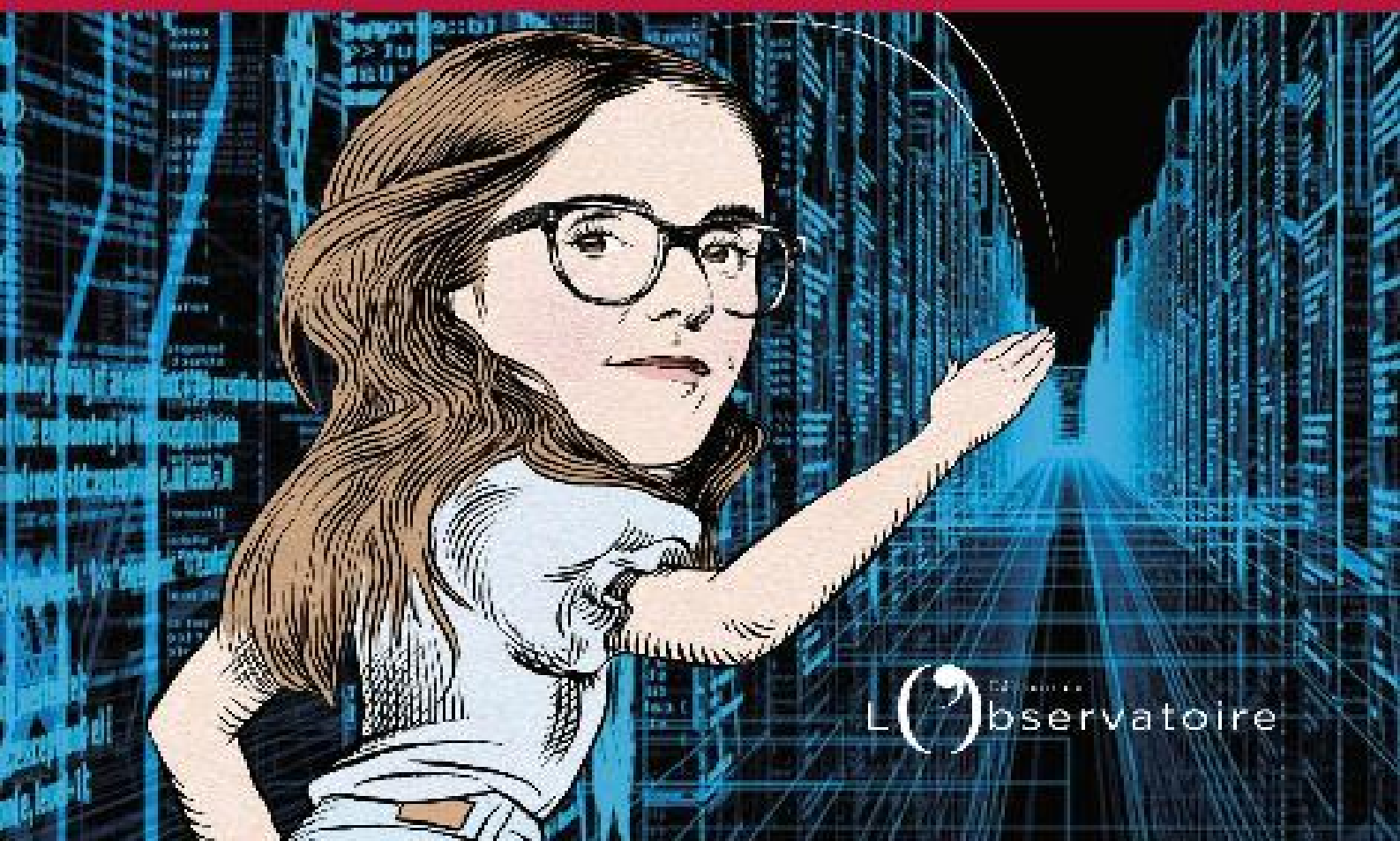


DE FACTO

AURÉLIE JEAN

De l'autre côté de la Machine

Voyage d'une scientifique
au pays des algorithmes



L'Observatoire

Aurélie Jean

De l'autre côté de la Machine

Voyage
d'une scientifique
au pays des algorithmes

Collection « De Facto »

L'Observatoire

ISBN : 979-10-329-0542-5

ISSN « De Facto » : 2648-7888

Dépôt légal : 2019, novembre

© Éditions de l'Observatoire / Humensis 2019

170 bis, boulevard du Montparnasse, 75014 Paris

Ce document numérique a été réalisé par [Nord Compo](#).

Collection « De Facto »

« Alexis de Tocqueville déplorait “l’effrayant spectacle” des philosophes français, enfermés dans des spéculations abstraites : “même attrait pour les théories générales, les systèmes complets de législation et l’exacte symétrie dans les lois ; même mépris des faits existants ; même confiance dans la théorie.”

C’est pour remédier à ce travers national que “DeFacto” accueille, autour du thème de la liberté, des textes à la première personne mêlant théorie et pratique, idées et expériences, réflexion et récit. Nos auteurs peuvent aussi bien être des théoriciens (de toutes disciplines) exposés à la pratique, que des praticiens forgeant leur théorie. Ils alternent rigueur argumentative et sincérité personnelle.

Plutôt que d’être simplement confronté à un système de pensée, le lecteur est ainsi embarqué dans une aventure intellectuelle, avec ses doutes, ses révélations, ses combats. Un voyage, au sens métaphorique comme souvent au sens propre.

De quoi redonner à la pensée la vigueur de l’expérience et la sève de la vie ! »

Gaspard Kœnig
directeur de collection

À mes grands-parents, Albert et Hélène Jean.

« No matter how successful you get, always send the
elevator back down. »

Jack Lemmon

Introduction

Automne 2011, Boston, Nouvelle-Angleterre. Depuis un mois, je travaille sur le campus du Massachusetts Institute of Technology (MIT), où, sous la direction des professeurs Raúl Radovitzky et John Joannopoulos, j'utilise les mathématiques, la physique, l'algorithmique et le code informatique pour comprendre les mécanismes du traumatisme crânien.

Tous les matins, je franchis les colonnes du Grand Dôme et emprunte le célèbre « couloir infini » (un quart de mile exactement) qu'ont traversé avant moi Kofi Annan, Buzz Aldrin, Ben Bernanke, Robin Chase et mon idole, Richard Feynman. Je longe des salles de classes, des salles d'expériences scientifiques ou encore des murs d'affichage, où se côtoient les annonces de compétitions de salsa, de courses de voiliers et de tournois d'échecs. C'est un peu ça aussi, le MIT : un lieu où sciences, ingénierie, danse, voile et échecs cohabitent librement et sans préjugés. Un lieu où tout le monde trouve sa place, loin des stéréotypes, avec une atmosphère d'ouverture aux autres qui aura joué un grand rôle dans mon parcours.

Mais en ce samedi après-midi ensoleillé, je ne franchirai pas le couloir infini. J'ai décidé d'aller visiter le meilleur ennemi du MIT : l'université de Harvard, située à seulement deux arrêts de métro, de l'autre côté de la rivière Charles. Je n'y vais pas pour admirer les beaux bâtiments de la plus ancienne université des États-Unis, ni pour revivre des scènes de *La Revanche d'une blonde* ou *The Social Network*, non. J'ai rendez-vous avec *Mark I*.

Le *Mark I*, l'un des tout premiers ordinateurs, a été construit durant la Seconde Guerre mondiale. C'est pour lui

que l'amiral Grace Hopper a développé un des plus vieux langages informatiques encore utilisés aujourd'hui : le Cobol. Le *Mark I* a été conçu pour permettre aux scientifiques du projet *Manhattan* (lancé par l'armée américaine avec le soutien du Canada et de la Grande-Bretagne pour travailler sur l'élaboration de la première bombe atomique) de calculer les effets de l'implosion.

J'ai découvert l'histoire du *Mark I* il y a près de vingt ans, en lisant la biographie d'un acteur du projet, le Pr Feynman, prix Nobel de physique. Richard Feynman a été l'une de mes grandes inspirations, lorsqu'à l'université j'ai fait connaissance avec l'atomistique. C'est par ses livres de mécanique quantique et sa personnalité si brillante et drôle que j'ai eu l'envie de devenir physicienne. Plus tard, j'ai découvert ses livres plus populaires, comme *Surely You're Joking, Mr. Feynman!*, qui concentre ses anecdotes scientifiques, mais aussi ses blagues – auxquelles je fais encore référence aujourd'hui, maintenant, qu'à mon tour, j'enseigne à l'université.

Sur les photos d'archives, un scientifique ou un technicien pose toujours à côté de *Mark I*, pour mettre en évidence sa taille gigantesque comparée au frêle *Homo sapiens*. L'homme, si petit face à la machine. À l'époque, c'était une fierté. Dire qu'aujourd'hui nos ordinateurs portables – que nous voulons toujours plus petits et légers – sont bien plus puissants ! Le *Mark I* a été désassemblé en 1959. Seules ses parties principales sont exposées aujourd'hui, mais peu importe : j'en rêve depuis plus de dix ans, et je *veux* le voir.

Me voilà arrivée à la station Harvard. À quelques mètres seulement se dressent deux grandes portes en fer forgé, portant la lettre H. Pour la première fois, j'entre dans l'enceinte historique de l'université de Harvard, qu'on nomme aussi le

yard. Au milieu des immeubles de briques et de pierres, je m'offre la liberté, loin du regard des jardiniers, de traverser les carrés de pelouse si bien entretenus. Une sorte de rébellion dans cette enceinte imposante, où sont passés Bill Gates, Michelle et Barack Obama, Sheryl Sandberg, Michael Crichton (l'auteur de *Jurassic Park*) ou mon autre idole, Conan O'Brien. Je m'efforce de conserver une sorte de nonchalance pour cacher mon excitation presque enfantine – certains esprits chagrins pourraient prendre cela pour une naïveté juvénile, et qui pour moi est un vrai atout, celui qui me permet d'aborder chaque étape avec confiance. Voilà qui explique d'ailleurs sûrement que je me sois toujours sentie chez moi aux États-Unis et à l'aise avec les Américains : leur optimisme à toute épreuve m'était forcément familier – éblouissement permanent qui empêche d'être blasé et pousse à découvrir de nouveaux mondes en permanence.

Je me dirige vers le très moderne Sciences Center, prête pour cette rencontre du cinquième type. Sur le chemin, j'imagine déjà les étoiles qui vont briller dans mes yeux. Mon anticipation peut sembler exagérée, mais c'est comme voir pour la première fois la *skyline* de New York ou la tour Eiffel, c'est magique !

À mon grand regret, cette machine et son histoire sont encore trop peu connues du grand public, alors que tant de choses sont liées à *Mark I* : les premiers langages informatiques, la naissance du mot « bug », le développement de la bombe atomique aussi, avec ses conséquences tragiques...

Je pousse les portes du Sciences Center et rejoins l'étage où m'attend *Mark I*. Je m'avance, prudente mais déterminée au milieu des touristes, qui sont eux aussi venus voir la bête. Et là, le choc ! Je ne ressens rien. C'est un petit drame existentiel,

qui sans en avoir l'air aurait pu avoir des conséquences rédhibitoires sur la suite de ma carrière. Une profonde déception esthétique, comme une passion épistolaire où le charme se romprait à la première seconde de la rencontre réelle. Bien sûr, l'engin est impressionnant. Mais il ne dégage aucune beauté, avec son gris triste et ses lignes grossières. Je suis d'une génération qui utilise des ordinateurs au design raffiné, de couleur blanche, rose ou dorée, et à l'ergonomie rigoureusement étudiée. À quoi donc pouvais-je m'attendre ? Les ingénieurs du *Mark I* n'avaient d'autre but que de bâtir une machine fonctionnelle. J'insiste, je fais le tour de l'engin, je cherche désespérément un coin de beauté, une couleur, un angle intéressant, quelque chose qui m'émeuve... mais toujours rien. Le néant complet. Les seules étoiles dans mes yeux proviennent des flashes des appareils photo des touristes qui s'agitent autour de moi – et qui, eux, semblent exaltés.

C'est alors que l'évidence me frappe. En cet automne 2011, dix ans après ma découverte des algorithmes, je ne suis plus une touriste. J'appartiens au monde de *Mark I*, désormais. Je suis une de ces scientifiques qui tentent de faire avancer la connaissance du monde. Avec d'autres (car la science est toujours une aventure collective), j'ai développé un algorithme de morphologie mathématique pour modéliser et simuler la forme des particules de carbone dans les caoutchoucs, afin de mieux comprendre les ressorts de leur élasticité. Pendant deux ans, j'ai utilisé ces mêmes simulations numériques pour améliorer la technique de génération d'un muscle cardiaque *in vitro*, technique qui vaincra peut-être un jour les rejets de greffe du cœur. À ma toute petite échelle, je suis aussi l'une des héritières de ces pionniers du *Mark I*.

Alors je ferme les yeux et j'imagine l'ordinateur en fonctionnement, avec des lumières clignotantes qui auraient

sans doute contribué à sa beauté. L'imaginaire prend le pas sur l'esthétique. Et maintenant, enfin, l'émotion me rattrape.

Je me figure Grace Hopper, assise près de *Mark I* avec son cahier de laboratoire, traquant les résultats de calcul mais aussi le moindre défaut dans le fonctionnement de la machine. Comment ne pas l'imaginer, écrivant pour la toute première fois dans son cahier le mot « bug », loin d'imaginer que soixante ans plus tard le monde entier l'emploierait ! Je connais l'histoire de ce bug : le 9 septembre 1945, un insecte (*bug*, en anglais) s'imisce accidentellement dans la machine, ce qui entraîne inévitablement un dysfonctionnement du *Mark II* (la deuxième version du *Mark I*), faussant les résultats de calcul. Aujourd'hui, nous parlons de bug pour évoquer un mauvais résultat, une incohérence dans la séquence logique des étapes de calcul, sans qu'une erreur syntaxique ou grammaticale du code informatique soit en cause. Merci, Grace, d'avoir mis un nom sur ce vilain défaut d'implémentation ! Il nous fait régulièrement tourner en bourrique et nous vaut de passer des heures, parfois des jours, à chercher la cause d'une erreur incompréhensible – puis d'autres heures encore à la réparer... Nous identifions un bug la plupart du temps à l'issue d'un calcul, alors que le code tourne pourtant correctement sur la machine. Il arrive de détecter des bugs sur des codes de calcul qui ont été écrits il y a plus d'une décennie ! Cela m'est arrivé – et c'est normal. D'autres plus tard trouveront sans doute des bugs dans des codes que j'ai pu écrire. Ainsi va l'informatique. De *Mark I* à aujourd'hui, il s'est passé tant de choses... Et il s'en passera encore de nombreuses d'ici à l'ordinateur quantique, qu'on annonce pour (après-)demain.

Me mettre un instant à la place de Grace Hopper, en cet été 2011, a finalement conforté ma motivation à continuer

dans cette voie. Cela dit, je me souviens de m'être dit qu'il était plutôt rassurant de ne pas pouvoir voyager dans le temps. Sait-on jamais, j'aurais pu être déçue en assistant à un exposé d'algèbre du mathématicien Al-Khwârizmî ou à une leçon de logique d'Euclide, notre maître à tous. Mon imagination et ma curiosité pourraient me jouer des tours !

Et voilà que quelques années plus tard Gaspard Kœnig me propose de voyager dans le mien – de temps – pour revisiter mon parcours...

« Une scientifique au pays des algorithmes » : voici comment Gaspard m'a présenté l'idée de ce livre. Inviter les lecteurs à un voyage au cœur des équations mathématiques et des lignes de code : une vraie gageure ! Le pays des algorithmes n'est pas encore la destination préférée des Français, mais il me semblait nécessaire de changer cette tendance, et Gaspard était déterminé à m'aider à réparer cette injustice.

Ce titre m'évoquait aussi quelque chose de très personnel. Comment ne pas penser à Lewis Carroll, et à *Alice au pays des merveilles* ? À 36 ans, je ne suis toujours pas certaine de savoir ce qui m'a plu quand j'étais enfant à la lecture de ce livre (et de sa suite, *De l'autre côté du miroir*). Sans doute était-ce la curiosité malade d'Alice, dans laquelle je me retrouvais. Combien de fois ai-je pu entendre cette phrase : « La curiosité est un vilain défaut » ? Alors qu'elle est, me semble-t-il, une arme pour découvrir les territoires encore inexplorés de ma propre vie ! Ma curiosité a toujours été dévorante. Mes grands-parents l'ont intelligemment cultivée au cours de mon enfance. Plus tard, je veux croire qu'elle a eu une influence positive sur mon parcours, sur mes multiples expériences et sur les personnes très différentes qui m'ont accompagnée et m'entourent encore aujourd'hui. Cette curiosité m'a aussi

amenée à me confronter à des échecs – et tant mieux ! Après tout, qui ne tente rien n’a rien. Seuls ceux qui ne font rien ne font pas d’erreur : j’aime cet état d’esprit, et ma curiosité m’aide à grandir, comme Alice.

Lewis Carroll décrivait Alice comme « extravagamment curieuse ». Cette curiosité est celle que nous, scientifiques, développons dans nos carrières : savoir poser et se poser les bonnes questions, remettre en cause ses idées et celles d’autrui, ou tout simplement s’évader dans un problème dont la solution n’existe peut-être pas. Naviguer dans le monde des algorithmes et de la modélisation numérique est pour moi un cadeau : celui de comprendre, par la virtualisation des phénomènes, les mécanismes de la vie, de tout système, d’ailleurs, vivant ou inerte. Écrire un algorithme, c’est dessiner un chemin de résolution pour un problème donné, une manière d’accéder rapidement et avec justesse (ou à une erreur près) à la réponse recherchée. J’ai expérimenté cette discipline dans de nombreux domaines – l’ingénierie, la médecine, l’éducation, le journalisme, l’économie, la finance... Autant d’univers différents qui ajoutent une dimension nouvelle à la seule logique : la réflexion analogique. L’avenir est dans la comparaison, l’interdisciplinarité, cette capacité à réfléchir de façon transversale pour faire profiter à de nombreux champs d’application les retombées de travaux.

Des livres de Lewis Carroll je retiens aussi l’étrangeté de ce monde parallèle « de l’autre côté du miroir », qui laissait penser que toute hypothèse était elle-même hypothétique. En choisissant de travailler sur les algorithmes et la modélisation du monde, je travaille depuis quinze ans sur ce fameux miroir, entre réel et virtuel. Ce miroir est aujourd’hui un véritable enjeu de civilisation, car il devient si net qu’il faudra s’armer

de connaissances pour ne pas s'y perdre – nous verrons cela dans la dernière partie de ce livre.

Dans ma carrière, j'ai simulé la morphologie des caoutchoucs à l'échelle nanoscopique, prédit l'élasticité d'un tissu cardiaque régénéré en laboratoire, automatisé l'écriture d'articles de *news* financières, ou encore simulé les mécanismes du traumatisme crânien. Pour chacune de ces applications, j'ai cherché à comprendre des mécanismes et à établir des prédictions par la simulation numérique. La démarche peut sembler paradoxale : plonger dans le virtuel pour comprendre le réel. Ces deux mondes, réel et virtuel, sont séparés par un modèle, une représentation mathématique et algorithmique de la réalité. Comprendre le fonctionnement de ce modèle, c'est comprendre ce qui relie ces deux mondes. Cet ouvrage aborde le fonctionnement des algorithmes, leur histoire, ainsi que nos interactions quotidiennes avec eux. On y détaillera aussi leurs limites, leurs ambiguïtés et leurs rôles dans l'innovation. On y découvrira enfin un concept qui joue un rôle essentiel dans ma carrière et ma pratique des sciences numériques – concept qui gagnerait à être connu de tous pour mieux appréhender le monde qui vient –, et qu'on nomme les « biais algorithmiques ».

Le biais algorithmique, c'est ce qui vient fausser les algorithmes et qui, sans qu'on s'en aperçoive toujours au premier abord, peut entraîner des discriminations écartant ou défavorisant une catégorie d'individus. Ces biais sont, par définition, non intentionnels. Comme on le verra, ils sont le fruit d'impensés qui ont échappé aux concepteurs et aux penseurs des technologies. Année après année, j'ai compris un peu mieux leurs origines et leurs conséquences, ainsi que les moyens qui existent pour les empêcher de s'installer dans les outils numériques que je développais.

Les biais algorithmiques sont aussi à l'origine de la révolte que je sens parfois poindre contre les évolutions technologiques – alors que nous devrions pouvoir établir un débat public dépassionné sur le sujet, pour mieux envisager notre avenir commun dans un monde où, soyons-en conscients, algorithmes et robots prendront une place croissante. Autant tenir ce débat en toute connaissance de cause, non ? Des dirigeants politiques au simple citoyen, nous devons tous accroître notre culture numérique – ce livre, je l'espère, y contribuera.

Enfin, cet ouvrage concentre ma réflexion personnelle sur cette science à la fois très ancienne et toute jeune qu'est l'algorithmique. L'algorithme a-t-il un genre ? Est-il coupable des discriminations raciales ou sexuelles dont on l'accuse régulièrement ? Si le code informatique est un langage, peut-on lui appliquer les règles de la linguistique moderne ? Autant de questions auxquelles aucun algorithme n'a encore pu répondre. Si vous le voulez bien, nous les examinerons ensemble !

Il y a toujours une première fois

Et si nous commençons par le début ? Ou plutôt, *les débuts* : mon premier ordinateur, mon premier surf sur Internet, ma découverte de l'informatique, ma première ligne de code, mon premier algorithme... Il y a une première fois à tout – et surtout, il y a ce que cette première fois provoque : cette accélération soudaine dans nos vies. On se souvient rarement de la toute première fois qu'on est monté sur un vélo ; mais on se souvient de ce jour où nos parents ont ôté les petites roues latérales – et des chutes et succès à répétition qui ont suivi. On se rappelle nos premières longueurs en natation,

la succession de plongeurs ratés puis réussis, sans clairement identifier notre première fois dans un grand bain.

Il en va ainsi de mon premier ordinateur : je ne me souviens pas précisément du jour où il est entré dans ma vie. Ce que je sais, en revanche, c'est que c'est avec lui que mon appétence pour l'informatique est née. Ou, plus exactement, une soudaine et impérieuse envie de sortir enfin de mon inculture complète dans un domaine qui, en cette année 2000, avait déjà commencé à prendre une large place dans nos vies. C'était l'époque de la « bulle Internet » et le web entraît progressivement dans tous les foyers. Google était arrivé en 1998, le premier iPhone ne viendrait que sept ans plus tard. Et vous rappelez-vous du fameux bug de l'an 2000 ? Tant de prédictions nous annonçaient une sorte de fin du monde... Tout cela pour un simple passage de millénaire qui nécessitait une remise à zéro informatique ! Les inquiétudes portaient notamment sur le format de la date stockée en mémoire pour les fichiers et les programmes, ou sur le format de la date dans les bases de données. Le passage de 99 à 00 pouvait créer des dégâts sans en avoir l'air, on risquait de perdre des données ou des séquences temporelles entières...

Nous voici face à un bel exemple de bug possible dû à une absence de prise en compte, lors du développement des outils, de certaines données d'entrée. Qu'on se rassure : les informaticiens ont trouvé la parade, tout s'est très bien passé en 2000, et le passage à l'année 10 000 se passera tout aussi bien. À l'époque, je dois dire, les tenants et aboutissants technologiques de ce bug m'étaient mystérieux, ce qui avait le don de m'agacer. Tout se déroulait sous nos yeux et je n'y comprenais rien. Comme si un univers à part avait décidé de grandir sans moi.

Mon envie de découvrir l'informatique est donc venue avant tout d'une frustration, qui s'exprime chez moi par un mélange d'agacement et d'impatience. J'étais frustrée de ne pas comprendre mais, plus encore, je n'arrivais pas à saisir ce qui me manquait pour commencer à comprendre. Prendre conscience de ce qu'on ne sait pas : voilà une étape clé de tout processus d'apprentissage. Dans mon cas, j'avais une conscience aiguë de mon incompetence, d'où mon agacement, mais je ne voyais pas bien ce que j'aurais dû savoir. Comment apprendre quelque chose qu'on n'a pas clairement identifié ? Je me sentais démunie. L'envie, elle, était là, profonde. Je *voulais* maîtriser le langage de l'ordinateur, je ne voulais plus me laisser guider aveuglément par la machine et, au-delà, je ne voulais plus rester étrangère à ce monde technologique qui se développait sous mes yeux. Encore aujourd'hui, quand on me demande pourquoi j'aime coder, je réponds systématiquement : « *Because I have the power, I have the power to change the world.* » Oui, avec le code, je peux changer le monde.

Ce n'est pas tant que j'aime coder en soi ; j'aime coder pour résoudre un problème, répondre à une question, pour aider à mieux comprendre les mécanismes qui se cachent derrière les phénomènes physiques, économiques ou sociétaux que l'on peut observer. Le code informatique est pour moi un moyen, et non une fin.

Mais à l'époque de mon tout premier ordinateur, je n'en étais pas là. J'ai suivi mon premier cours d'informatique sans savoir que derrière cette science étrange se cachait une discipline encore moins connue et pourtant plus ancienne, une discipline qui allait changer profondément ma manière de réfléchir et d'envisager le monde – j'ai nommé : l'algorithmique.

J'aimerais écrire que j'ai eu mon premier ordinateur à 10 ans, codé ma première application à 13 et remporté dans la foulée la compétition régionale des petits génies de l'informatique. La réalité est tout autre.

J'ai grandi loin des technologies digitales. Jusqu'à mes 8 ans, il n'y avait chez moi qu'un seul écran : celui de la télévision du salon. Une télévision à touches, sans télécommande, avec trois chaînes. Mon premier ordinateur et ma première connexion à Internet, je ne les ai eus qu'à 18 ans : un cadeau de mes grands-parents pour fêter tout à la fois ma majorité, mon baccalauréat et mon entrée à l'université. En 2019, cela peut sembler modeste ; en 2000, c'était un véritable investissement ! Je me rappelle encore tout le rituel qui a présidé à cet achat : les nombreux échanges avec mon grand-père sur les caractéristiques techniques de la machine à choisir ; mes desiderata quant au design de l'engin et son emplacement dans ma chambre ; et puis le parcours en voiture vers la boutique, avec de nouvelles conversations très sérieuses sur mon avenir... Tout était fait pour me faire prendre pleinement conscience de l'importance du moment. Et ça a fonctionné : je n'ai jamais réussi à me séparer de cet ordinateur. Son unité centrale est encore rangée dans le fond du placard de ma chambre d'enfant.

C'est en installant l'ordinateur que j'ai découvert mon inculture complète en la matière. Je me vois encore avec tous ces câbles de couleurs à la main, essayant de raccorder le clavier à l'écran, l'écran à l'unité centrale, et l'unité centrale au circuit électrique et au téléphone pour l'accès à Internet. Le fabricant avait prévu des codes de couleur pour faciliter les connexions et m'aider à mettre en marche l'outil qui, pour citer mon grand-père, « allait me donner des ailes ». Mais c'était encore plus frustrant. Le manuel était truffé de termes

que je ne connaissais pas. Je ne comprenais pas la différence entre mémoire vive et mémoire dure, je ne savais pas qui avait créé Internet ni comment cela fonctionnait... Tout ce que je savais, ou plutôt pressentais, c'était que l'informatique élargissait le champ des possibles.

Car si j'ai été élevée loin des « nouvelles technologies », je n'en ai pas moins grandi au milieu des sciences. Depuis ma petite enfance, mon grand-père me racontait des histoires sur le fonctionnement du monde qui m'entourait. La dynamo de mon vélo, la couleur bleue du ciel, la Terre qui tourne autour du Soleil, la construction ingénieuse des cathédrales et des pyramides : avec mon grand-père, tout était matière à réflexion !

Je me souviens encore parfaitement du jour où, avec lui, j'ai pour la première fois entendu parler du MIT. J'avais 7 ans et je prenais le petit-déjeuner dans la cuisine pendant que mes grands-parents écoutaient une émission de débats à la radio. C'était une sorte de rite familial : moi avec mon chocolat chaud, et mon grand-père, qui ne pouvait s'empêcher de commenter chaque propos des invités. Ce week-end-là, après les nouvelles internationales, le présentateur a parlé d'un institut de recherche situé dans le Massachusetts, aux États-Unis : le MIT. Ne parlant pas un mot d'anglais, je me souviens avoir pensé que c'était un drôle de nom : *Em-Aïe-Ti*... Je me souviens surtout que, pour une fois, mon grand-père a écouté sans interrompre le journaliste. Ce dernier racontait que les chercheurs du MIT étudiaient mathématiquement s'il était préférable de marcher ou de courir sous la pluie de façon à être le moins mouillé possible. À la fin de la chronique, voyant que j'avais écouté, mon grand-père s'est tourné vers moi avec un large sourire. Il m'a caressé la tête et m'a dit : « Tu vois, les mathématiques servent à tout ! » Ma grand-mère, tout sourire

elle aussi, a ajouté qu'il fallait toujours avoir un parapluie dans son sac. À l'époque, je me disais que ces chercheurs avaient beaucoup de chance de résoudre des problèmes aussi amusants ! Cela peut paraître naïf mais, alors que je n'avais jamais su répondre à la question « Que veux-tu faire quand tu seras grande ? », désormais je savais quel métier je voulais exercer : chercheur !

À 12 ans, j'avais déjà vu un réacteur nucléaire au CEA (Commissariat à l'énergie atomique), où mon grand-père travaillait en tant qu'agent administratif, mais je n'avais pas encore touché d'ordinateur. À 18 ans, j'avais acquis une grande culture scientifique, mais les sciences informatiques, elles, me restaient étrangères. Et ainsi, pour la première fois, seule dans ma chambre de jeune bachelière, je me trouvais impuissante, ne sachant même pas par quel bout attraper cette mystérieuse discipline.

Contrairement aux idées reçues sur les fans d'informatique, je n'ai aucune appétence pour les jeux vidéo (à part, peut-être, Tetris... C'est dire mon piètre niveau dans ce domaine), je ne suis pas passionnée par les films de science-fiction et encore moins par les robots. Au fond, je suis à l'opposé de ce qu'on imagine d'un développeur. D'abord, je suis une femme. Je suis plutôt ouverte et sociable, souvent féminine... Et je me moque autant de *Star Trek* que de Super Mario. Je pense être la seule personne à s'être endormie devant chacun des *Star Wars*. Certes, dans mon enfance, j'adorais Astro le petit robot, ou Nono, le compagnon d'Ulysse 31. Mais je ne faisais pas encore le lien entre robots et informatique. Même à l'adolescence, quand j'entendais parler de programmation, je pensais surtout à ces hackers étranges et aux petits génies de l'informatique qu'on voyait au cinéma, dans *Copycat* ou *WarGames*. La science-fiction ? Je lisais des romans

d'anticipation, oui (*Le Meilleur des mondes*, 1984, ou *Abattoir 5 ou la Croisade des enfants*), mais je m'attachais moins aux inventions technologiques qu'aux conséquences sociétales de ces évolutions. Je m'intéressais surtout aux réflexions sur la perte de liberté, la séparation des individus sur des critères discriminants, ou encore la mort écologique annoncée de notre planète.

Le cliché du développeur informatique asocial, enfermé dans sa bulle, peu sensible à l'esthétique vestimentaire et aux cocktails entre amis, s'il n'est pas entièrement le fruit de notre imagination, ne correspond pas à la majorité des informaticiens. Tout au long de mon parcours, j'ai rencontré des développeurs raffinés et cultivés – je pense particulièrement à Nikolay Osipov, Martin Hautefeuille, Ryan Flannery, Wendy Pino, Alexander Kudlay, Adrian Rosolen... Et tant d'autres ! Chacun avait son style, ses goûts, son attitude. Et tous avaient une grande ouverture d'esprit, avec une culture générale qui embrassait de nombreux domaines.

Mais, à 19 ans, j'avais encore en tête le cliché du développeur « geek » à l'extrême. Cela ne m'a pas empêchée de vouloir découvrir la programmation informatique. Mon envie venait de ma frustration de me sentir stupide devant un domaine que je pressentais important. Apprendre l'informatique, ce n'était pas seulement soulager une frustration. C'était comme sauter en marche dans un train qui pouvait me mener vers d'autres univers. Rétrospectivement, je peux dire que cette frustration initiale aura été bonne conseillère. Elle et ma curiosité sont, encore aujourd'hui, mes meilleures alliées.

Voilà donc pourquoi, lors de ma deuxième année en « sciences de la matière » à l'université Pierre-et-Marie-Curie (devenue, depuis, Sorbonne Université), je me suis inscrite

pour un cours optionnel d'informatique. Et c'est là que, dès le premier jour, j'ai découvert une discipline mathématique bien plus ancienne : l'algorithmique.

J'aime parler de l'algorithmique comme d'une science caméléon. D'abord parce qu'elle opère dans la plupart des autres disciplines et de leurs applications. Mais aussi parce que chacun lui assigne des définitions différentes selon sa perspective. Pour certains, elle relève des mathématiques, pour d'autres, de l'informatique. Tout le monde a aujourd'hui en tête les algorithmes des réseaux sociaux, ceux de triangulation pour la géolocalisation, ou encore l'algorithme d'attribution des places à l'université. Pour le grand public, l'algorithme est indissociable du monde numérique. Et pourtant, l'histoire de cette discipline remonte bien avant les applications pour smartphone, ou même les premiers micro-processeurs. Elle date des cours de logique d'Euclide, 300 ans avant notre ère ! Mais cela, on l'entend rarement – car le mot « algorithme » est souvent mal expliqué, voire pas du tout défini. Alors, définissons ! Ce sera déjà un grand pas de franchi.

Le Larousse de 2019 définit un algorithme comme « un ensemble de règles opératoires dont l'application permet de résoudre un problème énoncé au moyen d'un nombre fini d'opérations ». Je valide ! Ce problème n'est pas nécessairement mathématique ou scientifique, mais il nécessite une méthode logique pour en trouver la réponse – de la façon la plus efficace et la plus rapide possible.

Par exemple, on peut chercher une méthode logique pour trouver le plus vite possible et sans erreur le plus gros melon sur l'étal d'un marché. Pas besoin, pour cela de grands calculs mathématiques : il suffit de l'œil humain et d'une méthode de tri astucieuse. Vous avez « votre » méthode et vous l'appliquez toutes les semaines au marché ? C'est un algorithme.

En ce qui me concerne, j'écris et j'utilise des algorithmes numériques destinés à des calculs numériques, qu'on nomme *simulations*, conduites sur un ordinateur dans le but de résoudre un problème. Je navigue donc dans un univers numérique. Nous entrons ici dans le monde de l'intelligence artificielle (IA), où l'on fait réaliser par l'ordinateur un ensemble d'opérations nécessaires à la résolution mathématique d'un problème. Mais n'allons pas trop vite en besogne ! Pour l'heure, je n'en suis qu'au tout début de mon voyage, sur les vieux bancs de mon université au cœur du Quartier Latin.

Un peu d'histoire

Si je n'ai découvert et écrit mon premier algorithme qu'en 2001, la discipline algorithmique ne m'avait pas attendue pour exister. Car le pays des algorithmes a une histoire – une longue histoire, même, qui remonte jusqu'avant notre ère...

Et pourtant, la plupart des gens (comme moi-même au début) croient que les algorithmes sont nés dans la Silicon Valley avec Facebook et Google. En vérité, l'algorithme numérique – celui qui est destiné à être exécuté par un ordinateur – n'est qu'un certain type d'algorithme.

J'aurais aimé, en 2001, qu'on me raconte l'histoire des algorithmes comme ma professeure de physique, Mme Lucille Julien, nous racontait l'histoire des hommes et des femmes qui ont fait avancer la science. Une histoire dramatique comme celle de Galilée devant le tribunal d'inquisition, inspirante comme la pomme de Newton, voire romantique comme celle de Pierre et Marie Curie, j'étais prête à tout écouter ! Ces histoires donnaient de la poésie à la discipline. Elles nous permettaient de nous projeter dans ce monde que nous découvriions. Et elles nous faisaient mieux comprendre les débats agités et les guerres entre écoles de pensées – à toutes les époques, y compris la nôtre.

Las, on ne nous a rien dit de tout cela En cette époque connectée où l'instantanéité rythme nos journées, se placer dans des temps longs devient pourtant plus indispensable que jamais pour appréhender notre monde.

Avant de découvrir ce que les algorithmes numériques nous permettent de faire aujourd'hui, puis de nous projeter dans le futur de l'intelligence artificielle, sortons donc un peu du XXI^e siècle et faisons un détour par la Perse et la Grèce antique...

La Perse : là où tout a commencé... ou presque

À 19 ans, avec quelques années de latin derrière moi et l'arrogance sans limite d'une jeune étudiante, il me semblait évident que le mot « algorithme » avait une étymologie grecque. *Algos* voulait sûrement dire quelque chose en grec ancien – un mot qui aurait aussi donné *algèbre*... Quant à *rithme*, je ne voyais pas d'autres racines que celle de *rhuthmós*, qui a donné le mot « rythme ». Sûre de mon fait, j'écrivais souvent « algorythme » jusqu'à ce jour où l'on m'a fait remarquer, après plusieurs cours, que c'est bien un *i* et non un *y*. Présomptueuse peut-être, mais surtout curieuse, je me précipite donc à la bibliothèque de l'université Pierre-et-Marie-Curie pour chercher la véritable étymologie du mot.

D'habitude, j'évitais d'y aller pour travailler car la température élevée m'empêchait de me concentrer. Je n'ai jamais compris pourquoi les bibliothèques universitaires sont de véritables saunas... Mais je n'ai pas vraiment le choix : en 2001, ne l'oublions pas, Wikipédia n'existe pas encore et Google n'a que 3 ans. Quant aux assistants vocaux et aux smartphones, ils n'existent que dans les films de science-

fiction : impossible donc de sortir mon téléphone intelligent pour lui demander : « Qu'est-ce qu'un algorithme ? ».

N'ayant pas trouvé grand-chose sur Internet concernant l'histoire des algorithmes, je finis par me rapprocher de l'un des conseillers de la bibliothèque, immobile depuis un moment et apparemment frigorifié, malgré la température élevée, si j'en crois la longue écharpe qui recouvre son cou et ses épaules. Il me mène jusqu'au rayon informatique, tout au fond, à côté des livres de mathématiques, et me désigne l'étagère sur laquelle se trouvent les livres d'algorithmique. Ils sont nombreux, leurs couvertures démodées : je commence à penser que cette discipline n'est peut-être pas si jeune que je le croyais. Je balaye rapidement le rayon, jusqu'à ce qu'un titre attire mon attention. *Introduction to Algorithms*, voilà qui me semble parfait. Je remarque également l'éditeur : MIT Press. Le MIT ! Soudain, je me revois à 7 ans, dans la cuisine de mes grands-parents. J'attrape le livre et m'en vais lire un peu plus loin pour commencer mon voyage.

C'est dans les premières pages de ce livre que je découvre les racines du mot « algorithme ». Et force est de reconnaître qu'elles ne sont pas grecques. Elles nous emmènent en Perse, au IX^e siècle de notre ère, où vivait le mathématicien Muḥammad ibn Mūsā al-Khwārizmī. C'est son nom latinisé, Algorithmi, qui sera utilisé pour baptiser l'algorithme. Mathématicien, mais aussi astronome et géographe, al-Khwārizmī est originaire de l'actuel Ouzbékistan. Il était membre de la Maison de la sagesse, à Bagdad, où il est mort en 850, laissant derrière lui un capital intellectuel qui a rayonné à travers le monde. Car l'algorithme n'est pas son seul héritage ! La suite du livre m'apprend qu'il a également donné son nom à l'algèbre, avec son *Abrégé du calcul par la restauration et la comparaison*. Je repars donc de la

bibliothèque avec ce livre sous le bras, et l'excitation d'une gamine de 7 ans qui vient de découvrir une belle histoire.

Quelques jours après cette découverte, un cours magistral vient remettre la Grèce sur le devant de la scène. Le cours s'intitule « Diviser pour régner » : c'est le nom d'une méthode de calcul inventée par Euclide au III^e siècle avant J.-C. pour calculer le « plus grand commun diviseur¹ » de deux nombres entiers.

Sitôt rentrée chez moi, j'ouvre mon Grand Larousse pour en découvrir plus sur ce « père des mathématiques ». Ses *Éléments*, apprends-je, ont posé les bases des mathématiques et de la géométrie. On lui doit, entre autres, les principes de la géométrie dite « euclidienne », ainsi que les théories des nombres primitifs. Euclide donnait des cours de logique dans lesquels il présentait des axiomes, mais aussi des théorèmes et leurs démonstrations. Il y présentait également des méthodes efficaces de résolution de problèmes mathématiques ou géométriques. « Diviser pour régner » en fait partie.

Tout le monde connaît l'expression « diviser pour mieux régner ». En politique, elle sous-entend l'élaboration d'une stratégie pour affaiblir une communauté en dressant les individus les uns contre les autres, afin d'augmenter son pouvoir. L'idée d'Euclide est relativement similaire, sinon que les « individus » en question ne sont pas des humains, mais des éléments de tout type. Des nombres, par exemple. Ou des pommes.

Des pommes, oui. Car si je me suis précipitée chez moi pour en savoir plus sur Euclide, ce n'est pas uniquement par curiosité scientifique. Encore une fois, il faut revenir à mon enfance – ou plutôt, à mon adolescence. Sans le savoir, je connaissais l'algorithme d'Euclide depuis l'année de mes

13 ans. Mais si vous le voulez bien, continuons encore un peu notre voyage dans le temps avant de revenir à nos moutons numériques. Où l'on verra que les algorithmes sont d'abord une affaire de bon sens...

Une pause au jardin (mathématiques appliquées)

Après la Perse, faisons donc un saut dans le Perche – plus précisément dans l'ancienne maison de campagne de mes grands-parents, à Illiers-Combray (où habitait la tante Léonie de Marcel Proust). Dans le jardin, nous avons trois pommiers. Chaque année arrive le temps des compotes, des confitures et des tartes aux pommes de ma grand-mère. Mais avant ces réjouissances, il faut d'abord cueillir et trier les pommes !

Imaginez un instant que vous avez 13 ans, comme moi, et qu'ensemble nous sommes chargés de cette grande mission. Nous récoltons les pommes une à une, à la main, et nous les disposons dans un grand sac en tulle. Nous devons ensuite trier ces pommes, de la plus petite à la plus grosse : les plus grosses serviront pour la compote ; les plus petites seront mangées au couteau ou garniront les tartes. Le problème est simple, n'est-ce pas ? Vous arriverez facilement à trier ces pommes, et sans la moindre erreur, je n'ai aucun doute là-dessus. La donne change si je vous mets au défi : je parie que je mettrai beaucoup moins de temps que vous à trier les pommes. Tenu ? Allons-y.

Vous procéderez certainement par tâtonnement et, même si vous avez un œil de lynx, je sais que je peux aller plus vite. Comment ? C'est mon grand-père qui m'a donné la solution, en 1995, et bien qu'il ne connaisse pas la méthode d'Euclide, elle s'inspire du principe de « diviser pour régner ». Laissez-moi vous enseigner le secret à mon tour.

« Sépare aléatoirement les pommes dans plusieurs sacs, disait mon grand-père. Trie chaque sac individuellement, puis accorde tes tris séparés en comparant les plus petites pommes d'un sac aux plus petites de l'autre, etc. »

Nous pouvons le faire ensemble, si vous voulez. Mettons que nous avons soixante pommes. Nous commençons par les diviser en six sacs de dix pommes. Nous trions chaque sac séparément, en comparant les pommes deux à deux. Puis nous allons prendre deux sacs au hasard, et nous allons les « fusionner » – autrement dit : nous allons comparer les pommes de ces deux sacs et les ordonner intelligemment pour obtenir un sac de vingt pommes triées. Pour comparer les deux sacs de pommes déjà triées, nous comparons la plus petite pomme du premier sac avec la plus grosse pomme du second. Si la plus petite pomme du premier sac est plus grande que la plus grande pomme du second sac, alors bingo, le tri est déjà fait : sinon, nous poursuivons en comparant la deuxième plus petite pomme du premier sac avec la plus grande du second, et ainsi de suite en échangeant les pommes... Le principe est simple, là aussi, mais avec cette technique, nous avons toutes les chances de minimiser le nombre d'opérations de comparaison pour parvenir au tri complet des soixante pommes. On ira même encore plus vite si on sépare les pommes dans dix sacs différents, et non six. Mon grand-père, sans en avoir conscience, m'avait appris les fondamentaux de l'un des concepts algorithmiques les plus utilisés aujourd'hui...

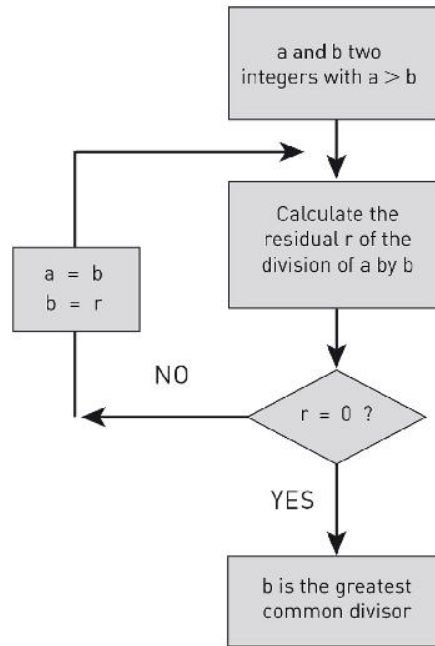
L'algorithme d'Euclide va plus loin, car il introduit la notion de récursivité – un des grands principes en algorithmique.

Pour comprendre le principe de récursivité, prenons un exemple concret. Nous considérons deux nombres, $a = 18$ et

$b = 12$, dont on souhaite calculer le plus grand diviseur commun. Pour cela, nous réalisons la division dite euclidienne entre le plus grand nombre (ici, a) et le plus petit (ici, b), qui nous fournit un quotient et un reste. Rappelez-vous ! C'est la division que nous avons tous apprise à l'école élémentaire. La division euclidienne de 50 par 10, par exemple, donne un quotient de 5 et un reste de 0. C'est le cas le plus simple : si le reste de la division euclidienne est nul, alors a est divisible par b , et donc le plus grand diviseur commun est b !

Mais ce n'est évidemment pas le cas le plus fréquent. Dans le cas choisi ici, la division de $a = 18$ par $b = 12$ donne comme quotient 1 et comme reste 6. Le reste est donc non nul. Nous procédons alors à une deuxième étape de calcul, en remplaçant a par la valeur de b (12) et b par la valeur du reste (6), et on réalise la division euclidienne de a par b . On obtient ici comme quotient 2 et comme reste 0 : c'est gagné ! Nous avons trouvé notre plus grand diviseur commun, qui est $b = 6$. Si le reste avait été non nul, alors on aurait continué la boucle en divisant toujours l'ancien diviseur par le dernier reste obtenu, jusqu'à obtenir un reste nul.

Diviser pour mieux régner ! Euclide avait trouvé comment calculer rapidement le plus grand diviseur commun, même de très grands nombres. La clé de sa méthode, c'est la récursivité – le fait d'appliquer en boucle une opération sur l'opération elle-même jusqu'à satisfaire une condition spécifique. L'opération est ici la division, et la condition à satisfaire est le reste qui doit devenir nul. Le dessin ci-dessous présente l'algorithme sous forme schématique :



L'algorithme n'est pas une recette de cuisine (mais l'inverse est vrai)

J'ai pris l'habitude, dans mes cours d'enseignement ou lors de différentes présentations, de poser la question suivante : « Selon vous, qu'est-ce qu'un algorithme ? ».

Le « selon vous » est une douce manœuvre pour rassurer mon auditoire et faire comprendre aux gens que je souhaite écouter *leur* définition et non *la* définition exacte d'un algorithme, en précisant qu'il n'y a pas de fausses réponses². Je suis souvent agréablement surprise, parfois agacée, mais je n'en veux jamais aux personnes qui me répondent. Après tout, si je devais donner à un économiste ma définition du libéralisme, du capitalisme ou encore du communisme, il risquerait de grincer des dents : ma réponse serait nécessairement subjective, inspirée d'une certaine sensibilité.

Lorsque je m'adresse à une audience de non-spécialistes, je me prépare systématiquement à tout entendre. Et j'ai tout

entendu, même une chanson ! Oui, une chanson. Je l'ai entendue au Colorado, en novembre 2018, alors que je passais quelques jours chez une de mes meilleures amies, Sandrine Vohra. J'ai profité de ces quelques jours à Boulder pour passer deux heures dans l'école des filles de Sandrine dans le but de parler algorithmes avec les élèves de leurs classes. Léa et Mili, âgées respectivement de 9 et 6 ans, étaient fières d'accueillir *Auntie* Aurélie dans leur école : je devais être à la hauteur. Les enfants ont une absence de filtres qui les rend attendrissants, contrariants, amusants... et surprenants. À cet âge, les biais cognitifs sont encore rares, ce qui rend souvent les discussions encore plus intéressantes. Et c'est au tout début du cours, au moment même où je demandais aux élèves s'ils savaient ce qu'est un algorithme, que cinquante-huit enfants se sont levés en même temps pour chanter :

An algorithm is...

A list of steps!

*That you can follow to complete a task!*³

[Tout le monde lève les bras en l'air.]

La chorale était un brin désynchronisée, mais c'était émouvant de voir des enfants âgés de 8 ans en moyenne chanter l'algorithme avec un tel enthousiasme, sans même prononcer le mot *computer* (ordinateur, en français). Ils ne sont pas tombés dans le piège dans lequel plongent presque tous les adultes, qui réduisent les algorithmes au monde numérique. Malheureusement, nous ne sommes pas tous comme ces enfants...

La définition que j'entends le plus souvent de la part de néophytes est la suivante : « L'algorithme est une recette de

cuisine, qui contient des ingrédients et une marche à suivre précisément pour réaliser quelque chose sur un ordinateur. »

Je ne sais pas qui a commencé à définir l'algorithme comme une recette de cuisine, mais je lui en veux terriblement ! Cette personne avait sans doute les meilleures intentions du monde, et je comprends la démarche. Sous un certain angle, parler de recette de cuisine peut sembler correct : après tout, l'algorithme est une séquence d'opérations visant à réaliser une tâche, ce qui est aussi le cas des recettes. Mais l'image est trop simpliste et induit le public en erreur.

Tout d'abord, je dois reconnaître que la comparaison même à une recette de cuisine blesse mon ego. J'en retire toujours la désagréable impression qu'on limite l'algorithme à la simple fabrication d'un gâteau au yaourt, un dimanche après-midi pluvieux. Je me trompe peut-être, mais je doute que les gens pensent à Alain Ducasse ou Hélène Darroze quand ils dressent le portrait robot d'un concepteur d'algorithmes.

Mais surtout, une fois l'idée de « recette de cuisine » installée dans l'esprit des gens, il devient difficile de leur faire comprendre ces notions essentielles (que nous allons développer dans ce livre) que sont la distinction entre critères explicites ou implicites, les techniques d'apprentissage, ou encore les biais algorithmiques. L'image de la recette de cuisine nous éloigne d'une abstraction pourtant nécessaire pour comprendre le « vrai » fonctionnement d'un algorithme.

Je vous propose plutôt de retenir la chose suivante : la recette de cuisine est une sorte d'algorithme, dans la mesure où elle contient des critères tels que les ingrédients, le temps de cuisson, ainsi qu'une procédure (incorporer la farine, puis les œufs et le lait, fouetter le tout avec régularité...). Mais le contraire est faux ! Images et autres analogies ont une vertu

pédagogique indéniable – et la vulgarisation doit pouvoir se raccrocher à des repères concrets de notre quotidien pour que nous puissions comprendre. Mais les images restent une déformation de la réalité, et il faut prendre garde à ne pas l'oublier. Nous aurons l'occasion de revenir sur cette difficulté.

Pour ma part, quand je définis un algorithme, je commence toujours ma phrase par : « Avant toute chose, un algorithme n'est pas une recette de cuisine... Mais, oui, la recette de cuisine est un algorithme. Laissez-moi vous expliquer... »

Dans mes explications, alors que je passe les premières minutes à parler d'Euclide et de al-Khwārizmī, je saute très vite dans le monde de l'algorithme numérique. En commençant, bien sûr, par une définition.

On qualifie de numérique un algorithme qui a été conçu pour être implémenté dans un code informatique destiné à faire tourner une simulation ou un calcul sur un ou plusieurs microprocesseurs d'un ordinateur. La différence est importante, voire fondamentale. Euclide pouvait appliquer à la main son algorithme sur un problème de tri comme celui de nos pommes du jardin. Mais si cette méthode du « diviser pour régner » est évidemment applicable aussi par un ordinateur, les algorithmes développés aujourd'hui sont spécifiquement pensés pour être utilisés par un ordinateur, et uniquement par un ordinateur. Ils sont inutilisables à la main, d'où leur nom spécifique : algorithmes numériques. C'est le cas des algorithmes d'apprentissage profond, ou *deep learning*, qui permettent par exemple à un programme (après un « entraînement » sur des millions de cas) d'identifier un chien ou une voiture sur une photo. Ces réseaux sont irréalisables à la main, principalement en raison de leur complexité. J'ajoute que les algorithmes numériques sont, par essence, évolutifs :

nous cherchons sans cesse à réduire leur complexité ou à développer des algorithmes capables de résoudre de nouveaux problèmes.

L'algorithmique n'est assurément pas une science figée. Elle évoluera encore davantage dans le futur avec des évolutions de machines toujours plus rapides, mais aussi, peut-être, avec l'apparition de nouvelles logiques, comme la logique quantique. L'algorithmique numérique, cette arrière-petite-fille de l'algorithmique, est une science relativement jeune qui a encore de longues années devant elle !

Welcome to the Neguev Desert

Nous allons bientôt entrer dans le détail de certains de ces algorithmes numériques. Mais auparavant, j'aimerais que ce voyage dans le temps et l'espace s'offre un dernier détour inattendu – sous les étoiles et autour d'un feu.

À l'heure où j'écris ce chapitre, je suis en déplacement en Israël, avec mes amies Judith Darmont et Géraldine Aresteanu. Nous avons décidé de passer quelques jours dans le désert israélien, le Néguev, en compagnie des Bédouins, dont le chef Walidie est un ami de Judith. Nous arrivons de Tel-Aviv en voiture, en milieu d'après-midi, et nous nous familiarisons avec notre nid pour la prochaine nuit, sous un nombre d'étoiles que nul palace ne saurait offrir. Après une longue balade dans le désert, nous préparons le dîner au feu de bois avec Walidie et ses camarades. Le pain, les légumes et le tahini sont prêts, nous nous installons tous autour du feu, assis sur des tapis confectionnés par les femmes de la tribu. Les Bédouins nous apportent des couvertures : il fait froid, la nuit, dans le désert. On mange, on se parle, même difficilement. Je ne parle qu'anglais ; je connais quelques mots en arabe et en hébreu mais pas suffisamment pour alimenter une conversation digne

du *small talk* américain qui permet d'apprivoiser son interlocuteur. À la place, je souris et fais des gestes accompagnés de mots-clés. C'est l'un de mes meilleurs amis, Nikolay Osipov, qui m'a donné ce conseil précieux lorsque je suis partie pour les États-Unis, en 2009 : « Pour t'intégrer, imprègne-toi de la culture locale et, surtout, souris ! Le sourire se comprend partout ! » En souriant, la communication passe toujours. Nikolay savait de quoi il parlait : cinq ans auparavant, il était arrivé à Paris de Saint-Petersbourg, sans connaître personne et avec une expérience de notre culture limitée aux films de Pierre Richard et Gérard Depardieu, immensément populaires en Russie. Dans ce désert du Néguev, je me souviens des mots de Nikolay et de mes premières années aux États-Unis. Je souris donc à Walidie, il comprend et me sourit en retour.

Nous arrivons à la fin du repas. La nuit est noire et les étoiles nous accueillent. Judith et Walidie parlent entre eux en hébreu, pendant que Géraldine prend quelques clichés de la scène – c'est une photographe professionnelle, profondément talentueuse. Walidie s'interroge et lui demande ce qu'elle recherche dans la photographie, puis il se tourne vers moi et me demande ce que je fais dans la vie. Je suis embêtée, je ne sais comment lui expliquer – lui qui n'a jamais connu que le désert, que peut-il bien savoir des sciences numériques ?

Géraldine vient à mon secours avec énergie : « *She is a scientist!* » Je vois bien que Walidie a l'air perplexe. Avec mon short en jean, mes baskets et ma queue de cheval, j'ai l'air d'avoir 25 ans et je suis loin de l'image du scientifique qu'on voit dans les films. Mais à ma grande surprise, Walidie n'a pas ce préjugé. Walidie ne regarde pas de films : son désert, son peuple et la nature sont ses seuls repères. Il me demande ce que je fais dans les sciences. Si seulement je pouvais lui dire

que j'étais astronome ! Avec toutes ces étoiles qui l'accompagnent chaque nuit, il aurait forcément compris mon métier. Hélas, je n'ai jamais étudié l'astronomie. Je lui dis que je fais des mathématiques, de la mécanique, et très vite je lui parle d'algorithmique. Il ne connaît pas ce mot et me demande de le lui expliquer, ce qui me met en joie. C'est une chance rare que de parler algorithmique à une personne qui n'a jamais entendu ce mot auparavant ! Celui ou celle qui parle systématiquement de recette de cuisine n'était pas passé par le désert de Néguev.

Je commence donc à lui parler de méthodes mathématiques pour résoudre un problème ou exécuter une tâche. Je lui parle aussi d'Antiquité et de Perse. Entourée de sable et d'étoiles, je sentais cette conversation prendre un tour magique. Il réfléchit, tire une fois de plus sur son herbe, souffle sa fumée vers le ciel et me dit : « En fait, l'algorithme, c'est la nature, c'est le ciel, les montagnes, les étoiles. » Je lui demande de m'expliquer. Il me dit que, s'il en croit ma définition, l'algorithme est partout. L'algorithme est un procédé pour résoudre, et construire. C'est la définition même de la nature. Il marque un point. Il me sourit, rit et me suggère de sortir de ma vision trop prosaïque de l'algorithmique. « Tu es trop rationnelle. Pourquoi l'algorithmique ne serait-elle que mathématique ? Ce n'est ni cet Euclide ni ton mathématicien perse qui ont inventé l'algorithmique, c'est la nature ! » Il ajoute : « Regarde le ciel, cet amas d'étoiles organisées selon une logique que seule la nature est capable de vraiment comprendre, car c'est elle qui l'a créé... Moi, je vois l'algorithmique comme la vie, l'espace, le monde dans lequel nous naviguons. »

Je suis peut-être trop rationnelle, reste que je me vois difficilement proposer cette définition des algorithmes à mes

élèves... Je lui explique l'angle mathématique de mon travail, Walidie hoche de la tête comme pour me dire que je n'ai pas compris de quoi il parlait. « Tu crois que tu es connectée car tu as de belles machines, des ordinateurs puissants, insiste-t-il. Mais avec moi, ici, dans ce désert, tu es réellement connectée. »

Notre discussion se perd malheureusement dans des traductions compliquées. Si seulement je pouvais parler couramment hébreu, ou arabe ! Walidie finit par poser sa main sur mon épaule et me dit : « C'est bien ce que tu fais, ton travail va nous aider à mieux comprendre notre monde. » Il me sert un verre de thé bien chaud et nous trinquons.

Alors, je dis à Walidie que je mentionnerai nos échanges dans le livre que je suis en train d'écrire. Je résume mon chapitre sur l'histoire des algorithmes, et Walidie me prévient : « Attention à ce que ton histoire ne se résume pas à une succession de dates ! En regardant autour de toi, tu verras que l'algorithme est partout. » Nous rions. Je me demande si c'est l'herbe que Walidie fume qui déforme sa perception des algorithmes... Peu importe, au fond. Nos échanges méritaient quelques lignes.

« Tu écriras un jour mon histoire ? me demande finalement Walidie. Il y a des choses que je veux transmettre à tous les gens loin de mon désert. » Je dis oui d'un geste de la tête, avant de promettre que je commencerai par sa définition de l'algorithme. Walidie est content, il me ressert du thé à la menthe, et conclut : « *Welcome to the desert!* »

1. Le plus grand commun diviseur (PGCD) de deux entiers a et b est le plus grand entier commun par lequel ces deux nombres a et b sont divisibles. Par exemple, le plus grand diviseur commun des nombres 15 et 20 est 5. En effet, 15 est divisible (sans reste) par 1, 3, 5 et 15; alors que 20 est divisible par 1, 4, 5, 10 et 20. Le plus grand diviseur commun est donc bien 5. Ce calcul devient compliqué sur des grands nombres et la méthode proposée par Euclide permet de réaliser ce calcul le plus rapidement possible.

2. Note pour mes étudiants : cela vaut essentiellement pour mes conférences et interventions diverses. Lorsque je pose la question après plusieurs leçons sur l'algorithmique, j'attends une réponse juste et précise ! Merci à vous.

3. « Un algorithme est... / une suite d'étapes / pour accomplir une tâche ! »

Mes premiers algorithmes

J'écris mon premier algorithme à 19 ans, au cours d'un travaux pratique de sciences informatiques un peu particulier. Nous sommes en septembre 2001 et me voilà donc partie pour mon premier cours d'informatique, la fleur au fusil et le sourire aux lèvres, prête pour un duel intellectuel selon des règles que je ne connaissais pas encore. Le mystère allait être levé, j'allais maîtriser la machine, enfin ! Nous sommes en septembre 2001, ma première année de fac est derrière moi et je pense déjà au doctorat que je commencerai quatre ans plus tard. Bien sûr, je ne sais pas encore quel sera mon sujet de recherche, ni qui pourra être mon directeur de thèse, mais je suis déjà sûre de vouloir devenir docteur, à l'image du grand Richard Feynman – et de tous ces professeurs qui, sans le savoir, m'ont inspirée. Ce cours d'informatique, sans que je le sache alors, allait déterminer le choix de la discipline dans laquelle j'allais naviguer pour mon doctorat.

Dans l'amphithéâtre, pour ce premier jour, je m'assoie au premier rang, avec une camarade déterminée comme moi à attaquer frontalement cette discipline. Nous avons l'impression d'aller au combat, de nous confronter avec bravoure à notre meilleur adversaire. Machiavel ne conseillait-il pas d'être proche de ses amis, et plus encore de ses ennemis ? En attendant notre professeur, je relis la description de l'option. Outre les cours magistraux sur les sciences

informatiques sont prévus des travaux pratiques (TP) par groupes de vingt ou trente étudiants. Je les attends avec impatience.

Ce premier cours démarre sur l'histoire des sciences informatiques. Petit aparté à ce sujet : je trouve étrange, a posteriori, que durant ce cours introductif, aucune femme n'ait été nommée. Pas une seule de celles qui ont développé les premiers langages de programmation durant la Seconde Guerre mondiale. En plus de l'amiral Grace Hopper, qui a développé le langage Cobol et le premier compilateur, il y a également eu les cinq femmes du projet ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), qui ont développé un langage permettant de réaliser des calculs de trajectoires de missiles pendant la guerre. Aucune mention. Ce n'est que bien plus tard, en 2015, que j'ai découvert l'existence de ces cinq scientifiques, dans un article des MIT News traitant de l'histoire de la programmation informatique...

La suite du cours m'apprend une chose que je n'oublierai jamais : c'est que l'ordinateur est stupide et profondément docile. Car, au fond, que fait-il ? Il effectue sans la moindre analyse critique des tâches que nous, humains, par l'écriture de lignes de code, lui commandons d'exécuter. Il obéit, sans réfléchir. Et qui plus est, il ne comprend que le langage binaire – ce langage composé de seulement deux chiffres, le 0 et le 1. On a connu plus complexe ! Dans la pratique, un code informatique s'écrit avec des lettres de l'alphabet et les signes que nous connaissons tous ; il est ensuite converti par un « compilateur » (une sorte de supertraducteur) en un document composé de 0 et 1, qu'on appelle un exécutable. Cet exécutable est, comme son nom l'indique, le fichier que l'ordinateur va lancer afin d'obtenir les instructions à exécuter.

Ce cours m'aura donc rassurée sur ce point essentiel : nous, humains, sommes les maîtres de la machine. Je pouvais donc reprendre la main sur cette technologie qui m'échappait, et cette année optionnelle d'informatique allait m'y aider.

Deux heures plus tard, ce premier cours prend fin et me voilà déjà partie vers mon premier TP, à la fois enthousiaste et intimidée à l'idée de bientôt découvrir mon premier langage informatique et d'écrire ma première ligne de code.

Arrivée à l'étage de notre cours, je me dirige vers la salle de classe qui doit nous accueillir durant ces dix prochains mois. J'entre sagement dans l'arène en cachant mon excitation pour éviter de paraître immature à mes camarades.

C'est une salle de classe tout à fait classique, avec ses tables en bois alignées sur cinq rangées et ses chaises parfaitement disposées face à un grand tableau noir. Aucun ordinateur en vue. Le professeur arrive, s'installe, se présente et nous accueille chaleureusement. Sans doute allons-nous prendre un quart d'heure pour faire connaissance avant de rejoindre une autre salle remplie d'ordinateurs, me dis-je. Mais pas du tout. Le professeur sort une feuille d'exercice et nous présente notre premier problème à résoudre... à la main !

On considère un tableau T d'une taille donnée et contenant des nombres entiers appartenant à l'ensemble des nombres entiers naturels N . Décrire une méthode qui permet de ranger dans l'ordre croissant les nombres de ce tableau, et ce, le plus rapidement possible.

Je ne comprends pas la situation. J'avais imaginé ce jour tellement de fois. Ma première ligne de code, mon premier bug, toutes ces surprises qui allaient enfin me délivrer d'une inculture et d'une frustration agaçantes... Et voilà que je me retrouve dans une vieille salle, à démarrer mon premier TP

d'informatique sans ordinateur ! Était-ce une imposture ? Une réduction budgétaire était-elle passée par là ?

Je passerai ainsi cinq mois sans le moindre tête-à-tête avec un ordinateur, ni même avec un transistor. Cinq mois, tête baissée et crayon à la main à écrire des algorithmes sur une feuille de papier !

Revenons à ce tout premier cours. Le professeur nous explique qu'avant d'apprendre à programmer un code pour résoudre un problème, il faut commencer par décrire, crayon en main, un « processus logique d'opérations hiérarchisées » qui mènera in fine à la résolution. Cela, c'est l'algorithme. La programmation, elle, viendra ensuite.

Rassurée par ce raisonnement, je me lance dans l'exercice. C'est un problème de triage bien connu en algorithmique. Le tri lui-même est simple. La difficulté de l'exercice tient en réalité aux derniers mots de l'énoncé : « le plus rapidement possible ». Mais avant d'aller chercher l'efficacité algorithmique, trouvons déjà un algorithme qui fonctionne. Et pour cela, commençons par prendre un exemple concret.

Notre tableau d'entrée T , celui que nous devons trier, contient ici six entiers de l'ensemble des nombres naturels (rappelons qu'un nombre naturel est un nombre entier positif).

4	239	30	2	467	11
---	-----	----	---	-----	----

Nous proposons de créer un autre tableau, dans lequel nous stockerons les nombres au fur et à mesure du triage. Ce tableau, initialement vide, deviendra donc notre tableau de résultat. Appelons-le $T_{\text{trié}}$:

--	--	--	--	--	--

L'idée est la suivante : nous allons passer d'une case à une autre du tableau T et établir des comparaisons deux à deux, afin de définir le plus petit nombre du tableau T – lequel figurera donc, in fine, dans la première case du tableau $T_{\text{trié}}$. Mon premier nombre est le 4. J'initialise le plus petit nombre du tableau $T_{\text{trié}}$ en lui affectant cette valeur de 4. Je compare ensuite ce nombre 4 au nombre suivant : 239. 4 reste donc le plus petit. Le nombre suivant (30) est toujours plus grand : on ne change rien. Mais le suivant (2), lui, est plus petit. Le plus petit nombre de mon tableau est à présent 2. Je compare ensuite 2 aux cases suivantes – 467, puis 11... J'en conclus donc que 2 est le plus petit nombre de la série, et je l'enlève du tableau T pour l'ajouter à mon tableau de résultat, $T_{\text{trié}}$:

2					
---	--	--	--	--	--

Je reprends mon tableau T (sans le 2, donc) et j'applique la même logique. Le même processus de comparaisons successives m'indique que le deuxième plus petit nombre est 4. Je l'ajoute donc au tableau $T_{\text{trié}}$ et l'enlève du tableau T :

2	4				
---	---	--	--	--	--

En appliquant cette séquence d'opérations autant de fois qu'il le faut, j'obtiens finalement le résultat de mon calcul $T_{\text{trié}}$:

2	4	11	30	239	467
---	---	----	----	-----	-----

Et voilà : sans le savoir – car le professeur ne nous a révélé qu'une fois le tableau rempli que notre méthode était algorithmique –, je viens de réaliser mon tout premier algorithme. Pas très sexy, pas très puissant, mais un algorithme.

La méthode semble simple, et elle permet bien de réaliser la tâche demandée.

En réalité, on peut faire bien mieux. La méthode requiert un trop grand nombre d'opérations, et en utilisant deux tableaux, on consomme deux fois plus de mémoire de stockage. Calculons ensemble, si vous le voulez bien. Nous réalisons 5 fois le processus de comparaison des nombres 2 à 2, en balayant le tableau entièrement. 5 comparaisons la première fois, puis 4, puis 3, puis 2, puis 1... Soit 15 opérations de comparaison en tout, pour trier un tableau de 6 éléments seulement. Pas très efficace.

En algorithmique, on analyse à la main ce qu'on appelle la « complexité de l'algorithme », laquelle se divise en deux catégories : la complexité temporelle caractérise le nombre total d'opérations à réaliser en fonction de la taille du problème ; la complexité spatiale définit la mémoire supplémentaire nécessaire à la résolution du problème – toujours en fonction de sa taille.

Quand on écrit un algorithme, on doit toujours définir cette complexité, car elle permet de confirmer si un algorithme est scalable, c'est-à-dire s'il est raisonnable de l'utiliser pour des problèmes comprenant de très nombreuses données d'entrée. À l'heure du big data, on comprend que la question devienne cruciale !

Dans le cas de notre problème de triage, la taille du problème se définit par la taille du tableau d'entrée, autrement dit le nombre d'éléments du tableau, qu'on nomme n . Dans notre algorithme, le nombre de comparaisons à réaliser est en théorie de $n \times \frac{(n-1)}{2}$. Avec un tableau à 6 éléments ($n = 6$), on doit donc réaliser $6 \times \frac{(6-1)}{2} = 6 \times 2,5 = 15$ opérations. Avec 20, il en faudrait : $20 \times \frac{(20-1)}{2} = 190$. Imaginez un tableau de

10 millions d'entrées contenant les notes de satisfaction données par chacun des utilisateurs d'une application lambda. Pour ordonner ces notes, l'ordinateur devrait exécuter 50 000 milliards d'opérations !

C'est ce qui rend cette discipline si stimulante intellectuellement : non seulement il faut déterminer un processus logique pour résoudre un problème, mais on doit aussi aller chercher la méthode la moins coûteuse en temps et en espace. Une partie du travail des « numériciens » et des développeurs consiste d'ailleurs à comprendre les algorithmes existants pour les « implémenter » (le terme utilisé pour désigner la traduction d'un algorithme dans un langage de programmation), mais aussi pour développer de nouveaux algorithmes plus rapides.

Ce premier cours pratique d'informatique me fascinait : un véritable appel au voyage ! Et dire qu'il ne s'agissait là que d'un petit week-end en comparaison du long périple qui m'attendait... Heureusement, un algorithme de résolution rapide et qui ne prend aucune mémoire supplémentaire existe pour résoudre ce problème de tri. C'est « l'algorithme de tri rapide », ou quicksort, en anglais. Cet algorithme, qui me fascine encore aujourd'hui et que j'ai implémenté une bonne dizaine de fois pour m'entraîner, a une complexité temporelle en $n \times \log(n)$ ($\log(n)$ (pour logarithme de n)) ; et il ne nécessite aucune mémoire additionnelle car la méthode de tri se fait sur place, c'est-à-dire dans le tableau d'entrée lui-même. Ainsi, toujours pour un tableau de 10 millions d'entrées, alors que l'algorithme défini précédemment a besoin de plusieurs milliers de milliards d'opérations, l'algorithme efficace n'en nécessite que 70 millions.

La découverte du langage et des questions sans réponse

Le cours d'algorithmique s'est poursuivi au cours des mois suivants, et la difficulté des problèmes à résoudre est allée croissante. Puis, après des semaines passées à réfléchir et à écrire à la main des algorithmes performants en temps et en espace, j'étais enfin prête à écrire ma première ligne de code ! Mon impatience se mêlait d'une certaine appréhension. Pour la première fois, la difficulté de la discipline et les exigences de compréhension de concepts souvent très abstraits m'angoissaient un peu. Mais peu importait : je devais me jeter à l'eau et confronter la machine, la dompter, lui faire faire ce que moi j'avais décidé... et sans bug ! Ce qui fut fait.

J'ai écrit ma première ligne de code en Pascal – le langage choisi par notre professeur et commun à tous les étudiants de ma promotion. Ce langage a été créé dans les années 1960 et son nom fait bien sûr référence au mathématicien, physicien et philosophe Blaise Pascal. Son créateur, le Suisse Niklaus Wirth, est à l'origine de nombreux langages de programmation et il a reçu en 1984 le prix Turing qui récompense chaque année les grands contributeurs aux sciences informatiques.

Par curiosité, j'étais allée regarder combien de langages informatiques avaient été développés depuis la Seconde Guerre mondiale. Le résultat n'avait pas manqué de me surprendre : plus de mille, me disait Google ! Certains ne sont plus utilisés, d'autres ont évolué... Aujourd'hui, je comprends mieux ce foisonnement : les langages évoluent pour s'adapter aux nouvelles architectures, leur syntaxe se simplifie sans cesse pour faciliter un développement plus performant.

Je me souviens parfaitement du contenu de ma première ligne de code, car elle reste celle qu'on écrit systématiquement

lors de la découverte d'un nouveau langage de programmation : le fameux Hello World!.

Notre professeur nous raconte la genèse de cette tradition : quand on apprend un nouveau langage, on fait réaliser une tâche à l'ordinateur qui est d'imprimer sur un écran de sortie la phrase Hello World!. Cette étape permet de se familiariser avec le langage que l'on apprend et plus particulièrement avec sa syntaxe. L'étape du Hello World! a été proposée dans le livre très connu des programmeurs en langage C, *The C Programming Language*, coécrit en 1978 par Brian Kernighan et Dennis Ritchie.

Voici donc mes premières lignes de code, qui ordonnent à l'ordinateur d'imprimer sur un écran de sortie la phrase Hello World!.

```
program hello;  
begin  
  writeln('Hello World!');  
end.
```

Ce seul exemple présente de nombreux points à assimiler pour un novice en Pascal. Vous aurez remarqué la présence systématique du point-virgule pour délimiter chaque ligne d'instruction (begin et end n'en sont pas, d'où l'absence de point-virgule à leur endroit), mais aussi la fonction writeln() qui permet d'imprimer sur l'écran – en l'occurrence la phrase Hello World!, reconnaissable au signe ' qui délimite une chaîne de caractères en Pascal. Enfin, vous noterez la présence des mots begin et end, qui entourent une tâche à faire réaliser à l'ordinateur. Tant de choses que j'apprends avec ce simple Hello World! !

L'année suivante, en cours de sciences numériques à l'École normale supérieure de Cachan, j'allais apprendre le

langage C, et le Hello World! s'afficherait sur mon écran grâce à cette formule.

```
printf("Hello World!");
```

En une seule ligne écrite en C, je pouvais ordonner la même tâche à l'ordinateur. Cet exemple démontre que l'évolution des langages de programmation simplifie de manière significative l'écriture – ce qui n'est pas pour me déplaire. Voici deux autres exemples de Hello World! écrit dans mes deux langages préférés, le C++ et le Python, dont la syntaxe est profondément différente :

```
std::cout << "Hello World!" << std::endl;
```

```
print("Hello World!")
```

La syntaxe est, avec la sémantique, la notion la plus importante à assimiler quand on apprend un langage informatique. Pour faire un parallèle simple : toutes les langues parlées – l'anglais, le français, le chinois, l'arabe ou encore l'allemand – diffèrent par leur grammaire et leur syntaxe. À l'époque de mon premier Hello World!, je me souviens d'avoir fait le parallèle avec mon tout premier cours d'anglais, à 11 ans, quand j'avais appris à me présenter en disant : *My name is Aurélie*. Cette phrase, toute simple en apparence, nous permettait d'appréhender la structure de l'anglais (sujet, verbe et complément), mais aussi de nous familiariser avec l'accent british en suivant l'exemple du professeur.

Même si les langages informatiques ne se parlent pas (encore), mon premier cours de programmation m'a montré que leur apprentissage présente de fortes similarités avec celui d'une langue en langage naturel. Eurêka ! Je venais de franchir une étape importante, qui allait grandement m'aider dans la suite de mes études, et bien au-delà. Au total, j'ai appris six

langages informatiques au cours de ma carrière. Un contraste saisissant avec les difficultés que j'ai éprouvées à apprendre l'espagnol... L'anglais, que je parle couramment, est la seule langue que j'ai réussi à apprendre.

Au cours de cette première année d'informatique, j'ai découvert qu'en plus des langues naturelles, il existait des langues dites construites, comme l'esperanto. Qui aurait cru que mes premiers cours de programmation en Pascal m'amèneraient à réfléchir à la nécessité et à la construction d'une langue universelle ? C'est à ce moment précis que j'ai compris une chose fondamentale : ce que tant d'intellectuels avaient cherché à créer, je l'avais sous les yeux – ou, devrais-je dire, sous les doigts : le code informatique comme réponse au mythe de Babel !

Certes, il s'agit d'un langage formel et non naturel, mais l'idée me semble intéressante. Les langages de programmation ont toujours visé à agréger un maximum d'individus des quatre coins du monde autour du développement de contenus informatiques – les logiciels libres, par exemple. Voilà pourquoi l'informatique utilise l'anglais pour définir des noms de fonctions – comme `print` pour demander l'impression du `Hello World!`. À l'heure de l'open source et des projets informatiques collaboratifs, l'utilisation de termes provenant de l'anglais s'avère nécessaire.

La découverte du parallèle entre un langage informatique dit « formel » et le langage naturel a donc été pour moi à l'origine de nombreuses questions, souvent sans réponse, en lien avec la linguistique.

La première concerne le passage d'une langue à une autre. Quand deux individus de langues différentes veulent communiquer entre eux, il leur faut un traducteur. Or, on sait

que la traduction peut faire perdre des subtilités d'expression propres à chaque langue... J'en ai fait moi-même l'expérience avec l'anglais : il m'a fallu beaucoup de temps pour arriver à un niveau de précision suffisant pour exprimer dans cette langue ce que je pensais en français ; tout est devenu plus simple quand j'ai commencé à réfléchir et à rêver en anglais. Il m'a fallu plus de dix ans !

Entre le code informatique et l'ordinateur, il existe aussi un traducteur : on l'appelle « compilateur », ou « interpréteur ». C'est lui qui transcrit le langage du programmeur (composé d'éléments du langage naturel que tout humain peut lire et comprendre) dans ce langage binaire composé de 0 et 1, qui est le seul que l'ordinateur comprenne. Il existe de nombreux compilateurs, avec des efficacités variables qui se traduisent par la capacité du compilateur à optimiser le code binaire (donc l'exécutable qu'ouvrira l'ordinateur). Problème : cette optimisation passe par une interprétation qui vient s'ajouter à la traduction à chaque fois que se présente une ambiguïté dans le code. Ainsi, il faut toujours garder ceci à l'esprit quand on code : quel que soit le langage qu'on utilise, il passera par un traducteur avant d'être lu par l'ordinateur. Dès lors, la façon de coder devient déterminante : il faut réfléchir et anticiper le comportement du compilateur afin d'éviter toute interprétation qui irait dans une mauvaise direction. De la même manière, si j'emploie une formule française trop alambiquée ou ambiguë lors d'un colloque en Italie, il est probable que l'interprète aura du mal à traduire. Dans ce cas précis, les conséquences sont bénignes – au pire, la salle rira. Avec un algorithme, c'est plus problématique, car l'interprétation peut être source de bugs.

Pour prendre un exemple très simple mais bien réel : quand vous multipliez en Python un nombre décimal (par exemple :

4,3) et un nombre entier (par exemple : 5), l'interpréteur peut considérer qu'il se situe dans un monde décimal ou dans un monde d'entiers. Concrètement : en l'absence de consigne claire, il risque de décider qu'il est dans un monde d'entiers et donc d'arrondir le résultat à l'entier inférieur ou supérieur. De sorte que, pour une même opération ($4,3 \times 5$), vous pourrez vous retrouver avec trois résultats différents : 21, 21,5 ou 22.

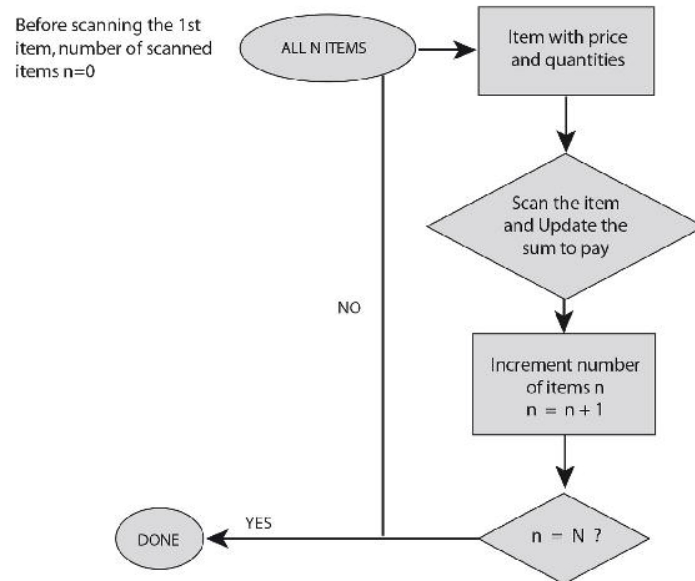
Bien sûr, je simplifie ici à l'extrême et il existe un moyen très simple de signaler à l'interpréteur ce que vous comptez faire de vos variables : écrire « 5,0 » au lieu de « 5 » pour bien faire comprendre que vous souhaitez multiplier deux nombres décimaux, par exemple. Tout cela pour souligner qu'écrire un code informatique supporte rarement l'ambiguïté. Et qu'à cause de ce nécessaire passage par un traducteur, il importe d'être le plus clair possible dès l'écriture de l'algorithme, en fonction du langage de programmation qu'on souhaite utiliser.

Mais au fait, à quoi ressemble vraiment l'écriture d'un algorithme ? Prenons à nouveau un exemple simple : celui d'une caisse enregistreuse qui doit calculer le montant total d'un panier de N articles.

Si je l'écris en langage naturel, je dirai quelque chose comme ceci :

La variable n désigne le nombre d'articles déjà scannés. La variable S désigne la somme à payer. À chaque passage d'un article, j'ajoute son prix à la somme S, et n s'incrémente de 1. Tant que n n'atteint pas la valeur N, je vais chercher un article supplémentaire. Lorsque n atteint la valeur N, ma somme S devient le résultat final.

En langage algorithmique, plusieurs possibilités s'offrent à moi. Je peux utiliser une forme schématique, avec des flèches et diverses figures géométriques que tout le monde peut comprendre (le losange désignant ici le calcul à réaliser) :



N = nombre total d'articles

n = nombre d'articles scannés

Avant de scanner le 1^{er} article, $n = 0$ > Considérer chaque référence, son prix et le nombre d'articles > Scanner un article et mettre à jour la somme S à payer > Incrémenter l'indicateur n (qui devient $n + 1$) > Si $n = N$, alors S est le total final ; sinon, revenir sur le tapis et recommencer l'opération.

Je peux aussi écrire mon algorithme dans une forme intermédiaire entre le langage naturel (l'anglais, toujours) et le code informatique.

Je précise qu'on appelle « boucle » (loop, en anglais) une opération réalisée à plusieurs reprises, jusqu'à ce que l'atteinte d'un indicateur (ici, $n = N$) ne commande d'arrêter (break) les opérations. Sachant cela, même sans être bilingue en anglais, vous devriez comprendre l'écriture suivante :

Le plus important n'est pas la façon dont on écrit l'algorithme : c'est de bien se faire comprendre par ses pairs, et par ceux qui utiliseront l'algorithme.

```
Loop over all N items :  
  → Scan the given item  
  → Update the sum and the total number  
    of items scanned  
  
If n = N then  
  Break, get out of the loop  
Else  
  Keep going over the loop
```

J'allais découvrir plus tard, durant mes années de doctorat, l'impact du langage informatique, de la subjectivité de la discipline algorithmique et de l'introduction de biais. Mais, au moment de ma première année d'algorithmique académique, je m'interrogeais principalement sur la subjectivité du code informatique en lien avec la structure d'une langue naturelle. Quand on écrit et parle une langue naturelle – le français, par exemple –, on utilise des structures et des mots qui diffèrent selon nos origines culturelles, sociales, géographiques ou professionnelles. En va-t-il de même pour le code ? Dit autrement : codons-nous tous de la même manière, ou notre façon d'écrire le code informatique est-elle influencée par notre environnement socioculturel ? Je ne sais toujours pas répondre à cette question, même si j'ai souvent observé des différences de rigueur et de sophistication dans les codes que j'ai pu lire dans ma carrière. Et s'il existe des différences, ont-elles un impact sur l'efficacité du code, sur sa clarté, voire sur le résultat fourni à l'issue de la simulation ? À ma connaissance, personne ne s'est intéressé à la linguistique de la programmation informatique¹.

Pour ma part, je pense qu'étudier l'écriture d'un code informatique en faisant l'analogie avec la linguistique permettrait de comprendre comment un biais s'introduit et se propage de l'algorithme à son implémentation numérique. Lors de mes années au MIT, j'ai eu la chance de rencontrer à plusieurs reprises le linguiste Noam Chomsky, pour qui j'ai

développé beaucoup d'affection en plus de la considération que j'avais déjà pour son travail. Trois ans après mon départ du MIT, en écrivant ce livre, j'ai pris mon courage à deux mains et lui ai envoyé un mail pour lui demander s'il pense que l'on pourrait un jour appliquer des théories linguistiques au code informatique. On avait certes utilisé des algorithmes pour analyser des procédés en linguistique mais on n'avait pas encore appliqué les règles de la linguistique à la structure et au sens de ce nouveau langage qu'est le code informatique et l'algorithmique. Il m'a répondu dans l'heure : « Je ne vois pas trop comment... Mais si quelqu'un a une idée, je serais curieux de voir ce que ça peut donner ! » J'étais bien évidemment déçue, mais tout de même assez heureuse de lire qu'il porterait un intérêt au sujet ! J'en suis certaine, il y a encore des zones méconnues en algorithmique, et la linguistique en est peut être une clé.

Mon premier « vrai » algorithme

Nous sommes en décembre 2005, j'ai 23 ans et je démarre ma thèse de doctorat à l'École des Mines de Paris. Mon premier cours d'algorithmique est déjà loin. Entre-temps, ma licence sous le bras, j'ai passé trois années à l'ENS de Cachan pour un magistère en mécanique... et un stage à l'université du Colorado, à Boulder, a confirmé mon envie de poursuivre dans la voie du numérique. Avec un camarade doctorant, sous la direction du Pr Yunping Xi, nous avons écrit un petit code, dans un langage appelé Matlab, pour calculer la profondeur de pénétration du sel des vents marins dans le béton des bâtiments côtiers – des sels qui se diffusent dans les pores des murs et qui, en se cristallisant, peuvent faire naître des fissures et donc fragiliser la structure. Ma première expérience de code informatique appliqué à un cas concret de la vie réelle !

Mais en décembre 2005, j'entre dans une nouvelle dimension. Me voici partie pour trois ans, avec pour défi de résoudre le problème suivant :

Étude d'un élastomère chargé en nanoparticules de noir de carbone : de sa nanostructure à son macro-comportement

Ce titre est celui que je donnerai, trois ans plus tard, à mon mémoire de thèse. Trois années passées à étudier les élastomères composés de nanoparticules de noir de carbone, aussi appelés... caoutchouc.

Le caoutchouc tire sa couleur sombre du carbone dont sont faites ses particules. On dit de ce matériau qu'il est « nanocomposite » car, même s'il paraît uniforme et homogène à l'échelle centimétrique (celle de l'œil nu), il possède en réalité au moins deux composants à l'échelle nanoscopique (celle du nanomètre, soit un millionième de millimètre) : l'élastomère et les particules de carbone. Selon la manière dont on mélange ces deux composants (vitesse, temps de mélange, température...), le caoutchouc est plus ou moins élastique et résistant à la rupture. Ainsi, quand on observe le caoutchouc au microscope, on observe que les particules de carbone s'agrègent en grappes de formes différentes selon les conditions de mélange.

Dans le cadre de mon doctorat, je cherche à comprendre la morphologie nanoscopique des grappes de particules de carbone dans la matrice élastomère et à la relier au comportement élastique du caoutchouc. En d'autres termes, je cherche à comprendre comment la façon dont sont disposées les nanoparticules de carbone peut influencer sur la facilité avec laquelle le caoutchouc se déforme.

Ce problème est différent de ceux sur lesquels j'ai pu travailler durant mes études, pour une raison à la fois très

simple et vertigineuse : il n'a jamais été résolu. Fini, le temps où j'écrivais des algorithmes pour résoudre des problèmes académiques dont on connaissait la réponse ! Cette fois, Euclide ne pourra pas me venir en aide...

Cette différence entraîne deux écueils majeurs. Tout d'abord, rien ne garantit que ce problème a une solution – du moins, en l'état des moyens techniques dont nous disposons. Car, même si la solution existe, elle nécessite peut-être des moyens expérimentaux ou numériques qui ne sont pas encore développés. Rien ne m'assure, par exemple, que les microscopes permettent d'observer réellement la forme des particules à l'échelle nanoscopique. Je démarre donc ma thèse sans savoir s'il sera techniquement possible de résoudre mon problème. Deuxième écueil : puisque ce problème n'a jamais été posé, rien ne m'assure que je l'ai *bien* posé. Pire : sa formulation est peut-être tout simplement fautive. Ne vous est-il jamais arrivé de répondre incorrectement à une question, même simple, car la question était mal posée ? Cela m'arrive très souvent – voilà pourquoi, en cas de doute, je demande toujours à mon interlocuteur de reformuler sa question...

Dans les pages suivantes, nous verrons que je n'ai pas développé un seul, mais toute une série d'algorithmes, répartis en deux groupes distincts. Dans le premier sont réunis tous les algorithmes qui m'ont permis d'analyser, de modéliser et de simuler la morphologie nanoscopique du caoutchouc. Le second regroupe les algorithmes grâce auxquels j'ai pu modéliser et simuler l'élasticité macroscopique du matériau, à partir des nanostructures générées virtuellement. L'objectif étant d'être capable, par des algorithmes bien pensés, de comprendre et de prédire l'élasticité du caoutchouc selon les conditions de mélange lors de sa fabrication. C'est ce qu'on

appelle la simulation numérique – celle qui passe par le virtuel pour mieux comprendre le réel.

Si vous le voulez bien, nous allons en détailler les étapes. Je vous épargnerai les aspects les plus techniques, c'est promis. Et d'ici quelques pages, même si certains détails vous échappent, vous aurez déjà une bonne idée des questions qui se posent quand on cherche à modéliser la réalité en créant des algorithmes.

Le paradoxe de la simulation : passer par le virtuel pour comprendre le réel

En licence, j'écrivais et j'implémentais des algorithmes pour résoudre des problèmes classiques, souvent assez simples. J'ai commencé à étudier des algorithmes beaucoup plus compliqués en master, mais les problèmes restaient peu excitants, et je n'avais encore jamais eu l'occasion de tester la puissance des algorithmes par le lancement d'une grande simulation numérique.

C'est véritablement avec ma thèse que j'ai découvert la puissance du calcul numérique, et que j'ai pris conscience que les ordinateurs pouvaient nous permettre de comprendre le monde. Plonger dans un monde virtuel numérisé pour répondre à des questions auxquelles personne n'avait jamais réussi à répondre dans le monde réel : la perspective était exaltante !

Mais j'allais devoir m'armer de patience... et d'outils que je n'avais encore jamais rencontrés. En effet, pour simuler dans le monde virtuel des essais de compression sur des échantillons contenant des dizaines de milliers de particules de carbone, même avec le meilleur algorithme de la planète, j'aurais besoin de machines dotées d'une grande puissance de

calcul. Pour le dire de façon naïve (mais scientifiquement exacte) : pour faire de gros calculs, il faut de gros calculateurs ! Je n'allais pas tarder à faire la connaissance de l'un de ces supercalculateurs...

Nous voici donc en décembre 2005, c'est mon premier jour de thèse. J'y vais un peu la fleur au fusil, sans savoir à quelle sauce je vais être mangée. De mon expérience, tous les thésards sont passés par là : arrivés frais, le sourire aux lèvres et croyant savoir conduire une recherche scientifique, on en ressort quelques années plus tard avec des ridicules et de nombreux kilos en plus – mais toujours le sourire aux lèvres, épuisés mais fiers d'être devenus des sortes de « guerriers ». J'ai moi-même pris neuf kilos durant ma thèse, que j'ai heureusement perdus dès l'année suivante. En thèse, on travaille beaucoup, avec une efficacité moyenne, on mange mal et on fait peu de sport. Mais avec quelques bonnes années pour apprendre à travailler vite et juste, notre efficacité va heureusement croissant...

J'entame donc ce premier jour avec la naïveté d'un personnage de conte pour enfants qui va se faire dévorer par un ogre. Je suis accueillie au laboratoire par l'un de mes directeurs de thèse, Samuel Forest. Nous prenons un café, il me parle de sa recherche sur la théorie du second gradient, et il m'embarque dans la salle de calcul. « Viens, je vais te présenter les machines qui vont te permettre de trouver la solution à ton problème. »

Nous entrons dans la salle où travaillent les doctorants : c'est aussi celle qui abrite le calculateur du laboratoire. C'est un serveur composé de 130 nœuds de calculs (un peu comme 130 ordinateurs montés en parallèle, ayant chacun deux processeurs). Aujourd'hui, ces 130 nœuds pourront faire sourire certains lecteurs avertis : d'immenses progrès ont été

accomplis depuis... Mais je me souviens encore de l'excitation de Samuel quand il m'a présenté la grande fierté du laboratoire...

Le calculateur est installé en plein milieu de la salle de calcul, dans une grande « cage » vitrée pour séparer ses cerveaux de silicium de nos cerveaux biologiques. Une vitre indispensable, à la fois pour protéger les machines par un circuit d'air froid... et pour nous protéger nous, les humains, contre un bruit infernal. Il faut imaginer 130 ordinateurs fonctionnant à fond dans une pièce de 20 m² : c'est assourdissant. À travers la vitre, nous n'entendions rien du travail de la machine, mais nous pouvions observer les petites LED bleues qui scintillaient en permanence. C'était bien plus beau que le *Mark I* que je découvrirais quelques années plus tard à Harvard !

D'une certaine façon, ce calculateur a joué dans ma recherche le rôle du miroir dans le livre de Lewis Carroll. Alice traverse le miroir pour visiter le monde de la reine rouge. Avec la machine, je pouvais moi aussi voyager dans un autre monde : le monde virtuel.

Mais au fait, pourquoi donc passer par un monde virtuel pour représenter notre monde fait d'atomes, de matériaux et d'individus bien réels ? La réponse est que nous n'avons souvent pas le choix. Le monde matériel dresse de nombreuses barrières qui nous empêchent d'avancer dans notre compréhension du monde, et les simulations par ordinateur peuvent nous aider. Pour réaliser des prédictions, par exemple. Prenez la météo : ce n'est pas l'observation des nuages à l'œil nu qui permet de prévoir le temps qu'il fera dans trois jours ! Derrière les chiffres et les sympathiques pictogrammes d'une application météo se cachent des calculs parfois gigantesques pour prédire les courants d'air chauds, les températures et les

taux d'humidité, sur des zones géographiques relativement larges et sur des périodes de temps parfois assez longues. En météorologie comme dans beaucoup de sciences, le calcul numérique nous permet de donner des indications sur le futur, des prédictions avec une certaine confiance. Mais ces prédictions ne sont, si j'ose dire, que la face visible de l'iceberg des simulations numériques. Leur grande valeur ajoutée est de nous permettre de comprendre, d'analyser un phénomène que nous sommes incapables de reproduire dans le monde réel.

Prenons le cas du caoutchouc. Dans le monde réel, nous sommes capables de contrôler expérimentalement une partie de la morphologie des grappes de particules de carbone en jouant sur les paramètres de mélange. Nous sommes aussi capables de conduire des tests de compression d'échantillons de caoutchouc pour en identifier la constante d'élasticité. En cela, nous pouvons donc expérimentalement, dans le monde réel, lier en partie les conditions de mélange au comportement élastique du caoutchouc. Mais cette approche se heurte à de sérieuses limites. Tout d'abord, des contraintes matérielles : fabriquer des échantillons sur lesquels réaliser des tests de compression est coûteux en temps (et en argent). En général, on restreint donc le nombre d'échantillons à fabriquer et de tests à réaliser. Une autre limite, plus importante, est liée à la reproductibilité du nanocomposite qu'on fabrique. Impossible de reproduire exactement la position et la forme de chaque grappe de carbone dans la nanostructure d'un caoutchouc que l'on produit ! Ce qui est un problème quand on cherche à comparer l'élasticité d'une même nanostructure pour différentes conditions d'étirement. Imaginez un clafoutis aux cerises : vous aurez beau suivre exactement la même recette avec les mêmes quantités, après cuisson, vos cerises ne seront

jamais placées au même endroit dans le gâteau. Dernière limite : on ne peut pas aller observer en détails la morphologie de ses nanograppes *pendant* l'essai de compression. Nous utilisons certes des microscopes, mais ils ne donnent qu'une vue partielle de la nanostructure au repos, et non pendant la déformation – or c'est elle qui nous intéresse...

Les simulations permettent de dépasser chacune de ces contraintes, et même d'aller plus loin. *Primo* : elles sont rapides à produire – et à moindre coût dès lors que l'on dispose d'un gros ordinateur. *Deuxio* : on peut utiliser la même nanostructure simulée pour plusieurs essais de compression numérique. *Tertio* : on peut analyser la déformation de l'élastomère entre les grappes de particules de carbone, ainsi que le déplacement des particules, et ce pendant la compression ! Impossible, dans le monde réel, d'aller analyser à l'échelle du nanomètre la déformation du caoutchouc : c'est en cela que les simulations sont magiques.

Un autre exemple sera peut-être encore plus parlant, pour bien comprendre ce point très important. Quelques années après ma thèse, au MIT, je suis passée par des simulations numériques pour mieux comprendre le traumatisme crânien, en analysant en temps réel les mécanismes qui peuvent l'engendrer. C'est le rêve de tous les neurologues que d'aller mesurer les réactions du cerveau lors d'un choc à la tête sur un homme ou une femme vivante... Mais c'est impossible dans le monde réel, pour des raisons éthiques évidentes : on ne peut pas réaliser un essai de collision sur la tête d'un humain en vie qui aurait des capteurs situés dans le cerveau pour mesurer les changements de pression intracrânienne ! Même les essais sur des animaux anesthésiés sont limités. Nous n'avons donc pas le choix : il faut passer de l'autre côté du miroir pour réaliser de telles expériences. En simulant la morphologie d'une tête

humaine avec tous ses composants (os, cerveau, muscles et cavités) et la réponse élasto-plastique de chacun de ces constituants, j'ai pu, dans le monde virtuel numérisé, obtenir une cartographie détaillée de la pression intracrânienne lors d'un choc. Je pouvais calculer les pressions subies par chaque millimètre du cerveau humain. J'ai pu identifier les zones fortement endommagées en fonction de l'angle de collision. J'ai même pu obtenir précisément les positions et les valeurs des pics de pression dans le cerveau. Ce plongeon dans le monde virtuel nous a permis, avec mon équipe, d'écrire une loi mathématique qui détermine le risque de traumatisme crânien d'un humain en fonction du type d'impact. Nous n'aurions jamais pu le faire en restant dans le monde réel, c'est une certitude !

Mais n'allons pas trop vite, et revenons en 2005... C'est au cours de ma thèse que j'ai compris la puissance du monde virtuel numérisé. J'ai aussi compris également que l'algorithme est la clé de ce monde, et que sa qualité est déterminante. Un mauvais algorithme vous emmènera dans un monde virtuel qui représente incorrectement la réalité. À l'époque de ma thèse, je ne connaissais pas encore les biais algorithmiques. Mais j'étais bien consciente que je pouvais faire des erreurs dans les hypothèses de mon premier modèle. C'est donc avec prudence que j'avançais vers mon premier « vrai » algorithme – celui qui me permettait de simuler la nanostructure des grappes de particules de carbone dans la matrice élastomère du caoutchouc...

Un algorithme de modélisation de la morphologie des nanoparticules

Vous avez bien lu le titre ci-dessus : j'ai écrit « un algorithme » et non « l'algorithme ». C'est qu'en réalité rien

ne suppose l'existence d'un algorithme unique pour résoudre un problème donné. C'est en cela qu'écrire un algorithme peut s'avérer être un exercice compliqué : il faut qu'il fournisse un résultat correct, et qu'il soit le plus efficace. On doit optimiser les complexités spatiales et temporelles de l'algorithme, c'est-à-dire qu'il doit aller vite et prendre le moins de mémoire possible. Et s'il est assez simple de raisonner ainsi quand on travaille sur des algorithmes académiques, c'est une autre paire de manches sur un sujet comme celui des caoutchoucs, dont le problème n'a encore jamais été résolu.

Pour avancer dans ma thèse, je dois écrire un algorithme et l'implémenter dans un programme informatique pour simuler la géométrie des nanostructures de caoutchouc. Pour cela, je découvre une nouvelle discipline : la morphologie mathématique, qui utilise les mathématiques pour analyser et représenter les formes.

Avant d'écrire mon algorithme, il me faut observer et analyser la morphologie nanoscopique du caoutchouc dans le monde réel – et donc choisir le microscope le plus adapté. On ne peut évidemment pas modéliser un phénomène sans avoir une idée, même grossière, de ce qu'il est concrètement ! En lien avec l'équipe des nanomatériaux de la société Michelin, qui finance une partie de ma recherche, nous optons pour le microscope à transmission. Il permet l'observation d'échantillons contenant des matériaux conducteurs, comme le carbone, mais sur des lamelles très minces.

Contrairement au microscope à balayage, qui permet d'observer des échantillons en volume, le microscope à transmission ne permet que d'observer une projection en deux dimensions d'un volume de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur, soit deux « étages » de particules. L'image obtenue au microscope est la projection sur un seul plan de ces

deux « étages ». Je passerai sur les détails mathématiques, mais nous avons dû écrire un algorithme supplémentaire pour reconstruire une image 3D de la réalité.

Je pouvais ainsi extraire des informations géométriques sur des grappes entières pouvant contenir plusieurs dizaines de particules. Mon premier constat fut la chose suivante : dans le monde réel, on ne peut pas tout voir. J'étais frustrée. Je devais modéliser la morphologie de ces grappes de nanoparticules de carbone sans avoir la possibilité de les observer entièrement au microscope, et toutes à la fois !

De ces observations, j'avais tout de même extrait de nombreuses caractéristiques morphologiques qui ont été déterminantes pour la suite. Tout d'abord, les particules de carbone ont des tailles différentes, mais toutes ont une forme quasi sphérique et elles ne sont jamais isolées : une particule est toujours connectée à au moins une autre particule. J'observe aussi que les particules de carbone ne sont pas en simple contact mais qu'elles fusionnent en partie. Enfin, je note que les grappes de particules de carbone, qu'on appelle morphologiquement des agrégats, paraissent avoir des tailles relativement similaires et semblent séparées d'une distance quasi invariable entre elles. Je décide donc de représenter mathématiquement les particules de carbone par des sphères pouvant se recouvrir les unes avec les autres, avec un rayon de longueur choisie aléatoirement selon une loi statistique, de type gaussienne². Je fais également l'hypothèse que les agrégats de particules sont décrits dans des sphères distantes d'une longueur relativement constante dans le nanomatériau. J'ajoute à mon algorithme une condition qui empêche l'existence de particules isolées. J'écris l'ensemble des équations mathématiques qui vont décrire mon algorithme. Pour cela, j'utilise ce que les mathématiciens nomment des

« moments statistiques » pour exprimer la répartition aléatoire dans l'espace des particules.

De l'algorithme au code informatique

Mes équations mathématiques écrites sur papier, mon algorithme est désormais schématisé. Je peux maintenant me lancer dans son implémentation dans un code informatique. Sur les conseils de mes camarades de promotion, je choisis de l'implémenter dans le langage C++ – que j'ai découvert un an auparavant et qui ne m'est pas encore totalement familier...

C'est la première fois que j'écris du code informatique pour résoudre un problème réel. J'avais écrit des codes en stage de dernière année de master, mais ils étaient destinés à résoudre des problèmes inventés – des *toy problems* créés de toutes pièces pour tester la faisabilité d'une méthode.

Après de nombreuses erreurs syntaxiques et une nuée de bugs, je peux enfin commencer à analyser les microstructures virtuelles que génère mon premier algorithme. J'observe, grâce à un logiciel de visualisation dédié, ces microstructures sur le grand écran de la salle de calcul. Mes premières microstructures simulées sont décevantes : les grappes n'ont pas les mêmes formes que celles observées au microscope et elles sont dispersées de manière trop uniforme dans la matrice élastomère. Je remarque également que mes agrégats ont des formes trop sphériques comparé aux images dans le monde réel, qui présentent des agrégats très tortueux et allongés. En discutant avec mes directeurs de thèse, je décide donc de reprendre mon algorithme. On ne le dit pas assez souvent, mais un algorithme s'élabore par tâtonnement : on simule, on observe... puis on reprend. C'est une boucle de rétroaction qui nous permet de construire un modèle qui soit le plus proche possible de la réalité.

Je reprends donc mon algorithme en introduisant des éléments supplémentaires. Tout d'abord, je réalise que les sphères que j'avais initialement choisies pour agréger en grappes les particules de carbone doivent être modifiées. J'opte pour des ellipsoïdes (une forme de gélule), dont je définis statistiquement la taille. Les dimensions de chaque ellipsoïde varient ainsi légèrement d'une grappe à une autre, et elles se positionnent plus aléatoirement dans l'espace. Voilà qui est (beaucoup) plus réaliste. Le miroir commence à être plus propre.

Après une deuxième itération, je constate que modéliser algorithmiquement les particules de carbone et les agrégats ne suffit pas : je dois également décrire la matrice élastomère autour. Pour cela, je choisis de représenter les zones entre les agrégats par des sphères de tailles variables. Sans le réaliser, j'étais en train d'écrire un algorithme de morphologie mathématique qu'on nomme aussi multi-échelles. En effet, mon algorithme devait contenir une composante pour chaque échelle du matériau afin de mieux le simuler : la particule, la grappe et la matrice élastomère.

Une fois ces nouveaux éléments introduits, je modifie mon programme informatique et je génère mes premières nanostructures numérisées. Je les observe attentivement, avec une certaine appréhension, tout de même, et... *Eurêka !* Même si les nanostructures simulées ne sont pas exactement identiques à celles observées au microscope, leur morphologie de base est comparable. Suffisamment semblables, en tout cas, pour que l'on puisse tirer des enseignements des variations qu'on va leur faire subir.

Mais, là encore, il allait falloir ruser avec la réalité...

Les choix sacrificiels des hypothèses

Maintenant que ma simulation fonctionne dans les grandes lignes, me voici à présent à l'étape de la calibration : c'est l'étape où je dois identifier avec précision la valeur de tous les paramètres de mon algorithme.

À cette étape, on fonctionne encore par tâtonnement, en faisant évoluer les paramètres et en observant les résultats obtenus, pour faire petit à petit coïncider les mesures virtuelles aux mesures observées dans la réalité. Cette étape de grande précision est elle aussi réalisée grâce à un algorithme, dit « d'optimisation », qui réalise des simulations en faisant varier les paramètres jusqu'à obtenir les valeurs les plus justes.

J'aimerais écrire que tout cela s'est fait en douceur, sans concession ni sacrifice. Ce serait mentir. J'ai dû faire des hypothèses. Pour le rayon des particules de carbone, par exemple. Peu avant la calibration, j'apprends que les expérimentateurs de Michelin ont déjà réalisé des mesures de ce rayon sur un échantillon de poudre de carbone contenant des particules nanoscopiques. Ils me racontent les difficultés qu'ils ont rencontrées et me fournissent une moyenne, un écart-type et des bornes pour le rayon dont la valeur suit une loi gaussienne tronquée. Avec précaution, je leur demande si ces données géométriques sont susceptibles de changer quand les particules sont en grappes dans la matrice élastomère. Après tout, ils avaient examiné les particules en dehors du matériau nanocomposite ; on pouvait tout à fait imaginer que leur forme ou leur taille était susceptible d'évoluer au contact de l'élastomère, ou en étant agglomérées dans des grappes. Les ingénieurs m'avouent ne pas connaître précisément la réponse. J'hésite alors à utiliser leurs mesures. Et si je commettais là une erreur, ne risquerait-elle pas de tout fausser ? Ce sont mes directeurs de thèse qui m'indiquent la voie la plus raisonnable à suivre en me rappelant cette sagesse

fondamentale de la recherche scientifique : il faut parfois accepter un certain pragmatisme pour ne pas reculer. Ils ont raison, bien sûr. À certains moments, on ne comprend pas tout avec exactitude – il s’agit alors d’avancer prudemment, en prenant des décisions dont on est capable de mesurer la valeur. Je finis par me résoudre à prendre ce risque dans mes hypothèses, en relativisant la portée de mon travail. Après tout, je n’étais pas en train de dimensionner un avion de ligne destiné à transporter des centaines de personnes chaque jour : ma responsabilité était limitée. Je fais donc l’hypothèse que les particules de carbone agrégées en grappes dans leur élastomère présentent la même géométrie que les particules dispersées dans une poudre.

Une autre hypothèse concerne les observations microscopiques. Pour calibrer mon algorithme sur les données obtenues sur des images de microscopie à transmission, je suis obligée de faire l’hypothèse que les lamelles observées sont toutes de la même épaisseur. Dans la réalité, c’est impossible ! Mais je n’ai pas le choix : sans cette hypothèse, je ne pourrai jamais optimiser mon algorithme. Je garde cette hypothèse dans un coin de ma tête pour éviter de me faire avoir par une quelconque erreur sortie de nulle part lors de la calibration. Et parce qu’en recherche on n’a jamais fini de se poser des questions, cette pensée sur l’épaisseur des lamelles entraîne une autre, concernant leur fabrication. Comment garantir que les techniciens en charge de découper ces échantillons de quelques dizaines de nanomètres d’épaisseur n’ont pas déplacé les particules de carbone pendant la découpe ? En translatant même de quelques nanomètres la position de ces particules, on risquait de modifier profondément la nanomorphologie du nanocomposite et donc de fausser les mesures. Je décide de

faire abstraction de cette idée, n'ayant pas les moyens de faire autrement. Mais, là aussi, je garde cette hypothèse à l'esprit.

Enfin, je commence à me demander si tout ce que j'ai pu moi-même observer et analyser à l'œil nu ne comportait pas une part de subjectivité. Après tout, on peut imaginer qu'une autre personne aurait vu des agrégats de formes différentes, ou pire : qu'elle aurait vu des détails de la microstructure que je n'avais pas vus... Cette histoire commence réellement à me torturer. Mais encore une fois, je n'ai pas le choix.

Ces *décisions*, comme Samuel les appelle, sont pour moi des sacrifices. Je viens de passer des mois entiers à élaborer avec religiosité un algorithme d'une grande précision, et voilà que je me retrouve à le calibrer approximativement. Même avec un jeu de paramètres optimisés je ne pouvais toujours pas garantir que mon algorithme ne comportait pas d'erreurs. Je réalise tout de même une calibration pour chaque nano-caoutchouc étudié, en faisant varier les conditions de mélange et la quantité de particules de noir de carbone.

Et nous y voilà ! Un peu plus d'un an après le début de ma thèse, l'algorithme d'optimisation a fini son travail et j'obtiens un premier jeu de paramètres pour un premier mélange, ainsi qu'un ensemble de nanostructures simulées et optimisées – donc supposées réalistes. Si toutes nos simulations ressemblent bien à la réalité, je vais pouvoir avancer dans le cœur de ma thèse...

Je retourne donc en salle de calcul, face à l'écran géant pour observer mes simulations et les comparer à la réalité. Samuel passe régulièrement une tête, et jeter un coup d'œil au-dessus de mon épaule. « Alors ? » demande-t-il toujours. À chaque fois, je lui demande d'être patient. « Ça me stresse, confie-t-il. Si seulement on pouvait y arriver ! » Ces visites

deviennent comme un rituel : nous discutons un peu, je lance une blague, il rit en retour et s'en va, de nouveau détendu... jusqu'à la fois suivante.

Et bien évidemment, le jour où j'examine enfin mes premières nanostructures numériques réussies, où virtuel et réel se confondent enfin parfaitement, Samuel n'est pas là ! Ni derrière mon épaule, ni dans la salle, pas même au laboratoire : il est en salle de classe boulevard Saint-Michel à donner un cours de mécanique. La vie est assurément injuste.

Ainsi donc, j'avais réussi. Partiellement, du moins. Car si, en apparence, ces microstructures ressemblaient fortement à celles du monde réel, il restait encore à le valider, en réalisant une mesure-test sur un indicateur non utilisé dans la phase de calibration.

Dans le cas de mes nanostructures de caoutchouc, je décide de mesurer la percolation (c'est-à-dire le degré de connectivité des grappes de noir de carbone dans l'élastomère). Je réalise donc des mesures de degré de percolation sur les images de microscopie, ainsi que sur les nanostructures simulées. Les résultats sont impressionnants. Même si je n'obtiens pas une correspondance parfaite, j'observe de fortes similarités d'un mélange à l'autre. Mon premier « vrai » algorithme est enfin validé !

Il me faudra plus d'un an encore pour le finaliser, et réaliser des simulations de compression pour faire le lien entre le comportement de mes nanostructures de carbone et l'élasticité réelle d'un pneu, par exemple... Vingt-quatre mois de doutes et de sueur, mais au bout du chemin une victoire m'attendait : une fois ma thèse soutenue, je devenais officiellement docteur en sciences numériques !

Ces trois années de thèse m'en auront appris plus que je ne pensais jamais savoir sur le caoutchouc. Je venais de résoudre des problèmes jamais résolus, avec des algorithmes que personne n'avait jamais écrits... et qui étaient destinés à être un jour améliorés par d'autres chercheurs.

Car au-delà des élastomères, ma thèse m'aura enseigné deux grandes vérités, qui m'accompagnent encore aujourd'hui. D'abord, que la recherche est par nature collaborative. Ensuite, qu'il n'existe pas de modèle parfait.

Tout au long de cette thèse, j'avais dû poser des hypothèses. Je les ai gardées très longtemps à l'esprit : je savais qu'elles pouvaient venir fausser mes résultats et mes analyses. Qui sait ? Certaines de ces hypothèses provenaient sûrement de ma manière de voir les choses ou de mes expériences scientifiques passées.

Je ne savais pas encore que tout cela avait un nom. Un nom que nous avons déjà croisé au cours de ce voyage, mais dont je n'ai pris connaissance qu'en 2009, trois ans après le début de ma thèse.

Il est temps, désormais, que nous fassions plus ample connaissance avec un concept essentiel pour qui veut comprendre (au moins un peu) les algorithmes. Suivez-moi de l'autre côté de l'Atlantique, nous allons découvrir ensemble les « biais algorithmiques ».

1. Des chercheurs ont tout de même présenté des résultats prometteurs pour déterminer l'auteur d'un programme informatique à partir d'analyses statistiques sur de nombreux codes. Voir cet article paru dans le magazine Wired en 2018 : www.wired.com/story/machine-learning-identify-anonymous-code/

2. Une loi gaussienne est une loi centrée réduite, caractérisée par sa moyenne et sa variance : plus les événements s'écartent de la moyenne, moins ils sont fréquents – d'où sa représentation sous forme de cloche. C'est la loi la plus couramment utilisée pour décrire des phénomènes naturels qui dépendent d'événements aléatoires.

Une rencontre sans fin : les biais algorithmiques

Pendant huit ans, après mes premiers pas à l'université, j'ai écrit des algorithmes sans penser à un quelconque *biais*. Des erreurs, j'en faisais, bien sûr. Mais je les attribuais surtout à des maladresses mathématiques dans les équations ou à des hypothèses erronées – autant d'erreurs qu'on pouvait aisément détecter et réparer.

Il faudra un changement de continent et des travaux de recherche médicale pour que le Pr George C. Engelman, de l'université d'État de Pennsylvanie, ne mentionne pour la première fois ce mot devant moi, en 2009. Cette première fois, je dois l'avouer, j'ai ri. Il n'y avait pas de quoi.

Je ne me doutais pas que je venais de découvrir un secret qui allait me suivre tout au long de mon parcours et changer toute ma pratique des algorithmes – et mon approche des sciences numériques en général.

Mais n'allons pas trop vite, et voyons donc comment j'ai fini par découvrir les biais algorithmiques dans un laboratoire, scalpel à la main, en pleine dissection d'un cœur de cochon...

**De la mécanique numérique...
à la médecine**

Après ma thèse de doctorat, j'étais décidée à poursuivre ma recherche en mécanique numérique aux États-Unis. J'y avais déjà réalisé un stage, quelques années plus tôt, et j'avais envie de découvrir un autre environnement. Mais les circonstances n'étaient pas idéales...

En 2009, la crise économique-financière faisait des ravages au pays de l'oncle Sam. De nombreux Américains perdaient leur emploi, pour certains leur maison, et la recherche scientifique américaine voyait ses moyens diminuer. Paradoxalement, il devenait plus simple d'obtenir un visa, car la crise avait fait fortement chuter le nombre de demandes. À l'époque, je m'en souviens, tout le monde pensait que les États-Unis étaient finis. Pas moi, et force est de reconnaître qu'ils ont bien rebondi...

Après quelques mois d'une recherche d'emploi intensive, j'ai reçu, de la part du Pr George C. Engelmayr, une proposition pour un poste de chercheur postdoctoral à l'université d'État de Pennsylvanie. Son objectif : utiliser les algorithmes pour comprendre la croissance du muscle cardiaque en laboratoire. Moi qui pensais continuer à explorer les matériaux synthétiques, voilà que je bifurquais soudain vers la médecine ! Mais le sujet s'annonçait passionnant, et ce grand écart n'effrayait pas le Pr Engelmayr, lui qui n'avait travaillé jusqu'ici qu'avec des médecins.

C'est avec lui que j'ai compris que le futur s'inscrit dans l'interdisciplinarité, cette capacité à translater ses compétences d'une discipline à l'autre et à travailler avec des gens profondément différents de vous-même. Et c'est cette aventure qui me permet, encore aujourd'hui, d'avoir la confiance nécessaire pour résoudre des problèmes scientifiques et techniques dans des domaines divers et variés. Je lui dois beaucoup.

En octobre 2009, j'ai donc rejoint le laboratoire biomédical de médecine régénérative de « Penn State ». Notre équipe combinait les visions médicales et d'ingénierie pour développer des techniques permettant de créer un tissu en laboratoire (plus exactement : dans un bioréacteur), afin de remplacer un tissu malade. Autant dire qu'il s'agissait d'une avancée décisive dans la longue histoire des greffes : en créant des tissus directement à partir de cellules souches du patient, on pourrait en finir avec les phénomènes de rejet des greffes ! On pourrait aussi éviter les opérations successives chez un enfant en cours de croissance qui porte une prothèse synthétique ou naturelle, puisque la prothèse pourrait grandir avec lui. Pour tout cela, il faudra encore des années mais, à l'époque, le travail ne faisait que commencer.

Pour ma part, je travaillais sur le développement *in vitro* du muscle cardiaque pour réparer les tissus malades du myocarde après un infarctus. Un an auparavant, George avait mis au point (avec l'équipe du Dr Lisa Freed, dans le laboratoire du Pr Robert Langer au MIT) une technique unique pour générer artificiellement un bout de tissu du myocarde, avec des résultats très prometteurs : la morphologie du tissu artificiel et son comportement élastique relatif étaient très proches de ceux du tissu *in vivo*. Mais le tissu était encore trop rigide, et trop de cellules cardiaques mouraient en cours de croissance. George, ce visionnaire, voyait dans les modèles et les simulations de ma thèse un moyen malin pour améliorer sa technique. En effet, le tissu du myocarde est composé (entre autres) de cellules cardiaques entourées de collagène. Nous avons donc établi une analogie entre ces cellules et « mes » nanoparticules de carbone dans leur matrice élastomère, et créé ensemble des algorithmes de simulation inspirés de mes premiers travaux...
Vive le dialogue entre les sciences !

Mais l'interdisciplinarité n'est pas qu'une affaire intellectuelle. Comme le disait George : « *You have to get your hands dirty* » – ce qui peut se traduire en français par : « mettre les mains dans le cambouis ». La médecine ne s'apprend pas que dans les livres. Il faut aussi toucher, manipuler pour comprendre. Selon George, je ne pouvais pas transposer mon modèle de morphologie de microstructures de caoutchoucs au tissu du myocarde si je ne comprenais pas le fonctionnement du cœur à l'échelle de l'organe et de la cellule. C'est dans cette perspective que, quelques mois après mon arrivée, il a entrepris de me faire disséquer un cœur de cochon afin d'en assimiler l'anatomie – mais aussi de me faire extraire des cellules cardiaques afin de les cultiver pour comprendre la vie quotidienne d'une cellule du myocarde.

Vous avez dit « biais algorithmique » ?

Fin 2009, me voilà donc partie pour ma première dissection de cœur. Je suis assise à l'une des paillasses de notre laboratoire sous une hotte aspirante, à côté de George – lui parfaitement détendu, moi emballée à l'idée de jouer au vrai docteur. Je réalise la chance que j'ai de passer ces deux prochaines heures à apprendre aux côtés d'un grand expert de la discipline. Mes micro-processeurs sont bien loin : j'ai revêtu la panoplie vestimentaire du parfait scientifique de laboratoire, avec gants, masques et blouse blanche. Je ressemble enfin à ce que ma grand-mère imaginait de moi quand je disais que je travaillais dans un laboratoire de recherche.

Après m'avoir présenté les outils que nous allons utiliser pour la dissection, George m'explique comment couper les tissus du muscle cardiaque afin de ne pas les abîmer pour l'extraction des cellules. Je découvre l'intérieur d'un cœur pour la première fois, avec ces deux parties quasi symétriques,

d'où partent respectivement l'aorte et l'artère pulmonaire. J'identifie les oreillettes, les ventricules, les valves... Mais au fait : comment distingue-t-on le ventricule gauche du droit avant dissection ? Très simple, me dit George. Il me demande de fermer les yeux et de toucher les deux parties. L'une d'elles est plus rigide : c'est la partie gauche, dont part l'artère aortique.

Je suis fascinée par la mécanique du cœur : un organe ingénieux, incroyablement sophistiqué, parfaitement conçu par la nature pour permettre la circulation du flux sanguin de manière synchronisée à travers le corps. George m'explique que l'anatomie du cœur de cochon est proche de celle d'un cœur humain. En revanche, précise-t-il, le positionnement dans la cage thoracique n'est pas le même entre l'homme et l'animal. Et il insiste : de façon générale, les différences morphologiques sont nombreuses entre l'Homme et l'animal : dès lors, en extrapolant des résultats de l'animal à l'humain, on prend toujours le risque d'introduire des biais dans nos recherches.

Un biais. C'est bien la première fois que j'entends ce mot en anglais – *bias*.

Je l'avais déjà compris dans la vie courante : nos visions parfois déformées des gens, des cultures et des choses de façon générale, peuvent biaiser nos jugements et nos perceptions. Mais, jusqu'ici, cela restait pour moi lié aux essais expérimentaux et aux études cliniques. Sûrement pas à mes algorithmes. J'avais tort.

Deux heures trente plus tard, nous achevons la dissection et l'extraction des cellules cardiaques. Je les pose délicatement dans une boîte de Petri, que je place dans l'incubateur chaud et humide pour qu'elles puissent se développer. L'incubateur

refermé, je commence à nettoyer la paillasse et les outils selon des règles strictes de stérilisation. C'est le moment que choisit George pour aborder la question des simulations numériques... et revenir sur la question des biais.

« Avons-nous réfléchi aux biais que nous pourrions introduire dans les modèles et les algorithmes que nous sommes en train de développer pour simuler le comportement élastique d'un muscle cardiaque créé en laboratoire ? »

Sa question m'a prise au dépourvu. À tel point, je me souviens très bien que je me suis mise à rire. « Comment ? Mais ça n'a rien à voir ! » ai-je répondu, un peu trop sûre de moi.

Mon raisonnement était le suivant : en réalisant des simulations numériques directement sur des modèles virtuels d'humains vivants, je n'extrapole aucun résultat de l'animal à l'Homme. Je ne me heurte donc pas au problème des médecins qui pratiquent des tests sur des mammifères ou des rongeurs... et qui par transfert supposent ce que ces résultats seraient chez l'humain. En résumé : pas d'extrapolation, donc pas de biais !

George me sourit. D'une voix douce et teintée d'ironie, il me dit que j'ai une vision biaisée de ce que sont les biais, et de la façon dont ils s'expriment : « Tes modèles et tes algorithmes peuvent contenir des biais, car tu les écris à partir de ta connaissance du monde – et, ici, de tes connaissances du fonctionnement du corps humain... Lesquelles dépendent de ta compréhension de ce que te disent les médecins. Tu ne peux évidemment pas garantir que tu as tout assimilé parfaitement. Et même si tu as tout compris, ces connaissances elles-mêmes peuvent être biaisées. Car nous-mêmes, médecins, nous avons parfois des connaissances limitées ! Celles qui concernent le fonctionnement du cerveau, par exemple... »

George marque un point.

Il me parle ensuite de notre modèle qui simule le comportement élastique du tissu du myocarde *in vitro*. Le choix des paramètres, le choix des équations mathématiques, voire la simple hypothèse de considérer dans un premier temps un comportement purement élastique du tissu cardiaque... Tout est possiblement source de biais ! Je commence à comprendre. Je pensais pouvoir garantir l'absence de biais car je justifiais rigoureusement et systématiquement chacune des hypothèses que je formulais dans l'algorithme, mais tout modèle est par essence une approximation, dont la pertinence dépend aussi de celui (ou celle) qui le développe. « Le modèle n'est qu'une grande hypothèse, résume George. Il se base sur des choix, conscients et inconscients, et dans chacun de ces choix se cachent nos propres perceptions qui résultent de qui nous sommes, de nos connaissances, de nos profils scientifiques et tant d'autres choses. »

En d'autres termes : toute modélisation reste une approximation de la réalité ; et même si mes hypothèses sont bonnes, je dois voir plus large : si elles se basent sur des données biaisées, mon algorithme le sera aussi.

Avec cette conversation, George venait d'entamer une collaboration qui allait bien au-delà du regroupement de compétences techniques et scientifiques. Elle allait prendre aussi une dimension métaphysique, pour remettre en question nos visions scientifiques. En tant que mécanicienne numérique, je ne vois pas la cellule cardiaque de la même manière qu'un médecin. Pour moi, elle est une entité géométrique presque homogène de forme variable (sphérique ou ellipsoïdale), qui se contracte selon une certaine fréquence et se déforme selon une certaine élasticité. Pour un médecin, la cellule cardiaque est une entité physiologique fortement

hétérogène où se produisent un ensemble de réactions physico-chimiques et électriques, recherchant un état d'équilibre constant pour s'adapter à son environnement. Deux façons si différentes de voir le monde ! Ce simple exemple justifie à lui seul la nécessité d'une collaboration entre médecins et numériciens pour développer des modèles de biomécanique les plus réalistes possibles, et donc les moins biaisés. *Biais* n'était qu'un mot, mais il changeait tout. En mettant un nom sur une réalité que je ne faisais que soupçonner, je voyais soudain les choses sous une autre lumière.

J'ai repensé à tous les biais que j'avais pu introduire dans les multiples algorithmes de ma thèse. Que ce soit les hypothèses faites sur la forme des nanoparticules de carbone, les décisions peut-être subjectives sur ce que j'observais sur les images de microscopie, ou encore les choix sur le comportement élastique de l'élastomère entourant les particules... J'avais forcément pris le risque d'introduire des biais. Pire : il y avait *sûrement* des biais.

Ce jour-là, j'ai pris une résolution : j'allais désormais traquer les biais possibles à chaque étape de mon travail pour les éviter autant que possible. Je devais les anticiper, les identifier, les chasser. Et cela passe par un esprit critique encore plus affûté – une sorte d'autodéfense intellectuelle pour m'éviter les pires erreurs.

Noam Chomsky parlait d'autodéfense intellectuelle pour combattre toute fabrique du consentement. Je me suis souvenue de ses textes qui me rappelaient notre faiblesse à tous : croire *a priori* sans aucun acte de rébellion intellectuelle ce qu'on nous dit, ce qu'on voit et ce qu'on apprend. Moi qui avais toujours pratiqué cette autodéfense intellectuelle vis-à-vis du travail des autres scientifiques, je devais également me méfier de moi-même. Je devais remettre en question ce que je

pensais et ce que je percevais de la réalité avant de la simuler numériquement. La suite de mon parcours allait me le montrer : les biais sont partout. En médecine, mais aussi en finance, en économie ou encore dans le journalisme. Depuis ces deux ans dans l'équipe de George Engelmayr à Penn State, je ne cesse de réfléchir aux origines possibles de ces biais, aux formes qu'ils peuvent prendre et à leurs conséquences.

Comprendre l'origine des biais dans nos comportements sociaux, c'est comprendre une partie des mécanismes des biais algorithmiques : comment ils s'introduisent, puis se propagent dans les simulations numériques que nous produisons et les technologies que nous utilisons. Depuis notre enfance, nous développons des biais cognitifs. Certains proviennent de notre culture et de notre environnement ; d'autres se forment au gré de nos expériences. Les biais algorithmiques résultent de ces biais cognitifs. On les retrouve dans les algorithmes et les modèles, mais aussi dans les données utilisées pour calibrer – voire « entraîner » les algorithmes, dans le cas de l'intelligence artificielle apprenante (ou *machine learning*). Comprendre ce passage de « nos » biais aux biais algorithmiques est essentiel pour porter un regard critique sur les technologies qui nous entourent aujourd'hui. Si ce livre permet d'y contribuer, alors il aura déjà atteint l'un de ses buts. Peut-être le plus important.

Les biais algorithmiques explicites

Rappelons qu'un algorithme, ou un modèle mathématique, contient des équations, des constantes, des variables ainsi que des conditions et des hypothèses. Le choix de ces entités peut se faire de façon explicite, c'est-à-dire qu'elles sont décidées par le(s) scientifique(s) en charge du développement de

l'algorithme. Il peut aussi être implicite, dans le cas du *machine learning*.

Commençons par le cas le plus simple : les critères explicites.

Dans le chapitre précédent, j'écrivais qu'il n'y a jamais un seul algorithme pour résoudre un problème donné, mais une multitude d'algorithmes possibles. Tout algorithme dépend en partie de la vision du monde des individus qui le développent. Certains en sont conscients et s'efforcent de réduire les biais au maximum. D'autres – volontairement ou non – y prêtent moins attention. Quoi qu'il en soit, il y a là une première source naturelle de biais.

Prenons le cas du modèle utilisé au MIT pour mes simulations numériques de traumatisme crânien. Dans mes travaux, je me suis intéressée à simuler numériquement des chocs à la tête d'humains exposés à des ondes de pression semblables à celles perçues par les soldats américains en Irak et en Afghanistan, exposés à des explosions lors d'attaques. L'US Army et la Navy sont très engagées dans la compréhension de ces accidents cérébraux qui engendrent des symptômes dramatiques chez les soldats revenant du front : perte de mémoire, troubles du sommeil, dépression, parfois suicide... Nous cherchions à comprendre les mécanismes de l'apparition de traumatismes crâniens en analysant les champs de déformation et de pression dans le cerveau au cours du choc. Pour ce faire, nous avons développé un modèle géométrique de crâne humain, contenant le cerveau mais aussi la boîte crânienne, le liquide céphalo-rachidien, l'ossature faciale ainsi que les muscles et la peau. Pour chaque constituant, j'ai utilisé un modèle de réponse élasto-plastique pour simuler la réponse mécanique de chacun des tissus. J'ai conduit des simulations numériques d'impact sur ce modèle de

tête humaine avec une onde de choc similaire à celles résultant d'une explosion. Je pouvais, avec mes simulations, calculer numériquement la pression dans chacun des tissus... Problème : les paramètres de notre simulation étaient identifiés sur des essais mécaniques qui ne tenaient pas compte de la direction du choc subi. Or, la manière dont le tissu du cerveau se déforme ne sera jamais exactement la même selon la direction de déformation – sans que les connaissances actuelles nous permettent de déterminer dans quelle mesure exactement. Après plusieurs hésitations, nous avons finalement estimé que l'influence de ce facteur sur les mécanismes du traumatisme crânien était négligeable. Nous avons fait le choix de considérer le cerveau comme isotrope, c'est-à-dire que la déformation serait la même quelle que soit la direction de déformation du tissu. Nous savions qu'un biais était possible – un biais *explicite*, donc, puisque introduit explicitement par nous-mêmes dans les hypothèses de départ – mais il était nécessaire pour ne pas nous perdre. J'avais bien sûr ce biais possible en tête au moment de dépouiller les résultats de mes simulations numériques ; aucun de ces résultats n'est venu laisser penser que notre hypothèse pouvait les fausser. J'ai toutefois mentionné ce biais potentiel lors de la publication de l'article : qui sait, un jour d'autres scientifiques reprendront nos travaux et parviendront à prendre en compte de façon détaillée l'anisotropie du tissu du cerveau pour comprendre encore mieux les traumatismes crâniens.

Un autre type de biais peut venir des données qu'on utilise pour paramétrer l'algorithme – qu'elles proviennent d'un échantillon non représentatif, ou qu'elles résultent de mesures ou d'observations elles-mêmes biaisées. Restons dans le cas de mes simulations du traumatisme crânien. Pour les réaliser, je devais connaître les dimensions moyennes d'une tête humaine

adulte et de ses constituants (le cerveau, l'os crânien, les cavités, les muscles...). Je devais donc collecter des données géométriques sur des humains adultes de différentes tranches d'âge et de différentes origines, afin que l'échantillon soit le plus représentatif possible. Étant une femme, j'avais évidemment pensé à collecter des données géométriques sur des boîtes crâniennes d'individus féminins. Mais c'est Raúl Radovitzky, mon directeur de recherche principal au MIT, qui m'a souligné l'importance d'aller également recueillir des dimensions pour des ethnies autres que « caucasiennes » (le terme officiel pour « blanc », aux États-Unis). Sans le vouloir, j'avais développé ce biais ethnocentrique dont parle tant Lévi-Strauss, en considérant inconsciemment l'homme blanc occidental comme référence. Une leçon ! Et une leçon valable bien au-delà de ce cas précis.

De façon générale, l'échantillon doit toujours être représentatif pour que la moyenne et l'écart-type aient un sens. Mais on sait qu'il est parfois difficile d'obtenir des données pour certaines catégories de population – une problématique que connaissent bien les sondages, par exemple (lesquels sont par ailleurs des nids de biais, quand on pense combien la façon de poser une question peut orienter la réponse...). Dans ce cas, il faut souvent diminuer le poids du paramètre associé dans le modèle et prendre cette limitation en considération lors de la discussion des résultats – c'est ce que les instituts de sondage appellent « redresser » l'échantillon.

Un autre point concerne l'origine des paramètres utilisés. On recourt toujours à d'autres travaux quand on conçoit un algorithme et ces travaux eux-mêmes peuvent comporter des biais. Pour modéliser le comportement élasto-plastique du cerveau humain, nous nous basions sur des essais mécaniques réalisés dans la vie réelle sur des cerveaux de cadavres

humains, ou *in situ* sur des cochons. Les deux cas étaient sources de biais. Dans le premier cas, on sait que les tissus cadavériques sont plus rigides que les tissus vivants car ils contiennent moins d'eau. De plus, on mesure généralement les propriétés élastiques du cerveau hors de la boîte crânienne et donc hors du contexte réel, ce qui peut également avoir un effet sur la réponse. Dans le second cas, même si le cerveau du cochon se rapproche davantage, morphologiquement, de l'Homme que de celui du rongeur, il reste différent de celui d'un humain.

Nous avons fini par établir deux lois mathématiques, qui sont aujourd'hui utilisées par d'autres scientifiques ainsi que par l'armée américaine et la Navy. La première porte sur le risque de traumatisme crânien selon l'énergie du choc subi. La seconde permet de faire l'analogie entre la pression maximale dans le cerveau d'un mammifère et dans celui d'un humain. On parle de loi d'échelle. Pour cette dernière loi, j'ai été prudente quant aux différences morphologiques entre cochon et humain, par exemple. En effet, le cerveau du cochon est bien plus petit et logé dans une boîte crânienne bien plus épaisse, laquelle tend à protéger davantage le cerveau lors d'un choc à la tête. C'est le même type de biais que celui que pointait le Pr Engelmayr lors de nos travaux sur le cœur.

Les biais algorithmiques implicites

En plus des critères explicites, les biais peuvent aussi se trouver dans les critères dits implicites d'un algorithme, qui proviennent de la phase d'apprentissage dans les techniques de *machine learning*. Cette simple expression peut faire peur. À l'idée d'une « machine » (un algorithme, en vérité) qui apprendrait (parfois) seule, on pense un peu trop vite à

Terminator... Vous allez voir que la réalité est bien loin du fantasme.

Imaginez par exemple un algorithme qui chercherait à reconnaître automatiquement un chien sur une photo. Pour développer cet algorithme, vous avez deux options. La première consiste à entrer dans les données de base toutes les caractéristiques qui définissent un chien : les oreilles, le museau, le pelage... Ce sont des critères explicites. Vous comprendrez très vite que la tâche est immense : car il s'agit de définir non pas un chien mais tous les chiens possibles – avec d'innombrables sources de biais : si vous définissez que le chien a deux oreilles, votre algorithme sera-t-il capable de reconnaître un chien avec une seule oreille ? Et il vous faudrait aussi définir ce qui *n'est pas* un chien, afin que le programme ne risque pas de confondre chiens et renards, par exemple. Autant dire que vous n'en finirez jamais de reprendre votre algorithme et votre programme informatique.

L'autre option, c'est l'apprentissage automatique. Le principe est très simple. Vous commencez par entrer dans l'algorithme des critères explicites basiques pour décrire un chien. Puis vous lui présentez des photos contenant (ou pas) un chien, et vous le corrigez en cas de réponse fausse. On parle d'un « apprentissage supervisé ». Au bout d'un certain temps (et d'un nombre considérable de photos !), l'algorithme aura développé par lui-même des critères de catégorisation, sur lesquels il s'appuiera par la suite pour reconnaître un chien sur une photo. Ce sont des critères inférés de l'expérience et développés par l'algorithme lui-même, et non par ses concepteurs. Voilà pourquoi j'aime parler de critères *implicites*.

Ainsi donc, après cet apprentissage, l'algorithme ne saura toujours pas ce qu'est un chien (voilà une grande différence

entre une *intelligence artificielle* et l'intelligence humaine), mais il saura en reconnaître un presque à coup sûr. Il saura même le distinguer d'un renard !

La justesse de l'algorithme dépend évidemment de la quantité de photos sur lesquelles baser l'apprentissage¹, mais aussi de la représentativité de l'échantillon d'images présentées. Et c'est là, dans les données de départ, que se nichent les biais ! Pour rester dans notre exemple : si l'échantillon canin ne comptait aucun « chien nu du Pérou » (une des cinq races de chiens sans poils au monde), l'algorithme pourrait très bien ne pas le reconnaître – alors qu'un humain y verra immédiatement un chien.

Et pour prendre un exemple bien réel, sachez que les tout premiers algorithmes de reconnaissance faciale ne reconnaissaient pas... les peaux noires. Rendez-vous au [chapitre 5](#) pour plus de détails sur les tenants et aboutissants de cette histoire !

Il existe encore d'autres sources de biais (dans l'interprétation des résultats d'une simulation, par exemple). Je n'entrerai pas dans les détails, mais vous l'aurez compris : il est très difficile de mettre en place un modèle et un algorithme qui soit strictement sans biais.

Notre responsabilité, à nous autres concepteurs d'algorithmes, consiste donc à évaluer les origines possibles de biais et travailler notre esprit critique tout au long du développement du modèle, de la réalisation du calcul numérique, du dépouillement des résultats et sur les conclusions que l'on en tire. C'est un questionnement sans fin ! Mais il est essentiel, sous peine de développer des algorithmes faussés.

Les paradoxes de l'observation

Il est un dernier point que je n'ai pas encore abordé : c'est le paradoxe de l'observation et de la mesure. Car on modélise souvent un phénomène à partir d'observations directes... Mais nos propres observations peuvent être sources de biais ! Voilà bien une question métaphysique (donc à laquelle la physique ne peut pas répondre), mais elle doit être prise en compte. Il y a ici deux questions.

La première est la suivante : comment savoir si ce qu'on observe est bien la réalité ? Je me la pose très souvent : si moi, Aurélie, je vois une chose sous telle forme, serait-il possible qu'une autre personne voie cette même chose différemment ? Après tout, ce que je vois a déjà été analysé par mon cerveau, lequel contient des algorithmes naturels construits depuis ma naissance, et donc potentiellement biaisés. La simplicité de la question cache une complexité dont l'Histoire ne cesse de témoigner. Un exemple ? Les Hommes ont longtemps pensé que le Soleil tournait autour de la Terre. Après tout, cela semble bien être le cas, depuis notre référentiel terrestre ! Il a fallu attendre le XVI^e siècle et Nicolas Copernic pour décrire le système héliocentrique : le Soleil au centre, les planètes autour. Moralité : notre observation elle-même peut être faussée, car nous pensons voir une chose qui n'est pas celle qu'elle est dans la réalité. On parle de paradoxe de l'observation.

Ma deuxième question concerne la mesure : comment savoir si la mesure que je réalise ne perturbe pas le phénomène que je souhaite analyser et quantifier ? Cette interrogation n'est peut-être pas sans vous rappeler l'expérience de pensée du « chat de Schrödinger ». Cette expérience a été proposée par le physicien Erwin Schrödinger en 1935 pour mettre en évidence le problème de la mesure en physique quantique. Pour notre démonstration, retenons-en cette version

simplifiée : un chat est présent dans une boîte opaque ; nous ne savons pas si le chat est mort ou vivant, et seule l'ouverture de la boîte peut nous donner la réponse à cette question. L'ouverture de la boîte représente ici la mesure – l'acte qui permet d'obtenir la valeur recherchée (ici, l'état du chat : *mort* ou *vivant*). Tant que la boîte est fermée, le chat a une chance sur deux d'être vivant ou mort. Mais si j'ouvre pour savoir, comment puis-je être sûre que l'ouverture de la boîte ne déclenche pas la mort du chat ? En d'autres termes : comment être sûre que la mesure n'a pas faussé le résultat ?

Cette question torture la plupart des scientifiques expérimentalistes et ceux qui, comme moi, utilisent dans leurs travaux les grandeurs mesurées par d'autres scientifiques. Voilà pourquoi, depuis ma première expérience dans le domaine biomédical à Penn State, je me suis toujours intéressée au contenu des protocoles expérimentaux, afin d'avoir un minimum d'esprit critique vis-à-vis des données que je récupérais dans les articles scientifiques. Pour aller encore plus loin, la simple collecte de données pour nourrir un algorithme peut elle-même être perturbée par la technique de collecte. C'est toute la complexité des enquêtes en sociologie, par exemple, où la façon de poser les questions influe nécessairement sur les réponses. Les chercheurs les plus scrupuleux s'efforcent d'éviter les biais liés à une influence sociale ou culturelle, mais cela reste difficile. Là encore, c'est notre décision et notre esprit critique qui minimisent ces influences et les effets de nos propres biais cognitifs.

Ne nous y trompons pas : nous discriminons tous, moi la première. Tenter d'éliminer complètement nos biais reviendrait à développer une société lisse, ennuyeuse – et, de ce fait, déprimante. Nos biais reflètent nos différences et la façon dont nous voyons le monde. Ils sont une part de notre

identité. En prendre conscience est une richesse plus grande encore : cela nourrit nos réflexions et nous donne donc l'opportunité d'évoluer et de faire évoluer nos sociétés.

Et, heureusement, les biais ne mènent pas tous à des discriminations ! Nous devons prendre conscience des déformations possibles de notre perception et agir en conséquence afin d'éviter toute discrimination et injustice.

Paradoxalement, les biais algorithmiques sont, je pense, la meilleure chose qui pouvait nous arriver, à nous, scientifiques. Savoir que ces biais existent, et qu'ils sont inévitables, nous fournit de nouvelles manières de regarder et de construire nos modèles et nos algorithmes, en nous appuyant sur de nouvelles perspectives et en considérant encore davantage le polymorphisme de la société, et donc sa complexité.

Les biais sont le meilleur ennemi du scientifique

Boston, quartier de Back Bay, 15 avril 2013. Il est presque 15 heures, ce lundi, et deux bombes explosent à 12 secondes d'intervalles près de la ligne d'arrivée du marathon de la ville sur Boylston Street. J'habite à 200 mètres de l'attaque. Quelques mois après l'attentat, Raúl réunit notre équipe de seniors (Dr Martin Hautefeuille, Dr Adrian Rosolen et moi-même) et nous fait part d'une demande un peu particulière du Pr Dave Rosen, de l'université de Dartmouth. Dave est un grand chirurgien plastique connu pour ses travaux et ses résultats de reconstruction faciale de soldats américains blessés sur le front. C'est aussi un ami de Raúl qui connaît très bien nos travaux sur les simulations numériques de traumatismes crâniens. Il nous propose de collaborer avec lui pour analyser le risque chez les participants du marathon

(même éloignés des bombes) d'être victimes d'un traumatisme crânien dû aux ondes de pression issues des explosions.

Dave avait accès à des données sur la cartographie du quartier, la position des individus autour des bombes, par âge et par genre, ainsi qu'à certaines informations sur le contenu des bombes utilisées par les terroristes. Nos yeux brillent quand Raúl nous présente le projet. Nous sommes tous d'accord pour foncer, même s'il faudra pour cela travailler en partie sur notre temps personnel, faute de financement. L'occasion est trop belle d'agir utilement – et si possible de démontrer comment algorithmes et simulations numériques peuvent aider à comprendre notre monde.

Je dois dire qu'Adrian, Martin et moi-même formons l'équipe idéale pour ce défi. Nous sommes de bons amis et d'excellents collègues avec des profils complémentaires qui nous permettent de nous attaquer à des problèmes compliqués à résoudre. Être amis est un atout important dans ce genre de projet chronophage. Nous avons reçu de la part de Dave une géométrie grossière de la ville, qui contenait beaucoup d'erreurs topologiques que nous avons dû corriger afin de la rendre exploitable. Au total, il nous a fallu un peu plus de deux mois pour construire un modèle réaliste des bâtiments de la ville autour de la ligne d'arrivée du marathon. Aujourd'hui encore, quand je longe la bibliothèque de Boston, je pense avant tout aux heures que nous avons passées à la modéliser.

Réaliser un tel modèle impose de faire des hypothèses – en particulier sur le modèle géométrique de la ville et sur les données énergétiques des deux bombes. Pour gagner du temps, nous décidons ainsi de ne pas inclure les arbres et les poteaux électriques dans la géométrie du lieu des attentats : un tel niveau de détail aurait significativement alourdi le modèle, donc rallongé le temps de simulation, voire rendu le calcul

impossible faute d'ordinateurs assez puissants. Problème : avec cette hypothèse, on néglige la réflexion et l'absorption des ondes de choc issues des bombes sur les arbres et les poteaux... On surestime donc l'amplitude de l'onde de pression qui arrive sur les individus, et ce point pourrait être source d'erreurs. Nous serons vigilants au moment d'analyser les résultats des simulations numériques.

Concernant les bombes, nous calculons des bornes inférieures et supérieures de l'énergie produite, en utilisant la liste des « ingrédients » qu'elles contenaient. À partir de la position des spectateurs du marathon et de la loi que j'avais codéveloppée sur le risque de traumatisme crânien selon l'énergie de l'onde de pression, nous sommes alors capables de caractériser la pression intracrânienne maximale subie par chaque personne aux alentours des bombes, donc d'évaluer leur risque d'avoir un traumatisme crânien, même bénin.

Ces calculs, uniques dans l'histoire des simulations de traumatismes crâniens, nous vaudraient bien un papier dans *Sciences* ! Raúl est impressionné par ce que nous avons réussi à produire en si peu de temps... mais il nous fait part de ses préoccupations. La situation est la suivante : dans l'urgence après l'attentat, de nombreuses personnes présentes ont été diagnostiquées avec un traumatisme crânien et leurs assurances ont déjà activé les indemnités journalières et les prises en charges médicales. Or, ai-je appris par les médecins, le diagnostic d'un traumatisme crânien est très difficile à établir. Certains effets d'un événement traumatisant sont d'ordre psychologique, et non physiologique – mais la frontière est difficile à déterminer avec certitude. Parmi les personnes qui ont été diagnostiquées avec un traumatisme crânien, certaines ne souffraient probablement « que » de traumatismes psychologiques. Si nos résultats venaient à être

publiés, les assureurs pourraient s'en emparer pour exiger une nouvelle expertise sur certaines victimes, faire requalifier le traumatisme et demander le remboursement de sommes déjà versées (ainsi va le système de santé américain...). Raúl pense que nous ne devons pas publier nos résultats pour éviter de mettre ces personnes en porte-à-faux. « Qui nous assure que nous avons raison ? dit-il. Nos simulations ne sont pas parfaites et nous le savons, nous avons fait tant d'hypothèses... »

Adrian, Martin et moi-même sommes en colère – non contre Raúl, mais contre ces assureurs qui allaient peut-être utiliser nos calculs pour augmenter leurs profits. Raúl ajoute : « Nous ne pouvons pas laisser les assurances agir de façon biaisée face à nos résultats. » Nous le savons : c'est la voix de la raison. Non seulement il serait extrêmement difficile d'expliquer simplement les algorithmes complexes que nous avons développés pour ces simulations, mais il serait encore plus difficile de sensibiliser les gens sur le nécessaire recul critique à avoir face à des résultats numériques. Les enjeux sont trop importants : nos résultats ne seront pas publiés.

Depuis ce jour et cette expérience malheureuse, je comprends que non seulement je dois me méfier de mes propres biais (et des éventuels biais des travaux sur lesquels je base mes hypothèses), mais que je dois aussi, une fois mes simulations réalisées, me méfier des biais de ceux qui utiliseront mes résultats. Je n'en sortirai donc jamais !

Avec Adrian et Martin, il nous a fallu un moment pour encaisser le coup. Aujourd'hui, nous sommes surtout fiers d'avoir résolu ce problème *a priori* impossible. Nous en parlons souvent entre nous quand nous nous revoyons, ou à nos collègues lors d'autres aventures... Mais nous ne mentionnons jamais les conclusions. Avec le recul, nous

reconnaissons volontiers que prendre conscience du regard biaisé que pouvaient avoir les assureurs nous a évité de dévoiler des résultats sans doute trop immatures (et qui auraient pu avoir des conséquences que nous serions encore en train de regretter). « Un grand pouvoir implique de grandes responsabilités », dit Ben Parker dans la BD *Spider Man*. Les biais étaient là pour nous le rappeler. Et même si les résultats n'ont pas été publiés, nous savons qu'un jour peut-être ils seront réutilisés – voire améliorés – par de futurs scientifiques qui pourront lever nos hypothèses grâce à des capacités de calcul toujours plus grandes et des algorithmes toujours plus performants.

De la médecine à Wall Street : algorithmes, journalisme... et politique

En 2016, après cinq ans au MIT, je rejoins la société Bloomberg – le Google de la finance – pour découvrir un nouveau champ d'application des simulations numériques : celui de la finance de marché. Adieu, Nouvelle-Angleterre ! Au revoir, recherche médicale ! Prête pour une nouvelle aventure, je découvre les grandes avenues, les gratte-ciels, le bruit et la poussière de Manhattan.

Quand Bloomberg m'a « chassée », quelques mois plus tôt, je ne savais pas que l'entreprise, en plus d'une agence de presse, était surtout le géant de la data financière. Bloomberg développe notamment des algorithmes et des outils pour fournir aux acteurs de la finance les informations nécessaires à leur prise de décision. Je mentirais si je disais que je connaissais la finance avant de rejoindre Bloomberg, mais cela importait peu. Mes expériences avec George et Raúl m'avaient décomplexée. Je me sentais de taille à relever de nouveaux

défis et à utiliser mes compétences en algorithmique dans un domaine entièrement nouveau pour moi.

Me voici donc intégrée au département *Equity* (fonds propres) dirigé par Ryan Flannery, qui développe des outils pour analyser les marchés boursiers en temps réel ainsi que les performances des analystes. Tout ce que je sais aujourd'hui de la finance de marché, je le dois à Ryan. Avec son esprit critique affûté et sa curiosité contagieuse, il a aussi été mon modèle chez Bloomberg. Je me souviens encore de mon premier jour. Ryan m'accueille au pied de la tour de Bloomberg, au sud-est de Central Park. Il m'accompagne à mon bureau au 20^e étage, situé à côté du sien. Je m'assois face à deux écrans géants qui diffusent des courbes boursières... J'ai soudain l'impression d'être plongée dans *The Big Short* ou *Wall Street* ! Tandis que je découvre mon nouvel environnement, Ryan me félicite pour mon algorithme de calcul de consensus. « Mon quoi ? » Sur le coup, je ne comprends pas : je viens d'arriver, je n'ai pas encore écrit la moindre ligne d'algorithme, de quoi pourrait-il bien me féliciter ? La réponse vient très vite : Ryan faisait référence à mon entretien d'embauche.

Les interviews d'embauche à Bloomberg s'organisent autour de problèmes mathématiques à résoudre, d'algorithmes à développer et de code à écrire. Ces exercices permettent de juger le plus justement possible, et sans biais, les compétences d'un candidat, en faisant abstraction des diplômes et des promesses du CV. Dans mon dernier entretien, je devais développer un algorithme et l'implémenter dans un code pour calculer en temps réel le « consensus », qui synthétise l'opinion des analystes financiers sur la valeur d'une action en bourse. Cet exercice a été capital pour mon embauche : Ryan m'apprend, les yeux pétillants et les bras agités, que mon

algorithme était non seulement juste, mais aussi plus rapide que celui de Bloomberg !

En réduisant encore davantage le nombre d'opérations à réaliser pour obtenir le consensus, je les avais déjà aidés (sans le savoir) à réduire la complexité temporelle de leur algorithme. Ryan s'emballait en me parlant. De mon côté, j'étais plutôt heureuse, et un peu surprise de ce succès... Je me réjouissais plus encore de voir que mon manager avait lui aussi un cœur d'enfant. Nous étions faits pour nous entendre. Et ce fut le cas !

En 2017, j'ai suivi Ryan dans un nouveau département de Bloomberg, appelé *Key insight* (qu'on pourrait traduire par « signaux faibles »). Cette équipe avait été créée pour développer des outils numériques capables de détecter des modifications notables ou subtiles dans les flux officiels de données financières et économiques, afin de générer automatiquement de courts articles de « news », contenant un titre et une ou deux phrases.

À ce stade, j'imagine le lecteur s'inquiéter pour les journalistes : si des algorithmes se mettent à écrire à leur place, ils ont du souci à se faire ! Au contraire, dirais-je, cet outil donne plus de pouvoir aux journalistes. L'idée est la suivante : les algorithmes sont plus rapides que l'humain pour détecter des modifications dans l'évolution d'une action ou d'un indice économique, voire pour comparer un événement avec d'autres événements passés. L'algorithme est aussi plus rapide pour écrire un article basique sur cette évolution. Prenons un cas concret. En écrivant : « L'action Apple a gagné aujourd'hui 4,7 %, ce qui constitue sa meilleure performance depuis un mois », on donne aux lecteurs une information factuelle qui serait ennuyeuse à écrire pour un journaliste. En publiant cet article automatique plus rapidement, Bloomberg

capte l'intérêt du lecteur tout en laissant au journaliste un peu de temps supplémentaire pour écrire un article d'analyse. Il y a alors nettement plus de chances que le lecteur, attiré par le premier article automatique, lise l'article du journaliste. Un bel exemple de complémentarité entre l'Homme et l'algorithme ! Et une bonne méthode pour distinguer les vrais bons journalistes²...

Biais II – Le retour

Le biais algorithmique me rattrape à l'été 2017, lorsque l'un des chefs économistes de Bloomberg, Jeremy Fang, me propose un projet aussi précurseur qu'ambitieux. Il voudrait savoir s'il est possible d'écrire un modèle qui puisse suivre la stabilité politique d'un pays et établir des corrélations avec sa santé économique. Il me précise son idée : il s'agirait de déclencher une alerte lorsqu'une instabilité politique apparaît et d'étudier l'influence de cette instabilité sur les indices économiques du pays, en analysant des phénomènes similaires survenus dans le passé.

Comme je peine à saisir sa demande, il prend un exemple sciemment exagéré : serait-il possible, demande-t-il, d'évaluer l'impact d'un coup d'État sur les indices économiques d'un pays donné ? Je comprends aussitôt que je vais le décevoir. Un tel algorithme, s'il existait, souffrirait de bien trop de biais pour être valable. L'explication est simple : les algorithmes de prédiction se basent toujours sur l'analyse du passé : ils sont conçus pour repérer des tendances, des corrélations, des enchaînements de causes et d'effets... Mais lorsqu'un événement est peu fréquent, voire très inhabituel (comme un coup d'État), son « schéma de récurrence » dans le passé est difficile, voire impossible, à extraire, rendant toute prédiction non pertinente. Ainsi donc, expliquai-je à Jeremy, nous

pouvons faire des choses formidables grâce à l'intelligence artificielle mais elle a ses limites, et il ne faudrait surtout pas voir en elle la réponse magique à toutes les questions.

Nos échanges me rappellent le livre de Nassim Nicholas Taleb, *Le Cygne noir*, que j'avais lu lors de ma thèse de doctorat et qui présente une réflexion sur les conséquences profondes d'un événement rare. Jeremy a lui aussi dévoré ce livre, ce qui me permet de lui expliquer le lien avec l'algorithmique. Le « cygne noir » de Taleb désigne, entre autres, un événement extrêmement rare qu'on ne peut pas prendre en compte dans un modèle car il ajouterait des contraintes et une complexité inutiles au regard de son poids statistique. Dans son livre, Taleb propose une illustration très simple : si vous habitez à proximité d'une voie ferrée que vous traversez tous les jours, vous ne pouvez pas commencer à intégrer le risque de vous faire écraser un jour par un train. Cela contraindrait beaucoup trop votre quotidien. En un mot : vous ne vivriez plus.

Pour en revenir au cas de Bloomberg : plutôt que d'intégrer dans le modèle des phénomènes exceptionnels comme les coups d'État, il serait plus pertinent, dans une approche plus explicite, d'ajouter à l'algorithme de base une composante qui décrirait les phénomènes à l'origine de l'apparition de ces événements. Mais cette approche reste délicate et peut prendre du temps, car il faut bien identifier les causes et les conséquences dans de nombreux cas d'usage. On peut toujours travailler de façon itérative en complexifiant le modèle et l'algorithme au fur et à mesure des itérations, mais vouloir tout modéliser en un coup peut amener à l'introduction de biais dont il serait difficile de découpler les effets tant ils sont nombreux. Dans le cas des simulations numériques de prédictions, il est plus judicieux de conserver un regard

critique face au modèle et à l'algorithme que nous développons, car la solution parfaite n'existe pas. Mes explications parviennent à convaincre Jeremy de réaliser un algorithme plus simple dans un premier temps... Et nous voilà partis !

Car, dans le même temps, Jeremy m'a lui aussi convaincue de relever le défi et de développer ce fameux modèle politico-économique, pour en implémenter un prototype, avec l'aide des économistes de mon équipe. Nous partons donc à la recherche des indicateurs les plus pertinents pour évaluer la stabilité politique d'un pays. Jeremy me propose une métrique liée à l'activité sur les réseaux sociaux dans un pays donné. Son idée est la suivante : puisque Twitter, Facebook et consorts se sont imposés comme une sorte de lieu de débats par procuration, un pays qui vit une instabilité politique aura tendance à voir un pic d'activités sur les réseaux sociaux. Il se trouve qu'une société extérieure propose un indice pour évaluer ces évolutions, et que cette métrique est déjà utilisée par d'autres entreprises et scientifiques. Nous partons confiants. J'analyse les données de différents pays sur les cinq dernières années, et rapidement l'hypothèse de Jeremy se confirme : on peut facilement corrélérer des événements symptomatiques d'instabilités politiques et économiques (élection serrée, pic d'inflation...) avec la quantité d'échanges sur Twitter, par exemple. Je commence donc à écrire mon algorithme de détection : je sais exactement comment l'articuler et comment utiliser les données historiques d'un pays pour mieux comprendre le présent. En parallèle, je continue d'analyser les données que nous collectons sur différents pays pour affiner le modèle. Ces données sont importantes : elles doivent m'aider à calibrer mon algorithme,

et à en valider la logique. C'est là que, malheureusement, les choses se compliquent.

Tout d'abord, j'ai du mal à obtenir des données sur des pays dits très instables politiquement, tels que l'Iran ou le Soudan – soit parce que l'usage de certains réseaux sociaux est interdit par l'État, soit en raison d'une autocensure des utilisateurs. C'est un gros problème. Comment puis-je développer un algorithme de corrélation des instabilités politiques et économiques d'un pays si je ne peux le calibrer que sur les données de pays stables ?! J'étais en train de biaiser mon modèle. Je ne puis fournir tous les détails de cette histoire pour des raisons évidentes de confidentialité mais, vous l'aurez compris, on retrouve ici la question des biais liés à l'échantillon utilisé pour concevoir le modèle.

Une autre donnée encore plus surprenante entre bientôt en scène. Dans un pays d'Amérique latine, je remarque deux pics très élevés d'utilisation des réseaux sociaux au cours des deux années précédentes – et ce, au même moment de l'année. Je pense d'abord à un bug : après tout, la société qui nous fournit ces données a dû, elle aussi, collecter, nettoyer et analyser des données brutes pour constituer son indice et des bugs sont toujours possibles. Je contacte la société pour leur faire part de cette anomalie dans leurs données. Les ingénieurs de l'entreprise me répondent dès le lendemain. Ils me confirment la validité de la donnée, mais avouent ne pas comprendre non plus le phénomène. Quelques heures et échanges plus tard, je découvre le pot aux roses : l'activité inhabituelle sur les réseaux sociaux était due... à l'exaltation des citoyens pour l'anniversaire de leur président ! Je ne sais pas si je dois rire ou pleurer... Finalement, je choisis d'en rire. Je vais trouver Jeremy et lui propose que nous en restions là. Cette histoire m'apparaît comme le signe que les données que nous avons

aujourd'hui à notre disposition vont nous faire développer un algorithme profondément biaisé. Même si cet algorithme fonctionne dans 80 % des cas, que se passe-t-il pour les 20 % restants ? En traduisant incorrectement certaines données, nous risquerions de développer des erreurs graves, qui pourraient elles-mêmes devenir source d'instabilités politiques dans un pays. Dit autrement : en finalisant et en déployant notre algorithme, nous risquerions d'entrer dans un cercle vicieux qui pourrait transformer nos propres résultats en déclencheurs de coups d'État !

Alors que je réfléchis au coût de la décision que je dois prendre, je repense aux simulations des explosions du marathon de Boston et au choix que nous avons finalement fait de ne pas continuer. Quatre ans après, j'en suis désormais persuadée : cette décision était la meilleure. J'en parle également à mon manager, Arvind Seth, qui dirige le département *Key insight*. Arvind comprend et il me soutient, même s'il admet être frustré que ce modèle ne sorte pas... Je lui promets que ce modèle sortira un jour et que ce que nous avons fait servira de base pour la suite. Arvind me sourit et commence à me poser des questions sur ces fameux biais, ce qui prolonge notre conversation jusque tard dans l'après-midi. Quand ces biais n'interfèrent pas avec mes développements algorithmiques, ils sont décidément l'objet de discussions longues et passionnées... Les biais algorithmiques sont assurément le meilleur ennemi du scientifique !

Je voudrais revenir une dernière fois sur cette affirmation, qui peut sembler provocatrice. Parce qu'ils sont inévitables, les biais nous forcent à développer notre esprit critique. Ils sont, en quelque sorte, l'ingrédient magique de l'autodéfense intellectuelle chez le numéricien : ils nous poussent à remettre sans cesse en question les résultats d'autrui, mais aussi nos

propres idées. C'est grâce à mon autodéfense intellectuelle que je développe cette armure et ces armes pour combattre les biais dans mon propre travail. Par notre formation, nous autres scientifiques avons un esprit critique relativement affûté. Nous passons un temps significatif à critiquer le travail des autres mais aussi le nôtre, à traquer les points faibles qui fragiliseraient une théorie ou des résultats. Mais l'économie actuelle de la science pousse aussi à la publication rapide de résultats avant de les avoir suffisamment passés au tamis de l'esprit critique. Cette course à la publication et aux résultats exclusifs (*publish or perish* : publier ou mourir) tend à affaiblir notre raisonnement critique.

L'existence même des biais doit nous forcer à nous interroger toujours davantage sur nos travaux, nos modèles, nos conclusions. Dans le cas contraire, nous risquons de commettre de profondes erreurs, avec des conséquences parfois désastreuses. À l'heure de l'automatisation intensive des procédés et des prises de décisions, des prédictions en tout genre et des technologies prétendument auto-apprenantes, il est important de voir dans le biais le meilleur ennemi des scientifiques : celui qui va assurer le bien-fondé et la bonne utilisation des innovations futures.

Et pourtant. Aujourd'hui, on rend les algorithmes coupables de tous les maux. On les accuse de racisme, de sexisme, de favoritisme... Mais c'est un faux procès !

Car, si sophistiqué qu'il soit, un algorithme ne fait jamais que ce pour quoi on l'a programmé – même dans le cas d'une intelligence artificielle apprenante. L'algorithme n'a pas de conscience, il n'a pas d'autonomie, il n'a pas de pouvoirs magiques.

Disons-le avec force : fustiger les algorithmes, c'est prendre la question par le mauvais bout. Bien sûr, les évolutions et innovations récentes soulèvent des problèmes inédits, auxquels nos sociétés doivent répondre pour encadrer les nouvelles pratiques et garantir qu'elles soient au service de progrès pour les humains. Pour trouver les solutions, rien ne sert de s'acharner sur des boucs émissaires. Mieux vaut chercher à comprendre et se poser les bonnes questions.

1. Voilà (entre autres) pourquoi Facebook, Google et les autres sont si gourmands des données personnelles : plus ils en collectent, plus leurs algorithmes peuvent être précis.

2. Sur ce sujet, voir mon billet « L'intelligence artificielle est une alliée pour la presse et les journalistes », *Meta-Media*, 23 mai 2019, <https://www.meta-media.fr/2019/05/23/lintelligence-artificielle-est-une-alliee-pour-la-presse-et-les-journalistes.html>

Nous sommes tous coupables de ces biais

En octobre 2017, mon voyage au pays des algorithmes prend un nouveau tournant. Je dis aurevoir à Bloomberg et décide de voler de mes propres ailes, entre les États-Unis et la France, pour continuer à écrire et implémenter des algorithmes dans différents domaines, et contribuer à l'information du public sur le sujet. Mettons donc nos actes en accord avec nos convictions !

C'est dans ce cadre qu'en octobre je donne une conférence devant les lecteurs de l'hebdomadaire *Le Point*. Quelques jours plus tard, Saïd Mahrane, l'un des rédacteurs en chef, me demande d'écrire un article dans le magazine pour défendre les algorithmes face aux nombreux crimes sexistes et racistes dont on les accuse. J'hésite un peu. Parce que je n'ai encore jamais écrit dans un magazine comme *Le Point*, parce que personne en France ne parlait encore de biais algorithmique... et surtout parce que je savais que ce papier me vaudrait d'être attaquée en retour. Endosser la cape de l'avocate des algorithmes, c'était accepter de devenir la messagère d'une nouvelle difficile à admettre : les vrais coupables des méfaits dont on accuse les algorithmes... c'est nous.

Je finis par accepter le défi, quitte à contrarier la grande majorité des lecteurs. Le titre est sans appel : « N'accusons pas

les algorithmes ! » Les retours des lecteurs sont plutôt positifs dans l'ensemble... Ouf ! Mais, si certains sont constructifs, d'autres, nombreux, révèlent chez les commentateurs une grande confusion. Une sorte d'aveuglement technologique de la part de gens qui pourtant utilisent chaque jour des algorithmes¹.

C'est cette confusion qui, quelques mois plus tard, m'a fait accepter la proposition de Gaspard Koenig d'écrire ce voyage au pays des algorithmes.

Quand la confusion s'installe

Nous avons tous vu des films comme *iRobot*, *Terminator*, *Matrix* ou *Blade Runner*, ou lu les romans d'Aldous Huxley, Isaac Asimov ou encore George Orwell. Toutes ces œuvres, qui nous ont valu de grandes soirées *popcornisées* ou des nuits cachées dans notre lit, sont autant d'histoires aussi excitantes que... fictives !

Nourries par les fantasmes et les peurs de ces auteurs visionnaires, ces histoires nous ont tant marqués qu'elles deviennent notre référence quand nous nous projetons dans l'avenir. Mais il est important de distinguer les peurs fantasmagoriques de la réalité algorithmique. Nous n'imaginons jamais vraiment qu'un monstre viendra hanter nos rêves, alors que nous avons tous vu *Freddy : les griffes de la nuit*. Nous n'évitons pas le rayon des poupées dans les boutiques de jouets par crainte de rencontrer *Chucky* ! Pourquoi ? Car nous comprenons la réalité sans la déformer. La crainte que nous ressentons devant les films d'horreur ne façonne pas notre perception des choses. Pourquoi donc n'en serait-il pas de même avec la science-fiction ? Je ne dis pas qu'aucun élément de ces films ou romans d'anticipation n'existe aujourd'hui. Mais s'y référer systématiquement,

même inconsciemment, ne peut que renforcer une confusion qui nuit gravement au débat public. Et cette confusion trouve sa source dans notre méconnaissance des mécanismes de base de l'intelligence artificielle et des algorithmes. Aujourd'hui, quand on parle d'intelligence artificielle (et qui n'en parle pas ?), on parle de robots humanoïdes ou tueurs, ou bien de machines qui menaceraient de nous réduire en esclavage. On invoque aussi l'avènement, même lointain, du « point de singularité », où une supra-intelligence algorithmique dépasserait l'intelligence humaine – nous y reviendrons au chapitre suivant. À vrai dire, on entend tout, et souvent n'importe quoi, sur le sujet. Pour ma part, je n'ai rien contre les confrontations de points de vue : elles permettent souvent des avancées dans notre compréhension du monde. Cela étant dit, j'ai un niveau de tolérance très bas concernant les pseudo-experts qui propagent avec morgue des contre-vérités évidentes, et tout ce qui contribue à plonger le public dans un complet flou intellectuel. La peur et l'horreur ont toujours plus vendu que le rêve, car notre cerveau, par instinct de survie, enregistre davantage les faits et les idées qui peuvent menacer notre espèce.

La première question que je me pose est la suivante : pourquoi accuse-t-on si facilement les robots – et donc les algorithmes ?

J'y vois plusieurs raisons. Tout d'abord, nous utilisons tous (scientifiques, journalistes, politiques ou simples citoyens) des termes au caractère fortement anthropomorphique pour parler des algorithmes : ils apprennent, ils se nourrissent, ils décident, ils nous écoutent... Ces termes sont des faux-amis et nous devons y prendre garde. Car même s'ils nous permettent de mieux comprendre la situation, ils développent chez nous des mécanismes de pensée qui nous font considérer

algorithmes et robots comme des êtres indépendants et conscients. En les personnifiant (qu'on pense aux assistants vocaux, par exemple), nous tendons à les considérer comme des êtres capables de raisonner, d'agir et donc de se responsabiliser. C'est une vision biaisée – voire entièrement faussée – de la réalité ! Et pourtant, il est difficile de résister à la tentation anthropomorphique quand on nous présente un petit robot mignon ou un assistant vocal qui raconte des blagues...

C'est un phénomène bien connu en intelligence artificielle, et qui porte un nom : ELIZA. Il tire son nom d'un agent conversationnel (dit *chatbot*) développé en 1966 par le Pr Joseph Weizenbaum au MIT. Ce chatbot communiquait à l'écrit avec des patients en psychothérapie, en reprenant ce qu'ils disaient sous forme interrogative. À la phrase : « Enfant, je ne m'entendais pas avec mes frères », ELIZA aurait pu répondre, « Enfant, vous ne vous entendiez pas avec vos frères ? » ELIZA ajoutait aussi régulièrement des phrases comme : « Je vous comprends. » Après quelques échanges, nombre de patients commençaient à avoir l'impression de discuter avec un humain et à ressentir des émotions envers ce psychothérapeute qui décidément les comprenait si bien. On peut trouver cette réaction naïve. Et pourtant, même si vous ne versez aucune larme à la mort de votre micro-ondes (qui contient des algorithmes), vous pourriez bien ressentir une sincère tristesse si votre assistant vocal ne fonctionnait plus.

J'étais moi-même très émue et très empathique lorsque je suivais les premières aventures (et mésaventures) de Curiosity, ce petit robot aux airs de Wall-E qui a commencé à explorer la planète Mars en 2012. Pendant des mois, j'ai suivi chaque jour avec excitation les péripéties de Curiosity sur le site internet de la Nasa, qui mettait à disposition du grand public des

photos et des informations sur ses analyses. Je n'en ai plus le temps aujourd'hui, et le petit robot me manque parfois ; ELIZA est passée par là ! Je me souviens également avoir été attristée en 2015 quand j'ai su que les robots Rosetta et Philae, qui s'étaient posés sur la comète Tchouri pour en analyser le contenu, avaient fini leur mission. Mes pauvres Rosetta et Philae, abandonnés dans l'immensité sombre et silencieuse de l'espace !

On nomme aujourd'hui « effet ELIZA » ce biais naturel qui nous fait ressentir une certaine empathie envers les robots, qui nous donne envie de les punir en cas d'erreur de leur part, ou encore de les défendre si quelqu'un les attaque. La prochaine fois que vous ressentirez une émotion devant un robot ou un humanoïde, pensez à ELIZA. Vous pourrez y penser aussi la prochaine fois que vous entendrez un juriste réclamer des droits pour les robots, ou que vous verrez un reportage sur l'intelligence artificielle truffé d'anthropomorphismes.

J'ai observé une augmentation significative du nombre de débats très souvent mal articulés autour de ces sujets. Les procès faciles du type « c'est la faute aux algorithmes » nourrissent des craintes irrationnelles, ils nous font dépenser une énergie folle à parler sans rien construire, ils nous empêchent de regarder les vraies questions et d'y trouver de vraies réponses. Il faudra pourtant bien s'attaquer aux racines du problème, mais pour cela, il faut accepter de creuser un peu, et d'aller voir de notre côté du miroir.

Le procès des algorithmes : acquittement demandé !

Commençons par l'accusation. Accusé algorithme, levez-vous !

Au premier rang des nombreux procès faits aux algorithmes se trouvent les accusations de discrimination technologique, autrement dit la discrimination de certaines catégories de population par des outils numériques.

C'est un fait : un logiciel, une application ou un simple programme informatique intégré à un objet connecté peuvent se révéler discriminants. L'exemple le plus connu est certainement celui de la scientifique afro-américaine Joy Buolamwini. Alors étudiante au MIT, Joy conduit au Media Lab des recherches qui nécessitent l'utilisation d'un logiciel de reconnaissance faciale. Après quelques tentatives ratées, elle réalise que le logiciel ne reconnaît pas son visage. Elle pense d'abord à une erreur de conception, un bug dans l'algorithme ou dans le code informatique. Elle demande à ses collègues de tester l'outil pour confirmer l'erreur, mais le logiciel reconnaît leurs visages. Au bout d'un moment elle comprend que le logiciel ne fonctionne pas sur elle car sa peau est noire. Elle démontre sa conclusion en portant un masque blanc qui fait identifier instantanément son visage par le logiciel. Ce bug était lourd de conséquences. Il se traduisait en effet par une discrimination raciale qui, si elle était le fait d'un individu (un vigile qui refuserait l'accès, par exemple) serait sévèrement punie par la loi américaine.

« Racisme ! » crie le procureur, qui a le point d'exclamation facile.

Parole à la défense, maintenant. Ou plutôt, place à l'analyse. Dans le cas de Joy Buolamwini, je vois deux causes possibles à la discrimination. Tout d'abord, l'algorithme ne contenait sans doute pas de critères explicites qui considéraient le contraste de couleur propres aux peaux foncées. De plus, les images fournies à l'algorithme lors de son « apprentissage » ne contenaient peut-être que des photos

d'individus blancs. Dans les deux cas, on peut imaginer que le groupe de concepteurs de l'algorithme était uniquement composé de personnes blanches, qui n'ont pas pensé à la couleur de peau quand ils ont développé l'algorithme et le logiciel. Ce ne serait pas étonnant, quand on sait qu'aux États-Unis, en 2016, moins de 8 % des développeurs étaient noirs². Un chiffre qui fait froid dans le dos...

Et il n'y a pas que les discriminations raciales ! Je pense à la première version de l'application de santé d'Apple. *Health* permet d'enregistrer ce qu'on mange, sa température, sa tension, ou encore de calculer son nombre de pas journalier. Mais sa première version ne permettait pas aux femmes d'enregistrer les dates de leurs menstruations. « L'appli de santé "complète" d'Apple oublie les vagins ! » a ironisé le *Daily Dot*. Devant le tollé, Apple a dû formuler des excuses publiques et l'oubli a été prestement corrigé dans une version mise à jour.

Dans ces différents cas de discrimination technologique, c'est l'absence de diversité exemplaire au sein de l'équipe de développement qui a empêché les concepteurs de réfléchir plus largement. Dans le cas d'Apple, les premiers développeurs de *Health* étaient sans doute uniquement des hommes. Je choisis de parler de diversité exemplaire, et non de diversité parfaite, car la recherche de perfection peut être contre-productive. Au contraire, rechercher une diversité exemplaire (qui suffit pour inciter les membres d'une équipe à réfléchir différemment) est un catalyseur pour plus de diversité dans le futur. C'est un cercle vertueux sur lequel on doit capitaliser.

À la lecture de ces premiers exemples, on entend des murmures sur les bancs du tribunal. « On tient le coupable ! »

se dit le public. Si ce n'est pas l'algorithme lui-même, ce sont ses concepteurs !

Si seulement c'était si simple...

En réalité, les « coupables » potentiels sont nombreux : ceux (ou celles) qui ont l'idée de recourir à un outil numérique pour exécuter une tâche, ceux qui conçoivent et développent l'outil, ceux qui en font la promotion, ceux qui le vendent... mais aussi tous les utilisateurs qui nourrissent l'outil de leurs données. Disons-le : nous sommes tous (au moins indirectement) sur la chaîne de création et de propagation d'un biais. À nous, avec notre esprit critique, d'agir à hauteur de nos moyens pour bloquer leur propagation, voire empêcher leur apparition.

Je verserai aussi au dossier de la défense un argument historique. C'est que les discriminations n'ont pas attendu les algorithmes pour exister. Prenez l'exemple des premiers airbags de voitures dans les années 1970 : les premières versions ont été mortelles pour les femmes et les enfants, car leurs morphologies n'avaient pas été prises en compte dans la conception. Les ingénieurs – tous des hommes – avaient considéré comme conducteur « standard » un homme mesurant 1,77 m. La moitié de la population se retrouvait donc « hors-norme » ! Les mêmes biais cognitifs aujourd'hui créent les discriminations technologiques. La principale différence n'est pas dans la nature des discriminations : c'est que celles-ci, cachées dans les équations mathématiques et dans les codes informatiques, sont désormais moins visibles, moins tangibles... et surtout, moins comprises.

Nous ne pouvons pas éliminer nos biais cognitifs d'un coup de baguette magique. Nous discriminons tous... moi la première ! On l'a vu au chapitre précédent, quand, à mon tour,

j'ai fait l'erreur de ne penser qu'à l'individu occidental en collectant des données géométriques de crânes humains. Je peux y ajouter un autre exemple, auquel je repense souvent. Je n'y ai pas le beau rôle, mais ainsi va la science : il faut savoir regarder la réalité avec le plus d'objectivité possible, et cette honnêteté commence par soi-même...

Le livreur de pizzas du MIT

Nous sommes en janvier 2014, au MIT. Depuis quelques années déjà, le département de l'énergie des États-Unis répartit les budgets historiquement alloués à la recherche nucléaire, à des projets nécessitant des supercalculateurs numériques. Ce sont des financements de recherche conséquents, sur plusieurs années, pour permettre aux équipes de recherche de tester leurs algorithmes et leurs modèles en réalisant les calculs numériques les plus gros de leurs carrières, sur les calculateurs les plus puissants du pays. Avec Raúl et notre équipe, nous avons décidé de soumettre une proposition de recherche pour le calcul de propagation de fissures jusqu'à rupture de structures ou de matériaux, de l'échelle atomistique à l'échelle métrique. Pour ce faire, nous devons collaborer avec plusieurs équipes du MIT.

Nous organisons une première rencontre entre les équipes de recherches, afin de mieux nous connaître et d'établir notre plan de bataille. La réunion se déroule à l'heure du déjeuner. Arrivée avec quelques minutes de retard, j'entre discrètement dans la salle, où une vingtaine de chercheurs discutent en dégustant, dans une assiette en carton, les pizzas livrées pour l'occasion. Je m'installe à la table de réunion et commence à parler avec le Pr Markus Buehler, grand spécialiste du calcul numérique atomistique. Une dizaine de minutes passent, Raúl préfère attendre que tout le monde soit présent pour

commencer la réunion. En attendant, nous continuons à discuter en dégustant nos pizzas caoutchouteuses arrosées de soda chimique au format XXL. Une personne frappe à la porte. C'est un homme plutôt petit, de type mexicain. Il porte un jean, des baskets et un sweater à capuche. Il a l'air timide et nous salue d'un rapide signe de la main. Je le regarde, et instantanément je pense qu'il s'agit du livreur de pizzas, à qui nous aurions oublié de signer la facture...

Mais l'homme avance, les gens le saluent, et Raúl s'exclame : « Le voilà, le grand professeur du département de sciences informatiques du MIT ! »

La honte et la peur me prennent aussitôt le ventre. J'ai des fourmis dans tout le corps. Mon visage doit être rouge d'embarras – si quelqu'un le remarque, me dis-je, je pourrai toujours invoquer une intolérance au piment de la pizza hawaïenne... Une pensée tourne en boucle dans mon esprit : heureusement que je n'ai rien dit ! Mais je sais que j'aurais pu. Vous m'imaginez, lançant à la cantonade : « *Hola señor, cómo está?* Avons-nous oublié de signer la facture ? »

Moi, Aurélie, une femme qui navigue depuis des années dans un milieu d'hommes, qui ne tolère aucune forme de discrimination, qui porte un discours engagé contre les stéréotypes – je me découvre soudain capable d'avoir et d'exprimer des jugements hâtifs, des préjugés sur les populations hispaniques de mon pays d'adoption. Aujourd'hui encore, j'en parle avec honte. J'essaie aussi d'en rire pour démystifier le sujet de la discrimination. J'ai des biais cognitifs, comme tout le monde, et je suis responsable des actes qui en découlent.

Certains me disent parfois que ma réaction relève moins du biais cognitif que de statistiques évidentes sur les vendeurs de

pizzas de la côte Est des États-Unis. Je ne serais donc pas responsable. C'est tentant ! Mais je dois les contredire. Certes, les statistiques sont là. Mais les courbes gaussiennes ont toujours des queues ! Voudrait-on les éliminer ? Et au nom de quoi ? La question mérite qu'on s'y arrête quelques instants, parce qu'une grande partie des questions éthiques liées aux algorithmes se joue là.

Biais *versus* statistiques : quand les algorithmes renforcent les inégalités existantes

Nos biais peuvent avoir de multiples origines : notre milieu social, notre éducation, nos expériences... et les statistiques, justement, ou plutôt la perception que nous en avons. Mais reconnaître les biais et identifier leur origine ne signifie pas qu'on doive les accepter. On peut comprendre un phénomène sans pour autant le justifier.

Comprendre est une première étape importante, car elle permet d'éviter que de telles situations se présentent de nouveau. Dans mon cas, je me souviens toujours de cette scène du livreur de pizzas quand la situation m'y invite. Dans les allées du très chic Whole Foods Market à New York, par exemple, si je souhaite poser une question à un employé, je regarde autour de moi en écartant l'idée que la personne de couleur à côté de moi travaille forcément ici. Dans mes différents laboratoires de recherche, j'ai souvent été prise par des visiteurs pour la secrétaire de l'équipe. Je me souviens d'une fois particulière au MIT. Alors que j'entre dans une salle de réunion, un professeur d'une université étrangère invité par Raúl se tourne vers moi et me dit : « Si je pouvais avoir un café, ce serait parfait » ; je m'assois, lui souris et lui réponds : « J'en prendrais bien un aussi ! » Raúl a enchaîné

immédiatement : « Laissez-moi vous présenter Dr. Jean, une chercheuse de mon équipe. » Je n'en veux pas à ce professeur. Je peux le comprendre, tant les statistiques jouent contre moi. En Europe et aux États-Unis, parmi les scientifiques en numérique avec plus de dix ans de carrière, nous sommes entre 3 et 5 % de femmes... Néanmoins, après ma remarque humoristique et la confirmation de Raúl, j'espère bien qu'il se souviendra de moi la prochaine fois qu'il verra une femme dans une équipe de recherche en sciences numériques.

Ce sont ici des cas individuels, des mésaventures que nous avons tous vécues un jour. Mais cette histoire de statistique peut avoir des conséquences autrement plus importantes si nous n'y prenons pas garde. Dans les assurances, par exemple. Aux États-Unis, certains assureurs font désormais tourner des algorithmes pour estimer le coût de votre assurance voiture. Et que constate-t-on ? Que ces algorithmes proposent bien souvent un tarif plus élevé pour les assurés de couleur que pour les assurés blancs. J'imagine que ces algorithmes ont été entraînés sur des données statistiquement représentatives, dans lesquelles les voitures de conducteurs noirs coûtent plus cher aux assurances – et ce pour des raisons évidentes, et sans rapport direct avec la couleur de peau : les Noirs ont en moyenne des revenus inférieurs aux Blancs, et conduisent donc des voitures plus anciennes qui tombent plus facilement en panne. Une tendance existe, certes. Est-ce une raison pour en faire une condition systématique pour une personne de couleur qui viendrait commander une assurance voiture ? Je ne pense pas. Et pourtant, à chaque fois que je donne cet exemple, comme pour l'histoire des pizzas du MIT, des personnes m'interpellent pour me dire qu'il ne s'agit pas d'un biais mais d'une tendance statistique. Non ! C'est un biais dans la mesure où on transforme une observation générale

(peut-être biaisée) en une condition algorithmique systématique. J'aimerais que cela soit bien compris : si nous basons aveuglément les outils algorithmiques sur l'observation des phénomènes passés, le monde ne changera jamais. Tout assureur devrait comprendre les outils qu'il utilise afin d'en éviter une utilisation abusive et biaisée – et cela vaut pour tous les secteurs de l'économie.

Il y aura toujours des biais

C'est établi : nous autres humains sommes donc les seuls coupables. Plus exactement : ce sont nos biais cognitifs qui nous entraînent vers l'erreur, voire le délit. Face à cette problématique, une solution semble évidente : effacer nos biais et uniformiser nos perceptions. Ainsi œuvrerions-nous pour le plus grand bien de l'humanité, et pour toujours ! Cette solution est impossible, et effrayante. Impossible, car cela supposerait que nous sommes dans la capacité d'identifier tous les biais d'un individu. L'objectivité absolue n'existe pas ! Et s'il fallait encore en convaincre certains, je vous propose une analogie avec le code informatique. Dans des codes longs, complexes et anciens, il y a des bugs... et c'est normal. Ces bugs sont pour la plupart silencieux, ils ne s'expriment que lorsqu'une situation nouvelle se présente, qui n'avait jamais été considérée ou mise en évidence auparavant. Ils peuvent provenir d'une erreur dans l'écriture du code ou dans la conception de l'algorithme. Dans tous les cas, ils sont bien cachés, et croire qu'un code est vierge de toute anomalie est une grave erreur. J'ajoute que notre cerveau est construit pour catégoriser – donc développer des biais. À vouloir à tout prix lutter contre les biais, on combattrait donc un automatisme naturel chez l'Homme, quitte à créer une frustration, voire des névroses, au nom d'une pureté intellectuelle et émotionnelle.

Cela semble étrange et dérangeant. L'idée d'éradiquer nos biais est également effrayante, car elle imposerait une société uniformisée, prédictible et sans surprise, qui tomberait dans un ennui meurtrier. Comme je le disais, éliminer nos biais cognitifs, c'est éliminer nos singularités, les différences qui font que nous nous comprenons mieux les uns les autres. Bien sûr, certains préjugés collectifs doivent tomber, car ils nous empêchent d'avancer et de faire progresser notre civilisation. C'est le cas de préjugés sur les prétendues difficultés des filles en mathématiques, ou encore la stigmatisation de groupes de jeunes bruyants dans la rue qui serait nécessairement signe d'insécurité. Mais, là encore, on est en droit de se poser la question suivante : suis-je un monstre d'avoir pensé qu'un professeur de type mexicain habillé à la cool était le vendeur de pizzas ? Je ne pense pas. Tout est dans la mesure, dans la conscience que nous avons de nos réactions et des leçons que nous retenons de nos expériences. On ne peut pas punir un individu pour avoir des biais cognitifs, mais on peut le poursuivre pour discrimination s'il agit en nuisant à quelqu'un, et cette différence est importante. Nous pouvons conserver la plupart de nos biais cognitifs ; le vrai défi consiste à éviter qu'ils ne se convertissent en biais algorithmiques, qui peuvent mener à des discriminations technologiques – et donc à une discrimination sociale ou raciale.

Aujourd'hui plus qu'hier, nous devons rester prudents sur nos usages des outils numériques, et rester ouverts pour détecter le moindre biais. Et c'est encore plus vrai dans le cadre des techniques d'apprentissage en intelligence artificielle, qui font développer dans leurs réseaux neuronaux des critères implicites biaisés et difficilement identifiables. Les techniques d'apprentissage sont un amplificateur des

conséquences des biais algorithmiques. En voici une explication.

L'apprentissage, un amplificateur des conséquences des biais algorithmiques

Jusqu'à présent, nous avons surtout présenté les biais introduits dans les critères explicites des algorithmes. Dans ce cas, il est relativement simple de caractériser les causes de ces biais : il s'agit d'identifier les paramètres ou les hypothèses discriminantes et de réparer le biais en modifiant l'algorithme lui-même, ou les données sur lesquelles il est calibré.

Mais qu'en est-il des biais introduits dans des critères implicites de l'algorithme, dans les cas où l'algorithme apprend sur des données d'apprentissage potentiellement biaisées ? La plupart du temps, ils ne sont révélés que lorsque des utilisateurs mettent en évidence des discriminations dont ils sont (ou pensent être) victimes. On peut alors commencer à en chercher la cause. Avant d'aller plus loin, néanmoins, peut-être faut-il nous arrêter un peu sur la façon dont sont conçus ces algorithmes. Nous avons donné un peu plus haut l'exemple d'un algorithme de reconnaissance d'images. Nous avons vu qu'après que des premiers critères explicites ont été introduits dans l'algorithme, ce dernier est « entraîné » sur un échantillon de données, le plus fourni possible, jusqu'à ce qu'il atteigne un niveau satisfaisant. Mais que se passe-t-il à *l'intérieur* de l'algorithme au cours de cet apprentissage ? À chaque réponse erronée à la question posée (« Y a-t-il un chien sur cette image ? »), les concepteurs signalent l'erreur à l'algorithme, lequel va progressivement développer ses propres critères (implicites) de catégorisation, donc de reconnaissance. Cet ensemble de critères dessine ce qu'on nomme un « réseau

neuronal », avec des configurations de données d'entrée qui mènent à différentes réponses.

Ces réseaux neuronaux peuvent devenir très volumineux, et si complexes qu'il est difficile de les analyser afin de caractériser *a posteriori* les critères implicites de l'algorithme entraîné. Le mathématicien Stéphane Mallat l'explique très bien dans sa conférence inaugurale au Collège de France³.

La complexité des réseaux neuronaux augmente encore dans le cas de l'apprentissage profond, le fameux *deep learning*, avec des invariants si solidement installés dans le réseau que toute rééducation de l'algorithme devient quasiment impossible. C'est ce qui s'est passé en 2015 avec l'algorithme de labellisation d'images de Google. Cet algorithme avait été entraîné sur une très grande quantité de données afin d'identifier des individus, des animaux ou des objets sur une image. À la suite d'une plainte d'un utilisateur, Google a réalisé que son algorithme pouvait, dans certains cas, assimiler les personnes de couleur noire à des singes. L'algorithme, qui avait été entraîné pendant très longtemps, avait développé un réseau neuronal extrêmement complexe qui empêchait toute rééducation. Google a donc décidé de désactiver cet algorithme.

Cet exemple témoigne des limites actuelles de l'intelligence artificielle, face à notre intelligence humaine. Depuis les premières calculatrices électroniques jusqu'aux exceptionnels AlphaGo (le programme développé par Google qui a réussi, en 2015, à battre un joueur professionnel au jeu de go) et Pluribus (une IA de Facebook qui a récemment battu cinq grands joueurs mondiaux au poker), les machines n'ont cessé, au cours des dernières décennies, de prouver qu'elles étaient infiniment plus efficaces que les humains pour des calculs complexes. En revanche, nous avons cette intelligence

de situation que les algorithmes n'ont pas. Un exemple ? Prenons le cas d'un algorithme à qui on a appris à identifier une voiture sur une image. Pour ce faire, on aura fourni à l'algorithme des images de berlines de formes variées, et dans les couleurs les plus fréquentes (bleu, noire, gris, rouge). De son entraînement, l'algorithme aura ressorti des invariants liés à la présence de quatre roues, d'un capot, de phares... Et pourtant, ce même algorithme risque de ne pas reconnaître de voiture si on lui présente l'image d'une décapotable jaune fluo avec des roues brillantes et des petits drapeaux roses tout le long de la carrosserie. L'humain est différent – et, en cela, plus intelligent. Un enfant qui a grandi à Paris au milieu de berlines de couleur souvent terne identifiera plus tard sans problème comme « voiture » une décapotable aux roues strassées à Miami. Cet exemple est sans doute un peu tiré par les cheveux, mais il illustre bien la différence entre humains et algorithmes. Depuis notre enfance et tout au long de notre vie, nous développons naturellement des sortes d'algorithmes cérébraux qui nous permettent de naviguer dans le monde avec une certaine intelligence. Lorsque se présente une situation soudaine et inconnue, notre intelligence de situation établit des analogies entre ces algorithmes cérébraux et ce que nous vivons – ce qui enrichit à nouveau nos algorithmes. Voilà comment nous apprenons de nos expériences.

Nous, humains, avons encore une bonne longueur d'avance sur la machine pour de nombreuses tâches. Il est difficile de développer un algorithme qui ne se trompe jamais. Le cas de l'algorithme de Google (qui était peut-être très efficace par ailleurs) est en ce sens emblématique : il existe des algorithmes qui fonctionnent dans 95 % des cas... mais si les 5 % restants peuvent avoir de graves conséquences, alors il faut s'interroger.

Alors que je m'apprête à terminer ce chapitre, des articles d'une incroyable férocité accusent Amazon et son algorithme de recrutement de sexisme et de discrimination envers les femmes. Nous sommes en octobre 2018 et Amazon vient d'interrompre soudainement des tests réalisés par un de ses algorithmes, destiné à sélectionner les CV de candidats les profils à recruter en priorité au sein de son entreprise. Que s'est-il passé ? C'est très simple. Amazon a fait l'erreur d'entraîner son algorithme sur les embauches des dix dernières années... lesquelles, il faut bien le dire, étaient essentiellement masculines. Les conséquences sont sans appel : l'algorithme a développé un biais qui lui fait sous-estimer la valeur d'un profil féminin.

Devant ces résultats, Amazon a mis fin au test. Mais pour nos journalistes, le mal était fait. Levée de boucliers ! Les éditorialistes s'en donnent à cœur joie, oubliant volontiers qu'il ne s'agissait que d'un test, et publient des tweets au vitriol et des papiers enflammés contre ce géant méchant et cruel. L'animosité des articles et des discussions de comptoir contribue à l'appauvrissement des débats sur les algorithmes de décision. Je suis agacée, énervée de voir qu'on ne laisse aucun espace à l'entreprise incriminée pour s'expliquer, et faire profiter à l'ensemble de la société de ses erreurs.

Pour lutter contre cette anti-algorithmie primaire, je décide de proposer au *Point* un article dont le titre va à contre-courant des idées reçues sur cette affaire : « Pourquoi il faut défendre Amazon et son algorithme de recrutement⁴ » Je prends le risque de me faire clouer au pilori comme Amazon, mais peu importe : il me semble important de faire entendre une voix plus raisonnable et plus scientifique pour qu'au moins ce débat serve à quelque chose. Sébastien Le Fol, le directeur de la rédaction, est enthousiaste. Le papier sort quelques jours après.

Les retours, dans l'écrasante majorité, sont positifs. Qui mieux qu'une femme, qui plus est féministe, pour défendre un « bandit » technologique accusé de sexisme ! Avec cet article, j'ai voulu montrer que, si nous nous attaquons aussi violemment et sans dialogue à ces acteurs puissants, nous risquons d'entrer dans une politique du « pas vu, pas pris » qui risque surtout de les déresponsabiliser, en les décourageant de publier des résultats de recherche, profitant de l'immatérialité des algorithmes pour cacher plus facilement le cadavre sous le tapis. Amazon et les GAFAM ne peuvent pas travailler de façon transparente au milieu des réactions haineuses de citoyens, journalistes et politiques néophytes. Mon but n'était surtout pas de faire d'Amazon une victime. Mais je tenais à pointer du doigt tous ces accusateurs qui crient avant même de chercher à comprendre et qui, fourche à la main, n'attendent que le bruit de la lame qui tombe, et la tête d'Amazon tombant dans le panier.

L'erreur est humaine et l'humain est le seul coupable. Mais les entreprises et les chercheurs qui conçoivent des algorithmes corrigeront d'autant mieux ces erreurs qu'ils trouveront des interlocuteurs qui, au-delà des discours, acceptent de s'intéresser aux mécanismes technologiques des algorithmes. Heureusement, il existe des solutions à explorer pour éviter de verser dans un totalitarisme anti-algorithmique.

Que les scientifiques redeviennent philosophes... et que les philosophes s'intéressent à la science !

Ce n'est qu'à l'automne 2010, après deux années de recherche postdoctorale, poursuivie par les biais et de nombreuses questions sans réponses, que j'ai suivi à 28 ans mon premier cours d'éthique. Un peu tard ? Sans doute. Mais

mieux vaut tard que jamais ! Après tout, j'ai surfé sur Internet pour la première fois à 18 ans – je suis une tardive, c'est évident. À cette époque, je travaillais toujours dans le laboratoire de médecine régénérative de Penn State. C'est George qui avait insisté pour que je m'inscrive à ce cours d'éthique, afin de faciliter mes échanges avec les médecins qui manipulaient des cellules et des organes, ou étaient en contact avec des animaux de laboratoire, mais aussi pour mieux juger de la déontologie des articles scientifiques que je lisais et dont je tirais à la fois mes données et mes raisonnements. Ce cours durait un semestre, à raison d'une heure par semaine. Il réunissait des étudiants et des chercheurs en médecine ou en biologie, et d'autres chercheurs qui, comme moi, travaillaient en étroite relation avec le milieu médical, sans être médecins eux-mêmes. J'en ai retiré quelques enseignements majeurs, dont certains m'aident encore aujourd'hui.

Sur un plan pratique, j'ai appris les règles et les procédures de tests sur des animaux, aux États-Unis mais aussi en Europe et en Asie. Cela a eu un impact direct sur ma recherche sur les traumatismes crâniens, deux ans plus tard : j'ai en effet volontairement refusé d'utiliser des résultats, pourtant publiés dans une revue asiatique, de tests effectués sur des singes en Asie, car ce type de test est interdit sur le territoire américain. J'aurais été dans la légalité si j'avais utilisé ces résultats pour ma recherche, mais j'ai préféré m'abstenir pour des raisons éthiques.

Ce cours d'éthique m'a également appris à questionner mes motivations dans mon travail. Quand on travaille sur un sujet de recherche ou de développement, il est difficile d'en garantir les bénéfices pour une large majorité. On peut les présumer, s'en persuader et persuader les autres chercheurs ainsi que les agences de financement, mais cela reste difficile à garantir

entièrement. En revanche, m'enseignait ce cours d'éthique, je dois pouvoir certifier systématiquement que mon projet ne causera pas de mal, même à une minorité d'individus. Cette position est davantage tenable pour un chercheur. Voilà pourquoi je regarde avec méfiance (même si je soutiens la démarche) le mouvement Tech For Good qui inonde les médias et les missions des institutions publiques et privées en Europe et aux États-Unis. Quand on est innovant et en avance sur son temps, on se concentre volontiers sur les bénéfices que telle innovation peut apporter à tout ou partie de la population. Mais, ce faisant, on écarte l'opportunité d'une réflexion profonde sur le risque de faire du mal à certaines catégories de personnes.

L'éthique manque cruellement dans les formations des scientifiques, des mathématiciens, mécaniciens, chimistes ou encore informaticiens. Pour aller encore plus loin, je dirai qu'il est urgent que les scientifiques (re)deviennent des philosophes ! Jusqu'à la moitié du xx^e siècle, chaque scientifique était aussi philosophe. Pour n'en citer que quelques-uns : Euclide, Dirac, Galilée, Copernic, Pascal, Descartes, Canguilhem, Feynman... Certains sont même connus aujourd'hui pour leurs travaux en philosophie et inconnus pour leurs contributions à la mécanique, aux mathématiques ou à la physique. C'est le cas de René Descartes, connu de tous pour son *Discours de la méthode*, mais moins pour sa géométrie cartésienne. Ou encore Blaise Pascal, dont on connaît les *Pensées*, mais dont on oublie souvent qu'il fut, avec sa calculatrice mécanique (la pascaline) l'un des précurseurs des machines à calculer.

J'ajouterai que l'inverse est tout aussi valable : il est temps que les philosophes redeviennent scientifiques. Aujourd'hui, pour caricaturer (mais à peine), les philosophes réfléchissent

sur un monde qui leur échappe, alors que les scientifiques construisent un monde sur lequel ils ne réfléchissent pas. Je ne suis pas meilleure qu'une autre, mais j'ai conscience de mes limites et je n'hésite pas à sortir de mon monde en discutant avec des sociologues et des anthropologues. J'essaie même d'enseigner ma discipline aux philosophes... et Gaspard Koenig a été pour moi un parfait cobaye.

Je suis persuadée que les cours d'éthique devraient être généralisés à tous les cursus scientifiques. Pour aller plus loin, je pense intéressant de suivre, même à raison de deux heures toutes les deux semaines, un cours de philosophie en doctorat de sciences. L'idée n'est évidemment pas de fournir à l'avance aux scientifiques des réponses à toutes les situations auxquelles ils pourront être confrontés, mais de nourrir leur esprit critique. À l'inverse, nous devons aussi envisager des cours de sciences dures dans les cursus de sciences humaines. Les sociologues et les philosophes sont les premiers à devoir sortir du flou artistique qui entoure l'intelligence artificielle et les algorithmes – et ce, pour une raison toute simple : ce sont eux que les scientifiques et experts en IA iront voir en premier pour réfléchir et avancer dans leurs réflexions. Ils doivent donc se préparer.

Régulations, autorégulations... et autres solutions

Lutter contre les biais algorithmiques et les discriminations technologiques peut passer par la loi. À condition, bien sûr, que ces lois soient bien faites, sans « vides technologiques » (à l'image des vides juridiques), et avec pragmatisme : en effet, en se projetant maladroitement dans des situations qui n'arriveront peut-être pas, la loi risque de freiner l'innovation – ou de se révéler tout simplement inutile.

En matière de technologies, la régulation par l'État est toujours délicate. Car les lois, quoique nécessaires, agissent souvent *a posteriori*, c'est-à-dire une fois que l'erreur est commise. Même si la loi vise à encadrer les comportements des personnes morales ou physiques, elle agit bien souvent comme une approche punitive et non préventive. En outre, la loi est par nature conservatrice, puisqu'elle suit les pratiques sociales : on écrit des lois pour réguler des pratiques déjà à l'œuvre dont on a caractérisé des dangers pour l'individu et/ou la collectivité. Pour agir *a priori*, il me semble aussi intéressant d'explorer les chartes et autres serments. Ils peuvent devenir des déclencheurs de conscience individuelle, d'une part, pour aider les acteurs de l'IA à travailler dans un cadre éthique et, d'autre part, pour préfigurer des lois à venir. C'est dans cette idée qu'en juin 2018 Grégory Renard (spécialiste des plateformes conversationnelles et fondateur de xBrain en Californie) et moi-même avons publié, sur le modèle du serment d'Hippocrate, l'un des premiers codes éthiques d'IA : le serment Holberton-Turing⁵. Ce serment s'articule autour de grands principes, parmi lesquels le respect des données des individus, la transmission du savoir (à nos pairs mais aussi au grand public), ou encore sur la promotion de l'éthique et le respect de l'humain. D'autres initiatives similaires ont vu le jour, telles que la charte d'éthique de Montréal, présentée en décembre 2018. Ces textes sont écrits pour faire réfléchir chaque expert en intelligence artificielle sur des questions éthiques et sur les responsabilités individuelles et collectives.

Une autre solution porte sur la formation et la culture de nos dirigeants politiques. Nos dirigeants ont traditionnellement des formations en lettres, en sciences politiques ou en économie. Très peu ont des formations scientifiques. Même

leurs conseillers en sciences et en technologies ont souvent des formations commerciales ou de gestion. Ce n'est pas une généralité, mais une tendance fortement ancrée depuis des décennies. Il devient critique d'intégrer des talents techniques et scientifiques en IA au sein des entités dirigeantes politiques de notre pays ! On me dira qu'il y a bien Cédric Villani, mais Cédric ne peut pas encore se cloner. Il existe de nombreux talents non médaillés qui ont des idées concrètes, des cerveaux bien faits et des convictions communes. Utilisons leurs compétences ! C'est par un mariage harmonieux entre scientifiques et politiques que l'on créera des textes de loi sans vides technologiques. Je rêve d'une Megan Smith dans un rôle du CTO⁶ de l'État français. Megan Smith a été CTO des États-Unis sous l'administration du président Barack Obama. Elle a eu une formation scientifique au MIT et a travaillé pour les plus grosses boîtes technologiques, telles qu'Apple ou encore Google.

Sur un plan purement technique, je crois beaucoup à l'utilisation d'agents algorithmiques pour évaluer le comportement possiblement biaisé d'un algorithme en cours d'apprentissage – une sorte de « police des algorithmes » qui serait elle aussi algorithmique. Je m'explique. Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, il est plus difficile de définir les critères implicites d'un algorithme issu d'un apprentissage supervisé que de souligner les critères explicites qui, par définition, ont été explicitement définis par des humains. Mais on peut imaginer des agents algorithmiques (que je nomme *algorithm watchers*, en anglais) qui analyseraient le comportement en temps réel d'un algorithme d'usage en train d'apprendre. L'idée est que ces agents algorithmiques analysent tout d'abord la représentativité des données d'apprentissage. Pour ce faire, l'agent algorithmique fournit à

une copie miroir de l'algorithme d'usage des échantillons de tailles différentes des données d'apprentissage. La réponse moyennée par échantillon ne doit pas fondamentalement changer à partir d'une certaine taille et d'une certaine représentativité. De plus, l'agent algorithmique peut fournir à la copie miroir de l'échantillon d'usage des données dites synthétiques, qu'il aura créées en modifiant les données d'apprentissage d'origine. Autant de moyens qui permettent à ces agents algorithmiques d'analyser le comportement d'un algorithme d'usage et d'alerter l'humain d'un risque de biais. Précisons que ces agents algorithmiques sont définis de manière entièrement explicite et ne prennent aucune décision à part alerter l'humain d'un risque de biais possible. Voilà pourquoi j'aime leur donner le nom d'« anges gardiens algorithmiques⁷ ». Ce nom a fait réagir quelques lecteurs qui y voyaient une aberration, « une idiotie supplémentaire dans l'intelligence artificielle ». Quelle désolation ! J'avais pourtant pris soin d'alerter le lecteur sur cette « licence anthropomorphique »... On peut étudier sans lui retirer sa poésie, mais certains semblent ne pas le savoir.

Toujours au rang des solutions techniques, je souhaiterais terminer ce chapitre en mentionnant une approche que Grégory Renard a développée avec son entreprise xBrain, et qui a déjà porté ses fruits. Grégory a monté il y a quelques années une équipe qui fonctionne en parallèle de son équipe de développement, et dont le but est de démontrer que l'équipe de développement a tort. Cela peut paraître étrange... Je pense au contraire que c'est plutôt malin. Comment mieux avancer et être plus innovant qu'en essayant systématiquement de démonter son propre travail ? Cela permet également de conserver un recul et un œil critique sur la qualité de celui-ci, ainsi que sur la mesure éthique de ses développements. Les

résultats de xBrain sont impressionnants, ils accélèrent l'innovation même s'ils créent parfois des tensions au sein même de l'équipe de développement. Comme on dit aux États-Unis : « *There is no free lunch !* »

1. Je pourrais aussi bien réécrire cet article aujourd'hui, en prenant l'exemple des trottinettes sur nos trottoirs. Quel déferlement de haine en quelques mois contre ces pauvres planches à deux roues algorithmisées ! Je ne dis pas qu'il faut aimer les trottinettes. Je ne dis pas que leur présence anarchique sur les trottoirs n'est pas un problème. Je dis simplement que ces pauvres trottinettes n'y sont absolument pour rien. La responsabilité du problème incombe aux utilisateurs indéclicats (et ils sont nombreux), aux entreprises qui n'ont pas anticipé l'impact négatif de leur service (ou qui préfèrent l'ignorer), à la Ville enfin qui donne les autorisations et fixe les règles de trafic.

2. Source : Brookings Analytics, 2016.

3. <https://www.college-de-france.fr/site/stephane-mallat/inaugural-lecture-2018-01-11-18h00.htm>

4. https://www.lepoint.fr/high-tech-internet/aurelie-jean-pourquoi-il-faut-defendre-amazon-et-son-algorithme-de-recrutement-26-10-2018-2266303_47.php

5. <https://www.holbertonturingoath.org/accueil>

6. *Chief technical officer*, qu'on peut traduire par « directeur ou directrice de la technologie », qui pilote la partie technique de l'innovation et diffuse dans une entreprise (ou une administration) la culture de l'informatique « analytique » et de l'IA.

7. « Les anges gardiens algorithmiques. Quand les mathématiques nous veulent du bien », *Les Échos*, 12 octobre 2018.

Où est donc la réalité ?

Algorithmes, biais, data, code, critères, hypothèses... Tous ces mots ne devraient à présent plus nous échapper. En tout cas, ils ne doivent pas nous faire peur, ou nous impressionner. Au contraire ! Ils sont notre clé pour garder toujours à l'esprit la distinction entre monde virtuel numérisé et monde réel organique. Pour reprendre la métaphore d'*Alice au pays des merveilles*, le miroir incarne la séparation de ces deux mondes, virtuel et réel. Comprendre comment est faite cette frontière, et comment on passe d'un monde à l'autre : voilà qui devrait faire partie d'une culture générale du XXI^e siècle. Cela permettrait d'éviter amalgames, discours catastrophistes et autres promesses mensongères.

Malheureusement, nous sommes loin d'un début de culture collective sur ce sujet. Ce miroir mal défini crée la confusion et concentre tous les préjugés sur l'intelligence artificielle en général, et l'algorithmique en particulier. Des droits pour les robots, l'union entre un robot et son propriétaire, cette tentation de punir les robots et les algorithmes qui les habitent : autant de situations farfelues, de l'ordre du fait divers, qui entretiennent le flou autour de la frontière entre réel et virtuel. Et quand on les évoque, c'est le plus souvent maladroitement – et d'une manière qui laisse entendre qu'elles relèvent du réel, de l'existant, du présent. Attention à ne pas

nous laisser piéger en nous retrouvant à penser le futur sur de fausses bases !

Aujourd'hui, certains prétendent que la *singularité technologique* ne serait qu'à une génération de notre humanité. D'autres avancent que dans un futur proche, les robots sexuels deviendront nos partenaires sentimentaux privilégiés. Une poignée, enfin, affirment que les robots ont déjà conscience d'exister. Que de mensonges ! Que de confusion !

Gare aux gourous du virtuel

Le cas de l'attribution d'une personnalité juridique pour les robots est un exemple de cette confusion. Une personnalité juridique est une personne morale (entreprise, pays, association...) ou physique (individu) qui possède des droits et des devoirs. Une minorité de juristes dans le monde défend l'idée de créer une personnalité juridique spécifique pour les robots, et donc pour les algorithmes. Certains pays l'ont même déjà fait. C'est le cas de l'Arabie Saoudite, qui a donné des droits au robot Sofia en lui accordant la citoyenneté. Quel honteux paradoxe que de voir que ce robot jouit de plus de droits qu'une femme ou un travailleur étranger dans ce pays ! Un autre exemple concerne la Chine, où un ingénieur nommé Zheng Jiajia a pu se marier avec le robot-femme qu'il avait lui-même conçu. L'image d'une femme silencieuse, docile, toujours sophistiquée et jamais en contradiction avec son mari serait-elle celle de la femme parfaite pour les Chinois ? Je ne saurais le dire, mais une chose est certaine : cette histoire, largement médiatisée, pourrait encourager d'autres individus et États à faire pareil et à conférer une existence sociale aux robots et aux algorithmes.

Cela étant dit, des questions juridiques se posent bel et bien. Il me semble ainsi nécessaire de réfléchir à des lois pour

empêcher les robots de se faire maltraiter... Mais il ne s'agit pas ici de protéger de pauvres humanoïdes sans défense : il s'agit de penser aux humains qui seraient témoins de scènes ayant une apparence de maltraitance et qui en seraient affectés. On en revient toujours à l'effet ELIZA : nous autres humains, doués d'empathie, pourrions souffrir psychologiquement, voire développer des traumatismes, à la vue d'un robot menacé ou battu. D'une manière générale, telle devrait être notre ligne de conduite dans tout ce qui a trait aux algorithmes/robots : protéger l'humain, et non le robot ! Un robot ne peut avoir de responsabilités, et pour une raison simple : il n'a aucun libre arbitre et aucune conscience de son existence. Bien sûr, il se trouvera toujours des faux prophètes pour affirmer le contraire et se faire les hérauts des humanoïdes sur les plateaux de télévision et les estrades des colloques : c'est que l'idée fascine et qu'il y aura toujours un public pour écouter ces histoires. On peut croiser ici ou là un avocat médiatique qui, depuis de nombreuses années déjà, se pose en grand défenseur des robots¹. Il surfe sur l'idée d'une « intelligence artificielle forte », où les robots auraient une conscience. Voilà bien une idée absurde, et contre-productive !

La réalité est à la fois plus simple et plus complexe. Mais précisons d'abord les définitions. L'intelligence artificielle dite « faible » désigne les techniques d'automatisation des tâches, de modélisation des phénomènes et de prédictions réalisées à partir de ces modèles. L'IA « forte » serait celle où la machine ne se contenterait plus de fonctionner mais prendrait conscience d'elle-même – c'est ce que suit ce qu'on appelle la « singularité technologique ». Dit autrement : l'IA faible est celle que l'on trouve déjà aujourd'hui dans la médecine, la finance, le marketing et quantité d'autres disciplines. La forte, celle que l'on voit dans les films de science-fiction...

Disons-le ici : l'IA forte n'existe pas encore, et elle n'existera sûrement jamais. C'est pourtant en visant ce « point de singularité » que nous autres scientifiques pouvons avancer à pas de géants dans notre compréhension du monde et réaliser de vrais bonds technologiques. Même si je suis consciente qu'un robot ne pourra jamais ressentir une émotion, viser ce point de singularité aide les scientifiques à avancer dans la recherche pour simuler au mieux une émotion.

La recherche sur le développement d'une IA forte nous invite également à réfléchir sur notre place dans l'ordre du monde, sur la notion même d'intelligence et ce qui nous différencie d'une puce en silicium. Murray Shanahan, professeur en robotique cognitive à l'Imperial College de Londres, décrit très bien la faible probabilité d'existence du point de singularité technologique dans son livre *The Technological Singularity*, mais il parle également d'opportunité intellectuelle.

Un autre intellectuel, qui ne vient pas du domaine de l'IA, a démontré par la pensée l'impossibilité d'une IA forte. Il s'agit du philosophe et linguiste John Searle, avec l'expérience dite de la « chambre chinoise ». Vers 1980, Searle s'imagine dans une chambre entouré uniquement de livres contenant des questions et leurs réponses écrites en chinois. Après des années d'apprentissage, dit-il, il serait peut-être capable de fournir la réponse à toutes les questions. Il analyse cette expérience en affirmant qu'il n'a pas appris la langue chinoise, mais qu'il simule la connaissance en apprenant par cœur des centaines de questions et leurs réponses. Il conclut en écrivant que, selon lui, l'IA forte ne peut exister, car l'intelligence des ordinateurs ne fera que simuler la connaissance sans la maîtriser. Aujourd'hui, le robot Pepper qui baisserait la tête de tristesse quand on lui crie dessus n'est pas un robot

malheureux, c'est un ensemble algorithmique qui répond à une action (vous levez le ton car vous êtes en colère) par une réaction mécanique (la tête du robot effectue un mouvement vers le bas). Aujourd'hui plus que jamais, les apparences sont trompeuses.

Sans aller jusqu'à la singularité, on trouve aussi des individus qui, sans mauvaise intention (du moins, je l'espère) et sans expertise en IA ou en algorithmique, se posent en « influenceurs » et multiplient les approximations sur des sujets qui leur échappent. Je suis souvent amenée à répondre aux questions de mes interlocuteurs par « je ne sais pas », ou encore « je ne suis pas assez experte dans le domaine que vous évoquez pour vous répondre précisément ». Ma prudence surprend. Elle déçoit peut-être. Et si je tente de répondre à une question que je ne maîtrise pas parfaitement (ou sur laquelle la science n'a pas encore statué), j'annonce toujours la couleur à mon interlocuteur pour qu'il puisse apprécier la netteté du miroir.

Ce miroir, c'est l'algorithme qui sépare le monde réel du monde virtuel numérisé – la passerelle vers ce monde virtuel. Mais tout spécialiste qui s'exprime sur ces sujets est aussi un miroir. Je m'explique : lorsque je parle de biais algorithmiques dans mes articles ou séminaires, j'exprime dans le monde réel ce que je sais du monde virtuel. *De facto*, je deviens miroir. Dès qu'un incompetent, ou un imposteur, s'autoproclame, sans fondement, « expert » de l'intelligence artificielle, il fournit dans le monde réel des informations déformées, approximatives, voire fausses, du monde virtuel. C'est ce que j'appelle brouiller le miroir, alors qu'aujourd'hui plus encore qu'hier nous avons besoin du meilleur reflet possible. Renvoyer à nos interlocuteurs l'image la plus juste possible du monde virtuel, pour permettre au public d'y accéder, telle est

notre mission. Ce livre est lui aussi un miroir, qui essaye au mieux de traduire de façon intelligente et intelligible la notion même d’algorithme.

Miroir humain, miroir algorithmique : tous deux ont leurs imperfections, tous deux doivent être remis en question. Un miroir humain se construit sur ses compétences et ses expériences. Mieux vaut savoir *d’où parle* la personne qui prend la parole sur ces sujets complexes, afin d’évaluer la qualité du discours – regarder (de près) leurs diplômes mais aussi leurs publications scientifiques, les entreprises qu’ils ont créées, les produits numériques qu’ils ont développés... Dans le cas du miroir algorithmique, il est important de comprendre le mode opératoire de construction des algorithmes – apprenants (implicites) ou non apprenants (explicites) – pour juger de leur pertinence et de leur justesse. Mieux on comprend le miroir, mieux on pourra juger du monde virtuel qu’on nous propose, et ne pas seulement le subir.

Améliorer le miroir algorithmique : à la frontière entre réel et virtuel

Certains pourraient se demander, et à juste titre, les raisons qui nous empêchent aujourd’hui de concevoir un miroir algorithmique parfait. Le monde virtuel, symbolisé par le reflet du miroir, serait alors l’image parfaite de la réalité, sans interprétation possible, sans hypothèse et sans doute. Le monde virtuel numérisé et le monde réel humanisé seraient alors indiscernables.

Ce problème est une magnifique mise en abyme des limitations dans ce que nous voyons, ce que nous comprenons et ce que nous savons de la réalité. Comme nous l’avons vu dans les chapitres précédents, nous construisons un algorithme à partir de nos observations et de nos connaissances, qui sont

inévitablement limitées. Les limites peuvent être techniques (je l'ai constaté tout au long de ma thèse). Elles peuvent être cognitives – ce sont les biais. Aux facteurs biologiques (rappelons-nous que nous n'observons pas les couleurs de la même façon !) s'ajoutent nos personnalités et nos expériences passées, qui nous font voir les choses différemment. L'objectivité parfaite n'existe pas. Et ce n'est pas tout ! Il faut aussi tenir compte des éléments du monde réel que nous ne pouvons pas voir (comme mes nanostructures de particules de carbone, dont je n'ai jamais pu analyser tous les détails géométriques) et qui nous obligent à émettre des hypothèses... Tout au long de ma carrière, j'ai pu le vérifier : la qualité des hypothèses définit la qualité du miroir algorithmique, son degré de perfection. Certaines hypothèses peuvent fortement déformer le reflet du miroir, et donc fournir une image de la réalité trop approximative, voire fausse.

Il y a, enfin, tout ce qu'on ne sait pas. Certains phénomènes nous sont encore inconnus, et jamais nous ne pourrions affirmer que nous avons tout observé, tout analysé, tout trouvé. Ignorer qu'on ignore, disait Aristote, c'est ne rien savoir. Mais savoir qu'on ignore, c'est vraiment savoir. Le doute existe, et il existera toujours ; il est l'essence de l'esprit scientifique.

Parce qu'il n'existe pas de miroir parfait, le monde virtuel sera toujours une approximation de la réalité et pourra toujours contenir des biais. Dès lors, quelle que soit la qualité du miroir, l'essentiel est de rester capable de distinguer réel et virtuel.

Je me souviens d'un grand moment de solitude en 2015, alors que je travaillais depuis quelques semaines avec Michelle Farley dans l'équipe de Raúl au MIT. Michelle était une expérimentaliste chargée de coordonner la campagne de

collecte de données morphologiques et fonctionnelles de cerveaux humains. C'était aussi une personne curieuse et ouverte, qui m'a beaucoup appris sur le cerveau humain et qui s'intéressait au but de nos recherches et à nos travaux de modélisation. Et c'est dans son bureau, alors que nous faisons le point sur nos avancées dans les simulations numériques, que le miroir entre réel et virtuel s'est soudain brouillé sous mes yeux...

Elle m'avait appelée quelques minutes auparavant : « Je viens de recevoir des images incroyables de cerveau, il faut que tu voies ça ! »

Je revois encore la scène. Ce n'est pas la première fois que Michelle me présente des images de cerveaux humains cartographiant les différentes zones neurologiques, mais jamais encore je ne l'ai vue aussi impatiente de me les montrer. Elle clique sur un dossier intitulé *New brain images*, ouvre une dizaine de fichiers en format *tif* et actionne le mode « plein écran ». Sous mes yeux commencent à défiler des images de cerveaux en trois dimensions, sous différents angles, avec des couleurs acidulées représentant chaque zone neurologique. Michelle commente, elle m'indique l'emplacement de la zone de la mémoire par rapport à celle du langage, me pointe des différences avec d'autres mammifères... Je suis fascinée, tant par ses explications que par la beauté des images, mais en même temps (on ne se refait pas) je me demande combien de temps il a fallu pour réaliser des simulations aussi réalistes – et quels biais peuvent bien se nicher dans ces images.

« La résolution est incroyable, dis-je sans trop réfléchir. Ces simulations sont géniales. » Michelle me regarde en plissant les paupières, et alors je comprends : depuis vingt minutes, nous regardions les mêmes images mais nous n'y

voyions pas la même chose. Ce n'étaient pas des simulations, mais la simple reconstruction en trois dimensions d'images d'IRM !

Michelle rit. « Je ne te l'avais pas précisé. Je pensais que c'était clair. Ce sont des résultats d'IRM, avec des couleurs artificiellement ajoutées pour représenter les zones neurologiques du cerveau ! »

À cause de ces couleurs flashy, j'avais inconsciemment classé les images comme des simulations provenant du monde virtuel. C'était pourtant bien le monde réel que j'observais. Mon cerveau m'avait trahie. Mais voyons donc le verre à moitié plein... Même si j'avais perdu vingt minutes à réfléchir aux biais algorithmiques possibles d'un calcul numérique qui n'en était pas un, j'avais appris une grande leçon : distinguer le virtuel du réel n'est décidément pas chose aisée, même pour moi !

Il existe aussi des cas où nous nous laissons nous-mêmes illusionner, même devant un miroir imparfait. C'est notre regard qui corrige de lui-même l'image, conditionné que nous sommes à voir en tout humanoïde (même raté) une sorte de semblable. Toujours l'effet ELIZA !

Encore une fois, l'actualité vient me fournir une illustration tandis que j'écris ce chapitre. Nous sommes en novembre 2018 et la presse mondiale ne parle que de cela : l'agence de presse chinoise Xinhua News Agency vient de mettre à l'antenne son premier présentateur télévisuel humanoïde. « Bonjour, dit-il, je suis une intelligence artificielle de présentation en anglais, et c'est mon tout premier jour à l'agence. » Ce robot est manipulé algorithmiquement par des humains, il n'a aucune intelligence de situation et aucune empathie, il n'en aura sûrement jamais.

Il n'a donc pas la moindre conscience d'exister. Et pourtant, il est évident que ce présentateur robotisé sans cœur et sans chaleur corporelle, mais plutôt réussi sur le plan anthropomorphique, nous touche au point d'avoir envie de le féliciter pour sa première télé ! Les gens sont conquis. Qu'aurions-nous ressenti si ce robot était malencontreusement tombé de son siège, ou s'il avait perdu un œil ou un bras en direct ? Un malaise douloureux. L'effet ELIZA est incroyablement puissant : à cause de lui, nous entrons dans une confusion profonde qui nous fait oublier le miroir, cette distinction entre le réel et le virtuel. Et pourtant, cette distinction est fondamentale ! Elle l'est d'autant plus que, d'ici dix ans, les ressemblances seront encore plus frappantes. Il en va donc de notre avenir : nous *devons* comprendre le fonctionnement de tels robots pour empêcher ELIZA de prendre place dans nos vies et de nous faire perdre notre esprit critique en faisant disparaître le miroir algorithmique.

Faire la différence entre la fiction et la réalité n'est pas aisé, même pour les spécialistes de l'intelligence artificielle. Distinguer le réel du virtuel est pourtant un excellent moyen d'éviter de tomber dans les mille et une théories du complot, les accusations injustifiées à l'encontre de grands acteurs de ces nouvelles technologies, ou encore les prédictions catastrophistes en tout genre. *Blade Runner* et *Terminator* restent des films. Et même si *Black Mirror* a des similarités surprenantes avec notre présent, cela reste de la fiction. J'ai déjà lu dans la presse ou entendu dans des conversations des références à des épisodes de *Black Mirror* pour commenter un fait d'actualité. Étant moi-même fan de la série, cela m'arrive aussi, mais je prends toujours le soin de préciser la frontière entre réalité et imaginaire. Alors que l'une décrit le présent, l'autre le projette de manière fictive dans un monde fabriqué.

Certes, il arrive que des anticipations de fiction se réalisent, comme certaines inventions des romans de Jules Verne. Dans *Black Mirror*, par exemple, l'épisode *Nosedive*, qui met en scène l'évaluation sociale par les citoyens entre eux, nous rappelle autant le système de « crédit social » mis en place par le gouvernement chinois que notre propre expérience des réseaux sociaux... Mais attention : à force d'établir des parallèles avec des fictions, nous sommes en train d'opérer, doucement et sans nous en rendre compte, une sorte de translation d'une narration fictive vers le monde réel. Nous devons continuer à dire que ces fictions sont réalistes, mais pas *réelles*. La différence est importante ; elle doit être comprise et admise par tout le monde. Cela semble évident aujourd'hui, mais l'est moins qu'on le pense. Et le sera de moins en moins à mesure que la science progressera et que le miroir se polira.

Il est une dernière raison pour laquelle nous ne saurions construire de miroir parfait, et il faut nous y arrêter un instant car c'est l'une des clés du monde des algorithmes. Là encore, je vous propose de faire un détour par l'Antiquité, du côté d'Aristote et de ses « catégories ».

Catégoriser le monde pour mieux le comprendre

On n'a pas attendu l'algorithmique numérique pour catégoriser le monde. Au IV^e siècle avant notre ère, Aristote propose, en ouverture de ses traités de logique (l'*Organon*), la première catégorisation de l'être. Il y décrit un ensemble de dix catégories que sont la substance, la quantité, la qualité, la relation, le lieu, le temps, la position, la possession, l'action et la passion. Si l'on prend mon cas, Aurélie Jean, on pourrait ainsi me décrire comme un individu de genre féminin (substance), mesurant un mètre soixante-sept (quantité),

gourmande (qualité), petite-fille d'Albert et Hélène Jean (relation), les placards garnis de dizaines de paires de chaussures (possession)... et ainsi de suite. Le résultat de cette catégorisation n'est pas unique pour me décrire. « Drôle » ou « volontaire » auraient pu décrire ma qualité ; on aurait aussi pu décrire ma « possession » par les centaines de livres qui se serrent dans ma bibliothèque.

Le terme « catégorie » vient du grec ancien *catagorein* qui veut dire « accuser ». Selon Aristote, les catégories seraient des « modes d'accusation de l'être ». Dans toute l'histoire de la philosophie, des penseurs ont remis en cause la catégorisation proposée par Aristote – et parfois l'idée même de catégorisation du monde. On a toujours cherché à catégoriser le monde pour mieux le comprendre, à classer pour mieux approcher les choses et démêler les nouveaux phénomènes. Cette simplification nous est nécessaire pour appréhender des choses complexes et démêler les nouveaux phénomènes. Parce qu'elles sont limitées en nombre et statiques dans le temps, les catégories limitent nécessairement notre vision du monde ou des gens. Elles sont aussi « discriminatoires » dans le sens où elles classent selon des critères qui discriminent. Cette discrimination n'a aucune connotation négative, elle exprime tout simplement le fait de différencier.

Les questions sur le nombre, la nomination et la hiérarchisation des catégories peuvent être sans fin. Avec trop peu de catégories, on risque de développer une grille de lecture réductrice du monde. Si le nombre est trop grand, on peut se perdre... Pourquoi Aristote a-t-il choisi dix catégories, pourquoi pas vingt ou cent ? Quel serait le nombre idéal ? Aristote pensait-il que ce nombre était voué à évoluer ?

Difficile à dire. Quoi qu'il en soit, la question est toujours d'actualité.

Car les algorithmes fonctionnent nécessairement sur des catégories. On classe les phénomènes pour traduire mathématiquement la résolution d'un problème ou d'une question, en définissant un chemin vers une réponse que l'on obtient par le calcul numérique. Cette classification se base sur ce que l'on sait, ce que l'on croit savoir et sur nos hypothèses.

Dans le cas des algorithmes apprenants, la donne change. La classification se crée non pas à travers des critères explicitement définis par les humains, mais à travers les critères implicitement décrits dans les invariants du réseau neuronal d'apprentissage. Reprenons notre exemple de reconnaissance de chiens sur une photo. Durant son apprentissage, l'algorithme aura créé un réseau neuronal pour répondre à la question : « Y a-t-il un chien sur la photo ? » Ce réseau neuronal est une sorte d'arbre de chemins de résolutions, construits selon des critères implicitement développés pendant l'apprentissage. Le réseau neuronal se complexifie au fur et à mesure des images qui lui sont fournies, pour obtenir un réseau fortement abstrait, dont il est difficile d'extraire l'ensemble des invariants et leur logique de fabrication. En d'autres termes : une catégorisation s'effectue au fil de l'apprentissage, qui échappe en partie à nos raisonnements... et qui est en réalité plus abstraite et bien plus complexe que la simple dichotomie *chien* ou *pas chien*.

L'autre grand changement, c'est que nos classifications deviennent évolutives. Dans le cas de la reconnaissance de chiens, cela peut sembler inutile – après tout, un chien reste un chien. Et pourtant ! Notre rapport à l'animal peut évoluer, et avec lui les photos que l'on échange sur les réseaux sociaux ou en privé. En 2019, aux États-Unis, il m'arrive de voir des

humains transporter des chiens dans des poussettes canines. Je dois systématiquement regarder à deux fois pour confirmer que c'est bien un chien allongé dans cette poussette, et non un petit bambin. Pour moi – et pour quiconque de ma génération et des générations précédentes –, c'est absurde. Au niveau algorithmique, cela peut se traduire par une ambiguïté : si la poussette est associée aux seuls bébés humains, l'algorithme n'identifierait pas le chien. Pour rester pertinent, il doit être capable d'intégrer ces évolutions.

Bien sûr, cet exemple est anecdotique. Mais, dans d'autres cas, il est impératif que les classifications ne soient pas figées, sous peine de ne plus être en phase avec l'évolution du monde ou de perpétuer des discriminations – comme on le voyait tout à l'heure avec l'assurance. Prenons l'exemple (fictif !) d'un algorithme qui analyserait les chances de succès d'un lycéen dans les études supérieures, par discipline et selon l'orientation. Chaque élève pourrait ainsi rentrer ses notes, ainsi que des informations plus personnelles (parcours, personnalité...), et le programme évaluerait ses chances de succès dans telle ou telle filière. Cet algorithme, nourri de données sur les performances des élèves des dix dernières années au lycée et en études supérieures, aurait développé une catégorisation selon le profil des lycéens, leur orientation après le bac et leur réussite (ou échec) dans le supérieur. S'il existait, il pourrait donc fournir une base décisionnaire intéressante et éclairer nos choix d'université et de discipline. Voilà qui est assurément intéressant... À condition que la catégorisation développée par l'algorithme ne soit pas figée ! Si tel était le cas, cela signifierait que la société ne change pas. Or, évidemment, elle évolue. Constamment.

Par exemple, si l'on avait entraîné cet algorithme sur les données des années 1970, il y aurait eu de fortes chances, en

2000, l'année de mon passage à l'université, que les études de droit me soient proposées avant les études de mathématiques (j'hésitais à l'époque entre ces deux voies). Les programmes de l'Éducation nationale au lycée changent, les élèves aussi. Il ne faut pas non plus oublier les tendances, qui ont une influence réelle sur le choix des élèves. À mon époque, c'était la mode d'aller en école préparatoire aux grandes écoles de commerce. Heureusement que les tendances scolaires n'ont jamais eu aucun effet sur moi, je l'aurais certainement regretté aujourd'hui.

Les limites des catégories (ou comment j'ai moi-même échappé aux biais)

La construction de nos catégorisations est fortement influencée par notre classification intuitive, parfois non dite, des êtres et des choses. Nous avons des préjugés, des stéréotypes à l'esprit. Nos expériences modèlent notre ego et nous font répondre à chaque situation en allant chercher dans l'une de ces catégories l'élément clé qui déterminera notre réaction.

Ces catégories nous limitent, et je suis le parfait exemple de l'individu qui n'entre pas dans les catégories standards, massivement reconnues et inconsciemment utilisées par la plupart d'entre nous. Je n'ai pas particulièrement souffert de cette catégorisation forcée et inflexible... mais j'ai souvent dû nager à contre-courant. J'appartiens en effet à plusieurs catégories *a priori* contradictoires : je suis une femme, féminine, et une scientifique qui aime l'algorithmique. J'aime les chaussures à talons comme les équations mathématiques. Je suis issue de la classe moyenne, j'ai été élevée dans une cité HLM et j'ai pourtant arpenté les couloirs de Sorbonne

Université, de l'ENS et des Mines de Paris. On peut y voir une belle réussite sociale selon une méritocratie propre à notre pays, mais force est de constater que j'étais bien souvent la seule. Je suis une féministe, et ce depuis mon adolescence – et j'aime les hommes, qui ont été mes meilleurs soutiens. Je regrette la stigmatisation du mot « féministe », en France. Plus jeune, j'ai fait autant de rugby que de danse de ballet. J'ai appris le piano et j'adore siffler avec les doigts, au grand dam de ma grand-mère, qui plisse les yeux pour me faire comprendre que ce n'est pas élégant. J'ai été inspirée de ne pas abandonner cette habitude : cela m'a bien servi dans la compétition féroce pour trouver un taxi à New-York, pour vivre pleinement des matchs de baseball... ou pour faire taire des élèves dissipés en classe. J'ai très vite et très tôt remarqué ma catégorisation contre-intuitive. Je n'entre pas dans les catégories préétablies, car j'ai été élevée sans catégories explicitement définies. Mes grands-parents, en particulier mon grand-père, n'ont cessé de me répéter que je ne devais penser ni à mon genre ni à ma classe sociale pour faire mes choix. Ils m'ont permis de développer un libre arbitre affûté, dont je profite encore aujourd'hui. Je ne dirais pas qu'il a toujours été simple d'être ainsi hors des cases – cela m'a souvent valu une sorte de frustration existentielle qui m'imposait fréquemment de me justifier.

Je me souviens de mon année de terminale. En l'an 2000, on ne parlait pas encore de Parcoursup : il me fallait donner mes choix d'universités et de disciplines pour la rentrée suivante sur l'unique Minitel de la bibliothèque de mon lycée. À l'époque, j'hésitais entre une licence de physique et mathématiques, et une licence de droit. La majorité de mes cousins et cousines avaient fait du droit, mon grand-père avait également pris des cours de droit à 40 ans, il semblait assez

naturel d'en faire mon premier choix. Était-ce un biais ou une inspiration ? Encore aujourd'hui, je n'en sais rien. De l'avis général – y compris celui de notre conseiller d'orientation –, le droit était plus adapté à une personne comme moi : une fille qui parle bien, qui raisonne correctement... Le même conseiller avait ajouté cet argument si pertinent : « Elle présente bien. » C'est bien connu, les avocats sont tous des individus propres et policés, alors que les scientifiques sont des personnes négligées, qui ne savent pas communiquer. Quel biais ! Heureusement, à la maison, je n'étais pas influencée. J'ai donc fait mon propre choix.

Cet exemple personnel souligne un point important : de tels algorithmes d'optimisation de parcours universitaires, s'ils existaient, ne feraient que nous fournir une base décisionnaire. Ce n'est certainement pas à l'algorithme seul de prendre une décision ! Car, à la fin de la boucle mathématique, il y a des humains : l'élève, ses enseignants, sa famille... Tous peuvent contribuer à questionner la suggestion de l'algorithme et à aider l'élève à faire son propre choix – quitte à prendre une décision qui n'est pas proposée par l'algorithme.

Près de deux décennies plus tard, en 2017, les mêmes biais d'apparence me rattrapent à New York. C'est une soirée d'août étouffante, dans le quartier de Soho, où Federica, mon amie sicilienne, m'a invitée à découvrir le « meilleur sicilien de la ville » (encore un).

J'arrive légèrement en retard (ne perdons pas les traditions), Federica est déjà là, au bar, comme il se doit dans tout restaurant new-yorkais, un cocktail à la main... et en charmante compagnie. Avenante comme elle est, elle n'a aucun mal à engager la conversation avec des inconnus dans

cette atmosphère feutrée, lumière tamisée et jazz en fond sonore. Deux hommes sont autour d'elle et, je le sens, d'emblée, il y a de la drague dans l'air. Je ne suis pas très à l'aise : s'il m'arrive de parler avec des inconnus, c'est le plus souvent dans une librairie ou un musée... Je ne sais pas draguer, je ne l'ai jamais fait, et je sais encore moins faire comprendre à un homme que je ne suis pas intéressée. Je redoute déjà l'ambiguïté qui ne devrait pas manquer de s'installer dans cette conversation à quatre... Mais, si je me souviens de cette soirée, c'est pour une autre forme d'ambiguïté – comme une succession de biais en tous sens.

Les jeunes hommes se présentent, nous disent qu'ils travaillent dans la finance. L'un deux, Mike, a très bien réussi à la Deutsche Bank. « Très bien réussi », dans le jargon des banquiers de New York, signifie qu'ils gagnent très bien leur vie et ont de beaux bonus, rien de plus. Arrive alors le moment délicat. Mike me demande ce que je fais dans la vie. Mais, sans attendre la réponse, il se lance : « Je suis sûr que tu travailles dans la mode, tu as du goût ça se voit ! » J'étire mes zygomatiques au maximum pour lui annoncer que non, je travaille chez Bloomberg – un nom qui, forcément, lui est familier. Il me regarde, surpris. « Tu es journaliste à Bloomberg ? » Encore raté. Il m'imaginera avocate ou responsable marketing, avant que je lui révèle mon métier et ma mission. Alors, Mike ouvre de grands yeux, pose son verre de bourbon sur le comptoir et déclare : « Ouah ! Je n'avais jamais rencontré de scientifique comme toi. » Je ne lui en veux pas, mais je le challenge quand même en lui demandant : « Tu t'attendais à quoi ? – Je ne sais pas, plutôt un garçon, mais sûrement pas à une jolie fille comme toi ! »

J'accepte sa franchise, et le compliment par la même occasion. Pour plaisanter, je lui dis que j'ai laissé mes lunettes

et mon tee-shirt de comics à la maison. La suite de la conversation sera tout aussi poussive. Je tente d'expliquer ce que je fais, Mike me fait du charme en laissant peu discrètement dépasser de la manche de sa chemise une montre à 20 000 dollars... Non, décidément, il a beau être très sympathique, rien n'y fera. Trop d'a priori. Mais, après tout, suis-je vraiment différente ? Moi-même, je fonctionne par catégories. Il m'a fallu une minute pour ranger Mike parmi les banquiers en costard, ostentatoires et vulgaires, Rolex au poignet et qui parlent fort de leurs dernières vacances dans les Caraïbes ou de leur dernier voyage en jet privé vers les Hamptons. Alors que, pour ce que j'en savais, Mike pouvait très bien être un philanthrope, un homme qui se balade dans les musées, lit des livres et aide la communauté des enfants de son quartier. Je ne le saurai jamais, nous n'avons pas eu le temps d'en parler. Une serveuse vient nous chercher, notre table est prête. En quittant nos deux prétendants, Federica me glisse : « Ils sont gentils », ce qui pour elle veut dire : « Ils ne sont pas intéressants. »

Je me souviens de m'être sentie lâchement rassurée de voir que mon amie avait les mêmes catégories que moi...

Pour voir le verre à moitié plein (puisque j'avais à peine eu le temps de finir mon cocktail), je dirais qu'il y a aussi un avantage à se retrouver ainsi « hors catégorie ». J'ai appris à jouer de cette particularité en ma faveur. Être l'une des rares femmes dans une équipe, dans un laboratoire ou au sein d'une entreprise, peut être une arme... car on se souvient toujours de vous ! À défaut d'avoir un prénom facile à retenir pour un Américain, j'avais un genre qu'on repérait. Je pense que c'est mon caractère « hors catégorie » qui m'a toujours encouragée à m'éloigner de cette idée bien-pensante contre laquelle je me bats – cette certitude qu'ont tant d'acteurs de la tech d'agir

« pour le bien de tous ». Peut-on jamais affirmer que notre travail bénéficie à tous ? Cette notion est décidément bien bancal. En revanche, comme je le soulignais un peu plus haut, il est toujours possible de réfléchir au mal que l'on peut faire. C'est sans doute parce que j'ai toujours fait partie de la queue des lois gaussiennes de mon environnement (scolaire puis professionnel), que j'ai toujours réfléchi en ce sens. Il existe souvent une minorité silencieuse, à laquelle on ne pense pas forcément, mais qui peut subir les conséquences d'une catégorisation grossière et imparfaite. Nous catégorisons tous et nous devons prendre conscience de cette classification naturelle que nous faisons des êtres et des choses pour éviter de nous laisser tromper par nos biais cognitifs. Nous devons éviter de les transmettre aux algorithmes que nous développons – ou aux données que nous fournissons aux algorithmes en phase d'apprentissage ou de calibrage.

D'une certaine manière, Aristote nous invite à sortir de ces biais en nous mettant face à une liste de catégories explicitement définies qui conduisent notre humanité. Travailler ainsi sur des catégories (nécessairement imparfaites) nous évite de nous leurrer sur la perfection de nos représentations. Nous pouvons toujours chercher à améliorer nos catégorisations, pour les rendre plus justes et plus fines, mais elles ne seront jamais qu'une représentation – quoi qu'en pensent ceux qui continuent à rêver d'un miroir parfait, et qui aujourd'hui fondent tous leurs espoirs sur l'ordinateur quantique...

L'ordinateur quantique serait-il la solution ?

Il fallait bien en parler quelque part, puisque certains, déjà, n'ont plus que ce mot à la bouche quand ils pensent au futur

des algorithmes... L'ordinateur quantique ! Si vous n'en avez pas encore entendu parler, je vous préviens : ça ne saurait tarder.

Mais qu'est-ce donc que l'ordinateur quantique ? Pour faire (très) court : tandis que nos ordinateurs contemporains fonctionnent avec des bits qui stockent l'information à travers des suites de 0 et de 1, l'ordinateur quantique fonctionnerait sur la logique du qubit, capable de stocker plusieurs unités d'informations simultanément, grâce au principe de superposition². La logique quantique permettrait, entre autres, de stocker une immense taille de données et de réaliser simultanément un très grand nombre d'opérations. De quoi résoudre des problèmes gigantesques ! Fabuleuse promesse. D'aucuns y voient déjà la solution à toutes les limites auxquelles nous nous heurtons aujourd'hui. Et pourtant... Certains seront sûrement déçus de l'apprendre, mais la vie n'est pas une question de taille. Au contraire ! Ce qui compte, c'est l'efficacité. Il en va de même pour les simulations numériques.

Précisons tout d'abord que nous sommes encore loin de la concrétisation d'un tel ordinateur pour des applications réelles. Mais admettons que nous soyons à quelques années seulement de son utilisation massive, et projetons-nous. En réalité, l'ordinateur quantique, même avec une capacité de calcul exceptionnelle, ne permettra de résoudre que certains problèmes – ceux qui supposent des calculs réalisés de manière simultanée, notamment. Ainsi, l'ordinateur quantique serait imbattable pour décrypter un code secret, car cela suppose de tester des dizaines de millions de combinaisons, indépendantes les unes des autres. On peut aussi imaginer qu'avec ces simulations simultanées, on puisse raisonner par l'absurde pour détecter des phénomènes et des mécanismes

encore inconnus des scientifiques, ou démontrer des conjectures qui résistent encore aux mathématiciens d'aujourd'hui.

En revanche, la plupart des problèmes auxquels j'ai été confrontée dans ma carrière ne trouveraient pas nécessairement plus de réponse avec la logique quantique. L'ordinateur quantique ne permettrait pas de *craquer* les complexités temporelles et spatiales de tous les algorithmes. Ces algorithmes évolueront sans doute, mais la complexité changera sûrement plus difficilement.

Et quand bien même. Imaginons (pure hypothèse !) que l'ordinateur quantique soit capable de résoudre des problèmes de taille infinie. Cette machine s'appuierait non plus sur des modélisations de la réalité, mais sur une projection conforme de cette réalité. Plus besoin de catégories ! Si cela pouvait un jour être possible, cela poserait un nouveau problème, aussi philosophique que technique : les biais pourraient encore plus facilement se cacher. Alors que la conscience même des catégories nous permet de repérer une classification bancale, l'absence de catégorisation peut rendre le diagnostic plus difficile. Comment s'assurer que rien ne sera oublié dans cette représentation algorithmisée du monde ? Je ne suis certaine de rien : je me pose des questions. La catégorisation a l'avantage d'identifier plus facilement des biais, même si c'est moins vrai lorsqu'elle est fortement raffinée, comme dans le cas de l'apprentissage algorithmique profond.

Ces simulations, ces algorithmes et cette puissance de calcul peuvent nous faire tourner la tête. Mais, comme je le disais, tout ceci est encore loin de nous. Il reste beaucoup de recherches à conduire. Au moment de conclure ce chapitre, les deux pieds dans le monde d'aujourd'hui, je propose de retenir ceci : que le miroir soit parfait ou imparfait, le plus important

reste la clairvoyance. Le virtuel gagne du terrain, mais la réalité doit rester un concept clairement identifié par tous, ce qui empêchera la confusion, les débats inutiles et les idées fausses et dangereuses de se propager. Savoir détecter un discours faux ou une actualité mensongère, voilà un pas critique pour s'accorder sur une réalité commune – et cela passera par une culture technologique mieux partagée. Nous devons tous identifier le miroir qui relie les mondes réel et virtuel, et ne pas hésiter à remettre en cause les acteurs de l'intelligence artificielle, d'un point de vue intellectuel, scientifique, philosophique et économique. « Où est donc la réalité ? » Tout le monde doit répondre à cette question et à tout moment. Il faut également répondre à la question : « Quelle sera la réalité de demain ? » Fournir des éléments de réponse à cette question, c'est chasser les peurs qui nous rattrapent plus vite que les sciences numériques avancent et que les algorithmes apprennent.

C'est un fait : de plus en plus de décisions seront à l'avenir prises par des algorithmes. Mais nous devons rester maîtres de nos vies et de nos choix fondamentaux, et non les déléguer à des équations mathématiques !

-
1. Maître Alain Bensoussan, pour ne pas le nommer, plaide régulièrement pour que l'on reconnaisse les robots comme une « nouvelle espèce ».
 2. À l'échelle atomique, un élément peut se trouver dans plusieurs états physiques en même temps. C'est ainsi que le fameux chat de Schrödinger est à la fois mort et vivant.

D'une révolution algorithmique vers une crise sociale ?

Paris, 8 mai 1794. La place de la Concorde s'appelle encore « place de la Révolution » ; c'est là que, depuis deux ans, est installée la Guillotine. En ce jour de printemps, la foule hurle à la vengeance et au mépris envers l'homme qui monte sur l'échafaud. Beaucoup ne savent pas qui est ce condamné. Son nom leur est inconnu, ils ne savent ni d'où il vient ni ce qu'il a bien pu faire pour mériter une telle sentence. Peu importe : il faut que la lame tombe. Cet homme, âgé de 50 ans, a été condamné à mort pour trahison contre la nation. Son crime ? Avoir tenté de sauver le pays de la banqueroute en créant l'assignat, dont la dévaluation (dont il n'était aucunement responsable) aurait profité aux spéculateurs. Mais cet homme n'est pas un financier. C'est d'abord un scientifique, bien connu de ses pairs, assurément l'un des plus grands chimistes de l'histoire, dont les principes et les théories sont encore utilisés au XXI^e siècle. En ce 8 mai 1794, c'est le grand Antoine Lavoisier que l'on exécute. Il a révolutionné la chimie et la thermique, mais c'est une autre révolution qui le condamne – pas celle des droits de l'Homme mais celle de la Terreur, celle de la méconnaissance et de la manipulation des masses, qui cherche des coupables pour payer ses erreurs. Antoine Lavoisier, pourtant rationnel et constructif, n'a pas réussi à convaincre le tribunal de sa non-culpabilité. En

dernier recours, il a demandé un sursis pour pouvoir terminer une expérience. Mais le président du Tribunal révolutionnaire lui aurait répondu : « La République n'a pas besoin de savants, ni de chimistes ; le cours de la justice ne peut être suspendu. »

Même si Lavoisier n'a pas été condamné directement pour ses travaux, le propos témoigne du mépris du Tribunal révolutionnaire pour la science et les scientifiques. Un mépris qui n'est pas neuf. Dans l'histoire, on a souvent chassé, humilié, voire assassiné, des scientifiques pour leurs travaux ou leurs théories qui, bien souvent, allaient à l'encontre de la pensée dominante. L'Inquisition en est une triste démonstration. Galilée, Copernic, Bruno, Érasme... On ne compte plus les scientifiques qui, pendant quatre siècles, en ont été les victimes. Comment a-t-on pu, dans le passé, condamner des acteurs de révolutions scientifiques au nom de révolutions politiques ? Cette question doit être posée aujourd'hui, car il me semble que nous ne sommes pas loin de pouvoir connaître dans un avenir proche – avec des nuances tout de même – des événements similaires, où le condamné serait puni pour ses positions scientifiques.

Depuis deux ans, je me pose moi-même la question régulièrement. Car les critiques se font de plus en plus fréquentes, et de plus en plus violentes. On accuse de manipulation les géants de la Tech, on dénonce une « dictature analytique et algorithmique », on accuse les développeurs d'être incultes et sans états d'âme... Ces débats sont légitimes, mais ils peuvent devenir dangereux s'ils sont mal posés, comme c'est le cas aujourd'hui. L'atmosphère est à la révolte, car la révolution technologique en cours est encore largement incomprise. Faute d'avoir cherché à inclure toute la population, elle fait peur et elle divise. Cette fracture numérique n'était certainement pas étrangère à un mouvement

comme celui des Gilets jaunes. Car aux inégalités sociales viennent aujourd'hui s'ajouter des inégalités profondes sur l'appropriation et l'usage du numérique.

Pour éviter des divisions irrémédiables dont les conséquences pourraient être terribles, il me semble impératif de tendre vers une véritable *inclusion numérique*. Et, plus largement encore, d'endiguer le recul de la culture scientifique dans notre pays. La culture scientifique n'est pas réservée aux ingénieurs. Dans tous les domaines, elle offre une grille de lecture intelligente et intelligible pour avancer vers des solutions constructives et pragmatiques. Assurer le large développement de cette culture scientifique n'est pas qu'une question d'éducation, c'est un impératif démocratique : nos débats doivent se nourrir d'une recherche de vérité, de logique, de doutes raisonnables, et non de passions sans fondement !

Il y a malheureusement à tout cela un obstacle non négligeable : c'est que nos dirigeants économiques et politiques ne comprennent pas pleinement les mécanismes technologiques sous-jacents des changements profonds qui sont à l'œuvre. Dit autrement : nous sommes tous un peu perdus dans cette révolution numérique, et le peuple n'a pas de décideur éclairé à sa tête. Car, contrairement à la révolution industrielle, où l'observation suffisait pour comprendre le mécanisme de base des machines, la révolution numérique est intangible. Algorithmes et réseaux neuronaux sont immatériels, insaisissables pour beaucoup. Dirigeants d'entreprises, personnalités politiques et intellectuels se perdent pour la plupart dans un jargon qu'ils ne comprennent pas. D'où un risque élevé de débats publics faussés – et de mauvaises décisions, ou de lois inadaptées.

C'est l'un des paradoxes de notre époque : une révolution est en cours, elle est dans tous les médias et sur toutes les

lèvres, elle est de toutes les conversations autour du zinc, café ou verre à la main... Mais elle reste largement incomprise. C'est tout de même un problème que tout le monde se mêle d'une aussi grande question sans en comprendre les mécanismes ! Il est important que nos dirigeants économiques et politiques montrent l'exemple.

Une révolution incomprise

En 2017, dans les couloirs de l'Assemblée nationale, un média français trouve malin de tendre un micro aux députés pour leur demander une définition de l'intelligence artificielle. Certains élus sont surpris par la question et préfèrent éluder, d'autres tentent de répondre, avec un certain courage. Impossible de savoir si ces réponses sont représentatives, mais force est de constater que le résultat est plutôt gênant. La séquence révèle surtout le manque de maîtrise des termes de la part des élus. Je me souviens de cette réponse : « L'intelligence artificielle est une intelligence qui n'est pas naturelle. » Ce n'est pas faux, certes. Mais si c'est là ce que nos députés peuvent proposer de mieux, nous sommes mal partis... Cela dit je sais combien ces micro-trottoirs sont eux aussi biaisés. La réaction la plus maligne aurait peut-être été de demander au journaliste sa propre définition de l'intelligence artificielle. Après tout, il n'y a pas que les dirigeants politiques qui ne maîtrisent pas le sujet. Nos journalistes aussi ! Et si cela peut nous rassurer : ce phénomène n'est pas franco-français... Qu'on se rappelle les échanges édifiants de Mark Zuckerberg, le PDG de la compagnie Facebook, avec les élus du Congrès américain à la suite de l'affaire Facebook-Cambridge Analytica !

L'affaire a éclaté le 18 mars 2018. C'était un dimanche, je m'en souviens, car je rejoignais mon amie Federica pour notre

brunch préféré (œufs brouillés, grand café et brioches toastées arrosées de sirop d'érable) dans un café de Williamsburg, près de Brooklyn. Il neigeait sur New York, le métro était ralenti et je suis arrivée avec vingt minutes de retard, cinq couches de laine et de cachemire sur les épaules. Federica était assise entre des coussins moelleux sur une banquette près du radiateur, l'écharpe au cou et le *New York Times* à la main. Ses grands yeux noirs dépassaient des feuilles du journal, et ils semblaient furieux. Était-ce mon retard qui la mettait dans cet état ? Pas du tout. C'était Donald Trump, et les révélations du *Times*.

Tandis que je faisais signe au serveur de m'apporter un café filtre bien chaud, Federica m'a tendu le journal, qui titrait : « *Firm that assisted Trump exploited data of millions*¹ ». Le journal révélait comment l'entreprise Cambridge Analytica avait illégalement recueilli les données personnelles de près de 90 millions d'utilisateurs de Facebook pour manipuler l'opinion de certaines catégories d'électeurs au profit de Donald Trump. Ce brunch qui ne devait prendre qu'une heure dura finalement trois heures, quatre cafés et trois cappuccinos. Nous cherchions à comprendre ce qu'il se passait, et nous n'avons pas tardé à engager la conversation avec d'autres amateurs d'œufs brouillés. Les New-Yorkais, majoritairement démocrates, étaient à l'affût du moindre scandale qui pouvait compromettre le président. Mais, si les clients du café partageaient notre opinion, leurs réactions témoignaient aussi d'une incompréhension complète des technologies, en particulier de la collecte, du stockage et du déplacement de la donnée. « Avec le *cloud* on ne sait même pas où sont nos données, disait l'un. Qu'on ne s'étonne pas ensuite de tels scandales ! » La technologie du *cloud* n'a rien à voir avec l'affaire Facebook-Cambridge Analytica. Federica savait cela

car, en plus de son doctorat en droit, elle avait fait des études scientifiques. Mais la plupart des *brunchers* avec qui nous parlions n'avaient pas l'air de comprendre, et je n'avais ni l'envie ni l'énergie d'entrer dans une explication intelligible sur ce qu'est une donnée et sur la manière dont elle est manipulée. J'étais suffisamment énervée comme ça, il ne manquait plus que quelqu'un vienne me dire qu'un algorithme est une recette de cuisine ! Mon premier sentiment a été d'en vouloir à Mark Zuckerberg et à Facebook pour leur irresponsabilité et leur propension à nous cacher des choses. J'en voulais aussi au président Trump, mais c'est un état permanent chez moi, ça ne changeait pas grand-chose.

Ce n'était que le début. Le scandale allait largement dépasser les cafés de New-York et la suite allait apporter la preuve formelle de l'incompétence numérique de nos dirigeants politiques.

En avril 2018, un mois après les révélations du *New York Times*, Mark Zuckerberg est appelé pour être interrogé pendant deux jours par les membres du Congrès américain. Autour de moi, on ne parlait plus que de cela. Fini les discussions sur la dernière saison de la série *Stranger Things*, tout le monde doit avoir son avis sur l'affaire Facebook-Cambridge Analytica. On parle de l'influence de la Russie sur les élections de 2016, ou encore de la puissance des *fake news*. L'audition du créateur de Facebook est retransmise en direct, je la suis avec la plus grande attention. Mais quelle déception ! Les échanges sont longs et peu intéressants, et les questions bien trop naïves. J'aurais aimé fournir aux membres du Congrès une liste de questions pour Mark Zuckerberg. Des questions qui l'auraient réellement poussé à s'expliquer. Au lieu de quoi, l'audition tourne au réquisitoire maladroit contre Facebook, avec des

questions très générales qui ne font en rien avancer l'investigation.

Quelques-unes sortent tout de même du lot, car elles n'avaient jamais été posées publiquement à Mark Zuckerberg, comme celle-ci : « Est-ce que Facebook écoute ou a déjà écouté les conversations des utilisateurs *via* le microphone de leurs téléphones portables ? » (Sous serment, il a répondu : « Non. ») Mais on se souviendra surtout de la question d'une confondante naïveté du sénateur de l'Utah, Orrin Hatch : « Comment comptez-vous conserver un modèle économique dans lequel les utilisateurs ne payent pas pour le service qui leur est fourni ? » La réponse est pourtant évidente : par la publicité ! Je demande souvent aux gens qui, selon eux, est le client de Facebook. Beaucoup répondent : « moi », ou « nous ». Ils se trompent ! Qu'on se le dise : le vrai client de Facebook, ce n'est pas vous, ce n'est pas moi, ce n'est pas nous : c'est le type qui met de la pub. J'aurais aimé qu'un des membres du Congrès demande à Mark Zuckerberg ce qu'est un algorithme – cela aurait donné encore plus de matière à ce chapitre. Au lieu de ça, les représentants manient les termes techniques comme « algorithme » ou « data » avec une apparente aisance, quand le contenu de leurs interventions trahit leur inculture en la matière et un véritable flou artistique sur la façon dont fonctionne une entreprise comme Facebook. Un exemple parmi d'autres : un élu, sur un ton accusateur, demande si Facebook vend les données de ses utilisateurs. C'est idiot ! Mark Zuckerberg a beau jeu de répondre que non. Car l'idée n'est pas de vendre de la data mais d'utiliser ces données pour mieux cibler les contenus des annonceurs. En levant toute ambiguïté technique dans les questions, on aurait pu entrer réellement dans un interrogatoire d'égal à égal. Deux jours durant, cette audition montrera l'incompétence

technologique et l'absence d'analyse critique des représentants du Congrès. Les clients du café de Williamsburg n'auraient pas fait pire ! Certains me disent que l'âge avancé des élus (61 ans en moyenne) les éloigne d'une réalité technologique contemporaine, et que la plupart n'utilisent pas Facebook. Est-ce une excuse ? Ma réponse est simple : ils sont membres du Congrès, ils sont censés être suffisamment intelligents pour comprendre. On ne parle pas d'usage ici mais bien de compréhension des mécanismes. On parle de données et d'algorithme.

Mais ce qui m'attriste le plus, je crois, dans ces auditions, ce ne sont pas les questions des membres du Congrès. Ce sont les réactions de Mark Zuckerberg lui-même. Voyez comme il a l'air extrêmement surpris, voire profondément perturbé, par les questions sur son modèle économique. Ses réactions reflètent une complète déconnexion face aux utilisateurs. On dirait que personne ne lui avait jamais posé ce genre de questions naïves ! Mark Zuckerberg ne se rend-il vraiment pas compte que les utilisateurs de Facebook sont loin de comprendre les mécanismes sous-jacents de son application, et combien leur culture technologique est faible ? À croire qu'il ne parle qu'à des développeurs et des scientifiques toute la journée... Et c'est un vrai problème. Comment avancer si même les individus à la tête des géants de la technologie ne comprennent pas les bouleversements sociétaux qui accompagnent la révolution algorithmique ?

L'affaire Facebook-Cambridge Analytica a renforcé la défiance du public envers Facebook, mais elle n'a pas fait chuter le nombre d'utilisateurs. Et c'est cette même défiance, renforcée par une culture technologique appauvrie, qui allait pousser quelques mois plus tard les commentateurs à considérer Facebook comme le premier responsable de la

montée du mouvement des Gilets jaunes. Une écrasante majorité des médias français s'est empressée de désigner ce coupable idéal : Facebook et son algorithme de recommandation de contenus qui favorise l'influence des groupes. Je contredis fortement cette accusation². Les réseaux sociaux sont des vecteurs puissants de communication de l'information, mais supposer que le mouvement des Gilets jaunes n'aurait pas vu le jour sans Facebook est un peu exagéré. L'usage des réseaux sociaux par les Gilets jaunes a certainement amplifié la montée en puissance du mouvement, mais ce n'est pas un argument pour inculper l'algorithme de Facebook. Allons-nous accuser les lignes TGV et les fournisseurs d'accès à Internet d'accélérer le déplacement de manifestants et la circulation d'opinions rebelles ? Bien sûr que non. Une fois de plus, nous nous enfonçons dans ce flou artistique qui nous aveugle et nous empêche de prendre nos responsabilités. On ne le répétera jamais assez : nous sommes le talon d'Achille de ces géants, car ils ne vivent que par notre participation active. Plutôt que d'accuser les GAFA de tous les maux, nous devons prendre nos responsabilités et agir en conséquence. Agir par une meilleure utilisation de ces réseaux outils, en déposant des plaintes ou des réclamations constructives... voire en fermant nos comptes, provisoirement ou définitivement !

Je reste persuadée que le manque de compréhension est la source de la peur, de l'énervement et du procès d'intention des citoyens face aux grands acteurs de l'intelligence artificielle. Et pourtant, il existe bien un contre-exemple. Il se trouve chez les Bédouins, dans le désert de Néguev, en Israël. Je me souviens de ma discussion avec Walidie, certes un peu désarticulée, mais toujours calme. Walidie ne comprend pas le fonctionnement des technologies, mais il profite quand même

de la 4G à certains moments de la journée, et il entend régulièrement parler de ces scandales en lisant les news sur son téléphone. Comment reste-t-il si calme ? J'imagine qu'il comprend encore moins bien l'intelligence artificielle que nos élus. Le problème, c'est que nous nous engageons systématiquement avec passion dans des sujets qui méritent la plus grande des rationalités. Il faut à tout prix dépassionner les débats pour éviter qu'ils s'appauvrissent. La passion biaise notre analyse, car elle place le sentiment et l'émotion au-dessus de la réflexion analytique. Mais comment dépassionner un débat ? Avec de la pédagogie. Expliquer, expliquer et expliquer encore. La passion et l'incompréhension sont étroitement liées. Il faut réapprendre à sortir de l'agitation : on avance bien plus vite dans la sérénité. Idéalement nous devrions tous passer quelques jours par an dans le désert des Bédouins pour nous déconnecter électroniquement, nous concentrer sur les fondamentaux et éviter les faux procès. Mais, même avec sa plus grande générosité, Walidie n'a pas la place pour tous nous accueillir ! Il va falloir faire sans et c'est possible. Je décide pour ma part d'éduquer, de parler, d'écrire sur mon travail, et sur les sciences et les technologies en général. Telle est ma manière de contribuer à la lutte contre une crise sociale qui suivrait naturellement une révolution algorithmique incomprise de tous.

Lutter par l'éducation

Le 5 janvier 2019, un groupe de manifestants s'avance avec détermination et violence vers un ministère. Leur but ? Détruire. Les raisons ? Peu importe, il faut que quelqu'un paye pour leur situation. Une soif de vengeance les anime. Ils se sont emparés d'un chariot élévateur sur un chantier voisin, ils parviennent à enfoncer les portes principales, entrent dans

l'enceinte de la République, brisent les vitres des voitures et d'un poste de sécurité, et repartent avant l'intervention de la police. Aujourd'hui des ministères, demain des laboratoires de recherche ? Ou des entreprises technologiques comme Facebook ? Je crois fortement à cette menace. Les Gilets jaunes – et tant d'autres – pensent que les politiques sont la cause profonde de leurs problèmes. Mais la cause est aussi à chercher du côté de la fracture numérique, accélérée par les avancées algorithmiques. Le jour où ils le réaliseront, nous aurons chaud aux fesses ! Attention : je n'écris pas que nous, acteurs de la tech, sommes responsables de la colère populaire, mais bien que la révolution technologique en cours prend le risque de diviser les humains. Certains se sentent démunis, délaissés, sans avenir professionnel et social face à des machines toujours plus sophistiquées et qui les dépassent. Je les comprends. Mais la réalité est plus subtile et à la fois plus simple. Encore faut-il l'expliquer – et s'assurer que l'on donne à tous les citoyens les armes intellectuelles et morales pour garantir la paix et poursuivre la révolution algorithmique de façon plus responsable, en évitant les crises et la violence.

Stefan Zweig décrit très bien les risques du totalitarisme intellectuel dans son essai *Conscience contre violence*, écrit à l'époque de la montée du fascisme en Europe. Il y raconte la violence, au XVI^e siècle, du pasteur protestant Jean Calvin à l'encontre de Sébastien Castellion, un théologien (protestant lui aussi) qui osait le défier dans son idéologie. Calvin y incarne la violence, Castellion la conscience, et le message est clair : l'absence de conscience, et donc de connaissance, peut plonger les individus dans une agitation agressive et les enfermer dans une fragilité intellectuelle et d'opinion qui peut plus facilement les attirer vers des idéologies extrémistes.

Je plaisante parfois en disant que je souhaite expliquer ce que je fais afin d'éviter de retrouver ma tête coupée dans un panier. Cette remarque – que j'essaie de rendre aussi légère que possible – suscite en général trois types de réactions. Il y a celles et ceux qui rient instinctivement et qui comprennent mon humour grinçant ; d'autres me regardent en se demandant de quoi je parle... et d'autres encore comprennent et semblent choqués par une référence révolutionnaire aussi terrifiante. L'image est certes violente et ma plaisanterie peut-être déplacée, mais elle exprime bien, à mon sens, le risque que nous encourons – celui de l'obscurantisme intellectuel et du populisme qui appuient sur les instincts et nous fait perdre en conscience et en libre arbitre. Ma position est simple : je ne veux pas mourir prématurément, voire bêtement. Je ne veux pas finir dans une fosse comme Antoine Lavoisier, dépouillé après son exécution. Je décide donc de vulgariser, d'expliquer, d'éduquer, et j'encourage chacun des acteurs de cette révolution algorithmique à me suivre dans cette démarche pédagogique. Il me semble d'ailleurs plus que pertinent de revaloriser toutes les actions des scientifiques du milieu académique envers le grand public³. Aujourd'hui, un professeur ou un chercheur est principalement évalué sur ses articles dans des revues scientifiques, sa capacité à obtenir des fonds de recherche et (dans une moindre mesure malheureusement) ses cours d'enseignement. Il devrait également être évalué sur ses contributions pédagogiques et de vulgarisation. Transmettre ses connaissances au plus grand nombre et de manière intelligible et didactique, voilà qui devrait contribuer à la carrière d'un scientifique. Dotés d'un capital intellectuel et scientifique, les utilisateurs des réseaux sociaux et autres applis pourraient se défendre et contrebalancer de façon réfléchie et constructive le pouvoir

des gros acteurs de la tech et de tous les développeurs et scientifiques en intelligence artificielle.

Nous avons besoin de tous les avis éclairés pour avancer dans notre compréhension et dans notre amélioration du monde – et continuer à développer des outils aussi inclusifs que possible, et non réservés à une petite élite. Car si nous nous contentons de regarder le monde sous le prisme étroit qui est le nôtre, nous risquons de commettre des erreurs, et d'introduire des biais algorithmiques dans les outils que nous développons. Nous, scientifiques, devons continuer à révolutionner la technologie en évitant d'initier une crise sociale. La seule révolution qui vaille sera une révolution positive : un chamboulement des habitudes et des conditions de vie qui améliore réellement la qualité de vie des citoyens. Sans cela, c'est notre tête qui est en jeu. Nous devons nous assurer que chaque citoyen ait la liberté de choisir ses outils numériques en connaissance de cause. Sans quoi, seuls ceux qui comprendront pleinement les algorithmes et les nouveaux outils resteront libres de leurs choix.

Le choix appartiendra à ceux qui comprennent

Humains contre algorithmes : telle serait l'alternative devant laquelle se trouverait notre civilisation...

Les textes de nombreux intellectuels, ces derniers temps, sont empreints de fatalisme – comme si notre cause était perdue d'avance face aux machines. Dans son dernier livre, *21 leçons pour le XXI^e siècle*, l'historien Yuval Harari écrit : « Grâce à leur puissance de calcul et d'apprentissage, les algorithmes décideront mieux que nous ce qui est bon pour nous. » À mon grand regret, il ne va pas plus loin. Cette phrase

mériterait pourtant une longue discussion. Que penser de cette déclaration ? Devrions-nous nous abandonner à la vague algorithmique qui nous transporte dans un monde entièrement prédictible – et ce, pour notre bien ? Je ne crois pas.

Tout d'abord, un algorithme ne connaîtra jamais tout de nous pour la simple et bonne raison qu'il n'atteindra jamais complètement notre inconscient. Les algorithmes nous faciliteront la vie de plus en plus à l'avenir, ils nous connaîtront davantage, mais ils ne peuvent pas se substituer à notre libre arbitre, car sans libre arbitre nous ne sommes rien. La vie est le plus vaste des bacs à sable, le grand terrain de jeu de l'expérience. Nous apprenons depuis notre enfance : grâce à nos parents d'abord, puis grâce à nos expériences et à nos erreurs. Chaque erreur nous donne l'opportunité de retenir une leçon, de catégoriser une situation dans notre cerveau afin de nous alerter, même inconsciemment, à la prochaine configuration similaire qui se présentera à nous. Cet apprentissage forge également notre sagesse et notre esprit critique. Une vie entièrement conditionnée algorithmiquement nous empêcherait de faire des erreurs, et donc d'apprendre. Sous couvert d'une recherche continue d'efficacité, nous ne ferions que nous appauvrir intellectuellement.

Cela me rappelle le film d'animation *Wall-E*, où l'on suit les aventures d'un petit robot chargé de « nettoyer » une planète Terre rendue inhabitable par la civilisation humaine. En attendant de trouver la preuve d'un retour possible, les humains ont été embarqués dans une station spatiale, où ils vivent une vie entièrement assistée par la technologie. On leur a vendu un monde où ils n'auraient pas à réfléchir à quoi que ce soit, où ils seraient nourris et où tout serait calculé pour leur bien-être et leur confort. Le résultat ? Après quelques décennies de ce régime, les Hommes sont devenus inadaptés

pour un possible retour sur Terre. Ils ressemblent à des enfants de 4 ou 5 ans, vierges de toute expérience. L'apprentissage est nécessaire, et les erreurs aussi ! Dans l'hypothèse d'une vie entièrement algorithmisée, faire des erreurs sera un luxe, et seuls ceux qui comprendront les technologies pourront décider d'utiliser certains outils plutôt que d'autres.

Je me souviens d'une discussion avec Gaspard Koenig, fin 2018, dans un restaurant japonais près de l'avenue de l'Opéra à Paris. Il me parle de l'été qu'il a passé à voyager dans le monde à la recherche de réponses à ses questions sur l'intelligence artificielle et à la place de l'homme dans cette révolution. Entre deux gorgées de saké chaud, il me provoque gentiment en affirmant qu'il est sûrement inutile de se battre si le monde peut mieux fonctionner sans notre intervention. « Si les algorithmes choisissent pour nous, pour notre bien, pourquoi se battre ? Après tout, notre but dans la vie n'est-il pas d'être tout simplement heureux ? » Et Gaspard de prendre l'exemple des applications pour les conducteurs d'Uber en Chine, qui leur indiquent des toilettes ou des lieux de restauration sur leur chemin, en prédisant leurs besoins avant même qu'ils les expriment. Ces mêmes applications imposent aux chauffeurs les clients à prendre, ainsi que la route pour atteindre la destination. Tout est fait pour améliorer la circulation, le travail du conducteur et le bien-être des passagers. Plus besoin de réfléchir, les algorithmes sont faits pour ça. J'ai bien vu que Gaspard exagérait. J'insiste : « Même si on apprécie ce principe d'optimisation, il y a tout de même des limites. » Tout d'abord, de tels principes encouragent encore davantage l'idée d'écarter l'humain de l'équation. Si l'algorithme peut tout faire et que le chauffeur n'a plus qu'à conduire son véhicule, il risque fort d'être remplacé dans le futur par la voiture autonome. Il y a même de fortes

probabilités que cela arrive un jour, d'ailleurs. Espérons que les chauffeurs Uber de Chine et d'ailleurs le comprennent et entretiennent leur habileté à discuter avec leurs clients, voire à les faire rire, pour mieux se distinguer de l'algorithme. Au fond, c'est là l'une des opportunités de la révolution algorithmique : elle nous oblige à miser sur ce qu'il y a de plus humain en nous, et sur notre créativité.

Comme Gaspard persiste à jouer l'avocat du diable, je lui parle de la nécessité d'avoir le choix. Si nous n'avons plus le choix, nous perdons cette liberté qui fait de nous des animaux politiques et sociaux sophistiqués. Nous risquons de devenir des êtres sans intérêt, qui ne réfléchissent plus, comme les zombies de la station spatiale de *Wall-E*. Je ne pense plus, donc je ne suis plus ! Sans aller jusqu'à statuer qu'il suffit d'avoir le choix pour être libre, c'est néanmoins une des conditions préalables. Sans compter que l'absence de choix diminue la sensation de plaisir qui s'accroît à la suite d'une bonne décision.

Les applications mises sur le marché se proposent toutes de nous faciliter la vie et de nous rendre plus heureux, dis-je en demandant un dernier saké. Mais il existe de nombreux exemples dans lesquels l'utilisation des algorithmes, poussée à l'extrême, conduit plutôt à l'effet inverse. Je pense notamment aux applications de *dating*, et engage la discussion sur ce point. Gaspard avait choisi le premier exemple pour soutenir son argument, c'était à mon tour de biaiser la discussion à mon avantage. J'ai toujours trouvé les applications de *dating* affreusement limitées. Les critères de sélection et de *matching* sont selon moi naïfs et parfois réactionnaires. Personnellement, je me moque de savoir si mon partenaire amoureux idéal aime les animaux, les voyages et a déjà été marié avec deux enfants. En quoi cela ferait-il de lui mon

prince charmant ? J'ai toujours pensé que, s'il existait une application de *dating* efficace, c'était plutôt LinkedIn (ce que me confirme Kim, une amie de New York qui travaille pour le réseau social). En ce qui me concerne, la vision du monde, les ambitions, l'ouverture d'esprit et la capacité à communiquer des gens m'importent bien plus que tout le blabla qu'ils pourraient mettre en profil sur Meetic... Les sites de rencontres vous encouragent à trouver l' élu de votre cœur sur des considérations de similarités précaires. Franchement, avec un peu plus de culture algorithmique, beaucoup de gens s'éviteraient des soirées parfois très gênantes ! Certes, j'ai des amis qui ont trouvé le grand amour grâce à des applications qui musclent le pouce... Mais cela reste dérisoire comparé à la masse d'individus qui utilisent ces outils en dépensant une énergie et un temps ridicules à chercher, sélectionner et rencontrer, sans y trouver ni leur compte, ni l'amour, ni le bonheur. Je ne parlerai pas non plus des biais algorithmiques qui se cachent dans ces outils. Mais il est évident qu'entre les critères explicitement définis par des concepteurs majoritairement masculins, blancs et judéo-chrétiens de moins de quarante ans, et les critères implicites développés par l'algorithme, tout est réuni pour qu'en bout de course ces applications soient hautement discriminantes. Pour preuve, on voit apparaître des sites de rencontres pour homosexuels, pour seniors ou pour personnes de couleur, alors qu'en théorie toutes les catégories de population devraient pouvoir cohabiter dans une même application. Encore faudrait-il que les algorithmes soient bien écrits et correctement implémentés, et qu'en cas de *machine learning* ils fassent leur apprentissage sur des ensembles de données non biaisées. J'adorerais pouvoir un jour analyser ces algorithmes pour voir comment ils ont été dimensionnés au départ et dévoiler leurs biais de conception.

Et quand bien même ces outils ne seraient pas remplis de biais, qu'en serait-il ? Imaginons, dans un futur plus ou moins lointain, qu'un algorithme absolument parfait puisse vous fournir sans se tromper une liste de partenaires avec lesquels vous auriez une vie heureuse. Je n'aime pas cette idée. Nous avons tous eu des partenaires qui n'étaient peut-être pas idéaux, mais avec lesquels nous avons construit, nous avons appris de nos choix mais aussi et surtout de nous-mêmes. Certains partenaires ont pu être des compagnons parfaits à certains moments de notre vie et moins à d'autres, ce qui résume souvent les causes d'une rupture. Et je reste persuadée que les combinaisons les plus surprenantes et hasardeuses peuvent créer les plus beaux couples.

Nos tasses de saké sont vides, et Gaspard finit par m'avouer qu'aucun algorithme ne lui aurait proposé son épouse, si différente de lui. Conclusion parfaite ! Voilà qui achève de démontrer que, s'il y a bien un domaine que l'algorithme ne devrait pas toucher, c'est l'amour. Néanmoins, nous sommes libres : il existe des applications de *dating*, de rencontres extraconjugales et de liaisons sans lendemain, et c'est tant mieux. Mais en comprendre le fonctionnement et les limites est un atout majeur pour naviguer intelligemment sur un « marché de l'amour » algorithmisé. Encore une fois, seuls ceux qui comprendront auront le choix !

Et l'amour charnel dans tout ça ?

Dans les années 1960 a commencé une révolution sexuelle qui a libéré les hommes et les femmes des préjugés et de contraintes sociales qui les entravaient dans de nombreux domaines. La pilule contraceptive, le droit à l'avortement, la fin de la censure au cinéma et dans la littérature, l'égalité des sexes face à la loi – et, plus tard, la libération homosexuelle

avec le mariage pour tous. Cette révolution n'a pas tout résolu. À ma grande surprise, il aura fallu attendre 2017 pour enfin voir le clitoris figurer sur les schémas anatomiques des organes génitaux féminins dans les manuels scolaires. En parallèle, une autre révolution apparaît, relativement silencieuse mais qui n'en fait pas moins occasionnellement couler de l'encre : c'est la révolution algorithmique sexuelle. Nous avons depuis longtemps des jouets sexuels. Les sextoys restent tabous dans nos cultures, associés qu'ils sont au célibat et à la masturbation. Seuls 14 % des Français disent en avoir un et, dans 70 % des cas, ils sont utilisés... en couple ! Le sextoxy joue en effet un rôle de facilitateur ou d'accompagnateur pendant l'acte sexuel : en posséder un ne signifie pas qu'on préfère un objet de quelques centimètres, fût-il parfaitement *designé*, à un partenaire en chair et en os !

Les sextoys se modernisent : ils sont de plus en plus connectés, certains se commandent à distance... Dans le même temps, on voit apparaître de véritables poupées sexuelles. On ne compte plus les articles de presse et les documentaires qui se penchent sur ces humains siliconés. À croire qu'il est plus facile de parler de poupées sexuelles que de sextoys ! Peut-être parce que le sextoxy est explicitement sexuel, tandis que les poupées de silicone n'ont pas directement de connotation sexuelle : on insiste volontiers sur leurs caractéristiques émotionnelles, sur leur ressemblance avec l'être humain... Nous retrouvons ici l'effet ELIZA, dans toute sa puissance. L'apparence humaine de la poupée lui apporte une sensibilité que même le *rabbit sextoxy* du livre et de la série *Sex and the City* n'a pas ! Ces poupées sexuelles sont par ailleurs étonnamment abordables. Aujourd'hui, en Asie, pour quelques milliers d'euros, vous pouvez vous procurer une « femme de compagnie » silencieuse, fidèle, docile, qui ne contredit jamais

son « époux », et immunisée contre les migraines. Devrions-nous nous préoccuper, nous autres femmes occidentales, de l'arrivée de ces partenaires de substitution ? Devrions-nous répondre par l'acquisition de robots masculins à l'écoute, romantiques, fidèles, infatigables et attentionnés ? Difficile à dire quand on sait que ces robots sont aujourd'hui féminins dans l'écrasante majorité, dimensionnés par des hommes hétérosexuels.

Ces poupées sexuelles sont fortement biaisées, conçues par des hommes pour satisfaire les critères de beauté des hommes asiatiques. Et que dire de leurs algorithmes ? Je ne connais pas assez le fonctionnement de ces machines pour en présager. On peut néanmoins imaginer que le vocabulaire de ces robots est composé de réponses préenregistrées, donc définies explicitement par un groupe d'humains, ou implicitement par une étude biaisée sur des données exprimant les envies des hommes. Une chose est certaine, ces biais mettront plus de temps à être mis au grand jour que pour d'autres algorithmes... tout simplement parce que peu de propriétaires oseront se plaindre publiquement de discrimination technologique concernant leurs poupées. C'est un sujet délicat. Les femmes n'ont eu aucun problème à se plaindre publiquement de l'absence des dates de menstruations dans les paramètres enregistrables de l'application Health d'Apple, mais on imagine moins facilement des hommes protester contre un vagin artificiel ayant une forme biaisée pour une large catégorie de la population masculine occidentale.

On sait peu de choses sur ces femmes siliconées, mais elles intriguent. Plus exactement : elles font peur. On y voit une menace pour la sexualité, et pour l'Amour, avec un grand A... Les humains du futur se contenteront-ils de partenaires sexuels plastifiés ? Se rendront-ils dans des cliniques de reproduction

pour avoir une descendance avec un ou une partenaire dont le profil ADN aurait *matché* algorithmiquement le leur ? Et alors, *quid* des enfants ? Tout cela me rappelle le film *Demolition Man* (1993), où un policier, John Spartan (Sylvester Stallone), revient dans le futur après des décennies de cryogénie. Il en pince pour sa partenaire Lenina Huxley (Sandra Bullock). Alors qu'elle lui propose ouvertement d'avoir un rapport sexuel, ils se retrouvent dans son salon, casque de réalité virtuelle sur la tête et capteurs et émetteurs sur le corps, pour entamer un rapport sexuel... à distance. Frustration de John ! Lenina se justifie en évoquant les risques de maladies sexuellement transmissibles. Et pour la procréation, ajoute-t-elle, il existe des hôpitaux spécialisés. Cette scène résume assez bien ce qu'on pourrait imaginer avec l'arrivée de poupées sexuelles. La différence avec la scène de *Demolition Man* serait que le sexe ne se ferait plus entre humains, mais avec des poupées algorithmisées. On peut imaginer pire encore : que les humains se détournent de la procréation et deviennent esclaves de leurs amours de substitution. On observe déjà quelques catastrophes familiales et amoureuses qui ont poussé des hommes à quitter leur femme pour une poupée. Certains ont même réussi à se remarier avec leur robot, en Afrique et en Asie.

Je reste optimiste, car je connais les dessous technologiques de ces robots ; ces scénarios devraient rester du domaine de la fiction, ou de l'exception. Attention pourtant à ne pas les balayer d'un revers de la main, ou d'une remarque ironique. Certains, en France, avancent que nos cultures latines sont trop romantiques pour que l'arrivée sur le marché de ces amours algorithmisées ait un impact réel. C'est possible. Quoi qu'il en soit, cette discussion ne pourra se tenir qu'en connaissant les tenants et aboutissants algorithmiques et technologiques de ces

outils. Car, ne nous mentons pas, s'ils restent aujourd'hui très limités, ils ne pourront que s'améliorer à l'avenir. L'apparence physique progressera vers plus d'incarnation « humaine », avec des matériaux qui imiteront toujours davantage la texture, la couleur et la température de la peau humaine. Ces matériaux intelligents biomimétiques auront également la capacité de changer de couleur, d'élasticité ou encore de température en fonction du niveau d'excitation que l'on souhaitera simuler. L'anatomie et l'esthétique se diversifieront. Quant aux interactions verbales et mécaniques avec les humains, elles ne peuvent aller qu'en s'améliorant. Une intelligence artificielle contenant des algorithmes ultra-performants, comme dans le film *Her*, habitera sûrement les prochaines générations de poupées. Cela étant dit, même avec une température variable, des pupilles qui se dilatent et des mots habilement choisis, ces femmes algorithmisées ne seront en aucun cas excitées par la présence et les gestes de leur propriétaire. Elles simuleront une excitation, sans la maîtriser. Il y a par ailleurs un point qu'il ne faudrait pas oublier trop vite : c'est que le cerveau est le premier organe sexuel ! Il interagit avec notre environnement pour déclencher et animer notre excitation, et bien évidemment le sentiment amoureux. Pour espérer gagner la bataille de l'amour, ces amas de silicone et d'algorithmes prétendument parfaits que sont les poupées devront s'armer d'une intelligence générale, et donc ressentir des émotions. Si tel était le cas, alors nous entrerions dans une ère post-singularité technologique. Ce qui est difficilement imaginable : cela supposerait une cartographie et une analyse exhaustives du comportement dynamique du cerveau humain, afin de modéliser et de simuler son fonctionnement complet. Même une source infinie de puissance de calculs et l'arrivée de l'ordinateur quantique ne pourraient venir à bout d'une telle complexité et d'une si forte abstraction. Les robots sexuels

continueront – et de mieux en mieux – à simuler une excitation, un plaisir orgasmique, voire un sentiment amoureux... Mais ils ne le ressentiront jamais ! Qu'on se rassure : la révolution algorithmique ne se transformera pas en crise démographique mondiale. Encore faut-il comprendre leur fonctionnement pour avoir le choix de ne pas devenir esclaves de ces machines.

C'est à nous, et à nous seuls, de décider de la forme des évolutions sociales qui accompagneront la révolution algorithmique. À nous de nous assurer qu'elles soient émancipatrices et positives, et qu'elles ne fassent de mal à personne. Les efforts doivent venir de tous les côtés, et à tous les niveaux. Nos dirigeants politiques et économiques doivent comprendre davantage. Élus, législateurs, dirigeants d'entreprises ou d'institutions publiques : tous doivent assimiler les mécanismes algorithmiques et analytiques pour mieux décider. Nous devons éduquer les plus jeunes à devenir des utilisateurs éclairés des technologies, à s'interroger davantage sur leurs objectifs quand ils utilisent une application ou un objet connecté, ou encore à agir en faisant remonter les informations quand ils pensent détecter un biais algorithmique. Soyons libres d'utiliser des robots sexuels, mais, surtout, restons libres, en comprenant comment ils fonctionnent. Ne bouchons plus nos yeux et nos oreilles face à la technologie, ce serait le pire moyen de renforcer la création et la propagation de biais algorithmiques. Avec pour conséquence de creuser encore davantage le fossé entre les citoyens. Ce serait rompre notre contrat social et notre indispensable cohésion.

Oui, nous avons du travail devant nous. Mais ne rien faire accroîtrait d'autant celui que nous devons faire demain, car la technologie avance toujours plus vite. Et gardons-nous aussi

des fausses solutions. Ne nous abandonnons pas à la fatalité qui voudrait que la technologie prenne inéluctablement le pas. Ne cédon pas non plus à la révolte : il y a d'autres moyens, bien plus efficaces, de faire bouger les lignes.

Je ne pense pas que nous devions tous devenir des experts en algorithmique pour pouvoir faire des choix éclairés. Mais il faut que, individuellement et collectivement, nous comprenions le fonctionnement de base des algorithmes. Que nous cessions d'y voir une sorte de magie, et de croire les messages (souvent publicitaires) qui prétendent que les algorithmes font tout mieux que les humains. Car c'est faux ! Certes, les algorithmes sont plus performants que nous dans de nombreux domaines. Mais il en existe aussi de mal conçus, ou truffés de biais. Et quand bien même ils seraient parfaits (si cela devait exister pour trouver le grand amour, par exemple), cela ne veut pas dire que nous aurions intérêt à les utiliser... Dirigeants, journalistes, consommateurs ou citoyens : tous, à notre niveau, nous devons améliorer notre culture algorithmique, et urgemment. Il n'y a qu'ainsi que nous pourrons tenir les débats collectifs qui nous permettront d'envisager l'avenir ensemble – avec confiance ou avec méfiance, chacun choisira : mais au moins, avec plus de raison que de passion.

-
1. « Une entreprise qui travaillait pour Trump a exploité les données de millions de personnes ».
 2. Sur cette question, voir mon article dans *Le Point*, 15 décembre 2018.
 3. Aurélie Jean, note n° 2 de la collection « Une proposition pour construire l'avenir » du cabinet Asterès, décembre 2018.

Conclusion

Voilà déjà presque vingt ans que je voyage au pays des algorithmes – ce pays qui me fascine et m'intrigue toujours autant. L'histoire a commencé un peu naïvement en 2000 avec mon tout premier ordinateur ; elle se termine avec un peu moins de légèreté en 2019, avec des biais algorithmiques que je continue de traquer et d'éviter.

Aujourd'hui, à travers l'entreprise que j'ai créée, je continue à développer des algorithmes dans divers secteurs, avec toujours le souci de rendre les applications numériques aussi inclusives que possible. Je consacre aussi une partie de mon temps à la recherche, à l'enseignement et à des contributions éditoriales. Je continue à transmettre ce que je sais, ce que je comprends du monde numérique, ainsi que mes questionnements. J'espère donner aux lecteurs de mes articles une certaine hauteur de vue et de nouvelles perspectives sur les grands sujets technologiques et scientifiques de notre temps. J'espère aussi inspirer encore et toujours les prochaines générations de scientifiques, les filles en particulier.

Je suis différente, et je me considère comme une privilégiée car j'ai toujours fait ce que je voulais faire, sans penser à ce que je représentais. Cela, vous l'aurez compris, je le dois en grande partie à mes grands-parents.

Je suis toujours passée au large des clichés, j'ai souvent eu l'impression de naviguer à contre-courant, mais, tout au long de mon parcours, j'ai été soutenue par une vague continue de bienveillance, et je tenais dans ce récit à remercier toutes celles et ceux qui ont été mes compagnons de voyage – parfois mes guides.

Je mentirais si j'écrivais que tout a été simple. Au contraire ! Il y a eu des concessions, des déceptions, mais qui m'ont toujours enrichie, d'une manière ou d'une autre. Ces dix-neuf années m'ont vue grandir, apprendre, changer. Forcément changer. Je suis moins naïve car je comprends davantage le poids de mon travail sur le reste du monde. Mes rencontres ont fortement alimenté mon apprentissage et le développement de mon sens critique. Médecins, ingénieurs, journalistes ou économistes, ils ont tous contribué à améliorer les algorithmes de ce voyage. Ils m'ont aussi évité certaines erreurs. J'ai réalisé que je n'étais pas mieux que les autres : j'ai mes biais, moi aussi, je vois les choses sous mon propre prisme. Développer une certaine humilité face à l'immensité et la complexité du monde virtuel est nécessaire si l'on veut comprendre notre monde organique.

Je me souviendrai toujours du déclic, de ce moment qui m'a fait réaliser que ce que je faisais dans le monde virtuel numérisé avait un impact sur le monde réel. Nous sommes en octobre 2015, cela fait déjà quatre ans que je suis au MIT, dans l'équipe de Raúl Radovitzky. Notre papier sur le modèle de prédiction des risques de traumatisme crânien chez l'humain a été publié quelques mois plus tôt dans le journal de l'Académie des sciences américaines, il continue à faire du bruit au sein de la communauté scientifique, mais aussi des médias. Je suis heureuse de voir comment Raúl, John Joannopoulos et tous les membres de l'équipe parlent de cet article. La première équipe à développer une loi mathématique obtenue entièrement à partir de simulations numériques de traumatismes crâniens, il y a de quoi être fiers ! Un soir, alors que je m'appête à quitter mon ordinateur pour retrouver des amis, je reçois un e-mail d'une nature très particulière. Je ne connais pas l'expéditeur mais l'objet m'interpelle : « Merci

pour votre article ». Je l'ouvre et découvre un long message avec des mots choisis. C'est un homme qui me remercie pour mon article et pour mon travail. Il a l'air personnellement touché par mes résultats. Au bout de quelques lignes à expliquer l'importance selon lui de telles recherches, il sort de sa coquille : « Je reviens d'Irak, où j'ai été exposé à plusieurs engins explosifs, écrit-il. J'ai été diagnostiqué tardivement de traumatisme crânien. Ma vie est depuis difficile [...]. Grâce à vos calculs, vous aidez des soldats comme moi. Vous aidez les médecins à diagnostiquer et donc à traiter ces traumatismes. » Il me parle de sa vie, de son quotidien pénible avec ses pertes de mémoire et ses angoisses nocturnes. Je savais que mon travail servait à quelque chose ; je n'avais pas réalisé à quel point. Tout était si théorique dans mon esprit, aucune émotion, jusqu'à ce jour, n'était venue s'asseoir aux côtés de ma rationalité. Je ne compte pas les « merci » de son message. Je suis émue, mes collègues me demandent si je vais bien, j'ai l'air inquiète. Je leur réponds avec la voix qui vibre : « Je vais bien... Ce qu'on fait sert vraiment à quelque chose ! » Je leur fais lire le message : ils sont gênés, mais heureux. Ils ne savent pas quoi dire...

Moi-même, je ne trouve les mots que le lendemain. Et j'écris à cet homme un long message pour lui parler de l'importance de son e-mail dans mon voyage au pays des algorithmes...

Ce voyage m'a aussi fait découvrir à quel point comprendre le fonctionnement des outils numériques est fondamental pour défendre nos libertés dans un monde qui se complexifie à vue d'œil. Et à quel point nous, scientifiques et concepteurs d'algorithmes, devons faire preuve d'ouverture et de vulgarisation, au lieu de nous retirer dans nos tours d'ivoire et laboratoires. Depuis ma thèse, je m'applique à ce devoir de

pédagogie. Durant ce voyage, j'ai expliqué le fonctionnement de mes algorithmes à des microscopistes, des cardiologues, des neurologues, des chimistes, ou encore des économistes, afin qu'ils les nourrissent – et qu'ils challengent par la même occasion mes hypothèses. Mon travail a souvent été remis en question, critiqué et retourné dans tous les sens, mais mes algorithmes en ressortent de bien meilleure qualité ! J'ai aussi décidé de parler des algorithmes à un public aussi large que possible, parce que les technologies numériques et les algorithmes arrivent dans nos vies à tous, et souvent de façon invasive. Les scandales et les mensonges en tout genre m'encouragent chaque jour un peu plus à vouloir transmettre et expliquer. Je suis souvent attaquée par une minorité de commentateurs qui sous-entendent l'inutilité de ma démarche. Certains pessimistes disent que les gens ne comprendront jamais. D'autres que je tiens un discours condescendant en pensant que les gens ne sont pas capables de comprendre par eux-mêmes. D'autres encore prennent systématiquement mes propos et mes critiques comme des accusations personnelles. L'ego mal dompté et surdimensionné est le pire ennemi de l'humanité, je l'observe régulièrement.

Heureusement pour moi, la majorité soutient une telle démarche. Si chacun d'entre nous comprend, à la hauteur de ses moyens, ce que sont les données, leur rôle dans les algorithmes et ce qui ressort de ces algorithmes, le pouvoir démocratique ne sera que plus grand. Défendre ses libertés, c'est connaître ses droits. Aujourd'hui les droits de chacun s'articulent autour des usages des technologies numériques, qui décident parfois en partie pour nous et nous assistent dans nos métiers et dans nos vies. En comprenant leurs ressorts, on appréhende plus facilement les limites de l'intelligence artificielle, mais aussi le champ des possibles. Comme le dit

Antoine Bordes, chercheur en intelligence artificielle : « Il faut distinguer ce que l'IA sait faire de ce qu'elle ne sait pas encore faire... et de ce qu'elle ne saura jamais faire ! » Cette phrase, *a priori* banale, cache une énigme que chacun d'entre nous doit soulever. Chacun doit pouvoir distinguer ces trois ensembles des réelles capacités de l'IA. Ce livre est une petite brique pour contribuer à l'effort gigantesque de traduction pédagogique des sciences numériques au plus grand nombre. J'espère que sa lecture aura déclenché des discussions, des questionnements, des sourires... et pourquoi pas des vocations !

L'histoire des algorithmes ne s'arrête pas à un laboratoire de recherche ou aux départements R & D des entreprises. C'est notre histoire à tous, collectivement et individuellement. Mon voyage m'a emmenée dans une salle de calculateur, dans un bloc chirurgical, sur le lieu d'un attentat, dans une classe, dans une salle des marchés, dans une agence de presse, et même dans le désert ! Je l'ai voulu sans frontières, et surtout sans *a priori*. Et quoi qu'en dise le titre de ce livre, le personnage central de ce voyage n'est pas l'algorithme, encore moins ma personne... Le personnage clé de cette histoire, c'est le biais algorithmique. C'est lui qui nous plonge dans une passion nous empêchant de raisonner efficacement. On accuse les algorithmes faute d'avoir d'autres coupables sous la main. On hurle au scandale sans chercher à *éviter* les scandales. On voudrait en découdre, mais sans le choix des armes. Autrement dit : on tourne en rond, dans un cercle dont le rayon ne cesse de diminuer, en réduisant au passage nos propres degrés de libertés. Il est grand temps d'en sortir.

Nous avons tous des biais et c'est tant mieux. Les éliminer reviendrait à vivre dans une société lisse, sans goût et sans relief (de toute façon, n'y pensons pas : si d'aventure des

idéalistes se fixaient un tel objectif, il serait impossible à atteindre). Les biais ne sont pas tous mauvais – et même les moins bons n’ont pas tous des conséquences catastrophiques. Nous n’en devons pas moins chasser les biais qui ont des effets discriminatoires. Encore faut-il les reconnaître ! Comprendre le « cycle de vie » d’un biais, comment il se transmet de l’humain à l’algorithme, puis à l’outil numérique : voilà le meilleur moyen de changer notre posture face aux outils technologiques. Dans mon métier, je deviens une sorte de « développeur responsable » d’algorithmes. Dans ma vie, une utilisatrice éclairée des outils et une collaboratrice exigeante des acteurs du numérique. Je connais mes droits, je comprends une partie de la logique et, même si je ne maîtrise pas tous les éléments, j’ai les armes pour poser des questions qui ont du sens et qui défendent mes intérêts. Cette posture est celle que nous devons tous adopter. Et nul besoin pour cela de devenir un expert scientifique de la donnée... Au contraire, peut-être ! J’ai moi-même souvent la tête dans le guidon et les gens qui m’entourent m’aident à prendre du recul pour mieux analyser les situations. Comme ma grand-mère de 84 ans, qui a compris (grâce à moi !) le principe de géolocalisation et se méfie de ce qu’on puisse nous localiser à tout moment. Elle n’a jamais utilisé d’ordinateur ni Internet, mais elle en comprend le principe et l’utilité. Elle a même compris le principe des cookies, même si elle trouve le nom idiot ! Comme disait le Pr Richard Feynman : « Si vous ne savez pas expliquer quelque chose simplement, c’est que vous ne l’avez pas compris. » J’ajouterai : « Si personne ne vous pose de questions suite à votre explication, c’est que vous n’avez pas été suffisamment clair ! » La curiosité est l’une des plus belles qualités : la déclencher chez les autres est, pour moi, une source de joie immense et une satisfaction personnelle.

Cette conclusion n'en est pas une. Ce n'est qu'une pause dans un voyage sans fin. Ces dernières pages sont aussi une invitation pour chacun à écrire son propre voyage dans le pays des algorithmes. À l'image du bac à sable algorithmique qui est un dossier dans lequel, nous scientifiques, rassemblons tests et prototypages avec les échecs et les réussites qui les accompagnent, nous devons tous créer notre sandbox¹. La vie est le plus grand des bacs à sable : on y apprend sans cesse par nos erreurs, par nos découvertes, par nos rencontres. Aucun algorithme ne saurait fournir une telle sagesse, car la rationalité, pourtant si précieuse, n'est pas toujours suffisante pour agir. Écouter ses intuitions est aussi un capteur efficace pour évaluer une situation. Je ne l'ai appris que récemment, mais comme je le dis souvent : il y a toujours une première fois !

Bon voyage à vous.

1. Bac à sable en anglais.

Remerciements

J'ai cité de nombreuses personnes dans ce livre que je remercie profondément de m'avoir accompagnée dans ce voyage qui continue encore aujourd'hui. Vous êtes tous devenus des amis chers. Vous m'avez mise au défi, vous m'avez appris, vous m'avez souvent fait sourire, et surtout vous m'avez aidée.

Ce livre est le résultat d'une belle collaboration avec les éditions de l'Observatoire. Je remercie Muriel, Emmanuel, Alice et Bertrand pour leur confiance, leur dynamisme et leur fidélité. Merci également pour la patience dont vous avez fait preuve à reprendre minutieusement chacun de mes anglicismes maladroits !

Je remercie Gaspard de m'avoir permis d'écrire dans sa collection « De facto » et de ses conseils précieux. J'ai commencé cette aventure avec un collègue, je l'ai finie avec un ami.

Je remercie mes proches des deux côtés de l'Atlantique, dont la réussite, la bienveillance et l'humilité m'inspirent chaque jour un peu plus. Votre amitié et votre soutien sont le meilleur des carburants ! Je remercie aussi ma famille américaine de cœur : Jane et Brian Krantz, et mes sœurs, Sarah et Rachel. *I met you almost ten years ago in Boston, and since then you have always been there for me, like family.*

Je souhaite enfin remercier ma famille pour son soutien inconditionnel, et en particulier mes grands-parents, Albert et Hélène Jean, qui m'ont élevée avec un amour sans limite et une ouverture d'esprit sans frontières. Ils m'ont donné pour la vie un bagage que je souhaite à tous les enfants de ce monde. Ce livre leur est dédié.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction

Il y a toujours une première fois

1 - Un peu d'histoire

La Perse : là où tout a commencé... ou presque

Une pause au jardin (mathématiques appliquées)

L'algorithme n'est pas une recette de cuisine (mais l'inverse est vrai)

Welcome to the Neguev Desert

2 - Mes premiers algorithmes

La découverte du langage et des questions sans réponse

Mon premier « vrai » algorithme

Le paradoxe de la simulation : passer par le virtuel pour comprendre le réel

Un algorithme de modélisation de la morphologie des nanoparticules

De l'algorithme au code informatique

Les choix sacrificiels des hypothèses

3 - Une rencontre sans fin : les biais algorithmiques

De la mécanique numérique... à la médecine

Vous avez dit « biais algorithmique » ?

Les biais algorithmiques explicites

Les biais algorithmiques implicites

Les paradoxes de l'observation

Les biais sont le meilleur ennemi du scientifique

De la médecine à Wall Street : algorithmes, journalisme... et politique

Biais II – Le retour

4 - Nous sommes tous coupables de ces biais

Quand la confusion s'installe

Le procès des algorithmes : acquittement demandé !

Le livreur de pizzas du MIT

Biais versus statistiques : quand les algorithmes renforcent les inégalités existantes

Il y aura toujours des biais

L'apprentissage, un amplificateur des conséquences des biais algorithmiques

Que les scientifiques redeviennent philosophes... et que les philosophes s'intéressent à la science !

Régulations, autorégulations... et autres solutions

5 - Où est donc la réalité ?

Gare aux gourous du virtuel

Améliorer le miroir algorithmique : à la frontière entre réel et virtuel

Catégoriser le monde pour mieux le comprendre

Les limites des catégories (ou comment j'ai moi-même échappé aux biais)

L'ordinateur quantique serait-il la solution ?

6 - D'une révolution algorithmique vers une crise sociale ?

Une révolution incomprise

Lutter par l'éducation

Le choix appartiendra à ceux qui comprennent

Et l'amour charnel dans tout ça ?

Conclusion

Remerciements



www.editions-observatoire.com

Suivez les Éditions de l'Observatoire sur les
réseaux sociaux

