizaine de milliers d'années, de se repérer dans le cycle des saisons, et, grâce à cela, d'inventer rien de moins que l'agriculture.

Il se peut que cela ait donné du crédit à l'idée, encore répandue, que ce qui se passe loin là-haut aurait une influence directe sur nos vies. Cette idée a été déclinée sous de nombreuses formes, allant de l'astrologie à l'hypothèse de visites extraterrestres actuelles ou passées. Aucune de ces formes, hélas, n'a jusque là réussi à atteindre le stade de théorie scientifique, ce qui nécessite, comme on l'a vu, de respecter les quatre piliers de la démarche et d'être validée par des expériences reproductibles.

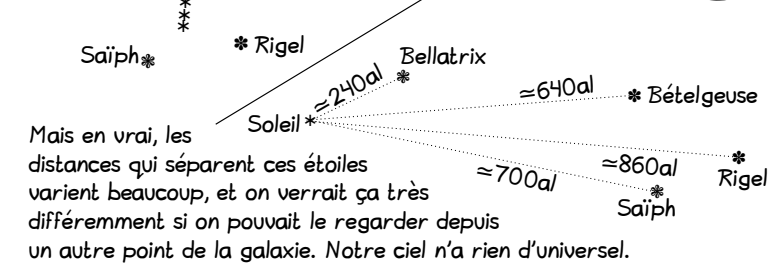
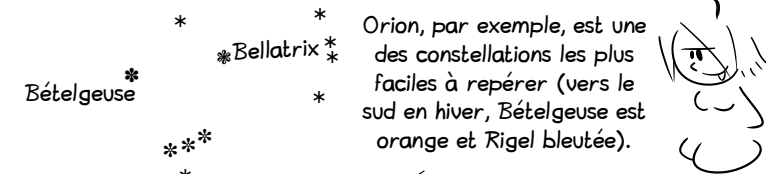
Aussi allons-nous nous contenter d'évacuer rapidement ces sujets en rappelant quelques faits (nous reviendrons sur un positionnement global vis-à-vis des pseudosciences très bientôt), avant d'aller jeter un œil à quelques aspects intéressants de l'étude des ciels lointains.

³⁹ À prendre ici au sens très large : nous autres, en Europe, héritons de l'agriculture développée en Mésopotamie (grosso-modo vers l'actuel Irak, qui sera aussi le berceau de notre écriture), mais des formes d'agriculture sont également apparues, à des périodes relativement proches et de façon indépendante, à l'autre bout de l'Asie, en Océanie, aux Amériques (deux foyers au nord et un au sud), et peut-être également en Afrique.

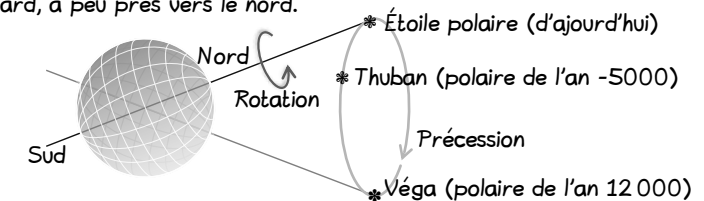
Reconnaître les constellations est assez utile : c'est un très bon moyen de se repérer dans le ciel, et parfois aussi sur la Terre autour de nous.



Mais une constellation, c'est comme une forme dans les nuages : c'est notre cerveau qui invente quelque chose là où il n'y a en fait que des points sans lien entre eux.

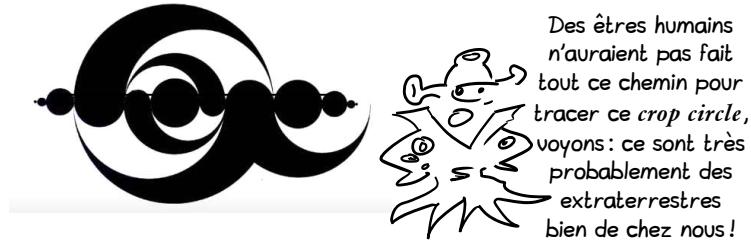


D'ailleurs, si vous vous demandiez : l'étoile polaire n'a rien de particulier par elle-même. C'est seulement une étoile ordinaire qui se trouve, par hasard, à peu près vers le nord.



En ce moment, du moins, car tout ça change avec le temps.

Le truc à retenir, surtout, c'est que les étoiles sont à des distances astronomiques de nous. Il nous faudrait des milliards d'années pour aller voir ce qui se passe sur place.



Cette distance considérable qui nous sépare des étoiles va d'ailleurs poser une difficulté expérimentale assez notable : nous ne pouvons pas aller « appuyer » sur ces étoiles pour regarder comment elles réagissent. Ça ne remet cependant pas en cause notre matérialisme de méthode : conceptuellement, on *pourrait* le faire. Il s'agit seulement d'une difficulté pratique.

Pour contourner cette difficulté, il faut donc changer légèrement la façon de procéder. L'astronomie fonctionne en accumulant les observations, que l'on va ensuite tenter de recouper et de classer vis-à-vis de ce que l'on connaît déjà. C'est également la méthode que l'on utilise, par exemple, pour les fossiles en paléontologie.

Ces observations sont, naturellement, accompagnées de travaux « en laboratoire » (modélisations, comme celles de Torricelli, accompagnées, depuis l'avènement de l'informatique, par des simulations), mais, l'expérience en situation contrôlée (comme celle de Pascal) ne pouvant pas avoir lieu, le régime de preuves utilisé repose sur deux autres éléments :

- D'une part, la maximisation de la cohérence de la proposition vis-à-vis d'elle-même (grâce, notamment, au principe de parcimonie) et vis-à-vis des lois connues par ailleurs (les relations de parenté entre les fossiles, dans le passé, sont conformes aux lois de l'évolution expérimentées dans le présent),

- D'autre part, la prédiction de nouvelles observations, qui pourront toutefois n'avoir lieu que bien longtemps après (ainsi, un trou noir, théorisé par Karl Schwarzschild d'après les équations d'Einstein en 1916, n'a été détecté pour la première fois qu'en 1971 (et la première photographie date de 2019)).

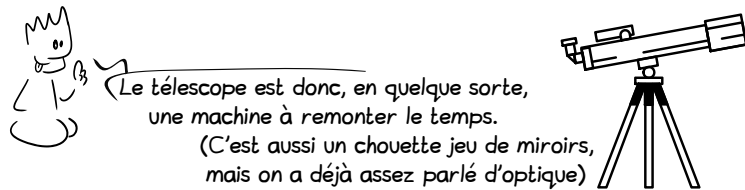
Ce régime de preuve, légèrement différent de celui décrit précédemment, offre un degré de certitude moindre, mais permet néanmoins d'assurer à nos énoncés une probabilité aussi élevée que possible dans ces conditions. Outre le cas où tester expérimentalement n'est matériellement pas possible, ce mode de fonctionnement est également utilisé dans les cas où l'on préfère (notamment pour des raisons éthiques) influencer le moins possible sur ce qui est observé, par exemple dans l'étude des comportements animaux.

Les trois cas où recourir à cette méthode est une nécessité technique ont cependant un point commun intéressant : il s'agit, à chaque fois, d'étudier le passé. L'Histoire, et les domaines associés, comme l'archéologie, se penchent sur celui de l'espèce humaine. La paléontologie s'intéresse à l'évolution de la biodiversité avant l'apparition de notre espèce. Une partie importante des phénomènes étudiés en astronomie étaient bien plus anciens que cela.

Car nous ne recevons des astres lointains que la lumière qu'ils émettent (au sens large : nos instruments d'étude ne se limitent évidemment pas à la lumière *visible*). Or, comme on l'a vu, la célérité des ondes électromagnétiques, si énorme qu'elle nous paraisse, est tout de même limitée : la lumière émise par le Soleil met déjà huit minutes à nous parvenir.

La plupart des étoiles visibles dans notre ciel nocturne, dont notamment celles d'Orion, sont situées à quelques centaines d'*années-lumière* (« al »), c'est-à-dire à une distance telle que les informations que nous en percevons sont parties de là-bas il y a plusieurs centaines d'années, et n'arrivent que maintenant, le temps de faire le trajet.

Et les étoiles visibles à l'œil nu sont loin d'être les seuls objets observables du ciel. Nous connaissons également un certain nombre de galaxies extérieures à la nôtre. Or, la taille d'une galaxie se compte en dizaines de milliers d'années-lumière, et la distance qui sépare deux galaxies entre elles atteint *au minimum* le million : nous ne voyons donc pas le ciel « en direct », mais des images d'un lointain passé.



En visant les points les plus lointains que l'on arrive à percevoir, on peut ainsi observer des phénomènes extrêmement anciens... mais il y a tout de même deux limites majeures : d'une part, tous les détails n'arrivent pas jusqu'à nous. Nous pouvons observer les galaxies lointaines, mais pas distinguer les étoiles qui les composent. Ensuite, et surtout, il existe une limite fondamentale au delà de laquelle on ne peut pas remonter, que l'on appelle l'*horizon cosmologique* : certains objets sont si éloignés de nous que la lumière qu'ils émettent a besoin d'un temps supérieur à l'âge actuel de l'univers pour pouvoir nous atteindre, ce qui nous empêche de les voir.

Car en effet, notre univers n'existe pas de toute éternité, en tout cas sous la forme que nous lui connaissons : autrefois, il se présentait sous une forme très dense, chaude et compacte, et s'est depuis dilaté et refroidi. La méthode de datation principale utilisée actuellement est de mesurer les variations du *fond diffus cosmologique*, lumière émise au moment où l'expansion a rendu l'univers transparent, que les outils adaptés permettent de détecter tout autour de nous. Il existe également d'autres méthodes (basées sur la mesure de l'âge des atomes, ou de celui des plus vieilles étoiles, par exemple), et toutes convergent vers un âge d'environ 13,7 milliards d'années.

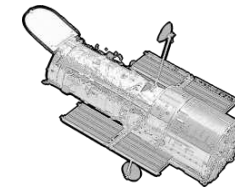
L'expansion de l'univers ne s'est pas arrêtée depuis. Elle s'est même accélérée au fil du temps. On s'en rend compte en mesurant les variations de couleur des galaxies lointaines. En effet, si la source d'une onde (électromagnétique ou mécanique) se déplace par rapport à nous, sa fréquence nous semble changer.

La sirène d'un véhicule, par exemple, nous paraît plus aiguë lorsqu'il s'approche, et plus grave lorsqu'il s'éloigne. Il en est de même pour les galaxies : la plupart d'entre elles⁴⁰ s'éloignent de nous (d'autant plus « vite » qu'elles sont lointaines, à mesure que l'espace disponible augmente), et l'on observe leur lumière se décaler vers le rouge (On désigne communément ce décalage par son nom anglais, *red shift*).

On nomme cette variation de couleur l'effet Doppler-Fizeau, du nom des scientifiques qui l'ont découvert à la fin du XIX^e siècle, et c'est l'astronome Edwin Hubble qui s'en est servi, en 1929, pour mettre en évidence l'expansion.



Edwin Hubble



(Ce joli télescope spatial, nommé "Hubble" en son honneur, a pris plein de photos magnifiques d'objets lointains du ciel, qui sont facilement accessibles sur Internet. N'hésitez surtout pas à aller y jeter un œil!)

<https://esahubble.org/images/>

Notons que la matière telle que nous la connaissons n'est pas apparue immédiatement à cette époque : ses composants de base, élec-

⁴⁰ Si l'expansion est globale, il peut en revanche arriver que certaines galaxies proches se rapprochent les unes des autres. Ainsi, notre galaxie et celle dite d'Andromède, une de nos plus proches voisines, devraient fusionner d'ici environ quatre milliards d'années : nous la voyons donc se rapprocher de nous, et l'effet Doppler-Fizeau décale donc au contraire sa lumière vers le bleu. Les premiers travaux à ce sujet, concentrés sur les galaxies proches, ont donc d'abord conclu à un univers en contraction, avant que l'on ne se rende compte en élargissant les recherches qu'il ne s'agissait que d'un effet local.

trons, protons et neutrons⁴¹, se sont réunis entre eux pour former des atomes, mais l'expansion, diminuant les chances de rencontres, a fortement limité ces associations : l'univers, au début de sa "vie", était constitué uniquement d'hydrogène et d'hélium, les atomes les plus légers existants.

C'est ensuite au cœur des étoiles que le reste s'est formé : ces gigantesques amas d'atomes sont suffisamment chauds et denses pour recréer des conditions proches de celle de l'univers des premiers instants, ce qui permet aux noyaux d'hydrogène de se coller les uns aux autres pour former des noyaux d'hélium. C'est ce que l'on appelle la *fusion nucléaire*. Pendant le premier stade de la vie d'une étoile (notre Soleil, par exemple, en est là), c'est la seule réaction qui a lieu. En effet, un noyau d'hélium présente une configuration tellement stable que, si un nouveau proton vient s'y présenter, il n'arrive pas à se fixer correctement et fini par être rejeté.

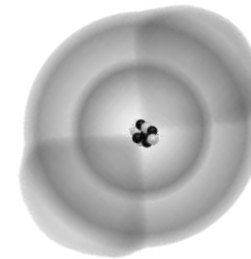
Cependant, lorsque la concentration d'hélium au cœur de l'étoile est suffisamment élevée, il arrive que trois noyaux se rencontrent en même temps, et parviennent alors à trouver une nouvelle forme : ils fusionnent en un noyau de carbone. Ce type de réactions devient de plus en plus fréquent avec le temps, et devient le moteur principal de l'activité du cœur de l'étoile au cours de la seconde partie de la vie de celle-ci (que l'on nomme phase de « géante rouge », car ses couches externes enflent alors considérablement, leur température diminuant légèrement au passage). Dans les stades ultérieurs de la vie de l'étoile, d'autres réactions de fusion ont lieu, faisant apparaître jusqu'aux noyaux de fer. Puis, si l'étoile a la taille et la température qui conviennent, elle finit par exploser : c'est au cours de cette explosion

⁴¹ En fait, électrons et *quarks*. Mais les quarks se sont quasi-immédiatement assemblés par trois pour former les protons et les neutrons, et ne peuvent pas être observés de façon isolée, raison pour laquelle on parle surtout de leurs composés. Deux sortes de quarks forment nos protons et neutrons habituels, ayant des charges électriques valant $-\frac{2}{3}$ et $+\frac{1}{3}$ de celle de l'électron (donc $+\frac{2}{3}e$ et $-\frac{1}{3}e$, la charge de l'électron étant définie comme valant $-1e$), mais notons qu'il en existe d'autres, formant des particules plus exotiques, observées pour l'heure exclusivement dans les accélérateurs.

que se forment les atomes les plus lourds, comme l'uranium, qui sont alors libérés dans l'espace avec les autres.

Une bonne partie de la matière qui nous compose a donc été formée au cœur des étoiles qui ont précédé notre Soleil, faisant dire au journaliste scientifique Simon Singh : « Les romantiques aimeraient peut-être penser qu'ils sont faits de poussières d'étoiles. Les cyniques préféreraient sans doute parler de déchets nucléaires. »

Une petite parenthèse, ici, au cas où ce que nous venons d'évoquer vous paraîtrait quelque peu mystérieux. Tous les atomes, qui sont les constituants élémentaires de la matière, comportent un noyau, lui-même fait de protons et de neutrons, autour duquel se déplacent des électrons.



Protons et neutrons sont maintenus collés les uns aux autres par ce que l'on appelle les forces *nucléaires*, très puissantes, mais dont le champ d'action est très limité. Les électrons, pour leur part, subissent l'attraction *électrique* des protons : ces deux particules possèdent en effet des charges de même valeur, mais opposées. Chaque électron contrebalançant un proton (et les neutrons ayant une charge électrique nulle), l'atome, vu dans son ensemble, est donc électriquement neutre.

La masse d'un atome dépend du nombre total de particules qui le composent, mais sa capacité à interagir avec d'autres atomes pour former des *molécules* dépend de la répartition des électrons, sur différentes couches, autour de son noyau, laquelle dépend elle-même du nombre d'électrons présents, lequel correspond au nombre de protons présents dans le noyau atomique.

Ce nombre de protons est donc ce qui caractérise l'atome. Comportant six protons⁴², le carbone va par exemple être en mesure de former une grande variété de molécules, stables, mais néanmoins relativement faciles à «casser»: cette configuration favorable lui permet d'être, avec l'oxygène et l'hydrogène, l'un des constituants principaux des molécules *organiques* qui composent tous les êtres vivants que nous connaissons. Toutes les réactions chimiques qui constituent la vie, notamment la combustion de l'oxygène (durant la respiration cellulaire) et la photosynthèse reposent en très grande partie sur les propriétés de ces trois sortes d'atomes.

Les scientifiques ont donc regroupé tous les atomes existants dans un tableau, en les classant en fonction du nombre de protons qu'ils contiennent. La position (en ligne, colonne ou diagonale) à laquelle arrive un atome donné dans ce tableau renseigne sur ses propriétés physiques et chimiques. Ce classement a été initié en 1869 par Dmitri Mendeleïev et, complété et corrigé par d'autres scientifiques ayant repris les travaux de ce chimiste russe, se nomme aujourd'hui le *tableau périodique des éléments*.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
		*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



Dmitri
Mendeleïev

⁴² Si changer le nombre de protons change le type d'atome dont il s'agit, le nombre de neutrons, lui, peut varier plus librement. Il existe ainsi, entre autres, du carbone à 6 neutrons, qui est celui que l'on croise le plus souvent, et du carbone à 8 neutrons, soit $6+8 = 14$ particules dans son noyau: c'est le fameux «carbone 14» qui, se décomposant à un rythme bien connu, permet de dater les composés organiques. On appelle ces différentes compositions des *isotopes* d'un même atome.

Notons que les éléments les plus lourds, comme l'uranium (qui compte 92 protons), ne sont pas stables: la répulsion électrique qui a lieu entre les protons devient si forte qu'elle contrebalance les forces nucléaires, conduisant les noyaux d'atomes à se scinder en deux en émettant de grandes quantités d'énergie: c'est ce que l'on appelle la *radioactivité*. Des réactions de ce type sont à l'origine de la chaleur interne et de l'activité magnétique de notre planète, qui sont deux éléments essentiels à la maintenir vivable: si notre Soleil est un gigantesque réacteur à fusion, notre planète est pour sa part un gigantesque réacteur à fission nucléaire.

Ce n'est pas le cas de toutes les planètes: l'activité interne de Mars, par exemple, s'est arrêtée, faisant de la planète rouge une planète «morte». Il n'y a donc plus d'activité volcanique à sa surface⁴³, et les vents solaires (des flux de particules de haute énergie qui s'échappent en permanence de notre étoile) ont dispersé la plus grande partie de son atmosphère. Sur Terre, c'est le champ magnétique de notre planète qui dévie ces vents solaires et nous permet de garder l'atmosphère que nous respirons.

Nous abordons ici l'un des intérêts fondamentaux de l'astronomie: en étudiant les planètes lointaines, qui ont des caractéristiques différentes de la nôtre, nous parvenons à mieux comprendre comment notre Terre fonctionne en isolant peu à peu l'influence de chacune de ces caractéristiques.

Mais, au fait, qu'est-ce qu'une *planète*, au juste? Comme pour un certain nombre d'autres concepts (en particulier celui d'*espèce* en biologie), la définition est un peu délicate, car il s'agit de représentations

⁴³ Notons cependant que l'activité interne n'est pas nécessairement la seule cause possible de volcanisme. Un impact d'astéroïde suffisamment violent peut créer un point chaud temporaire, et des effets de marées suffisamment prononcés peuvent déformer et donc échauffer suffisamment la matière solide pour faire pousser des volcans depuis l'extérieur. C'est notamment ce qui arrive sur Io, l'un des satellites naturels de Jupiter.

mentales que nous collons sur le monde physique, mais qui n'ont pas d'existence réelle. Ce sont le résultat de notre démarche de classement, mais nous rencontrons toujours des cas limites, des objets qui ne rentrent pas bien dans les cases.

En l'occurrence, le mot «planète» vient du grec ancien⁴⁴, et signifie «astre errant, vagabond». En effet, à l'œil nu, les planètes ressemblent, dans le ciel, à des étoiles qui, contrairement aux autres, se déplaceraient par rapport au reste du ciel avec le temps. Vues à la lunette astronomique, en revanche, elles grossissent en fonction de la lentille utilisée, tandis que les étoiles, beaucoup trop lointaines, restent de simple points lumineux.

C'est d'ailleurs ainsi que, le 13 mars 1781, William Herschel, excellent observateur du ciel, identifia une planète jusqu'alors inconnue, car presque invisible à l'œil nu. Nous avions déjà Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne, s'y ajoutait désormais Uranus. Quelques temps plus tard, Urbain Le Verrier, mathématicien français, ayant remarqué quelques perturbations dans l'orbite de cette dernière, calcula qu'il devait exister une planète de plus, dont il détermina la position. Il écrivit alors à l'astronome allemand Johann Gottfried Galle, qui pointa son télescope à l'endroit indiqué le 23 septembre 1846 et découvrit effectivement une huitième planète, Neptune.



Sir William Herschel



Urbain Le Verrier



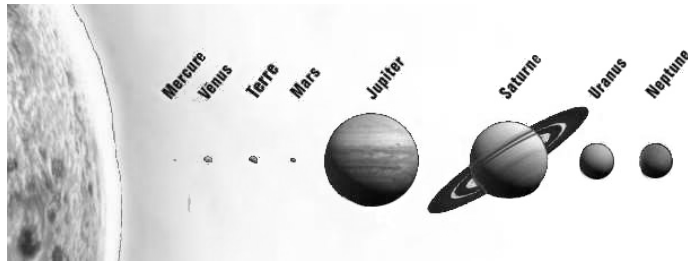
Johann Gottfried Galle

⁴⁴ Pour autant, notre vision du ciel vient beaucoup moins de la Grèce antique que ce que nous avons tendance à croire : un certain nombre de constellations que nous considérons habituellement comme «grecques» ont été héritées de ce qui avait été tracé quelques siècles plus tôt à Babylone ; et la plupart des noms d'étoiles ont été donnés bien après, par les astronomes arabes.

De nombreux autres corps plus lointains furent découverts depuis, mais, jusque là, aucun qui ne partage une caractéristique qu'ont en commun toutes nos planètes : l'isolement. Chacune de nos planètes, en effet, n'est accompagnée sur son orbite que par ses propres satellites, beaucoup plus petits qu'elle (notre Lune est d'ailleurs exceptionnellement grosse par rapport à la Terre). En revanche, les corps plus petits sont souvent accompagnés sur leur orbite par un certain nombre d'autres objets comparables à eux, qui tournent eux aussi autour du Soleil.

Lorsque ces petits corps non-isolés sont suffisamment massifs pour prendre une forme ronde, comme c'est le cas, par exemple, de Cérès dans la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, et de Pluton, Makémaké et Hauméa, dans la ceinture de Kuiper située au-delà de Neptune, on les désigne alors comme des *planètes naines*. Ces astres forment la limite basse, en taille et en masse, de notre notion de planète. Mais il existe également une limite haute : lorsqu'un corps céleste atteint une masse de treize fois celle de Jupiter, qui est la plus grosse de notre système solaire, la gravité est telle que des réactions de fusion nucléaire se déclenchent en son sein, ce qui est une caractéristique d'étoile. Une telle masse n'est cependant pas suffisante pour émettre de la lumière visible et devenir une véritable étoile : on parle, pour décrire ces objets, de *naines brunes*.

Nous n'avons pas de naines brunes dans notre système solaire, mais de tels objets ont déjà pu être identifiés dans l'espace lointain. En effet, bien qu'ils ne brillent pas par eux-mêmes, nos télescopes actuels permettent de détecter, par d'infimes variations de luminosité, leurs passages devant des étoiles qui, elles, brillent. Cette méthode permet de détecter des objets de taille bien inférieure à celle des naines brunes, et c'est ainsi que nous procédons actuellement pour rechercher des exoplanètes, des objets comparables à la Terre et à ses voisines mais orbitant autour d'étoiles lointaines.



Malheureusement, même si nous avons identifié des exoplanètes qui seraient susceptibles d'abriter des formes de vies similaires à celle que nous connaissons, l'énorme distance qui nous sépare d'elles rend impossible d'envisager le voyage. Nous pouvons rêver ne pas être les seuls dans l'univers (car si nous étions seuls, ce serait «un beau gâchis d'espace», disait Carl Sagan), mais, en l'état actuel des connaissances, la rencontre avec des formes de vies originaires d'un autre système solaire est très peu vraisemblable. Ce qui est fort dommage, car cela pourrait avoir, entre autres, des répercussions sur notre définition même de la vie, qui, pour l'instant, est assez spécifique à celle que nous connaissons.

Ça ne nous empêche bien sûr pas de continuer⁴⁵ à explorer le système solaire, en envoyant des sondes sur des objets qui sont tout de même à notre portée. Ces sondes nous ramènent parfois des résultats particulièrement intéressants : Philae, petit robot de la mission Rosetta envoyé le 12 novembre 2014 se poser sur la comète «Tchouri» (67P/Tchourioumov-Guérassimenko de son nom complet), a ainsi pu identifier à la surface de cette comète des acides aminés, molécules organiques qui constituent une part importante de nos cellules. Entre autres résultats tout aussi intrigants sur de nombreux autres plans, et qui ouvrent la porte à de nouvelles investigations.

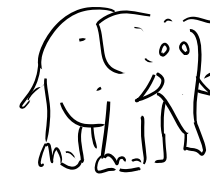
⁴⁵ Et ce d'autant plus que les progrès technologiques dus à l'exploration spatiale ont également des répercussions positives sur nos vies. Je ne vais pas détailler ce point ici ; mais vous pourrez trouver des exemples en feuilletant le livre de Jean-François Pellerin intitulé *100 inventions tombées du ciel*.

Nous avons encore énormément à apprendre, tant sur notre système solaire que sur l'espace lointain. Et pas seulement : si, à force d'explorations, nous connaissons plutôt bien les surfaces de la Lune et de Mars... nous sommes encore loin d'avoir une connaissance aussi précise du fond de nos propres océans ! Si notre démarche de compréhension du monde se montre bien aussi efficace que nous l'espérons, il n'empêche que la tâche est immense, et nous allons maintenant prendre un moment pour tenter d'en appréhender l'ampleur.

Une bonne nouvelle, toutefois, pour nous encourager : l'étude des cieux lointains confirme, jusque là, que notre postulat réaliste est raisonnable. Tout l'univers observable semble bien obéir aux mêmes lois que celles que nous pouvons découvrir depuis notre Terre. Les objets observés par la science, qu'il s'agisse de formes de vies ou de corps célestes, sont le fruit d'une histoire particulière qui fait que chacun, comme tous les autres, est unique. Mais les règles selon lesquelles ces histoires peuvent ou ne peuvent pas avoir lieu, elles, sont bel et bien universelles.

Désolé, Cousin Machin, mais on dirait bien qu'il n'y a qu'une seule réalité testable matériellement. L'univers n'a pas l'air d'être un « multivers », en tout cas pour l'instant.

Tant pis, moi je resterai du domaine de la philosophie (et aussi de la fiction, hein, quand même)



(Pour prolonger l'analogie, le mammoth, Cousin Machin de l'éléphant, représente ici une réalité alternative à la nôtre qui serait dotée de règles de fonctionnement différentes... et qui n'est scientifiquement pas testable.)

Neuvième partie : Admettre notre ignorance

« Une chandelle dans l'obscurité ». Cette métaphore, que l'on doit à Thomas Ady, désigne initialement l'investigation de prétendus pouvoirs occultes (l'ouvrage portant ce nom, paru en 1656, est sous-titré « un traité concernant la nature des sorcières et de la sorcellerie »⁴⁶). Elle peut très bien s'appliquer à l'activité scientifique toute entière : comme une chandelle, la méthode scientifique nous permet de percer les ténèbres de l'inconnu ; mais elle ne permet pas de « faire la lumière » sur tout instantanément.

Si l'on n'a qu'une chandelle pour s'éclairer, passer en revue toute l'ombre autour de nous sera long et fastidieux. Pire encore : tant que nous restions dans l'ombre de l'ignorance, nous pouvions imaginer que la zone à éclairer restait de petite taille. La première chose que l'on constate, à la lueur d'une bougie, est que l'obscurité est bien plus vaste que ce que nous imaginions.

Derrière cette envolée lyrique se cache une tendance bien réelle : de nombreuses découvertes scientifiques amènent en fait plus de questions qu'elles n'apportent de réponses. C'est ce que Léo Grasset, vidéaste de la chaîne *DirtyBiology*, désigne comme « la beauté cachée de la Science », dans une vidéo éponyme qui détaille joliment ce point (mais qui n'est, à ma connaissance, malheureusement disponible que par YouTube, nous reviendrons dans un prochain chapitre sur la raison pour laquelle cette problématique est plus en lien qu'on ne pourrait le croire avec le sujet de ce livre).

Note : je prends connaissance, juste au moment où ce livre allait partir à l'impression, des comportements abusifs de Léo Grasset. Puisque son travail est mentionné à plusieurs reprises dans la suite, il me semble important d'exprimer ici mon soutien total à ses victimes.

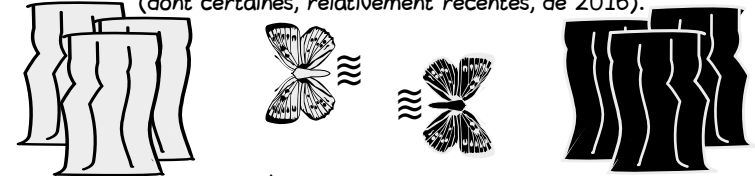
⁴⁶ Cet ouvrage et les quelques autres de cette époque, dont notamment *The Discoverie of witchcraft*, de Reginal Scot (paru en 1584), sont fréquemment cités comme précurseurs du scepticisme moderne. *The Demon-Haunted World*, ouvrage déjà mentionné d'Ann Druyan et Carl Sagan où apparaît le dragon dans le garage, était d'ailleurs sous-titré « *Science As a Candle in the Dark* ».

Les choses sont, en fait, très souvent plus compliquées qu'il n'y paraît. On a, par exemple, déjà parlé de la phalène du bouleau, petit papillon ayant illustré la sélection naturelle pendant la révolution industrielle anglaise.



Pendant longtemps, ça a semblé assez simple : les papillons clairs se cachent bien sur les troncs clairs, les papillons sombres se cachent bien sur les troncs sombres, donc la sélection devait reposer surtout sur le fait de ne pas se faire voir par les prédateurs.

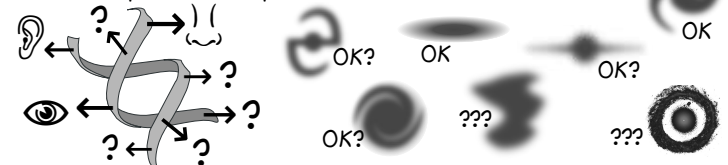
Sauf que... non. Enfin, pas que. La variation de la répartition dans le temps ne collait pas bien, et il a fallu de nouvelles études (dont certaines, relativement récentes, de 2016).



Pour expliquer complètement ça, il faut aussi prendre en compte d'autres aspects, comme les migrations, et d'autres critères de sélection, comme la thermorégulation.

Pour le coup, on a réussi à expliquer à peu près tout, c'est cool.

Dans d'autres cas, on a encore besoin de creuser, parce que l'explication complète est encore très loin de nous.



Par exemple, on ne connaît pas l'utilité d'une très grande partie de notre ADN (si seulement cette partie a une utilité, ce qui n'est pas forcément assuré non plus). Il y a aussi plein de galaxies dont la structure est encore difficilement compréhensible.

Plus on en apprend sur la façon dont le monde fonctionne, plus on se rend compte qu'on en a encore plein à comprendre. Les gens qui aiment les mystères devraient donc aimer la science : elle n'arrête pas de nous en faire découvrir de nouveaux.

Pour le dire autrement :

On l'a déjà vu : si on est aveugle et qu'on ne touche de l'éléphant que sa trompe, on s'en fait une image radicalement différente de celle que se fait quelqu'un, tout aussi aveugle, qui n'en touche que les oreilles, la queue ou les pattes.



Mais une fois qu'on arrive à imaginer l'éléphant dans son ensemble, on reste quand même avec une vision très limitée : un éléphant, ce n'est pas qu'une trompe, des défenses, des oreilles, etc., mais c'est aussi plein de choses à l'intérieur (comme un cerveau, ou bien des poumons) qu'on ne peut pas voir de l'extérieur, aveugle ou pas.

Notons que cet effet général faisant que la progression de nos connaissances nous amène à constater l'étendue de notre ignorance existe également au niveau individuel. C'est ce que l'on nomme l'effet Dunning-Kruger, du nom des scientifiques qui l'ont expérimentalement mis en évidence à la fin des années 1990 : les personnes les moins compétentes dans un domaine donné ont globalement tendance à surestimer leur propre niveau, tandis que les plus compétentes l'estiment de manière plus précise, quoiqu'elles aient parfois une certaine tendance à le sous-estimer.

Un tel effet était soupçonné de longue date : Darwin, Descartes, et même Aristote avaient déjà écrit sur le sujet à leurs époques⁴⁷. Il fallait néanmoins le prouver. La chose est récurrente dans les sciences sociales : il n'est pas rare de lire quelqu'un considérer que telle ou telle étude n'a fait que montrer ce qui était déjà évident. Il n'empêche, et nous l'avons déjà mentionné, que ce qui nous paraît évident n'est en fait pas toujours vrai (d'autant qu'il est toujours facile de trouver la

⁴⁷ Descartes aborde ce point, notamment, dans le *Discours de la méthode* dont nous avons déjà parlé, utilisant pour cela une formulation assez proche (quoique, naturellement, plus sérieuse) de celle que Coluche allait ensuite populariser : «le bon sens est la chose la mieux répartie : quoiqu'on en soit pourvu, on a toujours l'impression d'en avoir assez, vu que c'est avec ça qu'on juge!»

chose évidente *après coup*, même si le contraire nous aurait paru tout aussi évident!), la preuve était donc bien nécessaire.

Et, pour le coup, l'évidence est d'ailleurs toute relative, puisque l'effet Dunning-Kruger est souvent mal compris et considérablement amplifié par les gens qui l'évoquent. Des travaux plus récents (2016-2019) ont d'ailleurs montré que cet effet, dépendant de facteurs culturels, est vraisemblablement bien moins prononcé que ce que semblait indiquer l'étude initiale. Assez ironiquement, notre connaissance *de cet effet* est donc assez souvent surestimée.

Une des sources communes d'«évidences» qui n'en sont pas est la confusion entre corrélation et causalité. Une corrélation, c'est un lien fort mesuré entre la façon dont deux choses se quantifient. Ainsi, pour citer l'un des exemples les plus connus, il a été mis en évidence en 2012 que le nombre de prix Nobel décernés à des scientifiques d'un pays donné évoluait de la même façon que la consommation totale de chocolat dans ce même pays.

Il pourrait être tentant de considérer qu'il y a une relation causale, et que manger du chocolat aide à obtenir un prix Nobel. Les choses ne sont, toutefois, pas aussi simplistes et méritent qu'on s'y penche davantage. Une telle corrélation peut en effet être expliquée de quatre manières différentes : il peut y avoir relation causale, dans un sens ou dans l'autre (on pourrait aussi envisager que l'obtention d'un prix Nobel encourage la consommation de chocolat), mais ces deux éléments peuvent également être deux conséquences d'autre chose. Et il est également possible qu'il n'y ait simplement pas de lien, et que la corrélation ne soit que le fruit du hasard.



En l'occurrence, la troisième possibilité semble être la bonne : le chocolat étant un produit de luxe, et l'obtention d'un prix Nobel dépendant de la santé, notamment économique, de la recherche scientifique, les deux évoluent en fonction de la richesse du pays considéré.

Dans le domaine de la santé, par exemple, des corrélations sont souvent mises en évidence par des *études observationnelles*, c'est-à-dire de grandes études où l'on récupère un grand nombre d'informations sur un panel de gens aussi large que possible, précisément pour essayer, ensuite, de faire des statistiques. Ces études permettent de remarquer un certain nombre de choses, dont beaucoup ne sont que des accidents statistiques⁴⁸.

Faire les gros titres des journaux à partir d'une seule étude de ce genre est donc, au mieux, prématuré. Mais lorsque plusieurs études indépendantes montrent la même corrélation, on peut commencer à se dire qu'il est intéressant d'aller voir de plus près ce qui se passe. La manière la plus efficace de prouver qu'il y a effectivement causalité, lorsque tel est bien le cas, est alors d'influer directement sur l'un des facteurs, en situation contrôlée, afin de voir si l'autre varie comme on s'y attend ou non.



Si l'on avait des raisons de penser, par exemple, que manger de la pastèque fait pousser les cheveux plus vite, on constituerait deux groupes de telle sorte que, statistiquement, aucun autre facteur n'ait d'influence notable. On demanderait alors aux membres de l'un des

⁴⁸ On trouve d'ailleurs des gens pour s'amuser à traquer les corrélations accidentelles, qui font parfois sourire. On peut mentionner en particulier *Spurious correlations*, livre de Tyler Vigen qui en relève et commente un certain nombre, comme par exemple la corrélation avérée, entre 1999 et 2009, entre le nombre de morts par noyade dans une piscine et le nombre de films dans lesquels jouait Nicolas Cage.

groupes de se mettre à manger beaucoup de pastèque, et à ceux de l'autre de s'en abstenir complètement. Si, après un certain temps à ce régime, on constatait une différence significative dans la vitesse de pousse des cheveux pour l'un de ces deux groupes, une relation de causalité serait alors établie.

Toutefois, là encore, les choses peuvent être moins simples qu'il n'y paraît. Cette technique peut, par exemple, montrer que prendre un médicament donné aide à traiter certains symptômes (histoire de prendre cette fois un exemple «qui marche», considérons l'aspirine et le mal de tête), sans prouver toutefois que c'est bien le médicament lui-même qui a cet effet.

En effet, la guérison est un phénomène complexe dont les conditions sont loin d'être évidentes à contrôler. Il y a, tout d'abord, l'évolution «normale» du symptôme ou de la maladie, faisant que le mal de crâne peut passer de lui-même. Certaines maladies bénignes n'ont aucun besoin d'être traitées (comme le dit l'adage, en prenant des médicaments, un rhume dure sept jours ; sans en prendre, il dure une semaine).

Il peut y avoir, également, l'effet résiduel de traitements pris avant le début de l'étude, et qui n'ont encore terminé leurs effets. Mais il peut y avoir aussi, et surtout, le fait que prendre un traitement, quel qu'il soit, peut suffire à aider le corps à guérir. C'est ce que l'on nomme communément l'«effet placebo», encore que les scientifiques préfèrent parler des *effets contextuels* pour englober tous ces aspects en une seule désignation.

Les mécanismes précis par lesquels l'effet placebo lui-même fonctionne sont encore l'objet d'études importantes (le système dopaminergique semble y jouer un grand rôle, mais, comme pour beaucoup d'autres choses impliquant notre cerveau, nos connaissances sont encore très loin d'être complètes). Cela ne nous empêche cependant pas de bien savoir comment on le provoque et ce qu'on peut en attendre.

Il n'est d'ailleurs pas rare que nos connaissances des effets et des mécanismes soient assez décalées. Dans son livre *Les objets fragiles*, le physicien Pierre-Gilles de Gennes illustre cela en prenant l'exemple de l'encre «de Chine» (dont la recette semblerait en fait provenir de l'Égypte antique).



L'encre de Chine, c'est du noir de fumée (le dépôt qu'une bougie fait sur une plaque de verre tenue au-dessus de sa flamme, par exemple) en suspension dans l'eau. Malheureusement, si on laisse ça en l'état pendant vingt-quatre heures, le noir de fumée forme un dépôt au fond de l'eau et ne sert plus à rien.

Toutefois, si, juste après avoir mis du noir de fumée dans l'eau, on y ajoute un peu de gomme arabique, le mélange reste stable et on peut utiliser l'encre ainsi constituée beaucoup plus longtemps.

Le phénomène qui fait que le noir de fumée forme un dépôt se nomme *coalescence*, et la raison pour laquelle la gomme arabique va l'empêcher d'avoir lieu n'a pu être découverte qu'au siècle dernier, après de gros progrès en chimie ; mais ça n'a pas empêché les gens de l'époque de faire des expérimentations et de montrer que cela fonctionnait. De la même manière, le fait qu'il nous reste de gros progrès à faire dans la compréhension de ce qui se passe exactement dans notre cerveau ne nous empêche pas d'avoir appris beaucoup de choses sur l'effet placebo en l'expérimentant directement.

On sait par exemple que le temps que le médecin consacre à écouter ce qui ne va pas, et l'assurance qu'il a en prescrivant le médicament augmentent considérablement cet effet. Des variations ont également pu être constatées selon la façon dont se prend le médicament (gélule, piqûre, suppositoire...), et selon la forme et la couleur du produit.

En revanche, les caractéristiques propres à la personne qui reçoit le médicament ne semblent pas spécialement influencer : cela marche aussi bien à différents niveaux d'études, par exemple ; ou si l'on est disposé, ou pas, à accepter que l'effet placebo fonctionne.

Notons au passage que cela ne concerne pas uniquement les êtres humains adultes : nos bébés et nos animaux de compagnie sont également doués d'empathie⁴⁹, et l'attention que nous leur portons génère un effet placebo qui peut s'avérer assez important. On sait par ailleurs que des effets contextuels négatifs (on parle notamment d'«effet nocebo») peuvent infliger des souffrances mesurables (et ce sans que cela ne remette en cause la santé mentale des personnes concernées).

Étant donné que des effets contextuels se manifestent toujours, tester un médicament demande donc une procédure légèrement plus spécifique. En effet, si l'on se contentait de demander aux membres de l'un des deux groupes testés de ne pas prendre de médicament du tout, une partie de la différence serait due à ces effets contextuels, ce qui nous empêcherait de savoir exactement quel est l'effet (positif ou négatif) du médicament lui-même.

On va donc donner aux deux groupes deux gélules (ou piqûres, ou autre, selon la forme du médicament), dont l'un est le médicament lui-même, et l'autre une copie ne contenant aucun principe actif. De cette manière, les deux groupes vont subir les mêmes effets contextuels, mais le groupe ayant reçu le faux médicament (on parle de «groupe témoin», ou, par anglicisme, de «groupe contrôle») ne subira que ces effets, tandis que l'autre devrait, si le vrai médicament est efficace, subir un effet supplémentaire, que l'on appelle l'effet *propre* de ce médicament.



Pour des tests plus poussés, on divise parfois le panel de gens en plus de deux groupes : un groupe témoin reçoit toujours un faux mé-

⁴⁹ Concernant les animaux, on peut évoquer l'exemple de *Kluger Hans* («Hans le malin»), un cheval qui était réputé pouvoir, entre autres, effectuer des opérations mathématiques. Des tests menés en aveugle (en lui plaçant des œillères) ont révélé qu'il donnait en fait ses réponses en fonction de l'excitation de son public.

dicament, sans principe actif (un tel produit, dénué d'effet propre, est désigné comme «un placebo» car il ne sert qu'à *plaire* aux malades; c'est ce qui a donné son nom à l'effet), mais les autres reçoivent différents dosages du produit testé, afin d'observer l'évolution de l'efficacité du produit selon combien on en a pris.

Toutefois, cette façon de faire (que l'on désigne par «en aveugle», parce que les personnes testées ne savent pas de quel groupe elles font partie) est ici gêné par notre empathie. Si le médecin qui administre le médicament sait s'il donne un vrai ou un faux médicament, son comportement peut changer légèrement. Lui-même ne s'en rend pas forcément compte; mais les personnes testées peuvent tout de même déceler (même inconsciemment) des indices qui vont changer leur façon de réagir à l'effet placebo, et donc fausser les résultats.

Pour évaluer l'efficacité des médicaments, on recourt donc à un test en *double-aveugle*: les jeux de médicaments, réels et placebo, sont préparés à l'avance par des gens qui ne seront pas en contact avec les personnes testées, et le médecin qui administre le traitement à chacun des groupes ignore lui-même lequel des deux il donne, ce qui l'empêche de se trahir sans le vouloir, et donc de compromettre les résultats.

Pour les cas où l'on craint que l'interprétation des résultats ne puisse être faussée⁵⁰, on peut même avoir recours à une expérimentation en *triple-aveugle*: il s'agit, en plus du reste, de faire relever les résultats et réaliser les calculs qui vont avec par une personne qui ignore elle aussi quel groupe a reçu quel traitement.



⁵⁰ Il arrive, malheureusement, que nous faussions inconsciemment les résultats en faveur de l'hypothèse que nous souhaiterions voir confirmée. On pourra se référer par exemple à l'ouvrage *La Mal-Mesure de l'homme*, de Stephen Jay Gould... en notant que Gould lui-même n'était pas à l'abri de cet effet: il semble ainsi qu'il ait amplifié (quoiqu'assez légèrement) les erreurs relevées chez Morton.

Un tel protocole permet donc de s'assurer convenablement de l'efficacité propre d'un médicament donné, en les isolant des effets contextuels (eux-mêmes positifs ou négatifs). Toutefois, on peut y relever encore un problème: les membres du groupe témoin, malades comme les autres, ne reçoivent aucun véritable traitement pendant toute la durée de l'expérience. Or, les effets contextuels ne suffisent généralement pas pour les guérir (lorsque c'est le cas, chercher des médicaments a moins d'intérêt et les études sont moins nombreuses).

Ce problème n'est pas d'ordre méthodologique, mais *éthique*. La présence d'un groupe témoin est nécessaire pour bien évaluer l'effet du médicament; mais elle conduit à ne pas vraiment soigner des gens. Ou, plutôt, à ne pas les soigner immédiatement: on leur fournit bien sûr un traitement plus efficace si c'est toujours nécessaire une fois l'expérience terminée.

Pour pallier ce problème-ci, il est malheureusement nécessaire de revenir sur ce qui rend notre manière de faire efficace. Pour des cas de cancer, par exemple, où il est *vital* d'apporter des soins aussi vite que possible (faute de quoi, des métastases augmentent encore considérablement les risques), utiliser un placebo serait trop problématique; alors on teste en donnant au groupe témoin un autre médicament (le plus efficace existant jusque là). Cela permet de savoir si le nouveau médicament testé sera plus ou moins efficace, et donc de recommander ou pas son usage, mais sans permettre de quantifier précisément ses effets.

Dans d'autres cas, on va préférer ne simplement pas mener l'expérience, en tout cas directement. Reprenons notre exemple fruitier de tout à l'heure: si l'on observait une corrélation entre manger de la pastèque et quelque chose de plus problématique qu'avoir les cheveux qui poussent plus vite, par exemple faire un infarctus, réaliser le test en demandant à l'un des groupes d'avoir le comportement potentiellement risqué reviendrait à mettre leur vie en danger. Ce serait la manière de faire la plus efficace de montrer une causalité... mais on préférerait tout de même procéder autrement.

Heureusement, comme on l'a vu dans le chapitre précédent, il est possible de démontrer des choses, avec un degré de certitude moindre, mais néanmoins suffisant, en procédant de manière détournée, sans expérimenter directement. Il faut pour cela mettre en relation les observations effectuées avec les informations que l'on a pu expérimenter par ailleurs.

En l'occurrence, pour prouver la nocivité d'un produit de consommation sans directement mettre en danger les personnes testées, on a recours à une combinaison d'études de trois sortes différentes :

- les études observationnelles, qui permettent de mettre en lumière des corrélations sans influencer directement, mais ne sont pas suffisantes pour établir des causalités,
- les expérimentations animales, où l'on expose des animaux (généralement des rongeurs, mais pas que) à la substance, comme on l'aurait fait avec des humains, qui peuvent montrer des effets « en situation réelle », mais ne sont pas forcément généralisables, car ces organismes ne fonctionnent pas exactement comme les nôtres (le chocolat est poison pour les chiens, par exemple),
- les tests *in vitro*, c'est-à-dire réalisés en conditions de laboratoire (mise en contact de cellules prélevées chez un individu avec la substance soupçonnée, par exemple), qui peuvent permettre d'observer des mécanismes envisagés, mais dans des conditions qui, de fait, empêchent une grande partie des réactions d'un organisme aussi complexe que le corps humain d'avoir lieu, alors que ces réactions peuvent avoir une influence assez importante en situation réelle.

La combinaison de résultats concluants donne un dossier suffisamment solide pour conclure à une causalité même sans avoir réalisé l'expérience directement ; C'est ainsi, par exemple, que la nocivité du tabac a été démontrée par un grand nombre d'études tout au long du XX^e siècle.



On pourra toutefois objecter, à raison, que les expérimentations animales posent elles aussi des problèmes éthiques. Est-il préférable de les interdire, pour éviter d'engendrer des souffrances évitables ? La réponse ne dépend pas de la démarche scientifique elle-même, mais de l'encadrement de l'activité scientifique et du *pilotage des sciences*, qui est du domaine de la politique, c'est-à-dire des choix de société. La question mérite donc un débat citoyen.

Si notre société décide, collectivement, d'interdire ces expérimentations, alors il faudra trouver d'autres manières de parvenir à des résultats suffisamment fiables (ce qui est parfois déjà le cas), de la même manière que l'on trouve des moyens détournés de vérifier des hypothèses dans d'autres domaines. Tant que l'on respecte les quatre piliers de la démarche scientifique, les contraintes éthiques que l'on choisit de se donner n'empêchent pas de continuer à faire progresser nos connaissances. Il est donc essentiel de savoir distinguer ce qui relève de la méthode scientifique et ce qui relève du pilotage des sciences.

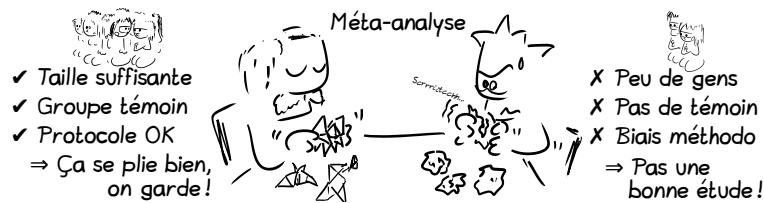
Il reste toutefois un point essentiel à aborder ici : cette manière de procéder fait que les éléments de preuve sont dispersés dans de nombreuses études distinctes⁵¹. Ce n'est pas un problème en soi, au contraire : nous avons déjà vu que, plus les expériences sont reproduites de manière indépendante, plus l'assurance que nous avons dans leurs résultats augmente. De multiples éléments de preuves, tous confirmés par ailleurs et venant de sources très différentes, mais convergeant vers la même conclusion, rendent celle-ci beaucoup plus solide.

Mais cela rend parfois le savoir beaucoup plus difficilement accessible, car tout le monde n'a pas le temps et l'énergie nécessaires à éplucher tout l'« état de l'art » sur chacun des sujets. C'est la raison

⁵¹ Ce qui fait que lorsque l'on demande, comme une désastreuse campagne anti-vaccination l'a fait en 2017, de pointer *une* étude prouvant que quelque chose est ou n'est pas dangereux, cela montre simplement que les personnes qui parlent n'ont pas compris ce dont il est question, ou cherchent intentionnellement à tromper leur public. En l'occurrence, la preuve que les vaccins en question sont sans danger existe... mais elle est morcelée en de très nombreuses études.

pour laquelle des scientifiques se livrent à ce que l'on nomme des *méta-analyses*, des études chargées de passer en revue tout ce qui a été publié sur un sujet donné, d'en vérifier la méthodologie, pour pouvoir en tirer des conclusions générales.

Ces méta-analyses (qui doivent elles-mêmes être vérifiées et reproduites, bien évidemment) constituent donc un élément essentiel de la chaîne de preuve, permet-tant de fixer les contours de l'état actuel des connaissances sur un sujet donné, et de déterminer ce qui reste encore à creuser. Elles permettent, occasionnellement, de mettre en lumière des biais méthodologiques qui invalident certaines études, et parfois de montrer que certains résultats sont faux par le simple fait du hasard (car, si une étude donnée a 5% de chances d'arriver par hasard à un résultat erroné, et que 200 études de ce type sont réalisées, il est normal qu'une dizaine d'études environ arrivent à un tel résultat erroné, sans que cela ne remette en cause la façon de faire).



Il arrive toutefois, malheureusement, que même lorsque plusieurs méta-analyses amènent une conclusion solide, des individus s'entêtent à nier ces résultats, généralement à l'aide d'arguments fallacieux (voire en ne s'embarrassant même pas d'arguments).

Car, hélas, si tout le monde a les yeux mauvais, il y a un certain nombre de gens qui n'ont pas vraiment l'esprit curieux. La démarche scientifique gêne certaines personnes pas vraiment prêtes à accepter que la réalité ne ressemble pas à ce qu'elles ont envie de croire.

Il est vrai que la réalité n'est pas toujours plaisante. Ainsi, dans plusieurs de ses romans, Agatha Christie fait demander à son détective (Poirot ou miss Marple, selon le cas) si les personnes qui viennent

demandeur une enquête sont vraiment prêtes à accepter une vérité qui, parfois, ira dans un sens qu'elles n'attendent pas. Mais si, comme on l'a vu, la démarche scientifique suit les mêmes règles qu'une enquête, la vraie vie n'est toutefois pas comparable à un roman policier.

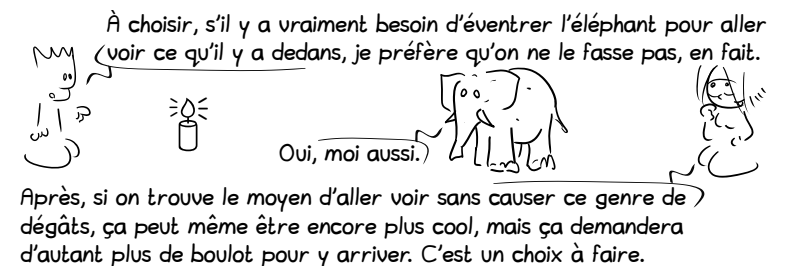
Il se peut que, pour des raisons éthiques ou autres, notre société choisisse de ne pas investiguer certaines questions, parce que nous préférons collectivement ne pas savoir. Cela, aussi, relève du pilotage des sciences, et donc de politique. Mais lorsque nous choisissons de chercher, il est essentiel d'en accepter les résultats, qu'ils nous plaisent ou non. Et, plus important encore, il ne faut pas laisser cela remettre en cause la démarche scientifique dans son ensemble.

Comme l'écrivait Normand Baillargeon (dans *La lueur d'une bougie: citoyenneté et pensée critique*, en 2001):

«Seul, la nuit, dans une vaste et sombre forêt, je ne dispose que d'une petite bougie pour m'éclairer. Survient un inconnu qui me dit: "Souffle ta bougie: tu y verras bien mieux"⁵²»

Cette petite bougie, c'est la raison. Elle est un outil modeste, sans doute, et ne saurait à elle seule résoudre tous nos problèmes mais cette bougie est aussi ce que nous avons de plus précieux.»

Nous allons donc maintenant passer un moment à apprendre à nous défendre contre des obscurantistes de tous poils.



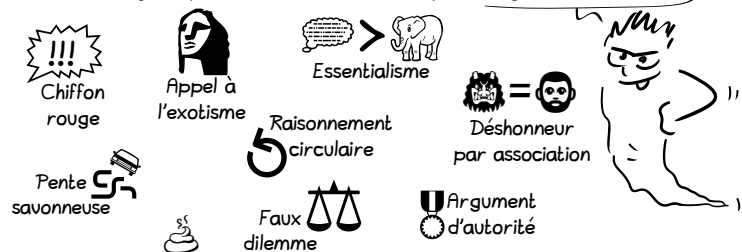
⁵² Notons toutefois que, comme toute analogie, celle de la chandelle dans l'obscurité a ses limites. En l'occurrence, de nuit et par un ciel dégagé, on voit effectivement mieux en coupant tout éclairage (excepté certaines lampes rouges spécialisées) et en laissant nos yeux s'habituer à l'obscurité, donc ce conseil ne serait pas nécessairement mauvais.

Dixième partie : Rester vigilant.e.s

La démarche scientifique permet de faire progresser nos connaissances de manière efficace, quoiqu'assez lente par comparaison à l'immense étendue d'inconnu qui nous environne. Mais cette démarche demande de suivre des règles contraignantes, que sont les quatre piliers : scepticisme, réalisme, matérialisme (méthodologique) et rationalité. Elle demande, en outre, de faire de nombreux efforts : une théorie ne se bâtit pas toute seule, et une expérience en situation contrôlée demande un travail important.

Or, pour diverses raisons, tout le monde n'est pas d'accord pour investir ces efforts pour comprendre le monde, ni à en suivre les règles du jeu. Un certain nombre de personnes ont même intérêt à ce que nous restions dans une obscurité plus ou moins prononcée, et entendent donc nous faire souffler la modeste bougie grâce à laquelle nous nous éclairons. Il ne faudrait cependant pas sombrer dans un excès de soupçon : tous ces gens ne sont pas mal intentionnés. Il y a, bien sûr, quelques cas de charlatanisme avérés, mais aussi, et surtout, énormément de gens qui, de manière tout à fait honnête, pensent savoir des choses qui sont malheureusement fausses, et entreprennent en toute bonne foi de les propager.

Eh, vous ne pensiez quand même pas vous débarrasser si facilement de moi ? Les erreurs de raisonnements, et autres arguments fallacieux, sont une de mes façons préférées de vous tromper, et ça marche bien !

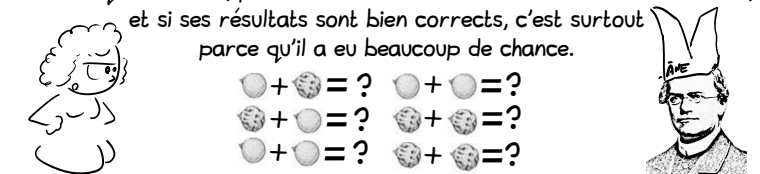


Il faut dire que les règles de la démarche scientifique ne sont pas nécessairement intuitives, et qu'il est aisé de se laisser tromper par tout et n'importe quoi. Ainsi, vous vous êtes peut-être demandé pourquoi la couverture de ce livre présentait, à côté de mon nom, la mention «docteur». Effectivement titulaire d'un doctorat, j'ai toute légitimité à utiliser cette mention, et je pourrais le faire sans y penser. Une thèse en informatique ne me donne pourtant aucune autorité pour parler de biologie, d'astronomie ou de cinéma : si la mention de mon titre vous a paru donner du poids à mes propos, alors je vous ai, d'une certaine manière, induit en erreur. Ce qui ne veut bien sûr pas dire que mes propos sont faux, mais qu'il faut les évaluer pour eux-mêmes et non pas pour la personne qui les tient.

Même quand l'intention est bonne et que l'on prend des précautions, vulgariser, c'est (presque) toujours trop simplifier, et donc dire ou sous-entendre des choses fausses.

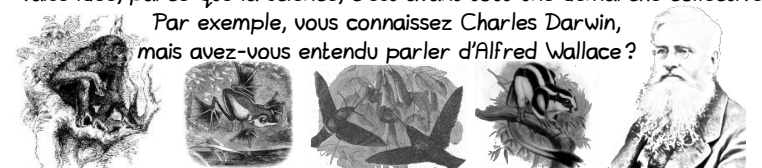


Par exemple, je vous ai dit que les travaux de Mendel avaient été très méthodiques. En fait, pas du tout : Mendel lui-même a très mal travaillé, et si ses résultats sont bien corrects, c'est surtout parce qu'il a eu beaucoup de chance.



(Mais d'autres biologistes ont reproduit ses recherches avec un meilleur protocole expérimental, montrant la validité des « lois de Mendel ».)

D'une manière générale, pointer une liste de « grands noms » de scientifiques (comme je le fais trop souvent ici), c'est généralement une mauvaise idée, parce que la science, c'est avant tout une démarche collective.



Il est considéré comme le « co-découvreur » de l'évolution, étant arrivé, de manière indépendante, à des conclusions très proches de celles de Darwin, à peu près au même moment. Mais quand on n'est pas biologiste, on connaît beaucoup moins son nom.

Il y a aussi plein d'autres gens (en biologie comme dans ailleurs) qui ont aidé à faire avancer les connaissances et qu'on a simplement oubliés. (Cf Clifford Conner, *une histoire populaire des sciences*)



Il faut donc faire attention à ce qu'on lit : même quand c'est bien écrit, c'est toujours fait par des êtres humains, et personne n'a la capacité de faire les choses parfaitement.

Il arrive même à des scientifiques de métier d'oublier les règles de la démarche scientifique et de commettre, en toute bonne foi, des erreurs assez notables. Aussi n'y a-t-il rien de surprenant à ce que des personnes qui n'ont jamais été formées à cette démarche se mettent à accepter pour vraies des choses qui, lorsqu'on les analyse de manière rigoureuse, se révèlent finalement fausses, sans qu'il ne faille pour autant les en blâmer.

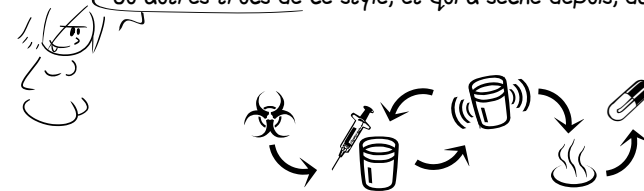
On peut mentionner par exemple le cas des médecines dites "alternatives", comme par exemple l'homéopathie : les médecins qui pratiquent cette discipline voient effectivement leurs malades guérir, du moins la plupart du temps. Si l'on se contente de ce constat sans mener d'évaluations rigoureuses, il est donc tout à fait naturel de se persuader de son efficacité.

Cependant, les nombreux travaux scientifiques réalisés sur le sujet, y compris ceux menés par des homéopathes de métier (ou du moins, qui exerçaient ce métier *avant* d'avoir réalisé ces travaux) comme Fritz Donner⁵³ ou, plus récemment, Natalie Grams, aboutissent tous à la même conclusion : si elle maximise les effets contextuels, ce qui suffit

⁵³ Le cas de Donner est d'autant plus remarquable que ses tests ont lieu alors que les nazis étaient au pouvoir. Or, l'homéopathie étant d'invention allemande, le régime aurait vivement apprécié que l'on démontre sa supériorité (des préjugés nationalistes bien moins extrêmes ont suffi à aveugler des scientifiques dans d'autres contextes, voir notamment le cas de l'Homme de Piltdown). Que les conclusions de cette étude soient négatives, et donc contraires à ses intérêts, mérite donc d'autant plus d'être souligné.

à expliquer ses apparents bons résultats, l'homéopathie *n'a simplement aucun effet propre*. Pour toute maladie suffisamment grave pour que les effets contextuels ne suffisent pas à en venir à bout, se cantonner à un traitement homéopathique revient donc simplement à mettre la vie des malades en danger.

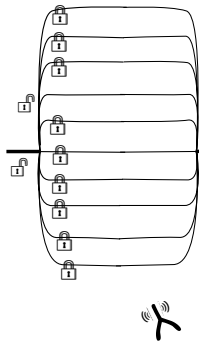
En même temps, une granule homéopathique, c'est du sucre qui a été en contact avec de l'eau qui a été en contact avec de l'eau qui a été en contact avec de l'eau (...) qui a été en contact avec du foie de canard, du béton du mur de Berlin, du venin de serpent (ou autres trucs de ce style, et qui a séché depuis, donc bon...



Malheureusement, face à des faits qui viennent remettre en cause nos croyances, nous avons tendance à privilégier ces dernières, et donc à nier les faits, ou à chercher d'autres raisons de nous conforter dans nos positions erronées. Ce phénomène relève de la notion de *dissonances cognitives*, étudiée en psychologie sociale. Les homéopathes n'échappent pas à cette réaction de défense, et nous reviendrons très bientôt sur l'un de leurs arguments principaux à ce sujet ; mais nous nous contenterons pour l'instant de remarquer qu'il y a beaucoup d'autres domaines concernés.

On peut par exemple mentionner la recherche d'eau, de métaux précieux ou de personnes disparues à l'aide d'instruments comme des baguettes ou un pendule. De nombreux tests ont pu être réalisés, et pour l'instant, dès lors que la méthode était suffisamment rigoureuse, les résultats que l'on obtient sont tout à fait conformes à ce qu'on peut attendre du simple hasard.

Pour tester le pouvoir de détection de l'eau d'un sourcier, un protocole simple est de faire passer dix tuyaux reliés à la même entrée et à la même sortie sous un faux plancher, en les espaçant suffisamment. Chaque tuyau est fermé par une valve. Avant le début de chaque test, une personne ouvre la valve de l'un des tuyaux et ferme les autres.



Cette personne s'éloigne ensuite suffisamment pour garantir le double-aveugle, puis les autres arrivent et ouvrent l'arrivée d'eau. Seul l'un de ces dix tuyaux est donc alimenté, et le sourcier doit déterminer lequel. Il a donc une chance sur dix de ne pas se tromper, et, en pratique, on observe effectivement autour d'une bonne réponse pour dix essais.

Établir de tels protocoles, suffisamment fiables pour tester les prétentions «paranormales»⁵⁴, relève d'un champ disciplinaire que l'on nomme la *zététique*, encore que l'on lui préfère parfois (notamment par anglicisme) le simple terme de *scepticisme*. Il est toutefois important de noter que le principe est bien ici d'être sceptique, c'est-à-dire de douter, et non de poser *a priori* que ces prétentions paranormales sont nécessairement fausses.

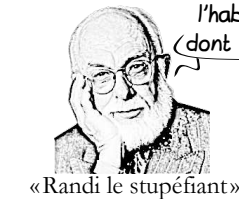
«La zététique est sympathique»: la bienveillance est une nécessité, d'une part parce que l'objectif est –encore et toujours– de comprendre, et non pas de juger; et d'autre part parce que, si la personne en face est dans l'erreur, mais y croit sincèrement, la prendre de haut n'apporte généralement pas grand chose. Malheureusement, certains individus revendiquent un attachement à la zététique tout en affichant un comportement hautain et agressif (montrant parfois au passage que pointer la bêtise des autres n'est pas un gage d'intelligence). Regrettons-le et passons à autre chose.

⁵⁴ Comme souvent, les limites exactes de ce domaine sont floues, mais précisons que la plupart des pseudomédecines relèvent bien du paranormal: elles postulent, sans éléments de preuve, des moyens d'action incompatibles avec nos connaissances actuelles dans de nombreux domaines autres que la santé, comme des «canaux» ou «méridiens» en acupuncture, ou encore une «mémoire de l'eau» en homéopathie. Analyser ces allégations de fonctionnement a cependant peu d'intérêt tant qu'il n'y a aucun effet propre à expliquer.

Si les homéopathes, sourciers, etc. peuvent croire sincèrement en leurs prétentions extraordinaires, d'autres n'ont cependant pas cette possibilité, et sont donc plus vraisemblablement malhonnêtes. C'est le cas des gens qui prétendent tordre les cuillères par le seul pouvoir de leur esprit, ou autres prétentions «parapsychologiques»: la plupart des investigations solides menées jusqu'à présent ont conduit à mettre en évidence des tricheries.

Il s'agit le plus souvent de «trucs» de prestidigitations, et des illusionnistes professionnels ne s'y laissent généralement pas tromper: un certain nombre d'entre eux (comme par exemple Harry Houdini) ont consacré une partie de leur carrière à investiguer des allégations de pouvoirs paranormaux. James Randi, célèbre illusionniste et zététicien américain, a d'ailleurs montré que l'aide de personnes exerçant ce métier était on ne peut plus utile pour ce type de recherches scientifiques.

Nos sens nous trompent, mais pour autant, la nature ne «triche» pas: les scientifiques de métier n'ont pas l'habitude de gérer ça aussi bien que les illusionnistes, dont c'est le boulot et qui ne se laissent donc pas avoir.



«Randi le stupéfiant»

Ça veut dire que ces gens-là sont capables de faire pire que moi ??!



Mais l'investigation zététicienne a un autre objectif, en plus de nous aider à comprendre le monde: elle vise également à nous apprendre à nous protéger, et à protéger la science, contre les détournements problématiques qui en sont faits. Car les prétentions paranormales et autres postures pseudo-scientifiques sont plus dangereuses qu'il n'y paraît.

Si l'on met de côté les enjeux de santé publique liés, par exemple, à l'homéopathie ou aux campagnes anti-vaccination, on pourrait en effet penser que ce type d'allégations n'est pas spécialement problématique. Certes, les personnes qui vendent des livres sur la supposée

origine extraterrestre des agroglyphes ou des pyramides, des grigris «anti-ondes» ou autres, ne font que chercher à s'enrichir sur la crédulité des gens. Il faut bien manger, et les scientifiques aussi peuvent avoir tendance à vendre du papier pour arrondir leurs fins de mois.

La différence fondamentale est que les scientifiques (dans ce rôle, en tout cas ; car leur comportement peut bien sûr changer une fois la blouse rangée au vestiaire) ne font que proposer des éléments de compréhension sur le monde et inviter le reste du monde à y réfléchir, tandis que les “spécialistes” du paranormal entendent dicter aux gens quoi penser.

Si nous souhaitons vivre dans un système démocratique, donc où l'ensemble de la société doit donc contribuer à la chose publique, alors les discours incitant à ne surtout pas réfléchir, et à laisser reposer nos décisions sur des paroles de gourous et sur des données dont on a pu conclure qu'elles étaient fausses, sont un problème majeur.

La science vise à produire des connaissances fiables sur le monde, pas à priver les gens de leur capacité à décider : ses résultats nous indiquent *ce qui est*, mais ne nous indiquent jamais *ce que nous devons faire*. Il est toutefois préférable que ces connaissances soient bien prises en compte dans les décisions.

Revenons en effet sur le cas de l'homéopathie, qui est assez symptomatique. À l'instant où j'écris ces lignes, les produits homéopathiques profitent d'une exception qu'ils sont les seuls à avoir : tous les autres médicaments, pour être autorisés à circuler, doivent obtenir une *autorisation de mise sur le marché*, pour laquelle il faut prouver qu'ils sont efficaces pour ce qu'ils sont censés traiter, et sans danger par ailleurs pour la santé⁵⁵. Les produits homéopathiques n'ont pour leur

⁵⁵ Il arrive malheureusement que cette preuve s'avère fausse, et que certains “médicaments” présentent des problèmes. Ils sont alors retirés du marché dès que l'on s'en rend compte. Ce système n'est donc pas parfait, bien sûr ; mais, globalement, les gens se portent en nettement meilleure santé depuis que la médecine se base sur les connaissances scientifiques. Des progrès restent faisables, mais c'est encourageant.

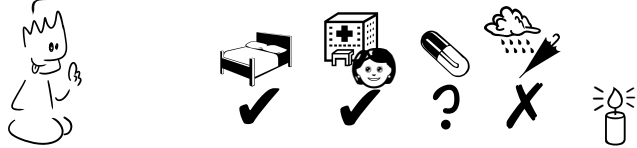
part besoin que de ce dernier aspect, et on ne leur demande simplement pas de prouver leur efficacité.

En outre, ils ont longtemps été partiellement remboursés par la sécurité sociale, ce qui encourageait d'autant les gens à y recourir (cette situation a heureusement pris fin entre la rédaction de ce livre et sa parution). Compte tenu du fait que leur efficacité n'a jamais pu être démontrée au delà des effets contextuels, cette situation est assez problématique. Pour la défendre, toutefois, les homéopathes avancent en particulier que, s'il n'y avait pas leurs produits, les gens auraient tendance à abuser de médicaments classiques qui, eux, peuvent tout de même avoir des effets secondaires gênants.

La surconsommation de médicaments est effectivement un problème : notamment, abuser des antibiotiques favorise la reproduction des bactéries qui y sont résistantes, ce qui tend à diminuer leur efficacité (c'est un exemple de sélection bien connu en biologie). Mais en quoi le fait de remplacer ces médicaments par des produits homéopathiques est-il censé y remédier ? Quelles autres propositions peuvent être envisagées dans ce sens ? Quelles études comparent ces différentes propositions pour chercher à montrer, de manière rigoureuse, laquelle sera la plus efficace ?

Si le problème que l'on considère est bien la surconsommation de médicaments (et non le fait que ces dérogations encouragent à consommer un produit “de santé” inefficace, qui nous intéresse au départ !), alors l'homéopathie n'est qu'une piste de réflexion parmi d'autres pour y remédier. Il convient de l'évaluer au même titre que les autres et de prendre, ensuite, une décision *en connaissance de cause*.

En fait, si les gens consomment trop de médicaments, la solution la plus efficace est peut-être... de leur apprendre à en utiliser moins. Non ?



(Et s'il faut vraiment un placebo, ça peut se fabriquer à la main pour moins cher)

Voilà donc une autre raison majeure pour laquelle nous avons collectivement entrepris cette démarche visant à comprendre le monde : parce que cela nous permet d'acquérir les données en fonction desquelles nous pourrions ensuite forger nos prises de décisions.

Il est donc essentiel de distinguer clairement ce qui relève de la science et ce qui relève du politique. Il est, malheureusement, beaucoup trop fréquent de lire des énoncés disant «La Science dit que ceci, donc nous devons faire cela». Ce n'est jamais aussi évident, et surtout, la logique est fallacieuse.

Un énoncé classique de ce type, par exemple, dit que puisque le verre met quatre mille ans à se décomposer dans la nature, alors nous ne devons pas laisser traîner les bouteilles quand nous rentrons de pique-nique. La première partie de cette phrase est un fait avéré ; la seconde une proposition on ne peut plus raisonnable. Mais il n'y a pourtant aucun lien logique direct entre les deux, et si l'on se limite à ça, la phrase ne tient pas la route.

Ce qu'il faudrait plutôt dire, c'est que *parce que nous voulons pouvoir retrouver l'endroit propre le lendemain, et que* le verre met quatre mille ans à se décomposer, alors nous ne devons pas laisser traîner ces bouteilles. Si notre décision politique était plutôt que nous voulions impérativement laisser des traces aux archéologues du futur, peu importe la propriété présente, alors, utilisant la même donnée scientifique (le temps de décomposition du verre), nous concluons au contraire qu'il serait essentiel de laisser traîner ses bouteilles un peu partout !

Prenons un autre énoncé courant : «il ne faut pas être raciste, parce que la science dit qu'il n'y a pas de races dans l'espèce humaine». Cela signifie-t-il que, si la science avait conclu à l'existence de différences plus marquées qu'elles ne le sont entre différentes populations humaines, cela aurait suffi à justifier l'apartheid et les génocides ? Il existe pourtant bien des sexes⁵⁶, et cela ne suffit pour autant pas à légitimer les discriminations basées sur le *genre*, qui, comme la race des racistes, correspond à une construction sociale qui ne fait que prendre la biologie pour prétexte.

Quand une personne, de quelque bord que ce soit, vient proclamer qu'«il n'y a pas d'alternative» et que la science nous impose telle ou telle prise de décision, son comportement est aussi problématique que celui des personnes qui nient la science pour justifier leurs allégations fausses. La science ne fait que fournir les données, et nous laisse ensuite collectivement la décision. C'est précisément cette indépendance vis-à-vis des conséquences politiques qui permet aux scientifiques de travailler sereinement. Ce qui ne les empêche bien sûr pas de faire partie de cette société, et donc de devoir participer, comme les autres, aux prises de décisions ; mais leurs fonctions dans la recherche ne doit leur donner aucune autorité particulière.

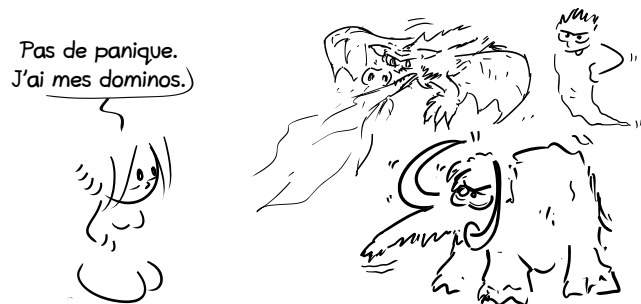
Nous devons, de nos jours, faire face à un grave problème : la science est en danger. Et la menace vient de plusieurs côtés. Il y a, pour commencer, les gens qui n'acceptent pas ses résultats, pour diverses raisons (créationnistes ; climatosceptiques...), et qui entendent imposer leurs idées malgré les faits. Dans de nombreux pays du monde, ces gens ont une importance politique majeure et sont donc en mesure de causer bien des dégâts.

⁵⁶ Encore que leur définition ne soit, elle non plus, pas aussi «évidente» qu'il n'y paraît : il existe plusieurs manières de définir le sexe biologique chez l'être humain, selon que l'on regarde la génétique, la morphologie interne ou externe, les hormones... et ces différentes définitions ne correspondent pas toujours ! Catégoriser peut sembler pratique de prime abord, mais, de plus près, la réalité rentre rarement dans les cases.

Il y a, aussi, tous les gens qui nous trompent, d'une façon ou d'une autre, sur ce que dit la science et comment elle fonctionne. Cela va de ces personnes, dont nous venons de parler, qui prennent ses résultats pour prétexte, dans le but d'imposer des idées politiques sans les expliciter clairement, aux publicitaires de tous poils qui saupoudrent leurs discours de mots-clefs « faisant scientifique », mais qui n'ont rien à faire là (il n'a par exemple jamais été prouvé que l'ADN, végétal ou pas, ait une quelconque efficacité dans une crème pour la peau), ou au contraire jouent sur les peurs (avec la fameuse, et fumeuse, opposition entre « chimique » et « naturel »). Par leur faute, on en vient, jetant le bébé avec l'eau du bain, à se méfier de la démarche scientifique par une association d'idées reposant sur des mensonges.

Et puis il y a, surtout, tous ces gens qui prétendent faire de la science, mais sans en respecter les règles, et dont les discours nous trompent sur ce qu'est, vraiment, la démarche scientifique, en rognant sur l'un ou l'autre de nos quatre piliers qui, nous l'avons vu dans la première partie, sont essentiels pour que l'édifice entier puisse tenir debout.

Il est donc nécessaire que nous apprenions, collectivement, à reconnaître ce qui relève de la science et ce qui n'en relève pas.



Un « dessein intelligent » (ou « conception intelligente », *intelligent design* en anglais), que l'on pourrait mobiliser comme élément explicatif en cas de difficulté expérimentale, s'oppose au matérialisme de méthode et ne respecte pas le principe de parcimonie, car cette hypothèse serait nettement plus coûteuse que la plupart de ce qu'elle entendrait remplacer.

C'est encore le principe de parcimonie qui nous permet d'écarter l'hypothèse de visites extraterrestres pour former des dessins dans les champs de blés ou construire des pyramides, quand il est parfaitement possible de reproduire les mêmes œuvres à l'aide d'outils bien plus rudimentaires et qui ne violent aucune des lois de la physique (pour la construction de monuments, on peut notamment mentionner les travaux de Wally Wallington).

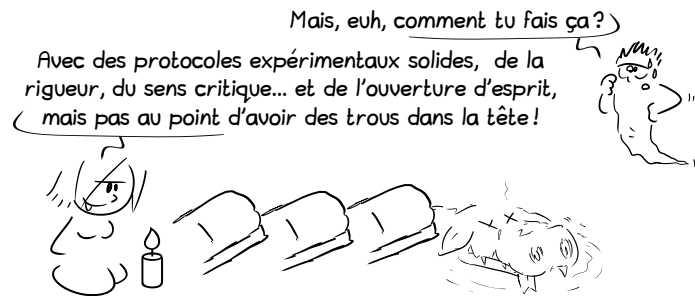
Les pouvoirs médiumniques ou radiesthésiques, dont on nous annonce qu'ils sont un ressenti personnel qu'il serait impossible à mesurer de manière objective, s'opposent donc tout simplement au réalisme. De même que tous les raisonnements, racistes et autres, qui consistent à poser que la réalité doit se conformer à nos catégories mentales plutôt que l'inverse.

Quant au scepticisme, on s'y oppose lorsque l'on refuse toute modification des thèses initiales, alors que le cadre théorique a grandement changé depuis ou lorsque les résultats expérimentaux nous donnent tort (les deux s'appliquent en ce qui concerne l'homéopathie). On s'y oppose plus généralement quand on nie les faits, ou que l'on n'accepte de prendre en compte que ceux qui peuvent être interprétés dans notre sens (stratégies classiques du créationnisme et du climatocépticisme, entre autres).

D'une manière plus fondamentale, toute thèse irréfutable au sens de Popper, c'est-à-dire qui n'autorise pas l'existence d'une expérience pouvant la contredire, et donc se rend impossible à vérifier (comme

c'est le cas de la psychanalyse ou de nombre de scénarios complottistes) échoue par construction à fournir quoi que ce soit d'utile pour comprendre le monde.

Plus fondamentalement encore, il est nécessaire de faire la différence entre ce qui relève du *fait*, c'est-à-dire de l'énoncé objectif vérifiable, de ce qui relève de nos points de vue sur ces faits. Dire que ce livre compte douze chapitres relève du factuel, et est en l'occurrence véridique. Dire qu'il n'est pas illustré relève également du factuel, mais est en l'occurrence faux. Dire qu'il est long, ou court, ou plaisant, ou ennuyeux, en revanche, ne relève que de vos avis personnels⁵⁷.



La zététique a pour rôle de nous fournir cette «hygiène préventive du jugement» dont parlait Jean Rostand (dans *Science fausse et fausses sciences*, 1958), et par là quelques défenses contre les allégations pseudoscientifiques, pour ensuite laisser les autres domaines d'application de la démarche scientifique travailler sur ce qui a de véritables chances d'améliorer nos connaissances objectives.

Pour le reste, il faut garder à l'esprit que c'est notre responsabilité collective de gérer le pilotage des sciences, c'est-à-dire de décider quelles sont les directions prioritaires dans lesquelles la recherche doit s'orienter. Il ne faut en effet pas oublier que la recherche scientifique

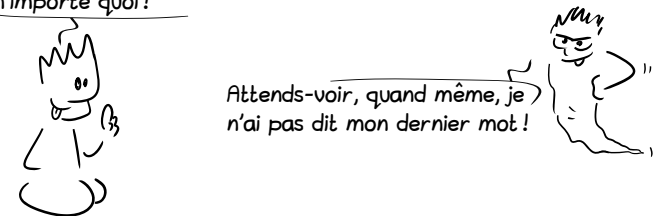
⁵⁷ Il convient toutefois de préciser que c'est rarement aussi simple et caricatural que cela. Dans de nombreux domaines, il est d'ailleurs d'usage de dire que «la donnée n'est jamais donnée», car identifier les faits nécessite déjà du travail. Et s'ils sont vérifiables, encore faut-il les vérifier en pratique, comme nous le rappelle la dent d'or déjà évoquée.

ne roule pas en roue libre, ne serait-ce que parce qu'elle a besoin d'être financée.

Le contexte socio-politique est également particulièrement important. Prenons par exemple l'invention de la bombe atomique : elle a été inventée dans un contexte de guerre, avec une énorme pression, notamment militaire, pour mettre cette arme au point avant les nazis, qui proclamaient être sur le point d'y arriver. Cela ne retire, bien sûr, en rien leur responsabilité personnelle aux personnes, scientifiques y compris, qui ont participé à sa mise au point ; mais une pression et un financement aussi élevés pour des objectifs autrement plus intéressants pour l'avenir de l'humanité pourraient permettre d'arriver à des résultats tout aussi impressionnants.

D'une manière générale, le contexte est particulièrement important à de nombreux niveaux... y compris en ce qui concerne l'esprit critique et l'autodéfense intellectuelle dont nous avons parlé au cours de ce chapitre. Nous allons donc maintenant nous pencher un peu plus spécifiquement sur cette problématique assez particulière.

Face à une affirmation, quelle qu'elle soit, il ne faut pas oublier son esprit critique. D'où vient l'information ? Comment est-elle construite ? Quelles hypothèses ont été testées ? (Est-ce qu'on a pensé à tout ?) Les preuves apportées sont-elles bien à la hauteur de ce qui est affirmé ? (Souvenez-vous, «des affirmations extraordinaires exigent des preuves plus qu'ordinaires»). Bien sûr, on ne va pas mettre en place une étude en double-aveugle pour toute affirmation de la vie courante, mais il ne faut pour autant pas laisser les clefs de notre cerveau à tout et n'importe quoi !



Onzième partie : Contexte et perspective

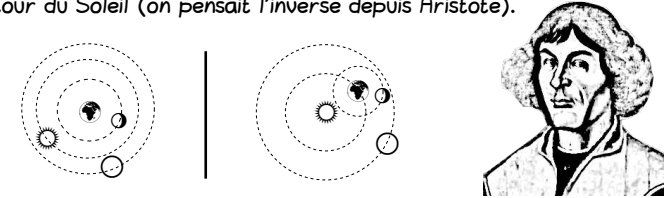
Il est essentiel, comme nous venons de le voir, que nous sachions collectivement identifier ce qui relève de la science et ce qui n'en relève pas : d'une part, lui prêter des conclusions politiques gêne le bon fonctionnement de la démarche, et surtout nous prive de nos prérogatives citoyennes. D'autre part, tricher avec l'un de nos quatre piliers nous amène nécessairement dans le champ des pseudo-sciences. Cela aboutit à des visions du monde faussées, ce qui parfois (dans le cas, par exemple, des pseudo-médecines) peut aller jusqu'à mettre des vies en danger.

Il arrive que les personnes refusant de reconnaître que les thèses qu'elles soutiennent n'ont rien de scientifique évoquent, pour se défendre, le nom de Galilée. Avant d'avoir le rôle dont nous avons déjà parlé dans la découverte de la pression atmosphérique, celui-ci avait, en effet, subi un célèbre procès de la part de l'Église catholique – qui, à l'époque, proclamait que ses textes sacrés primaient sur les résultats de la recherche scientifique.

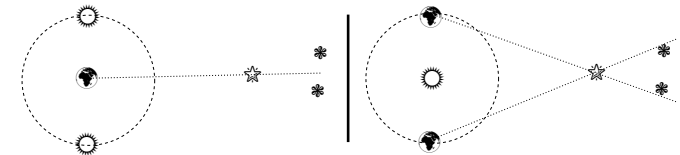
Il y aurait bien des choses à remarquer à propos de cette comparaison, mais cela occuperait trop de place pour tout détailler ici, aussi contentons-nous de deux points : tout d'abord, Galilée risquait le bâcher au cours de ce procès. Fort heureusement, ce genre de châtement se fait rare de nos jours ; et, si dangereuses que soient leurs affirmations, les pseudo-scientifiques ne risquent évidemment rien de tel.

Ensuite, et surtout, bien que la postérité ait retenu que Galilée avait eu raison, les choses, remises dans le contexte de l'époque, étaient en fait beaucoup moins évidentes. Sur la question de savoir qui, de la Terre ou du Soleil, tourne autour de l'autre, Galilée a en fait eu beaucoup plus de chance que de rigueur scientifique.

En 1543 paraît *Des révolutions des sphères célestes*, ouvrage posthume de Nicolas Copernic qui (re)propose l'idée que c'est la Terre qui tournerait autour du Soleil (on pensait l'inverse depuis Aristote).

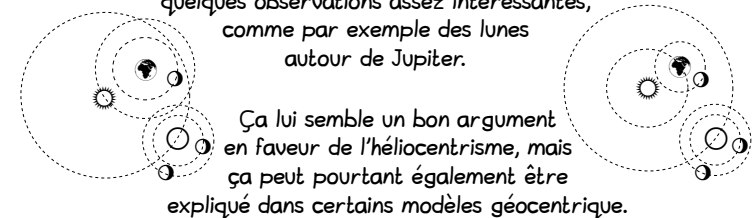


L'idée est intéressante, mais il faut la tester. Si la Terre bouge, alors on devrait pouvoir mesurer un décalage dans la position des étoiles entre l'été et l'hiver (la Terre ayant parcouru la moitié de son orbite)



C'est ce qu'on appelle la parallaxe. L'astronome Tycho Brahe tente l'expérience en 1584 et conclut... que la Terre ne bouge pas. Ses multiples essais n'ont révélé aucun décalage.

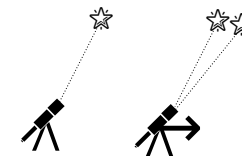
Fin 1609, Galilée pointe une lunette astronomique vers le ciel et fait quelques observations assez intéressantes, comme par exemple des lunes autour de Jupiter.



Ça lui semble un bon argument en faveur de l'héliocentrisme, mais ça peut pourtant également être

expliqué dans certains modèles géocentriques.

Ce n'est qu'en 1729, près d'un siècle après la mort de Galilée, qu'une véritable preuve que la Terre bouge sera apportée, par un phénomène optique inconnu à son époque, appelé « aberration de la lumière ».



Si le télescope bouge, l'angle apparent d'une étoile peut changer. (C'est lié à l'effet Doppler-Fizeau dont on a parlé un peu plus tôt)

(Et il fallut attendre encore 1828 pour que l'expérience de la parallaxe donne un résultat positif : les étoiles sont si loin qu'il fallait fabriquer des instruments beaucoup plus précis)

À l'époque du procès, donc, géocentrisme et héliocentrisme étaient difficiles à départager : le second donnait des explications légèrement plus simples (donc favorisées par le principe de parcimonie), mais les résultats expérimentaux tendaient plutôt vers le premier. En proclamant que la Terre tournait⁵⁸, Galilée manquait donc beaucoup de prudence (ce qui ne justifie pour autant pas le procès).

Vous reconnaissez que vous disiez n'importe quoi, sinon ce sera la torture et le bûcher. On l'a déjà fait à Giordano Bruno il n'y a pas si longtemps !



(Je rajouterais bien « et pourtant, elle tourne », mais si je disais ça, les seules personnes qui pourraient entendre me brûleraient aussitôt, donc je ferais bien mieux de me taire...)

Toutefois, quoiqu'une véritable preuve ne soit arrivée que bien plus tard, l'idée du géocentrisme était alors dans « l'air du temps » et discutée par beaucoup d'autres. On peut notamment mentionner un collègue et ami de Galilée (lequel n'était donc pas « seul contre tous », loin s'en faut), l'astronome allemand Johannes Kepler, qui a corrigé les travaux de Copernic, menant aux descriptions des orbites toujours utilisées de nos jours.

Il faut donc ici distinguer ce qui est arrivé *effectivement* de ce qui aurait pu se produire à l'époque : parce que nous connaissons la suite des

⁵⁸ Et, afin de préciser un peu les choses : en fait, ce n'est pas plus la Terre qui tourne autour du Soleil que l'inverse. C'est le couple Terre-Soleil qui tourne ensemble autour de son centre de masse, et le Soleil bouge donc légèrement aussi. Mais la Terre est de si loin la plus légère des deux que le centre de masse est à l'intérieur du Soleil, qui bouge donc très peu tandis qu'elle fait le plus gros du chemin (Jupiter, beaucoup plus massive que la Terre, le fait pour sa part bouger davantage ; bien qu'elle reste beaucoup moins massive que lui et qu'elle fasse donc elle aussi le gros du trajet).

événements, nous avons tendance à la considérer comme inéluctable. Il faut pourtant, pour bien comprendre les choses, garder à l'esprit que ce n'était qu'une possibilité parmi d'autres. C'est l'un des rappels méthodologiques importants que nous adresse Antoine Prost dans ses *douze leçons sur l'histoire*.

D'une manière plus générale, s'intéresser au passé demande de faire attention à ne pas sombrer dans le piège de l'anachronisme : le travail, en histoire, nécessite de comprendre les points de vue de l'époque étudiée et non d'y plaquer sans discernement notre vision actuelle. Pour autant, des allers-retours entre les deux époques sont nécessaires : notre point de vue présent nous donne un éclairage sur les événements passés grâce, notamment, aux conséquences qui ont suivi, et la connaissance du passé nous permet une meilleure compréhension de certains aspects du présent.

Une difficulté de l'histoire est cependant que remonter aux sources d'une information n'est pas toujours évident. Il y a le fait que les textes datant de la période et du lieu qui nous intéressent peuvent être peu nombreux, bien sûr ; il y a aussi le fait que des détails sont parfois ajoutés en cours de route. Ainsi, la plus ancienne mention retrouvée jusque là du fameux « *E pur si muove!* » attribué à Galilée date d'un tableau peint une dizaine d'années après le procès, où il figure sur un mur de cellule. Il faut attendre le siècle suivant pour qu'un récit le place dans la bouche du savant.

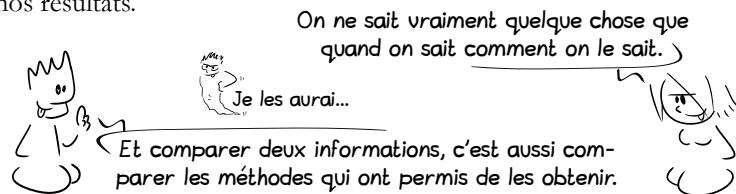
Pour sa part, la célèbre *chanson de Roland*, écrite au XI^e siècle, raconte une campagne de Charlemagne datée de 778, mais sans grande précision historique : les basques y deviennent des sarrasins, et celui qui était alors encore roi (et est représenté glabre ou moustachu sur les monnaies de l'époque) y devient « l'empereur à la barbe fleurie ». Il faut donc prendre garde aux clichés laissés par la postérité, et toujours vérifier la crédibilité des sources.



Les documents utilisés en histoire doivent être datés aussi soigneusement que les fossiles en paléontologie : ce n'est pas parce qu'ils portent une date écrite que celle-ci est nécessairement vraie, et les faux documents ne sont pas une invention récente. Qui plus est, le « fait » historique, comme d'ailleurs celui des autres sciences « humaines », n'est pas toujours aussi évident qu'une trace géologique, loin s'en faut.

Selon la question posée, un même document peut apporter des informations assez diverses qui n'étaient pas son objectif d'origine : les archives fiscales, par exemple, permettent entre autres d'obtenir des informations relatives aux dots et aux mariages. Il faut donc une certaine astuce pour extraire les informations. Ce qui nécessite de montrer d'autant plus d'attention à la méthode par laquelle on les obtient, car il faut pour autant éviter de faire dire n'importe quoi à n'importe quelle « source ».

Prost nous prévient ainsi, dans les deux leçons supplémentaires venues compléter l'ouvrage précédemment cité, que « l'histoire peut être littérature ou science sociale selon ce qu'en font les historiens. Ils la transforment en littérature quand ils se dispensent de méthode, sinon de réflexion sur ces méthodes. » Il en va en fait de même pour toutes les autres sciences : c'est le fait de suivre une méthode stricte qui assure la vraisemblance de nos conclusions et permet de corriger nos résultats.



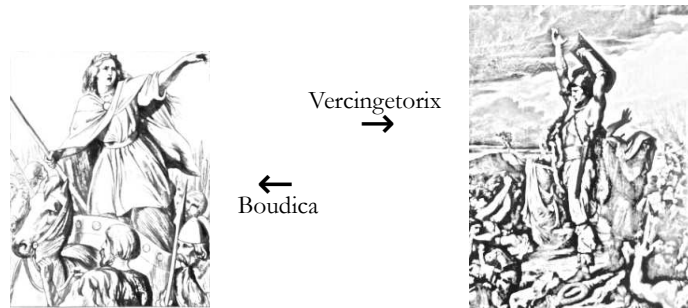
Il faut, de plus, prendre en compte le fait que les points de vue peuvent changer radicalement avec le temps et les circonstances.

Mentionnons pour exemple « nos ancêtres, les gaulois ». Cette ascendance⁵⁹ a paru évidente tout au long du XX^e siècle, et l'est peut-être encore de nos jours pour pas mal de monde : elle participe à fonder l'idée d'un *roman national*, d'une identité française qui remonterait presque à « la nuit des temps ».

Cela n'a pourtant pas toujours été ainsi : durant l'Ancien Régime, la noblesse s'estimait descendre soit des Francs, soit de Rome, et l'identité française ne pouvait rien avoir de commun avec celle de ces « barbares » chevelus qui occupaient auparavant les lieux. Le recours aux gaulois a commencé aux alentours de la période révolutionnaire, au moment où le tiers-état (qui était, lui, perçu comme descendant des gaulois) a commencé à jouer un rôle majeur dans l'idée qu'on se faisait de la nation française. Sylvain Venayre nous raconte l'évolution de cette perception dans *Les origines de la France : quand les historiens racontaient la nation*.

Retenons au moins que ni les uns ni les autres n'étaient spécifiquement « français » : Clovis et Charlemagne ont autant d'importance dans l'histoire allemande que dans la nôtre, et ce n'est qu'à la toute fin du XII^e siècle que Philippe II « Auguste » commence à utiliser le titre de « roi de France » plutôt que celui de « roi des Francs ». D'ailleurs, si nous avons pioché, dans les écrits de Cæsar, un Vercingétorix qui n'y était que d'une importance assez mineure pour en faire le héros d'une épique résistance, d'autres personnages tout à fait similaires peuplent les légendes des autres pays situés sur d'anciens territoires celtes (dont « les Gaules », au pluriel dans la vision romaine des choses, faisaient partie). Ces territoires celtes n'ont d'ailleurs, à l'époque, jamais formé une nation au sens moderne, mais seulement un ensemble de cités indépendantes.

⁵⁹ Nous parlons ici d'une ascendance « idéologique », mais il est intéressant de mentionner également la généalogie. À ce titre, gaulois, romains et francs sont autant nos ancêtres les uns que les autres : statistiquement parlant, toute personne ayant vécu en Europe à l'époque de Charlemagne ou plus tôt, et ayant eu des enfants, se retrouve dans l'arbre généalogique d'à peu près tout le monde en Europe à notre époque. Un épisode de *DirtyBiology* intitulé *Vous êtes de sang royal* détaille ce point.



Notons que l'histoire et l'archéologie, comme les autres sciences, n'échappent pas à leur lot d'opposition idéologique. Ainsi, le lieu de la célèbre bataille d'Alésia a été sujet à de grands débats et, quoi que sa position ne fasse plus de doute d'un point de vue scientifique, des hypothèses alternatives plus ou moins fantaisistes continuent de faire parfois parler d'elles.

Pourquoi de telles persistances ? Sans doute parce que les connaissances scientifiques sont souvent davantage que de simples « données » : elles sont ce qui nous permet d'appréhender la réalité⁶⁰. L'image mentale que nous nous construisons du monde en dépend, et, à ce titre, accepter une théorie scientifique nouvelle (si prouvée soit-elle pour mériter ce titre) peut s'avérer délicat, car cela nécessite de remettre en cause beaucoup de choses.

Nous rejoignons ici la notion de *paradigmes*, théorisée en particulier par Thomas Kuhn. Un paradigme scientifique, selon Kuhn, regroupe à la fois la théorie scientifique actuellement utilisée (donc les faits connus et leurs interprétations), les questions qui restent à résoudre, et la pratique méthodologique qui les accompagne (comment les questions doivent être posées et comment interpréter les résultats).

⁶⁰ Et le passage du temps n'est pas sans avoir une influence assez notable. Ainsi, pour juger de l'état « normal » d'un coin de nature, on se réfère à ce que l'on a personnellement connu, et non à ce que pouvaient connaître nos parents ou nos grands parents, qui pouvait être assez différent. Un autre épisode de *DirtyBiology*, collaboration avec la chaîne *C'est une autre histoire*, traite de ce sujet, *l'amnésie écologique*.

Les personnes qui adhèrent aux pseudo-sciences de toute sorte ont en fait leurs propres paradigmes : leurs méthodes sont plus facilement prises en défaut que celles qui respectent les règles de la démarche scientifique ; néanmoins, la vision du monde qui en résulte reste suffisamment cohérente pour que passer à une vision plus solide des choses soit une étape difficile. Pour quelqu'un qui a passé toute sa vie dans un paradigme selon lequel le Soleil tourne autour de la Terre, ou selon lequel l'identité de la France date de l'époque des celtes ou des francs, accepter qu'il en soit autrement peut demander une remise en cause assez profonde.

Thomas Kuhn s'intéresse précisément à la façon dont on passe d'un paradigme à l'autre, mais dans le cas où les deux paradigmes sont bien scientifiques. Il vient ici corriger les travaux de Karl Popper sur la réfutabilité évoqués précédemment : pour Popper, lorsqu'une théorie se retrouve finalement réfutée par une nouvelle expérience, elle est abandonnée aussitôt. Kuhn fait remarquer que ce n'est pas le cas : la théorie, même réfutée, reste en place tant qu'elle n'a pas été *remplacée*.

Ainsi, la théorie de la relativité générale et la théorie quantique forment l'état le plus avancé des connaissances actuelles dans le domaine de la physique. Pour autant, ces deux théories sont strictement incompatibles : dès lors que nous avons besoin de recourir aux deux en même temps, nos équations ne fonctionnent plus. Cette incompatibilité est, en pratique, une réfutation : si elles ne peuvent être simultanément vraies, alors il faut bien que l'une au moins des deux soit fausse. Néanmoins, nous continuons de les utiliser, faute d'avoir mis au point pour l'instant la nouvelle théorie qui résoudra cette incompatibilité.

On pourrait ainsi résumer la situation, comme l'un des personnages de Jules Verne dans *Voyage au centre de la Terre*, en disant que « la science, mon garçon, est faite d'erreurs, mais d'erreurs qu'il est bon de commettre, car elles mènent peu à peu à la vérité. » Cette phrase laisse cependant entendre un progrès plus ou moins direct.

Or, comme nous l'avons déjà vu, des régressions sont parfois possibles sur certains points. Et surtout, chaque étape n'est pas nécessairement dans la continuité de ce qui précède: deux paradigmes différents peuvent nécessiter des manières d'envisager les choses tellement différentes que dire que l'un vient corriger l'autre n'a pas grand sens. C'est ce que Kuhn appelle *incommensurabilité*.

Il désigne d'ailleurs le passage d'un paradigme à l'autre comme étant une situation de crise, parlant de sciences «normales» tant que le paradigme actuel n'est pas remis en cause, et de sciences «révolutionnaires» au moment du changement. On peut effectivement considérer le passage du géocentrisme à l'héliocentrisme, ou, plus récemment, la remise en cause des principes de Newton au début du siècle dernier comme des «révolutions scientifiques», étant donné l'ampleur des changements en peu de temps.

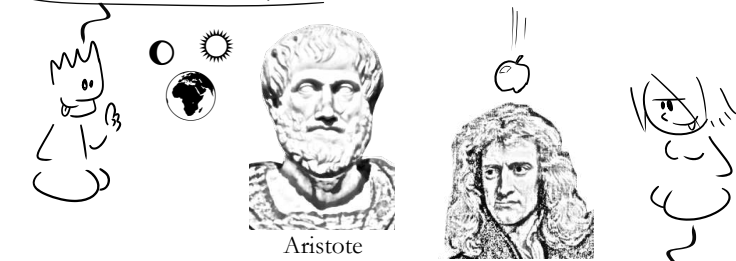
Pour autant, la crise n'est pas toujours particulièrement perceptible. La distanciation vis-à-vis de la théorie *synthétique* de l'évolution, dont nous avons déjà parlé, relève d'un changement de paradigme, sans qu'il n'y ait de situation aussi révolutionnaire que celles que Kuhn a étudiées. Pourquoi cette différence? On peut supposer⁶¹ que le rapport à l'erreur particulier de la biologie y a une certaine importance: comme nous l'avons vu, il s'agit d'un domaine où des faits nouveaux viennent très fréquemment remettre en cause les connaissances précédentes. Il se peut que cette habitude de la remise en cause puisse faciliter jusqu'aux changements de paradigmes.

N'oublions donc pas le scepticisme essentiel à la démarche scientifique. Il se peut également que la gymnastique mentale propre à

⁶¹ Notons bien que ce n'est qu'une hypothèse: il faudrait des travaux dédiés (en sociologie des sciences, notamment) pour la vérifier. À l'inverse, on peut se demander pourquoi la méthode scientifique telle qu'on la pratique actuellement s'est développée principalement en Europe et sur une période de temps somme toute assez réduite. On peut supposer ici qu'il s'agit d'une réponse au dogmatisme religieux particulier qu'on y rencontrait, rendant nécessaire des méthodes d'autant plus solides pour appréhender le réel et se mettre d'accord sur les conclusions obtenues. J'avoue cependant ignorer si des travaux spécifiques ont été menés sur ces questions.

l'histoire, et plus particulièrement à l'histoire des sciences, soit d'une grande aide: prendre la peine d'étudier d'autres paradigmes et arriver à les comprendre et à passer de l'un à l'autre peut assurément aider à accepter l'idée que nous pourrions peut-être être amenés à en changer ultérieurement.

Au fait, pourquoi Aristote a-t-il conclu que la Terre était au centre de l'univers? Tout simplement parce que tout objet lourd a tendance à tomber. Or, la Terre a l'air particulièrement lourde, mais nous ne la sentons pas tomber. C'est donc qu'elle a déjà dû finir par arriver à l'endroit le plus stable, donc au centre, non?

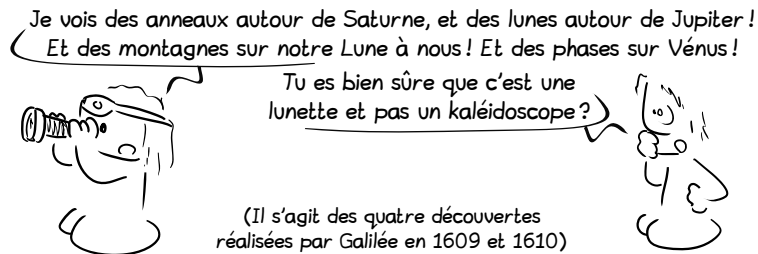


D'après les connaissances de l'époque, c'était logique de supposer ça. Il fallait les travaux de Newton pour pouvoir comprendre que si la pomme tombe, c'est que c'est la Terre qui l'attire, et que l'explication d'Aristote ne marche donc pas.

Il est également nécessaire de prendre conscience des limites de nos paradigmes actuels. Revenons pour cela sur les deux grandes difficultés expérimentales évoquées au chapitre quatre. La première est la nécessité de recourir à la médiation d'instruments – comme des accélérateurs de particules – pour obtenir les données dans les sciences «de la matière». Outre le problème, déjà évoqué, de la nécessité d'avoir un tel instrument pour travailler, il faut également accepter que ce que nous affichent ces instruments correspond bien à la réalité.

Cela nous paraît suffisamment évident de nos jours – car nous avons intégré les paradigmes correspondants. Ça ne va pour autant pas nécessairement de soi. Ainsi, l'une des premières grandes critiques adressée aux observations de Galilée était que rien ne garantissait que

ce qui n'était visible qu'à l'aide d'une lunette existait bien réellement: avant de réfléchir à la façon dont on pouvait interpréter la découverte des lunes de Jupiter d'un point de vue hélio- ou géo-centrique, il fallait d'abord accepter l'idée que ces quatre lunes étaient bien de véritables objets du ciel.



Andreas Osiander, en éditant le livre de Copernic mentionné précédemment, avait jugé préférable d'ajouter en préface une précaution vis-à-vis des thèses de l'astronome qu'il pourrait être intéressant de reprendre concernant la science en général: nous ne pouvons pas formellement prétendre que nos modèles décrivent véritablement la façon dont la réalité se comporte⁶². Tout ce que nous pouvons dire, c'est que ces modèles sont, en l'état actuel des connaissances, ce qui nous permet de prédire et de rendre compte de ce comportement de la manière la plus précise.

De la même manière, nous pouvons revenir sur l'affirmation de Galilée, déjà mentionnée, selon laquelle «le monde est écrit en langue mathématique»: cela suppose que le monde a besoin des mathématiques pour exister. Nous pouvons tout aussi bien considérer, ce qui revient au même, que les mathématiques sont le langage dont nous nous dotons pour comprendre un monde qui existe de toute façon, indépendamment d'elles.

⁶² Cela rejoint d'ailleurs ce fameux «anti-réalisme» philosophique évoqué rapidement au chapitre deux. L'idée en est que, chaque fois jusque là que l'on a cru que nos modèles décrivaient le véritable comportement de la nature, on a fini par se rendre compte que ce n'était pas le cas: il n'y a donc pas de raisons de penser que nos modèles actuels, quoique plus précis, soient plus fiables à ce niveau. Cela ne remet pas en cause l'existence d'un monde matériel, et reste donc un réalisme au sens utilisé ici.

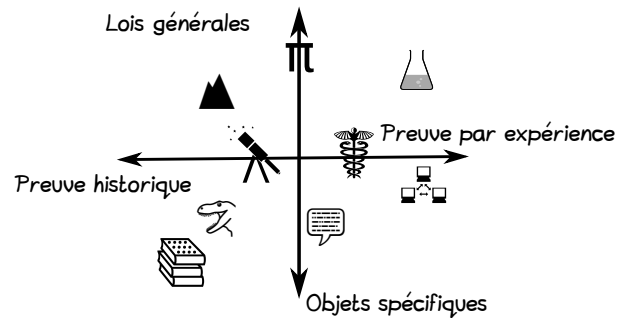
Comme nous l'avons déjà évoqué à propos du principe de parcimonie: la nature n'est ni logique, ni rationnelle (pas plus d'ailleurs qu'illogique ou irrationnelle). La nature est ce qui est à expliquer, et ce sont nos explications qui doivent suivre les règles que nous détaillons dans ce livre.

À l'opposé, la difficulté expérimentale faisant qu'il est assez difficile d'«appuyer» précisément de la manière qui convient pour ne provoquer que la réaction que l'on souhaite observer est elle aussi bien plus importante que ce que l'on pourrait croire. Nous avons évoqué, concernant les questionnaires, l'importance de la formulation utilisée et des réponses proposées. Mais il faut également noter que le seul fait de poser une question a déjà une certaine influence.

Se demander, par exemple, si l'identité nationale de la France remonte aux Gaulois, à Rome ou aux Francs (ou même à Philippe Auguste) revient déjà à poser que cette identité nationale se transmet malgré des changements assez considérables d'une époque à l'autre. Plus encore: cela revient à poser qu'il existe une identité nationale identifiable, ce qui est déjà un implicite qui ne va pourtant pas forcément de soi sans cette question.

Cela ne concerne d'ailleurs pas que les sciences sociales: ainsi, l'historien des sciences Rafael Mandressi nous montre, dans son ouvrage *Le regard de l'anatomiste*, la façon dont le corps humain a été «inventé», au sens où la connaissance que nous en avons ne dépend pas seulement des progrès que nous avons fait dans son étude, mais également des changements de point de vue à son sujet qui ont rendu cette étude envisageable.

Nous l'avons déjà rapidement envisagé, mais la distinction même entre «sciences dures» (ou quel que soit le qualificatif qu'on peut leur donner) d'un côté et «sciences humaines» de l'autre est également une découpe qui peut être remise en question, dans la mesure où les méthodes utilisées en pratique, par exemple, peuvent amener à une toute autre classification de l'activité scientifique.



Légende :

Astronomie Chimie Analyse qualitative Médecine Maths
 Histoire Informatique Géologie Classification du vivant

Il faut surtout veiller à ne pas oublier que nous sommes susceptibles d'accepter beaucoup de choses fausses, pour peu que le contexte nous y incite. Kepler, par exemple, comme la plupart des astronomes de son temps, était également astrologue (Galilée fut l'un des premiers à vouloir séparer ces deux activités). Si Houdini a jugé utile de consacrer une partie de sa carrière à démasquer les charlatans, c'est parce qu'un certain nombre de ses contemporains, y compris parmi les personnes de formation scientifique (comme Alfred Wallace ou Arthur Conan Doyle⁶³), avaient tendance à se laisser abuser par le spiritisme en vogue à l'époque.

En fait, et c'est là un aspect fondamental, nous avons tendance à accepter beaucoup trop facilement ce qui semble à première vue cohérent avec ce que l'on considérait déjà comme vrai. Il s'agit du *biais de confirmation*, l'un des biais cognitifs les plus importants et les plus durs à éviter.

⁶³ Doyle n'était en effet pas aussi perspicace que son plus célèbre personnage. Notons d'ailleurs que l'un des grands principes du détective doit en fait être manié avec des pincettes : effectivement, «lorsque l'on a éliminé l'impossible, ce qui reste, si improbable que ça paraisse, doit bien être la vérité». Il faut néanmoins s'assurer d'avoir bien éliminé tout ce qui était impossible avant de conclure, ce qui est généralement très loin d'être une mince affaire. L'autre grand principe, cependant, est plus important à garder en mémoire, mais nous y reviendrons dans le chapitre suivant.

C'est une tendance très naturelle de favoriser les lectures qui vont dans notre sens. Ainsi, une personne «de gauche» a généralement tendance à éviter la presse «de droite», et réciproquement. Cela présente cependant deux inconvénients majeurs : d'une part, éviter de se confronter au point de vue adverse fait qu'on peut assez facilement en avoir une vision déformée, caricaturale. On sombre alors aisément dans le travers de l'«homme de paille», exemple bien connu de logique fallacieuse qui fait que les critiques qu'on adresse à l'autre point de vue ont peu de chances de fonctionner. Il serait, au contraire, préférable de s'intéresser suffisamment aux positions adverses pour s'assurer d'être en désaccord *en connaissance de cause*.

D'autre part, le manque d'exposition aux points de vue opposés fait que l'on perd de vue le fait que le nôtre ne va pas forcément de soi et n'est pas nécessairement partagé unanimement. On devient ainsi vulnérable aux manipulations, volontaires ou non, exercées par les gens qui ont des avis proches du nôtre : ce n'est malheureusement pas parce qu'un propos nous plaît qu'il est nécessairement vrai.

Cette tendance, appelée couramment «effet bulle», est d'ailleurs renforcée par certains des outils de communication que nous utilisons. Nous allons donc terminer ce tour d'horizon de la démarche scientifique en nous penchant sur un domaine qui a beaucoup d'importance sur cet aspect : l'informatique.

Le consensus scientifique est, à un moment donné, le plus haut degré de certitude que peut atteindre la connaissance humaine. Ça ne veut pour autant pas dire que c'est une vérité absolue et définitive.



Thomas Kuhn

(Même si certains morceaux ont très peu de chances de bouger...)

Et méfiez-vous du biais de confirmation : j'utilise ça tout le temps, et c'est très efficace pour vous faire gober des tas et des tas de mensonges !



Douzième partie : Partager le savoir

Le terme «informatique» désigne le «traitement automatique de l'information». Ce domaine scientifique a un statut assez particulier, comparable à celui des mathématiques, dans la mesure où les personnes qui travaillent dans un autre domaine le perçoivent généralement comme un outil qui peut être mis au service de leurs propres recherches. C'est effectivement le cas, et l'informatique appliquée à d'autres domaines y a permis des progrès assez notables. Pour autant, et comme pour les mathématiques, l'informatique «pure» est également un domaine de recherche à part entière, et à ce titre, une part de l'activité scientifique.

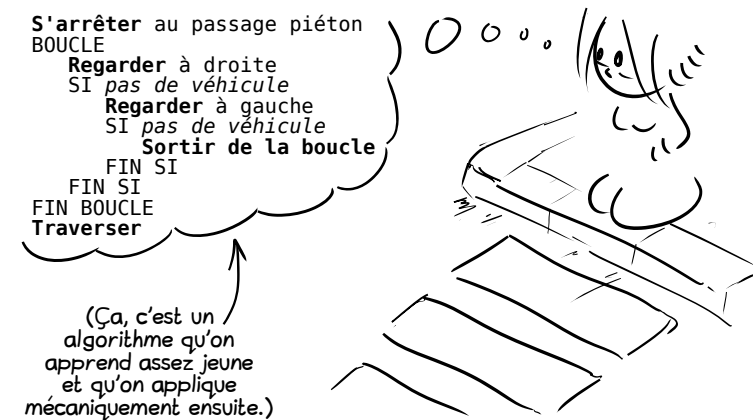
Il s'agit de la science du traitement de l'information, dont on a coutume de dire qu'elle est autant la «science des ordinateurs» que l'astronomie est la «science des télescopes». L'un de ses concepts importants est ainsi celui d'*algorithme*, qui est beaucoup plus ancien que nos ordinateurs – le mot «algorithme» lui-même est une déformation du nom d'*Al-Khwārizmī*, un mathématicien perse⁶⁴ du IX^e siècle.

Un algorithme est une suite d'opérations visant à obtenir un résultat à partir de données d'entrée. En quelque sorte, un algorithme est à un programme informatique ce qu'une mélodie est à un morceau de musique. L'*algorithmique*, qui est une branche de l'informatique, vise notamment à déterminer quels problèmes peuvent ou ne peuvent pas être résolus à l'aide d'algorithmes. Elle étudie également la *complexité*

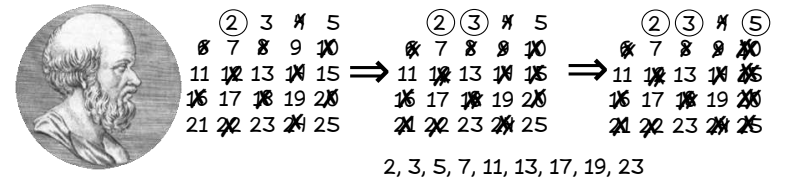
⁶⁴ La plupart des noms que j'ai mentionnés dans ce livre était ceux de scientifiques européens, mais ce n'est pas pour autant qu'il n'y a eu de science qu'en Europe. Ainsi, au cours de notre moyen-âge, le monde arabe (au sens large) disposait d'une certaine avance dans plusieurs domaines de recherche, dont en particulier les mathématiques, la médecine, et l'astronomie.

Un certain nombre des progrès que nous avons faits par la suite –jusque dans la méthode elle-même : Roger Bacon, par exemple, s'est basé sur les travaux d'Alhazen pour mettre au point la sienne – sont dus aux scientifiques arabes et perses.

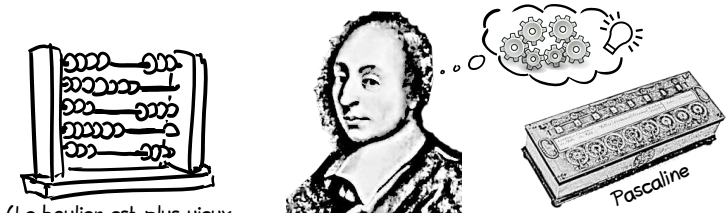
de ces algorithmes, c'est-à-dire les ressources en temps et en mémoire qui seront nécessaires à les dérouler jusqu'à leur terme pour obtenir des résultats.



Des algorithmes, ça fait très longtemps qu'on en utilise. On peut par exemple parler du crible d'Ératosthène (le même savant qui avait calculé la circonférence de la Terre), qui sert à identifier des nombres premiers.



Un peu plus récemment, on a cherché à fabriquer des machines capables de calculer mécaniquement. Blaise Pascal, dont on a déjà parlé aussi, en a inventé une dès 1642, qu'on a appelée la «pascaline».

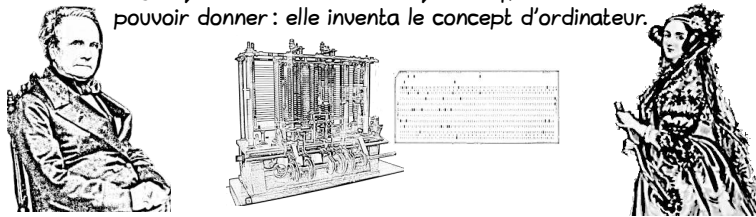


(Le boulanger est plus vieux et s'actionne à la main, mais le principe est grosso-modo le même.)

Notons d'ailleurs, puisque nous venons d'évoquer les notions de paradigmes et de rapport aux outils, que la fin du moyen-âge et surtout la renaissance ont connu une période assez longue de querelle sur la meilleure manière de compter: elle opposait les «abacistes», qui utilisaient des abaques (il s'agit du terme générique pour désigner les outils aidant à calculer, comme le boulier ou le *soroban* japonais), aux «algoristes», qui utilisaient des procédures algorithmiques.

Mais venons-en à l'invention de l'informatique moderne, qui demande des capacités que n'ont pas ces «simples» machines à calculer, qu'elles soient manuelles ou automatiques.

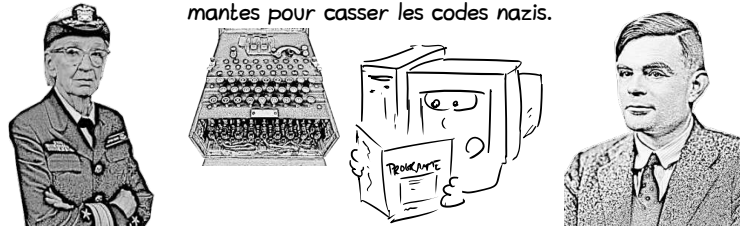
Charles Babbage, mathématicien anglais, passa une bonne partie de sa vie à travailler sur une machine à calculer de ce type, qu'il eut l'idée de rendre programmable. Mais c'est surtout Ada Lovelace, collaboratrice de Babbage, qui eut l'intuition de ce que ce type de machines allait pouvoir donner: elle inventa le concept d'ordinateur.



On était encore au XIX^e siècle: il s'agissait d'une machine entièrement mécanique, que l'on programmait à l'aide de cartes perforées, comme c'était le cas des métiers à tisser de l'époque.

(En vrai, on a gardé les cartes perforées longtemps, même avec le numérique)

C'est au cours de la seconde guerre mondiale que l'ordinateur numérique a été inventé: il y avait besoin de machines à calculer bien plus performantes pour casser les codes nazis.



Parmi les gens qui ont travaillé sur ces premiers ordinateurs, on trouve entre autres Grace Hopper, dans l'U.S. Navy, ou encore Alan Turing, dans la marine britannique.

En 1843 paraît un mémoire commenté sur la *machine analytique* conçue par Charles Babbage, dans lequel on trouve, sous la plume d'Ada Lovelace, le tout premier *programme informatique* de notre histoire. Alors que son collaborateur ne percevait encore ce sur quoi il travaillait que comme un simple outil de calcul perfectionné, Lovelace écrit par exemple que «la machine pourrait composer de manière scientifique et élaborée des morceaux de musique de n'importe quelle longueur ou degré de complexité.»

Bien que cette machine n'ait jamais dépassé le stade de prototype, les intuitions de Lovelace se virent confirmées au siècle suivant par l'avènement de l'ordinateur numérique. Alan Turing y est pour beaucoup: durant sa thèse de doctorat dédiée au problème de la calculabilité, il invente en 1936 le concept de «machine universelle» (que l'on appelle, depuis, «machine de Turing»), un modèle abstrait de traitement des algorithmes, dont nos ordinateurs reproduisent le fonctionnement.



Une machine de Turing peut être représentée à l'aide d'un ruban (supposé infini) sur lequel on vient lire et écrire des informations en fonction d'une table d'actions. Cela peut correspondre à un ordinateur exécutant un programme... ou à un être humain suivant une liste de règles précises.

Turing est d'abord un mathématicien, et ses premiers articles sont publiés comme parlant de mathématiques. Ce n'est que progressivement que les deux domaines disciplinaires vont se séparer –jusqu'à être, de nos jours, deux sections distinctes dans nos universités, avec notamment des régimes de preuve pouvant être assez différents (raisonnement pur ou expérience).

Ce n'est pas la première fois qu'une telle chose arrive: dans son *Discours sur deux sciences nouvelles*, en 1636, Galilée avait montré comment l'étude de la résistance des matériaux et celle des mouvements (que l'on appelle la *mécanique*) devenaient deux domaines distincts, qui se détachaient donc de ce qui était jusqu'alors une seule discipline, la

physique aristotélicienne. Cela nous montre, une nouvelle fois, que la science est une démarche générale dont la découpe entre les différents domaines est une question de spécialité des gens qui la pratiquent, et non de nature.

L'algorithme n'est cependant pas le seul concept important de la science informatique. On peut également mentionner les concepts, complémentaires entre eux, de *données* et de *requêtes*. Les premières sont les informations que l'on veut pouvoir retrouver, éventuellement à partir de sources diverses, quand les secondes sont la façon dont nous exprimons quelles données nous voulons précisément obtenir.

Depuis l'invention du disque dur en 1956, les travaux se sont en premier lieu dirigés vers la façon de stocker les données de manière à pouvoir être récupérées efficacement. On a ainsi vu apparaître des *bases de données relationnelles*, disposant d'une algèbre spécifique. Plus récemment, compte tenu de l'évolution du paysage informatique, un autre aspect a pris une considérable importance : celui de la *fouille de données*, l'extraction d'informations à partir de sources de données diverses, pouvant être nombreuses, et qui ne sont pas nécessairement bien structurées.

Parallèlement, le travail sur les requêtes s'est d'abord intéressé à la façon dont on pouvait, mathématiquement, optimiser leurs traitements (par exemple par des mécanismes comme celui de *réécritures équivalentes*, permettant, à partir d'une requête donnée, d'en trouver une seconde qui donnera rigoureusement les mêmes résultats, mais de façon plus simple à calculer). Mais on s'est également orienté vers l'étude des requêtes elles-mêmes, et de ce qu'elles disent sur les personnes qui les expriment.

Ce dernier aspect est la base de tout outil de recommandation : connaissant les derniers livres que vous avez achetés et les habitudes d'achats d'un grand nombre d'autres gens, par exemple, on peut vous proposer d'autres livres qui seraient susceptibles de vous plaire. Ce

mécanisme est loin d'être mauvais en soi, mais son utilisation massive tend à augmenter considérablement « l'effet bulle » dont nous parlions au chapitre précédent, et les risques de manipulation liés aux biais de confirmation.

Cela devient particulièrement préoccupant lorsque c'est utilisé à l'échelle que peuvent prendre des entreprises géantes telles que Google ou Facebook. Leur modèle de financement repose en effet sur la publicité, et, à ce titre, elles ont intérêt à nous faire rester aussi longtemps que possible sur les sites sur lesquels elles l'affichent. Le mécanisme de ciblage est donc utilisé massivement, alimenté par les très nombreuses données que ces entreprises sont capables de récupérer sur nous par, entre autres, les multiples boutons de partage que l'on croise un peu partout.

Chaque fois que la page sur laquelle vous êtes contient (par exemple) l'un de ces boutons, vous faites tourner un petit bout de code dans un ordinateur distant qui note que vous avez visité la page en question.



Ça permet de savoir quelles pages vous visitez (et éventuellement combien de temps vous y restez), et, grâce aux progrès en fouille de données et en analyse de requêtes, d'affiner les suggestions qui vous seront faites la prochaine fois que vous irez sur le site ciblé.

L'ampleur est d'autant plus importante que ces sites sont la source d'information principale de beaucoup de gens. Les personnes quelque peu sensibles aux discours pseudo-scientifiques vont donc aisément glisser dans une « bulle » ne leur livrant que cet aspect des choses. Et ce d'autant plus facilement que les contenus pseudo-scientifiques sont souvent identifiés comme plus attractifs d'une manière générale, et donc automatiquement mis en avant pour les personnes encore peu ou mal profilées : l'importance qu'ont pris, notamment sur YouTube,

des élucubrations pseudo-scientifiques comme celles voulant que la Terre soit plate est donc une conséquence logique du mode de fonctionnement de ces plateformes.

Il pourrait être tentant de dire qu'il est donc nécessaire de mettre à disposition à cet endroit d'autant plus de contenu plus juste scientifiquement, mais ce mode de fonctionnement fait qu'il arrivera peu jusqu'aux personnes qui en auraient le plus besoin. Cela contribue par ailleurs à renforcer la bulle de confort des personnes qui vont davantage visionner ce type de contenu, les faisant baisser leur garde sur d'autres aspects (et ce, en plus d'autres aspects problématiques propres à ces plateformes).

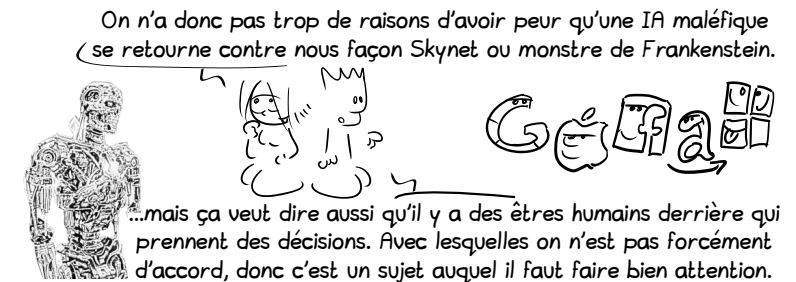
De la même manière que pour l'expérimentation animale et les questions d'éthique qu'elle pose, il est donc nécessaire qu'une réflexion *politique* ait lieu à ce sujet, s'appuyant si possible sur l'expérimentation de solutions alternatives, afin d'avoir davantage de données fiables à comparer. Les résultats de cette réflexion n'influenceront pas directement sur la science elle-même, mais pourront changer au moins la façon dont les gens se l'approprient.

D'autres problèmes peuvent apparaître lorsque, pour tel ou tel enjeu de société (les questions de surveillance, notamment), on nous informe que le choix qui a été effectué est d'«utiliser un algorithme», sans nous donner plus de précision sur la façon dont cet algorithme fonctionne. Comme on l'a vu, ce mot désigne n'importe quelle suite d'opérations : cette réponse seule ne nous renseigne *absolument pas* sur les choix réellement effectués.

De la même manière que pour les énoncés de type «la science dit que, donc» que nous avons évoqués au chapitre dix, il s'agit ici de dissimuler les véritables décisions politiques, ce qui est *a priori* assez préoccupant. Et ce d'autant plus que les programmes informatiques restent très dépendants du milieu dans lequel ils sont conçus : même les programmes fonctionnant par apprentissage ne font, la plupart

du temps, qu'amplifier les biais introduits (involontairement) dans le code ou les jeux de données initiaux.

Malgré les grands progrès effectués depuis son époque, nous restons en effet assez proches de la situation que décrivait Ada Lovelace il y a deux siècles : «la machine analytique n'a nullement la prétention de créer quelque chose par elle-même. [...] Son rôle est de nous aider à effectuer ce que nous savons déjà dominer.» Comme pour les autres sciences, nous avons donc besoin de nous approprier collectivement l'informatique pour savoir ce qu'il est raisonnable, ou pas, de décider en fonction des connaissances acquises.



Mais envisageons plutôt quelques aspects plus positifs apportés par les progrès en informatique, et plus précisément, par la façon dont les progrès *techniques* influent sur la façon de faire des sciences.

L'avancée la plus évidente réside bien sûr dans le fait que les ordinateurs facilitent considérablement les calculs. Pour tous les domaines scientifiques dans lesquels les équations mathématiques occupent une place importante, la puissance et surtout la vitesse de nos machines permettent un gain de temps considérable. Avec en plus un avantage non-négligeable : la machine, elle, ne se trompe jamais en suivant les instructions qu'on lui donne (même si, bien sûr, celles-ci peuvent ne pas être les bonnes : plus le programme est complexe, plus il risque de contenir des bugs, de la même façon que plus un texte est long, plus il risque de contenir des fautes).

Nous avons déjà évoqué les simulations, venues compléter les modélisations faites «à la main», comme celles de Torricelli. L'astronomie peut par exemple y avoir recours pour vérifier si les structures que nous observons sont, en fonction de ce que nous en connaissons, stables dans le temps. La biologie peut également y faire appel, par exemple pour reconstituer des espèces disparues afin d'en savoir plus sur leur façon de se déplacer. Et il y a, bien sûr, de très nombreux autres exemples.

Mais d'autres progrès ont amené des changements plus structurels. Ainsi, Internet a ouvert des possibilités assez importantes en matière de travail collaboratif. Et la science, qui est, comme nous l'avons vu, par nature une démarche collaborative (puisque le but est de dépasser nos subjectivités personnelles), en tire évidemment bénéfice : la possibilité de mettre à disposition des contenus sans devoir les imprimer et les acheminer par colis postaux facilite considérablement le processus de relecture.

On considère en effet qu'un travail scientifique ne compte qu'à partir du moment où il a été relu par d'autres personnes travaillant dans le même domaine, mais dans d'autres laboratoires (entre autres critères permettant d'éviter les conflits d'intérêts), qui doivent en autoriser la publication (c'est ce que l'on nomme le *peer-review*). Elles demandent parfois pour cela des modifications, et la possibilité de faire ces allers-retours est naturellement grandement facilitée par l'usage du courrier électronique.

Le domaine informatique est d'ailleurs dans une position privilégiée à ce niveau, car les expériences y reposent souvent sur des programmes qui peuvent être eux-mêmes transférés en même temps que l'article proposé, permettant aux personnes chargées de relire de reproduire directement les résultats – ce qui est évidemment plus délicat pour, par exemple, une étude portant sur un grand nombre de gens ou sur un fossile unique et fragile. On peut cependant regretter qu'en pratique, cette reproduction dès la relecture (lorsqu'elle est possible) ne soit pas systématique.

Néanmoins, une seule étude, même lorsqu'elle est ainsi solidement vérifiée, ne suffit pas à conclure. Par principe, plusieurs études concordantes restent nécessaires pour que l'on estime la connaissance qui en découle suffisamment solide. Il est donc nécessaire que les travaux soient partagés aussi largement que possible, et Internet facilite également les choses à ce niveau, en permettant de les mettre directement à disposition de tout le monde.

...même si cela reste peu fait en pratique. En effet, les journaux scientifiques, où paraissent les articles, sont gérés par des éditeurs privés, qui, comme les géants d'Internet dont nous venons de parler, sont d'abord motivés par la rentabilité. Leur présence était, historiquement, difficilement dispensable : avant Internet, prendre en charge l'impression et l'envoi était loin d'être à la portée de tout le monde. De nos jours, il serait possible de fonctionner différemment, mais changer les habitudes n'est pas facile. L'importance d'un article scientifique reste liée à celle de la revue dans laquelle il est publié, et, à ce titre, les éditeurs de ces revues – même s'ils ne produisent pas le contenu et se contentent de déléguer la relecture – restent en position de force.

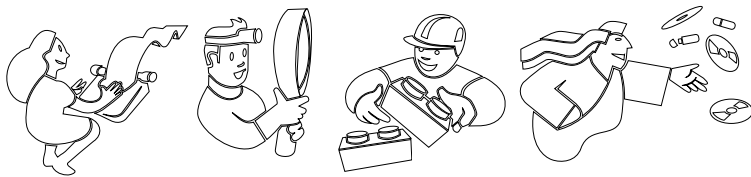
Ces trente dernières années, alors que les moyens de propager l'information ont été grandement facilités, les prix demandés par ces revues ont augmenté considérablement. De ce fait, avoir accès à l'état des connaissances scientifiques devient particulièrement délicat pour les gens qui ne disposent pas des budgets qu'un laboratoire peut consacrer à ces revues. De ce fait, une grande partie de la société perd non seulement la possibilité de contribuer à l'activité scientifique, mais plus simplement celle d'en prendre connaissance.



C'est d'autant plus problématique à une époque où n'importe qui peut, même sans connaissances particulières, participer à la recherche : dans des domaines où de grosses puissances de calcul sont nécessaires, mais où les opérations à effectuer peuvent aisément être découpées en petites tâches, un logiciel comme BOINC permet à tout ordinateur de prendre en charge quelques unes de ces tâches. Il vous suffit d'installer ce logiciel, de choisir les projets de recherche auxquels vous voulez contribuer, et le reste se fait automatiquement, en tâche de fond, se limitant aux ressources de calcul que votre ordinateur n'utilise pas.

Un tel mode de fonctionnement permet déjà, sur la simple base du volontariat, d'atteindre des puissances de calcul comparables à celles des supercalculateurs. Mais comment espérer que son usage se répande encore, si les gens qui seraient susceptibles de contribuer restent ainsi totalement coupés de la recherche scientifique ? Malheureusement, la question de l'*Open Access*, la mise à disposition des résultats scientifiques, reste globalement peu mise en avant dans les milieux universitaires (même si certains exemples ont de quoi inspirer, comme celui du *Projekt DEAL* en Allemagne).

Cette idée d'*Open Access* peut être vue comme une application à la science du concept de Logiciel Libre, qui hérite lui-même du mouvement encore plus général des biens communs. Notons toutefois que le Logiciel Libre lui-même, né dans les milieux universitaires, tient à la base pour beaucoup du fonctionnement de la science : ses quatre *libertés fondamentales* définissant si un logiciel est « libre » ou non sont en effet les possibilités de l'utiliser, de l'étudier, de le modifier et de le partager.



Or, l'activité au quotidien des scientifiques consiste en le fait d'étudier les publications de leurs collègues, de proposer des modifications sur les points qui paraissent améliorables, et, une fois les nouveaux résultats acquis, de publier, donc de repartager les connaissances obtenues. Libristes et scientifiques ont donc des manières de travailler communes, avec le même objectif général de mettre des ressources à disposition de l'humanité entière, et les deux communautés gagneraient sans doute à collaborer davantage.

La comparaison vaut d'ailleurs pour d'autres aspects du monde libriste : *Wikipédia*, par exemple, se donne pour base de fonctionnement le fait que n'importe qui puisse compléter ou corriger le contenu déjà apporté. Pour éviter que des vandales ne propagent de fausses informations, cependant, une équipe de personnes motivées (qu'il est toujours possible d'intégrer) se charge de suivre les modifications apportées et de les vérifier. Toute affirmation nouvelle se doit donc d'être sourcée, afin que cette vérification puisse se faire en connaissance de cause.

Il s'agit, ni plus ni moins, du mécanisme de *peer-review* tel qu'il est utilisé dans le monde scientifique, mais sous une forme généralisée. Le résultat est bien sûr variable selon les domaines (en fonction, principalement, des gens qui contribuent : si votre domaine de spécialité y est améliorable, vous pouvez y remédier, à condition bien sûr d'accepter ce mode de fonctionnement assez strict), mais, globalement, ce système apparaît comme au moins aussi fiable que celui des encyclopédies plus classiques (et cela vous fournit une porte d'entrée pour aller plus loin sur la plupart des sujets abordés dans ce livre ; je l'ai d'ailleurs moi-même utilisée pour vérifier quelques informations en cours de rédaction).

Le tout étant, bien sûr, de vérifier effectivement les sources qui vous sont proposées aussi souvent que nécessaire. Comme Christophe Michel, vidéaste de la chaîne *Hygiène mentale*, le fait remarquer dans sa vidéo *Le 1^{er} avril : la fête de l'esprit critique*, la plupart des

gens savent déjà effectuer ce genre de tâches. Le tout est de prendre le réflexe de le faire⁶⁵.

Il est donc essentiel de ne pas oublier le grand principe dont Arthur Conan Doyle avait doté son célèbre détective: «Chercher une explication avant de connaître tous les faits est une erreur capitale. Le jugement s'en trouve faussé.» Cela ne veut pas dire, nous l'avons déjà évoqué, qu'il ne faut pas avoir d'avis *a priori* sur les choses (ce qui serait de toute façon très peu vraisemblable). Mais il faut *suspendre son jugement* pendant le temps de l'analyse, et accepter de considérer tous les faits, et pas seulement ceux qui vont aisément dans notre sens.

S'il y a besoin de réaliser une expérience, il ne faut pas hésiter à le faire. Mais en gardant à l'esprit qu'il faudra accepter le résultat, et donc peut-être accepter à la fin de revenir sur notre avis initial, et d'en changer.



Suspendre son jugement, c'est temporaire: on le fait pendant qu'on examine les choses, mais à la fin, il faut finir par trancher.

La démarche scientifique est l'affaire de tout le monde: elle est l'outil le plus fiable dont nous disposons actuellement pour comprendre le monde qui nous entoure, et cette compréhension est nécessaire pour ensuite pouvoir prendre des décisions en connaissance de cause.

Il faut donc en prendre soin, et pour cela, s'assurer qu'elle est bien partagée aussi largement que possible. Notre système scolaire donne une part importante à l'apprentissage des connaissances issues de la

⁶⁵ Il faut également prendre conscience du décalage important qui peut être rencontré entre les publications scientifiques et ce que disent les médias. Ainsi, le consensus scientifique sur la dangerosité de l'amiante s'est formé à une époque où ce matériau était encore très couramment utilisé, mais cette information a mis beaucoup de temps à arriver dans les médias. À l'inverse, le glyphosate est aujourd'hui très largement présenté comme particulièrement à risque, sur la base d'une très faible partie des études réalisées: le consensus scientifique est au contraire assez rassurant à son sujet (ce qui ne veut pas dire qu'il n'existe pas d'autres raisons de s'opposer à son usage).

recherche scientifique. Tous les domaines ne sont cependant pas abordés, et surtout, au moins pour sa partie obligatoire, les *méthodes* par lesquelles on obtient ces connaissances, faute de temps et de moyens, sont bien moins mises en avant. L'école ne nous apprend pas encore les quatre piliers.

Les choses évolueront sans doute. La première des *douze leçons sur l'histoire*⁶⁶ d'Antoine Prost, que nous évoquions au chapitre précédent, nous rappelle d'ailleurs que la recherche et l'enseignement, pour une même discipline, sont fortement liés et changent souvent l'un avec l'autre. Mais en attendant, comme les milieux libristes ne cessent d'ailleurs de nous le montrer, nous pouvons partager non seulement les connaissances, mais également les méthodes, surtout quand elles ont fait leurs preuves.

La question que nous avons à nous poser, finalement, est celle de la société dans laquelle nous voulons vivre. Si nous acceptons d'éteindre nos cerveaux et de laisser toutes les prises de décisions à d'autres, quelles qu'en soient les conséquences, nous pouvons nous permettre de suivre les pseudo-sciences. Mais si nous voulons comprendre le monde qui nous entoure et être en mesure de participer à la vie citoyenne, si nous voulons, malgré nos yeux mauvais, garder l'esprit curieux, alors nous avons besoin de la science.



⁶⁶ L'auteur de ce livre, alors même qu'il présente sa discipline comme une démarche de compréhension respectant nos quatre piliers, conclut qu'elle n'est pas, ou pas entièrement, une science, en utilisant pour cela des arguments qui «disqualifieraient» tout autant l'étude des espèces passées et celle des objets célestes atypiques (dont on a vu qu'elles reposent sur les mêmes règles), mais aussi l'informatique ou une partie de la médecine. C'est en fait sa définition de «science» qui se limite à la recherche de généralités et veut que les résultats obtenus soient des certitudes absolues. Que cette erreur de définition soit aussi répandue est l'une des raisons pour lesquelles il est essentiel d'explicitier ce qu'est réellement le «contrat tacite» de l'activité scientifique.

Pour ne pas conclure

Nous avons, au cours de ce livre, abordé ensemble la démarche scientifique dans son aspect le plus général. Pour cela, nous avons abordé un certain nombre de domaines, mais qui sont très loin de représenter un panorama exhaustif de l'activité scientifique : un grand nombre d'autres disciplines, que je connais personnellement moins, ou dont les exemples auraient pu être moins parlants vis-à-vis des objectifs de ce livre, n'ont simplement pas été abordées, bien qu'elles soient tout autant passionnantes.

Même pour les sujets que nous avons abordés, cela n'a été qu'un survol très rapide – faute de quoi ce livre aurait très facilement triplé de volume et aurait sans doute été moins attractif. Nous avons donc été très loin d'aborder suffisamment en profondeur certains aspects, et peut-être certains d'entre vous restent maintenant sur leur faim. Ce qui n'est pas une mauvaise chose, car, le titre de ce livre nous le rappelle, la curiosité est la première des qualités requises pour comprendre le monde. N'hésitez donc surtout pas à continuer de creuser sur les sujets qui peuvent vous intéresser.

Peut-être ai-je pu vous donner – si vous ne l'aviez pas encore – l'envie de contribuer à la recherche scientifique. Je n'ai malheureusement pas abordé de manières d'y contribuer directement, en dehors de la possibilité d'installer sur votre ordinateur le logiciel BOINC. N'hésitez surtout pas à le faire : c'est très simple à faire, ça ne vous demandera aucun effort, et ça ne manquera pas d'être utile.

Toutefois, pour les personnes qui aimeraient s'investir plus personnellement, d'autres pistes sont bien sûr possibles. Et puisque j'ai, à plusieurs reprises au cours de ce livre, évoqué des vidéos de Léo Grasset et de Christophe Michel, je vais le faire une fois encore.

Le vingt-huitième épisode de *DirtyBiology*, intitulé *Pokémon Go et la science*, nous montre comment la participation citoyenne au recensement de la nature est particulièrement utile à la recherche scientifique, et ce dans de nombreux domaines, en insistant sur l'importance de l'observation sur notre rapport au monde. Cette vidéo évoque d'ailleurs plusieurs exemples de logiciels qui peuvent être utilisés dans ce but, que je vous laisse découvrir⁶⁷.

L'autre vidéo que je voulais évoquer à ce sujet est *La science participative (jouons avec le micro-onde)*, de la chaîne *Hygiène Mentale*, qui répond à une autre vidéo de la chaîne *Scilabus*. Ensemble, ces vidéastes montrent comment nous pouvons, pour des questions de la vie de tous les jours (il s'agit ici d'étudier la façon dont la chaleur est répartie au sein d'un micro-onde), monter nous-mêmes des protocoles scientifiques et mener des expériences collaboratives, sans pour cela avoir besoin de passer par les grands laboratoires et la publication en revues scientifiques.

En effet, la science ne doit pas rester cantonnée dans les laboratoires. Nous avons évoqué, dans le dernier chapitre, la problématique des résultats (et donc de la publication en *Open Access*) qui, nous l'avions vu précédemment, sont des données essentielles pour nos prises de décision. Mais il faut rappeler qu'il en va de même pour les méthodes : *faire* de la science, au sens de monter des expériences, c'est l'affaire de tout le monde.

Un autre moyen qui peut être évoqué pour cela est de rejoindre l'association zététicienne la plus proche de votre domicile (voire de contribuer à en créer une s'il n'en existe pas encore) : l'activité zététicienne consiste en effet en le fait de tester véritablement des affir-

⁶⁷ La vidéo pourra d'ailleurs être complétée par d'autres sur le même thème. Notamment, Mehdi Moussaïd a consacré à ce sujet le huitième épisode de sa chaîne *Fouloscopie*, intitulé *Ces jeux vidéos qui font avancer la science*. Il s'agit d'ailleurs d'une collaboration avec Arnaud Thiry, de la chaîne *AstronoGeek*, où se situe la seconde partie de ce travail, sous le titre *Devenir chercheur depuis son bureau*.

mations (on prend généralement pour cas d'études des affirmations pseudo-scientifiques, mais il n'y a en fait aucune limite et beaucoup d'autres choses peuvent être testées), et donc de monter des protocoles d'études permettant de les vérifier. C'est donc un exercice intéressant, en plus d'être généralement un bon moment.

Ces protocoles varieront, bien sûr, en fonction de ce qui est testé, mais, comme nous l'avons vu tout au long de ce livre, ils doivent respecter certaines règles pour être valides. Ce sont nos quatre piliers, «partie cognitive» de ce que Bourdieu appelait le «contrat tacite» de l'activité scientifique. Rappelons-les donc une fois de plus.

Le premier pilier est le **scepticisme initial sur les faits et leurs interprétations**. Il faut d'abord s'assurer que les faits que l'on étudie existent bien (rappelons-nous de l'histoire de la dent d'or de Fontenelle!), et bien considérer l'ensemble de ces faits. Il faut également suspendre notre jugement : ce que nous pensions *a priori*, même si cela résultait de travaux eux-mêmes tout ce qu'il y a de plus scientifique, peut toujours être remis en cause. Ce pilier est illustré, dans ce livre, par le «mauvais génie» de Descartes, entité supposée susceptible de nous tromper sur tout et n'importe quoi, que nous avons vu à l'œuvre un peu partout.

Le deuxième pilier est le **réalisme**, au sens où nous postulons qu'il existe un monde qui ne dépend pas de nous : c'est cette supposition initiale qui nous permet d'envisager que nous pourrions, une fois les expériences menées, nous mettre d'accord sur les résultats. Ce monde, étant indépendant de nous, ne dépend donc pas de nos catégories mentales : c'est elles qui doivent se conformer au réel et non l'inverse. Ce pilier est illustré, dans ce livre, par un éléphant (en référence à la fable de plusieurs aveugles rencontrant un tel animal : chaque personne en touche une partie différente, et s'en fait donc une image mentale différente de celle de l'autre. Le réalisme scientifique est

simplement l'idée que nous pouvons, en discutant pour partager ces différentes images mentales, parvenir à reconstituer ensemble un éléphant complet).

Le troisième pilier est la **rationalité**, c'est-à-dire le fait que nos interprétations doivent, pour tenir la route, suivre les règles de la logique. Elles doivent également se conformer au principe de parcimonie, ce qui signifie que, toute chose égale par ailleurs, nous favorisons l'explication la moins coûteuse, qui est donc celle qui présente la plus grande cohérence. Ce pilier est illustré, dans ce livre, par une poignée de dominos, dont les «cascades» illustrent assez bien cette façon de fonctionner.

Le quatrième pilier, enfin, est le **matérialisme méthodologique**, c'est-à-dire le fait que nous ne mobilisons, pour nos explications, que des entités *matérielles*, donc sur lesquelles on peut «appuyer», d'une façon ou d'une autre, pour observer une réaction. Cette contrainte fixe les limites de l'activité scientifique, et permet de nous assurer de la pertinence de nos résultats en confiant à la réalité elle-même la responsabilité de trancher. Ce pilier est illustré, dans ce livre, par le dragon dans le garage, allégorie de l'entité immatérielle proposée par Druyan et Sagan.

Toute démarche visant à comprendre tel ou tel aspect du monde qui nous entoure en s'appuyant sur ces quatre piliers est, par construction, une démarche scientifique.

Chaque personne peut, bien sûr, avoir son propre avis sur ce qui fait ou ne fait pas la beauté des choses. Je considère pour ma part, et j'espère vous avoir fait partager cette vision, que la science est d'abord quelque chose de beau. D'une part parce que les règles qui la composent en font une œuvre «architecturale» qui mérite assurément notre attention. D'autre part parce qu'elle nous permet de découvrir de nouveaux aspects du monde qui nous entoure. Elle nous permet également de prendre conscience de l'étendue de notre ignorance, ce qui

n'est, à mon sens, que d'autant plus motivant pour partir à la découverte de ces nouvelles régions inconnues.

Mais si vous préférez un autre point de vue, la science est également quelque chose d'utile. Pas seulement au sens où cela nous permet de fabriquer de nouvelles choses (ce qui n'est pas directement son but, même si l'ingénierie reste un domaine très proche), mais aussi au sens où cela nous permet de construire des connaissances solides sur lesquelles baser ensuite nos prises de décisions. La science est un enjeu citoyen, au sens où savoir identifier ce qui relève de la science et ce qui n'en relève pas est essentiel à la vie de la société et aux décisions *politiques* que cela implique.

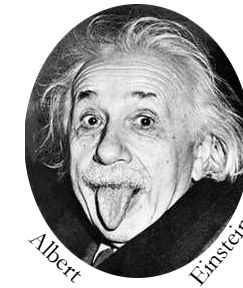
L'auteur de science-fiction Arthur C. Clarke écrivait «Toute technologie suffisamment avancée est indiscernable de la magie.» Il voulait signifier par là que plus une technologie est complexe, moins la plupart des gens comprennent la façon dont elle fonctionne (combien de personnes, par exemple, sauraient décrire entièrement le fonctionnement d'un ordinateur?)

Pour autant, comme nous l'avons vu, la magie n'est pas nécessairement incompréhensible, et on trouve même des illusionnistes qui se donnent pour tâche d'en expliquer certaines ficelles. Il en va de même pour la technologie, et pour le reste: même si tout le monde ne peut évidemment pas devenir spécialiste de tout, nous pouvons sans doute travailler collectivement à comprendre suffisamment les choses pour qu'elles cessent d'être «magiques».

Évidemment, pour cela, connaître la méthode scientifique n'est qu'une première étape: comme nous l'avons vu, il faut également se renseigner sur les biais qui gênent notre compréhension du monde. Étudier plus en détails la façon de faire de la science «au quotidien» peut également aider. Et, bien sûr, il y a tout un tas de connaissances à acquérir dans d'autres domaines. Peut-être verrons-nous cela ensemble une prochaine fois.

En attendant, la bibliographie proposée ci-après vous permettra déjà d'«aller plus loin» en creusant un certain nombre de sources que j'ai utilisées pour rédiger ce livre, qui viennent compléter celles que j'ai déjà pu évoquer en cours de route. Certaines sont plutôt techniques, d'autres plutôt amusantes, ou tout un tas d'autres qualificatifs, mais toutes méritent assurément le coup d'œil.

N'hésitez donc pas à continuer!



Bibliographie commentée

Pour les gens qui souhaitent effectivement aller plus loin, et en plus des différents ouvrages que j'ai pu mentionner, citations à l'appui le plus souvent, dans le corps du texte lui-même, vous trouverez ici (en vrac et dans le désordre) un certain nombre d'ouvrages de diverses sortes (livres, cours, blogs, conférences...) qui m'ont, d'une façon ou d'une autre, aidé à rédiger celui-ci, et qui pourraient donc former des compléments intéressants.

Grise Bouille – <https://grisebouille.net/>
par Simon "Gee" Giraudot

Blog de caricature politique, fiction humoristique, et, surtout (pour ce qui nous intéresse ici), vulgarisation scientifique. Gee aborde notamment pas mal de points concernant l'informatique de manière très accessible et très agréable à lire. Et si vous aimez le style de la plupart des dessins de ce livre, vous aimerez : c'est de lui que ça vient.

L'écriture inclusive: parlons faits et science
par "Bunker D." (2018)

Cet article ne m'a pas servi à écrire ce livre – je ne l'ai d'ailleurs découvert qu'en toute fin de rédaction. Néanmoins, il me semble important de le mentionner ici, et ce pour trois raisons : d'abord, il fournira des éléments de réponse utiles aux fâcheuses personnes, évoquées en introduction, qui cloisonnent leur esprit à la simple vue d'un point médian. Ensuite, il présente, sources à l'appui, un très bon travail de sciences humaines, qui pourra servir d'exemple en la matière. Enfin, répondant à un déplorable article paru dans la revue «Science... et pseudo-sciences», il illustre la façon dont même le milieu sceptique peut se laisser entraîner par ses préjugés, nous rappelant ainsi que personne n'est à l'abri de l'influence du «mauvais génie».

<http://www.bunkerd.fr/ecriture-inclusive/>

Le livre d'argent – <https://fadrienn.irlnc.org/>
par Sébastien "Elzen" Dufromental

Mon propre blog, dont j'avais dit en introduction que l'adresse se trouverait par ici. J'y aborde de multiples sujets (on y trouve notamment des articles un peu plus détaillés sur certains sujets abordés rapidement ici, comme par exemple l'«affaire Galilée»). Si vous voulez réagir au contenu de ce livre, je vous lirai là-bas avec plaisir.

Le contour des sciences: un enjeu citoyen
par Guillaume Lecointre (2011).

Conférence donnée dans le cadre des Forums régionaux du Savoir, à Rouen, qui présente les quatre piliers de la démarche scientifique, décortique les attaques du créationnisme contre la recherche scientifique sur l'évolution, et aborde la distinction entre scientifique et politique. C'est la seconde conférence de Lecointre que j'ai pu voir sur ce sujet (la première avait été donnée deux ans plus tôt dans mon IUFM), et c'est sans doute de là que vient l'idée d'écrire ce livre. Une captation est disponible à cette adresse :

[https://www.scienceaction.asso.fr/ressources/
videos/le-contour-des-sciences-un-enjeu-citoyen](https://www.scienceaction.asso.fr/ressources/videos/le-contour-des-sciences-un-enjeu-citoyen)

De Feu et de Glace, Planètes ardentes
par André Brahic (2011).

Autre conférence donnée dans le cadre des Forums régionaux du Savoir, qui évoque l'astronomie en général, et montre un certain nombre d'images assez magnifiques de ce qu'on trouve dans l'espace plus ou moins lointain. Quelques éléments concernant la démarche scientifique sont également évoqués, notamment en ce qui concerne les difficultés pratiques de l'étude des planètes lointaines. Une captation est disponible à cette adresse :

[https://www.scienceaction.asso.fr/ressources/
videos/de-feu-et-de-glace-plan%C3%A8tes-ardentes](https://www.scienceaction.asso.fr/ressources/videos/de-feu-et-de-glace-plan%C3%A8tes-ardentes)

Les sciences face aux créationnismes
par Guillaume Lecointre (2012).

Ce livre, qui propose de «ré-expliciter le contrat méthodologique des chercheurs», reprend un certain nombre d'éléments de la conférence du même auteur mentionnée plus haut. Un peu moins vulgarisé, il permet en revanche d'entrer davantage dans les détails sur plusieurs points, du fait notamment du changement de format. Il me paraît donc être un élément de réflexion important pour compléter la conférence, ainsi que pour les gens qui préfèrent l'écrit à la vidéo.

Ce qu'Einstein disait à son coiffeur
Ce qu'Einstein n'a jamais dit à son tailleur
par Robert L. Wolke

Deux livres de «réponses scientifiques aux questions de la vie de tous les jours», qui couvrent donc de multiples sujets. De mon point de vue, ils sont incontournables pour les gens qui «regardent les choses telles qu'elles sont en se demandant pourquoi» (pour citer les paroles d'une chanson qui n'a rien à voir). Ils sont faciles d'accès, et souvent assez drôle. Et la dernière réponse apportée, commune aux deux ouvrages (c'est la seule à se trouver en double), porte sur une question assez fondamentale: qu'est-ce qui fait que certaines choses peuvent se produire et d'autres pas?

C'est pas sorcier
par Jamy Gourmaud, Frédéric Courant, Sabine Quindou *et al.*

Est-il vraiment nécessaire de présenter ce qui reste comme la référence de la vulgarisation scientifique en France? Il m'arrive, maintenant que je connais plutôt bien un certain nombre de sujets, de pinailler sur plein de points que j'aurais personnellement présenté différemment, mais, comme beaucoup de gens de ma génération, j'ai grandi avec cette émission, et j'ai découvert une bonne partie de ce que j'aborde ici en la regardant, avant d'aller creuser par d'autres moyens ensuite.

La Terre avant les dinosaures
par (Jean-)Sébastien Steyer (2009).

Ouvrage magnifiquement illustré (par Alain Bénéteau, qui a également travaillé aux illustrations du *Guide critique de l'évolution* déjà mentionné dans le corps du texte) racontant l'apparition des premiers tétrapodes et la façon dont les vertébrés ont peuplé les terres émergées, en démolissant au passage le mythe de la sortie des eaux. Un livre qui montre que les dinosaures sont loin d'être les seuls animaux préhistoriques à mériter notre attention, et donnera un peu plus de détails sur les soucis du groupe «poissons», trop rapidement évoqués au chapitre cinq.

Le Pharmachien – <https://lepharmachien.com/>
par Olivier Bernard

Un autre blog en bandes dessinées assez sympathique, celui-là axé sur la santé et les pseudo-médecines (quoiqu'il aborde occasionnellement d'autres sujets). Assez drôle, très accessible, et maintenu à jour (les articles qui ont besoin de l'être sont révisés quand les connaissances scientifiques évoluent). Les (nombreuses) sources sur lesquelles s'appuient les articles sont généralement fournies dans le premier commentaire.

La statistique expliquée à mon chat
par Nathan Uyttendaele, Laura Maugeri et Gwenael Grisi

Série de vidéos de vulgarisation sur le fonctionnement des statistiques et leur rôle assez important en sciences, ainsi que sur la notion de preuve dans la démarche scientifique. Certaines vidéos sont très faciles d'accès; d'autres un peu plus techniques mais à la portée de toute personne motivée. L'ensemble est disponible sur PeerTube, par l'instance skeptikon.fr, ainsi que sur YouTube.

xkcd – <https://xkcd.com/>
par Randall Munroe

L'un des plus célèbres *webcomics*, et aussi l'une des deux seules références anglophones de cette bibliographie. Pas mal de planches sont des blagues, notamment autour des sciences (un wiki, disponible sur <https://www.explainxkcd.com/>, quoique lui aussi anglophone, pourra aider à comprendre les subtilités), mais certaines de ces planches peuvent être très informatives (comme par exemple la 1211 qui résume la parenté entre les oiseaux et les dinosaures (évoquée au chapitre cinq), ou la 1732 qui traite du réchauffement climatique).

Je mentionne *xkcd* ici principalement pour deux planches : la 435 (*Purity*), qui m'a inspiré l'illustration de la page 60 (quoique la planche d'origine sombre précisément dans le travers que j'y dénonce), et la 54 (*Science*), que j'ai failli citer page 95 (La citation «*It works, bitches!*» a, depuis, été popularisée par Richard Dawkins (puis reprise notamment par Gee, dans sa B.D. *En fait, Einstein se trompait*), mais c'est dans *xkcd* que je l'ai personnellement rencontrée pour la première fois).

Notons que les personnes anglophones pourront jeter un œil aux *What if?*, un ensemble de réponses très sérieuses (mais néanmoins amusantes) à des questions parfois assez farfelues portant sur de nombreux domaines (notons d'ailleurs que certaines de ces réponses ont été traduites en français et éditée sous le nom de *Et si?*).

Un peu de sucre?
par "Emma" (2016).

J'ai hésité à placer cette bande dessinée ici, dans la mesure où le reste du blog, quoique très intéressant sur le plan politique, n'est pas franchement en lien avec le sujet qui nous préoccupe dans ce livre. Celle-ci en particulier, en revanche, présente, sources à l'appui et de manière très pédagogique, une très large partie de ce qu'il y a à savoir concernant l'homéopathie et les enjeux de santé publique qui l'accompagnent.

<https://emmaclit.com/un-peu-de-sucre/>

Zététique et autodéfense intellectuelle
par Richard Monvoisin

Il s'agit d'une série de cours (12 × 2h) ayant lieu à l'université de Grenoble, qui aborde, entre autres, les bases épistémologiques, les protocoles de tests, les biais du cerveau humain, l'évolution et la construction sociale du genre, les pseudo-médecines, et la philosophie morale. Une captation réalisée en 2017 est disponible en ligne (sur PeerTube, par l'instance skeptikon.fr, ainsi que sur YouTube).

Espèces d'espèces
par Denis van Waerebeke *et al.* (2008).

Documentaire de vulgarisation concernant la taxonomie du vivant, très pédagogique et parfois assez drôle, (re)plaçant *homo sapiens* dans l'arbre du vivant en présentant les caractéristiques physiques héritées lors de certains croisements. À voir plutôt dans sa version longue, si possible (je n'ai pas toujours compris le choix des coupes de la version courte).

What is Open Access?
par Jorge Cham, Jonathan Eisen & Nick Shockey (2012).

Seconde et dernière référence anglophone de cette bibliographie (mais néanmoins plutôt accessible), cette vidéo (malheureusement hébergée par YouTube) résume très clairement la situation actuelle de la publication scientifique et les raisons pour lesquelles il est nécessaire d'envisager d'autres manières de procéder.

Notez, pour les anglophones, que le site propose d'autres vidéos explicatives sur un certain nombre de sujets scientifiques, et surtout un grand nombre de petites B.D. assez amusantes sur la façon dont fonctionne (pas toujours correctement) le milieu universitaire.

<https://phdcomics.com/comics.php?f=1533>

Nos ancêtres les gaulois et autres fadaïses
par François Reynaert (2010).

Livre de vulgarisation historique qui reprend et interroge un certain nombre de clichés concernant l'Histoire de France, et s'efforce d'ouvrir des perspectives. Il est appréciablement complété par un autre livre du même auteur, *L'Orient mystérieux et autres fadaïses* (2013), qui ne m'a cependant pas servi directement pour celui-ci.

Patience dans l'Azur
par Hubert Reeves (1981, révisé en 1987).

Une histoire de l'univers, un peu datée et présentée d'une manière parfois un peu trop poétisée, mais qui présente néanmoins de façon intéressante la façon dont la matière telle que nous la connaissons s'est formée et qui, surtout, éveille à la curiosité, ce qui est un point de départ nécessaire à toute recherche scientifique.

On a perdu la moitié de l'univers
par Jean-Pierre Petit (2001).

L'auteur de ce livre est aussi celui de plusieurs déclarations assez douteuses scientifiquement parlant, et la thèse qu'il présente dans la seconde partie du livre est considérée comme peu vraisemblable selon les connaissances actuelles. Néanmoins, l'inventaire d'observations restant à expliquer dressé dans sa première partie mérite l'attention, en particulier celle qui a été choisie comme titre de ce livre.

Le Point Culture
par Alexis "Links" Breut

Série de vidéos à visée humoristique informative sur des sujets assez divers, certains sans grand rapport avec ce qui est évoqué ici (comme les super-héros, les légendes urbaines ou le cinéma), et d'autres plus en lien et qui m'ont appris ou remis en tête quelques infos. À ma connaissance, ces vidéos ne sont malheureusement disponibles que sur YouTube.

Le peuple des couleurs
entretien avec Jean-Baptiste Eczet par Pierre Zaoui (2010).

Ce texte, plutôt court et aisément disponible sur Internet (sous plusieurs formats), évoque la vision des couleurs par les Mursis, ainsi que quelques autres raisons pour lesquelles l'anthropologue interrogé s'est intéressé à eux. C'est la source principale que j'ai utilisé pour parler de nos différences de perceptions au chapitre sept.

La théorie de l'évolution: une logique pour la biologie
par Patrice David et Sarah Samadi (2011).

Un ouvrage assez complet et plutôt accessible concernant la théorie de l'évolution et son rôle central dans l'analyse du vivant. Il commence par positionner le statut des théories scientifiques vis-à-vis des thèses créationnistes, puis présente un certain nombre de mécanismes connus par lequel a lieu l'évolution et explicite leurs apports.

Descendons-nous de Darwin?
par Guillaume Lecointre (2015).

Pour compléter le précédent, ce petit livre actualise les connaissances en matière d'évolution en évoquant en particulier la distanciation qui se fait vis-à-vis de la «théorie synthétique» qui s'opère ces dernières années et le retour à une vision plus «darwinienne» des choses. Il s'agit de la principale source que j'ai utilisée pour aborder cet aspect au chapitre cinq.

Le Paranormal
par Henri Broch (1989).

Ouvrage majeur dans le domaine de l'esprit critique et du scepticisme moderne, qui présente brièvement (et efficacement) ce qui est à l'œuvre quand on parle de paranormal, à savoir «ses documents, ses hommes, ses méthodes». Très utile, à mon avis, pour aborder le monde des pseudo-sciences avec l'esprit correctement préparé.

Au Cœur de l'Extra-Ordinaire
par Henri Broch (1991 - 2015).

L'ouvrage précédent était utile pour ce qu'il disait de la façon dont fonctionnent les pseudo-sciences en général; celui-ci (qui a été plusieurs fois révisé, je n'ai pas encore lu la dernière version) le complète en entrant dans les détails d'un nombre important de domaines, comparant les prétentions paranormales aux faits scientifiques connus.

Devenez sorciers, devenez savants
par Henri Broch et Georges Charpak (2002).

Il s'agit de l'un des premiers ouvrages que j'ai lu dans le domaine de la zététique, qui aborde quelques techniques de magicien, fournit des explications connues de faits présentés comme paranormaux, et aborde quelques notions de probabilités. On y trouve notamment, au chapitre deux, une explication plus complète de la persistance rétinienne négative que j'évoque rapidement au chapitre un.

De la relativité de l'éthique
par Hubert Guillaud (2018).

Cet article présente les résultats d'une étude réalisée depuis 2014 par le MIT concernant le «dilemme du tramway» (présenté notamment dans le dernier des douze cours de Richard Monvoisin évoqués plus haut), dans le cadre de travaux sur l'«intelligence artificielle» des voitures autonomes (ce qui nous donne donc un bon exemple du fait que les recherches peuvent facilement être interdisciplinaires – ici, une question d'informatique a besoin d'informations issues des sciences sociales). Cette étude soulève le caractère fortement culturel des questions d'éthique et de morale, mais également (dans sa mise à jour) les limites que peuvent avoir ce type questions en fonction du contexte dans lequel les résultats vont s'appliquer.

<https://www.internetactu.net/de-la-relativite-de-lethique>

Michel Onfray et le mythe de l'évidence
par Alexandre Delaigue (2015).

Article court d'un professeur d'économie (partant d'une réaction moqueuse de l'auteur mentionné à l'attribution d'un prix Nobel) qui montre en quoi ce qui paraît «évident» ne l'est pas forcément *tant que cela n'a pas été prouvé*, et dénonçant donc «le piège du bon sens».

<https://blog.francetvinfo.fr/classe-eco/2015/10/19/le-mythe-de-levidence.html>

Non, 58% des Français ne croient pas à la théorie du complot
par Valéry Raspus et Nicolas Gauvrit

Article court décortiquant un sondage réalisé en 2011 et portant sur l'attentat du *World Trade Center* ayant eu lieu dix ans auparavant. Ce sondage contient en effet un tel nombre de biais méthodologiques que cet article suffit à lui seul à rappeler une bonne partie de ce qu'il faut éviter pour ne pas fausser les résultats, qui ont trop rapidement été évoqués au chapitre quatre.

<http://leplus.nouvelobs.com/contribution/191255-11-septembre-complot.html>

(Notons au passage qu'il vaudrait mieux éviter la désignation de «*théorie* du complot»: il s'agit, au mieux, de «spéculations complottistes», ou de «thèses complottistes», mais clairement pas de théories au sens scientifique évoqué dans cet ouvrage.)

Existe-t-il une beauté absolue? (DirtyBiology #39)
par Léo Grasset, “Manon Bril” *et al.*

Autre collaboration avec la chaîne *C'est une autre histoire*, tournée au musée du Louvre. Je mentionne cette vidéo-ci en particulier ici car elle présente notamment une étude réalisée sur les ocelles de la roue des paons qui m'a servi à ajuster l'illustration de la page 70. Mais, comme d'ailleurs pour l'autre chaîne évoquée directement dans le livre, *Hygiène mentale*, n'hésitez pas à visionner d'autres épisodes!

Origines des images utilisées

Comme annoncé en introduction, la plupart des bandes dessinées qui sont présentes dans cet ouvrage ont été constituées grâce aux images mises à disposition par Gee sur son blog. J'ai pioché un peu partout, mais mentionnons en particulier, pour leur usage récurrent :

- *Des zéros et des uns* (le « mauvais génie » de Descartes a été assemblé à partir de deux personnages de cette BD).
- *Mammoth of control* (pour l'éléphant représentant la réalité objective et ses quelques versions dérivées).
- *Dragon & fine aigrette* (pour les images exclusives du Dragon dans le garage de Druyan et Sagan, évidemment).

Une autre image récurrente, issue d'une photo de la tour Eiffel prise par Adrian Scottow, a été trouvée sur Flickr, grâce à son filtre de recherche permettant de se limiter aux licences libres (on notera au passage que les photos de la Tour Eiffel prises sous un angle permettant de voir distinctement ses quatre piliers sont assez rares).

En complément, voici les sources d'images utilisées de manière ponctuelle (exception faite des portraits des scientifiques utilisés, tous récupérés sur les pages Wikipédia correspondantes) :

- Page 15: le projecteur et les lunettes, comme les caméras page 16, sont des caractères Unicode.
- Page 16: les trois personnages filmés viennent de la B.D. de Gee *Grease Boy Bullshitgraphic Universe*.
- Page 19: ces trois exemples, parmi d'autres, ont été prélevés sur la page de Wikipédia dédiée à la notion de paréidolie.
- Page 26: la première image est « sept hommes aveugles et un éléphant », par Romana Klee, illustration de la doctrine *Anekantavada* qui m'a inspirée l'usage de l'éléphant.
- Page 28: ce schéma est entièrement constitué d'une combinaison de caractères Unicode.

- Page 32: une photo du Puy de Dôme prise par Alain Rigail.
- Page 34: dessin de l'expérience des hémisphères de Magdebourg avec 24 chevaux, par Louis Figuier.
- Pages 36, 40 et 47: les loupes et engrenages sont des icônes du thème par défaut de l'environnement GNOME (je comptais utiliser les caractères Unicode correspondant, mais ça rendait moins bien).
- Page 56: exception faite du banc à l'arrière-plan, il s'agit d'une combinaison de caractères Unicode.
- Page 57: l'image du scanner IRM vient d'une photographie de "KasugaHuang" prise dans un hôpital taïwanais et trouvé sur la page Wikipédia dédiée à l'IRM.
- Page 63: les deux avocats viennent de Wikimedia Commons, le fruit ayant été mis à disposition par "Dervish" et le défenseur (trouvé en cherchant « *lanjer* », l'ambiguïté n'existant pas en anglais) par "Väsk".
- Pages 69 et 70: la tête de panda et les cœurs sont des caractères Unicode. Les autres animaux viennent de Wikimedia Commons (je les ai trouvés par une recherche portant sur le nom de l'animal, en spécifiant le format SVG. J'ai modifié quelque peu les paons pour correspondre aux besoins de l'illustration).
- Pages 71 et 72: les images de pois viennent à l'origine d'un schéma présent sur la page Wikipédia sur les lois de l'Hérédité. Je les ai toutefois réassemblés pour ces images.
- Page 74: extrait à peine modifié de la B.D. *En fait, Einstein se trompait* de Gee (notons qu'avant 1915 et sa relativité générale, Einstein était déjà connu pour sa relativité restreinte, mais celle-ci ne portait pas sur la gravitation).
- Page 79: extrait à peine modifié de la B.D. *Mammoth of Control* de Gee (j'ai isolé la partie correspondant à un véritable arbre phylogénique, l'image originale y ajoutant quelques blagues).
- Page 82 et suivante: les images d'animaux, mais aussi de végétaux et de caractères, viennent de Wikimedia Commons, comme

précédemment. J'ai utilisé en particulier un très chouette comparatif des tailles de cétaqués réalisé par "Chris huh".

- Page 84 : cette carte du monde en projection Hölzel a été réalisée par "Ktrinko".
- Page 87 : carte montrant la collision de l'Inde avec le reste de l'Asie ayant créé l'Himalaya. Image dans le domaine public issue du site du gouvernement des USA (trouvée sur Wikipédia).
- Page 88 : schéma représentant le mouvement des plaques tectoniques, réalisée par José F. Vigil.
- Page 88 toujours : schémas d'éruption volcaniques (explosive et éruptive) mises à disposition sur Wikimedia par Sémhur. Le même auteur a également fourni d'autres illustrations, car il existe en pratique une bien plus large gamme d'éruptions.
- Page 97 : le schéma anatomique d'une méduse est une modification par "Whidou" d'une image de Zina Deretsky.
- Page 99 : le dessin d'Indiana Jones provient de la B.D. de Gee sur les *Citations apocryphes*.
- Page 99 toujours : l'image de prisme a été tirée de la version présente sur Wikipédia de la pochette de l'album *The Dark Side of the Moon* des *Pink Floyd*. Puisque le texte fait le parallèle entre le son et la lumière, ça me semblait adapté.
- Page 101 : le schéma anatomique de l'œil est la dernière étape d'une planche réalisée par "Matticus78" montrant différentes étapes de l'évolution de nos yeux. Celui de l'oreille a été réalisé par "Iain", puis vectorisé par "Surachit". Ces deux schémas sont disponibles en plusieurs langues, dont l'anglais et le français.
- Page 102 : il s'agit, bien évidemment, de l'Homme de Vitruve (déjà utilisé page 69) et de la Mona Lisa (ou Joconde), célèbres œuvres de Leonardo da Vinci.
- Page 108 : le microscope a été dessiné par "Con-struct".
- Page 108 toujours : le haut-de-forme posé en clin d'œil à la série de jeux *Professeur Layton* est simplement un caractère Unicode sur lequel la lettre L a été superposée.

- Page 110 : le schéma représentant la précession est une version adaptée d'une image réalisée par Markus Nielbock.
- Page 111 : le dessin du *crop circle* (agroglyphe en français) est une reproduction de celui tracé à Sarraltrof par les vidéastes des chaînes AstronoGeek, La Tronche en biais, Un monde riant, le Defakator et Hygiène Mentale. Je vous encourage d'ailleurs à aller jeter un œil à ces vidéos, qui en valent sacrément le coup. L'extraterrestre humano-sceptique, pour sa part, vient de la B.D. de Gee *Incident diplomatique interstellaire*.
- Page 113 : le télescope a été dessiné par "Outstandy".
- Page 116 : cet atome (de Bore, en l'occurrence) est extrait d'une comparaison réalisée par "IlluScientia" entre différentes représentations (celles de Bohr et Rutherford, qu'on croise encore souvent, sont plus «visuelles», mais hélas moins réalistes).
- Page 121 : ce schéma du système solaire, où les tailles sont à l'échelle, mais évidemment pas les distances, a été mis à disposition par "Yelkrokoyade".
- Page 124 : les papillons, qui d'ailleurs ne sont pas du tout des phalènes, ont été prélevés sur la version du blason de la ville de Chaumont-Devant-Damvillers, dans la Meuse, mise à disposition par "Celbusro".
- Page 124 toujours : les images de galaxies viennent d'une représentation de la classification de Hubble (l'astronome) réalisée par "inductiveload". J'y ai ajouté une image de l'objet de Hoag issue d'une photo prise par Hubble (le télescope, cette fois).
- Pages 126 à 133 : toutes ces illustrations sont constituées de combinaisons de caractères Unicode.
- Page 135 : l'image combine des éléments des B.D. de Gee *Un demi de compression* (au centre), *Les ordinateurs ont bons cœurs* (à gauche) et *Panique algorithmique* (à droite).
- Page 137 : les images utilisées pour illustrer les arguments fallacieux sont des caractères Unicode.

- Page 138: le personnage qui lit et le bonnet d'âne sur la tête de Mendel viennent de la B.D. de Gee *Des zéros et des uns*.
- Page 138 encore: l'institutrice qui vérifie les travaux de Mendel est celle qui disputait le processeur fautif dans la B.D. de Gee *Le bug dans tous ses états*.
- Page 138 toujours: les illustrations d'animaux à côté de Wallace sont tirées d'ouvrages qu'il a publiés, d'après Wikipédia.
- Page 140: la «recette» d'un produit homéopathique (comptez une boucle centrale pour chaque CH) est, de nouveau, constituée d'une combinaison de caractères Unicode (qui sont décidément bien pratiques).
- Page 153: les deux personnages proviennent de la B.D. de Gee *Citations apocryphes*, où il explique lui aussi que Galilée n'a probablement jamais dit «et pourtant elle tourne».
- Page 152: les schémas ont été (trop) rapidement constitués par moi, les planètes et les étoiles étant des caractères Unicode.
- Page 154: il s'agit d'une enluminure de Jean Fouquet, intitulée «Bataille de Roncevaux en 778. Mort de Roland».
- Page 157: l'image de Vercingétorix a été peinte par François-Émile Ehrmann, celle de Boudica dessinée par Edward Farr. Boudica est en quelque sorte l'homologue britannique de Vercingétorix, mais je ne détaille pas ce point dans le texte pour encourager les gens intrigués par son apparition éclair à aller faire leurs propres recherches.
- Page 160: la pomme qui tombe sur la tête de Newton vient de la B.D. de Gee sur les *Citations apocryphes*. Chez lui comme chez moi, il s'agit d'un clin d'œil à Gotlib.
- Page 161: la personne regardant dans la lunette (c'est en fait une paire de jumelles dans le dessin d'origine) est la princesse de la B.D. de Gee *Dragon & fine aigrette*.
- Page 166: l'illustration est un extrait à peine modifié de la B.D. de Gee *Panique algorithmique*, où l'on retrouve également la comparaison entre un algorithme et une mélodie. Le boulier,

- lui, vient de la B.D. de Gee *Les ordinateurs sont des cons* (où Gee semble surestimer quelque peu son âge).
- Pages 166 et 167: les images de la Pascaline, de la machine analytique, de la carte perforée et de l'Enigma allemande ont été trouvées sur Wikimedia Commons.
- Page 172: l'image du Terminator est une photo, prise par Al Lemos, d'une statue exposée à la Comic-Con 2004.
- Page 172 toujours: les parodies des logos des cinq plus grands géants d'Internet (et plus puissantes entreprises mondiales au moment où j'écris ces lignes) viennent de la B.D. de Gee *La rentrée des GAFAM*.
- Page 174: l'image de gauche, dessinée par Jorge Cham, est tirée de la vidéo sur l'OpenAccess dont l'adresse est fournie page 190, vidéo qui est elle-même placée sous une licence libre.
- Page 174 toujours: l'image de droite est une parodie du logo de l'éditeur Elsevier dessinée par Michael Eisen pour une campagne de boycott. J'y ai ajouté un caractère Unicode représentant un cavalier d'échecs, pour évoquer l'éditeur Springer, l'autre géant de la publication scientifique, qui a un tel cavalier dans son logo. Springer semble toutefois un peu plus ouvert qu'Elsevier au concept d'*Open Access*.
- Page 175: ces quatre personnages, représentant les quatre libertés fondamentales du logiciel libre, sont issus d'une campagne de communication de l'April, association française de plaidoyer et d'information autour du Logiciel Libre (et des sujets connexes), qui sont mis à disposition sur le site web de l'association.

Sauf mention contraire explicite (ce qui concerne par exemple les B.D. de Gee), toutes les images indiquées ci-dessus ont été trouvées grâce à Wikimedia Commons. Certains schémas, dont la source n'a pas été précisée, ont tout de même été réalisés par moi.