

TURING



À LA PLAGÉ

**L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
DANS UN TRANSAT**

RACHID GUERRAOUI • LÊ NGUYỄN HOANG

TURING



À LA PLAGE

**L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
DANS UN TRANSAT**

DUNOD

À Anne.
Rachid Gerraoui

À ma grand-mère, *Nhat Nguyễn.*
Lê Nguyễn Hoang

Principe graphique de collection, conception et illustration de la couverture :
Marie Sourd, Atelier AAAAA

Crédits typographiques : *A is for* (titraillle) & *Carrara* © Hoftype (texte courant)

Illustrations de l'intérieur : Rachid Marai

© Dunod, 2020
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-079555-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PROLOGUE



TURING, UN GÉNIAL PRÉCURSEUR

Qui n'a jamais entendu parler d'Alan Turing, mathématicien et cryptologue britannique de génie? Le film *Imitation Game*, sorti en salles en 2015 avec Benedict Cumberbatch à l'affiche, a contribué à le faire connaître auprès du grand public, en forçant quelque peu le trait sur son caractère torturé et solitaire. Le film retrace notamment le rôle déterminant joué par Turing pendant la Seconde Guerre mondiale: ce dernier a réussi à casser le code des machines Enigma – réputées inviolables – avec lesquelles l'armée allemande chiffrait ses communications.

Turing est également l'inventeur du fameux « test » qui met à l'épreuve la faculté d'une machine à discuter avec un être humain. Chaque année, la remise du prix Loebner place ainsi les bots conversationnels sous les feux des projecteurs. Si l'intérêt scientifique de ces compétitions paraît

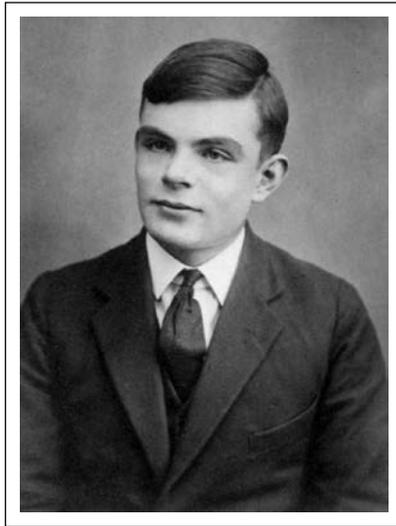
limité, le concept du test de Turing s'est largement diffusé dans la culture populaire ; il est régulièrement repris dans les œuvres de fiction faisant figurer des androïdes, comme le film de science-fiction *Ex Machina* (2015) ou encore la série télévisée *Westworld* (2016).

D'Alan Turing, on connaît aussi la fin tragique. En 1952, suite à la déclaration d'un cambriolage de son appartement à la police, il révèle avoir fourni ses clés à un ancien amant. Il se retrouve condamné pour pratiques indécentes en compagnie d'un autre homme, l'homosexualité étant alors criminalisée au Royaume-Uni (la loi, datant de 1885, ne fut abrogée qu'en 1967). Les autorités lui proposent un choix cornélien : la prison ou la castration chimique. Il choisit la seconde option. Les produits qu'on lui demande d'ingurgiter l'empêchent néanmoins de réfléchir correctement et nuisent à sa forme physique. Le 8 juin 1954, il est retrouvé mort dans son lit. Sur sa table de nuit trône un reste de pomme qui aurait été empoisonnée au cyanure... Une légende urbaine tenace voudrait d'ailleurs que le logo d'Apple, à la pomme croquée, soit un hommage à Alan Turing.

Icône gay, héros de la Seconde Guerre mondiale, génie torturé au destin brisé... Mais qui était vraiment Alan Turing ?

Alan Mathison Turing est né à Londres en 1912. Sa mère Sara, ancienne étudiante à la Sorbonne, est ingénieure. Son père, Lucius, est un haut fonctionnaire du gouvernement britannique. La famille Turing est aisée, mais

Alan grandit loin de ses parents, qui sont mutés en Inde et le laissent chez des amis en Angleterre. Sa mère racontera qu'au fur et à mesure de ses retours en Angleterre, elle retrouve un enfant de moins en moins social.



Alan Turing à l'âge de 16 ans.

Alan Turing passe une grande partie de son temps seul et lit beaucoup. Il a comme livre de chevet *Les merveilles de la nature que tout enfant devrait connaître*, un ouvrage dans lequel les organismes vivants sont représentés comme des machines. Cette lecture a sûrement imprégné sa vision du monde. Il aime contempler la nature. Ses anciens camarades ont rapporté qu'il pouvait s'arrêter en plein match de hockey pour observer des fleurs. Alan Turing est distrait et il le sait. Il est aussi d'une naïveté déconcertante, doublée d'une logique à toute

épreuve. Lorsque sa mère lui demandait de promettre d'être sage, il répondait que certes il promettait, mais qu'il craignait d'oublier sa promesse. Sa rigueur logique le conduit aussi à refuser de signer sa carte d'identité, car il y est mentionné qu'il ne faut rien écrire dessus.

Alan Turing entre à l'internat du collège de Sherborne à 13 ans, en 1925. Le jour de sa rentrée coïncide avec une grande grève des chemins de fer. Il rejoint donc l'internat à vélo en couvrant une distance d'une centaine de kilomètres. Les journaux locaux rapportent l'exploit du jeune Turing, mais lui trouve cela normal ; on lui avait dit de ne pas rater le jour de la rentrée !

Ses années à Sherborne ne sont pas faciles. Son caractère distrait lui attire les moqueries de ses camarades. Son manque d'intérêt pour la religion et les matières littéraires agace nombre de ses professeurs. Certains demandent même son renvoi. Ses exploits scientifiques le sauvent néanmoins à chaque fois de l'expulsion. Pendant un cours de religion, il peut par exemple calculer des dizaines de décimales du nombre π .

C'est à cette époque qu'Alan Turing s'éprend de son camarade Christopher Morcom¹. Mais ce dernier décédera quelques années plus tard, après avoir consommé du lait avarié. Turing admirait beaucoup l'esprit scientifique affûté de Christopher ; il sera profondément et durablement affecté par son décès.

En 1931, Turing est admis à l'université de Cambridge. Il a 21 ans. Il avait demandé à entrer au prestigieux

Trinity College, mais sera finalement admis au Kings College. Sa mauvaise réputation auprès de certains professeurs lui jouera encore des tours. Il obtient une bourse d'étude en prouvant le théorème fondamental de la limite centrale : la somme de variables aléatoires indépendantes tend toujours vers une loi normale². Turing ignorait que ce résultat avait déjà été démontré quelque dix ans auparavant ; il est donc accusé de tricherie. Mais la démonstration de Turing est suffisamment originale pour que certains professeurs croient en sa sincérité et le défendent.

En 1936, Alan Turing écrit un article fondateur : « On Computable Numbers, with an Application to the *Entscheidungsproblem* ». Il y décrit une machine qui deviendra le modèle de nos ordinateurs, une machine universelle qui peut exécuter tous les algorithmes possibles et imaginables. Cette avancée le consacre comme le « père » de l'informatique moderne.

Alan Turing part ensuite finir son doctorat à l'université de Princeton aux États-Unis. John Von Neumann, autre figure emblématique de l'informatique, tente alors de recruter Alan Turing à Princeton ; mais la Seconde Guerre mondiale éclate. Turing retourne en Angleterre, où il rejoint le quartier général des services de renseignement britannique, à Bletchley Park, pour briser le système de cryptage de la machine Enigma. Turing est acharné au travail. Pour se délasser, il fait de la course à pied. Quand il est convoqué pour des réunions à Londres, il parcourt 75 kilomètres dans chaque sens. Sans une blessure qu'il se fait à une jambe, il se serait même qualifié

pour l'épreuve du marathon aux Jeux olympiques ! Bien que la bataille de la Manche (1940-1941) ait sûrement été gagnée grâce aux travaux de cryptanalyse de Turing, ce dernier ne recevra aucune distinction officielle. Ses travaux restèrent longtemps classés secret-défense, de peur que d'autres puissances étrangères ne s'en saisissent.

Après 1945, Alan Turing reprend ses recherches sur les machines universelles. En 1950, il écrit son fameux article sur les machines qui pensent, « *Computing Machinery and Intelligence* ». En 1952, il écrit aussi un programme de jeux d'échecs. Il prédit que les machines battront les humains, ce qui arrivera quelques décennies plus tard. Turing travaille aussi sur la morphogénèse. Vers la fin de sa vie, il avancera des hypothèses fondamentales pour expliquer pourquoi les fleurs de tournesol et les écailles d'une pomme de pin prennent la disposition particulière que nous leur connaissons.

Bref, c'est ce destin exceptionnel que nous vous proposons de découvrir dans les pages qui suivent. L'héritage de Turing est extraordinairement fécond, et il est plus que jamais d'actualité. Dès 1936, puis en 1950, ce dernier a jeté les fondements de ce qu'on appelle désormais l'intelligence artificielle. Depuis une décennie, celle-ci bouleverse notre quotidien ; elle est en train de transformer en profondeur les modes de production, les habitudes de consommation, les processus de décision... Et pour mieux comprendre ce qu'est l'intelligence artificielle et imaginer l'ampleur de la révolution à venir, il est utile de revenir sur les pas de Turing.

CHAPITRE 1



AU CŒUR DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

À quoi ressemblerait une machine douée d'intelligence artificielle? Et de quoi serait-elle capable? Pourrait-elle «penser»? Pour répondre à ces questions, Alan Turing s'attacha d'abord à caractériser la nature des machines et à définir leurs capacités. Ce faisant, il en vint à formaliser la notion d'algorithme. À l'en croire, l'intelligence des machines réside nécessairement dans l'algorithme qu'elles exécutent.

Additionner 6 à 7 est facile: nous savons que le résultat vaut 13. Pas besoin de réfléchir. L'information est stockée quelque part dans notre cerveau. Nous l'avons enregistrée après l'avoir apprise sur les bancs de l'école. Et c'est le même constat pour l'addition de n'importe quelle paire de chiffres: nous connaissons le résultat car nous nous en souvenons.

Additionner les nombres 57 et 76 est un tout petit peu moins facile. Mais l'opération reste assez simple, même sans calculatrice. Voici la marche à suivre sur une feuille de papier. Tout d'abord, on place les deux nombres à additionner l'un au-dessus de l'autre. On additionne ensuite les chiffres les plus à droite (6 et 7). On écrit le dernier chiffre du résultat (3) sous la barre, en notant la retenue 1 à côté des deux chiffres de la colonne voisine, à gauche. On ajoute cette retenue aux deux chiffres à gauche (5 et 7). Enfin, on écrit le résultat en dessous (13); l'addition est terminée, le résultat obtenu est 133.

Nous venons d'exécuter un algorithme, c'est-à-dire une liste d'instructions élémentaires et d'opérations logiques.

$$\begin{array}{r}
 1 \\
 57 \\
 + 76 \\
 \hline
 133
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 1 1 \\
 57 \\
 + 76 \\
 \hline
 133
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 1 1 \\
 57 \\
 + 76 \\
 \hline
 133
 \end{array}$$

Qu'en est-il de la somme de 757 et 876? Et de la somme de 987 654 327 689 757 et 768 976 966 876? La tâche est à peine plus difficile. Il suffit d'exécuter le même algorithme que pour 57 et 76, c'est-à-dire de répéter les mêmes étapes élémentaires: (a) additionner les chiffres sur une colonne, (b) noter le résultat et la retenue, (c) se décaler à gauche. On poursuit le processus tant qu'il reste des chiffres à additionner.

Mais pourquoi cet algorithme d'addition fonctionne-t-il? Pourquoi donne-t-il le bon résultat, même avec de grands nombres? Nous nous posons rarement

de telles questions. Nous nous contentons d'exécuter l'algorithme en suivant les instructions à la lettre, comme une recette de cuisine.

En particulier, cet algorithme d'addition nous est si familier que nous ne nous rendons pas nécessairement compte qu'il dépend du système de numération, c'est-à-dire de la façon de noter les nombres. Ce système de numération a d'ailleurs révolutionné l'histoire des mathématiques. Il s'agit du système de numération indo-arabe, aussi appelée « notation positionnelle décimale ». C'est cette notation qui permet l'astuce des retenues. C'est aussi cette notation qui réduit une addition de nombres à une répétition d'additions de chiffres. Si les nombres sont écrits en notation romaine, par exemple LVII et LXXVI pour 57 et 76, l'algorithme n'est pas applicable.

En fait, pendant longtemps, la capacité à effectuer les additions (et surtout les multiplications) de nombres était une compétence rare, réservée aux scribes, aux arpenteurs-géomètres et à quelques autres savants. Puis vint Algorithmi³.



L'HOMME « ALGORITHMI »

Au VIII^e siècle, un mathématicien perse s'est penché sur les méthodes d'addition des nombres. Son but n'était pas seulement de réaliser lui-même des additions, mais de trouver une astuce pour que n'importe qui soit capable d'effectuer toutes sortes d'additions. Pour y arriver, il adopta la notation décimale proposée par

des savants indiens. Celle-ci représente les nombres avec des chiffres de 0 à 9. Et de façon cruciale, elle accorde une importance particulière au placement de ces chiffres : la valeur d'un chiffre dépend de sa position. Comme vous le savez très bien, 109 et 910 représentent des nombres différents, même s'ils sont composés des mêmes chiffres.

Grâce à cette notation, l'algorithme d'addition devint facile à décrire et à exécuter. Il suffisait de savoir additionner des chiffres et de suivre méthodiquement les instructions de l'algorithme pour réussir à additionner de très grands nombres. Cet algorithme est si simple que, désormais, l'écrasante majorité des enfants le maîtrisent dès le plus jeune âge.



Portrait fictif du mathématicien perse Algorithmi.

Le mathématicien qui rendit le problème de l'addition facile s'appelait Al-Khwarizmi (env. 780-850); il est plus connu en Occident sous le nom d'Algorithmi. Le

Calife lui avait demandé, en tant que savant de la maison de la sagesse à Bagdad, d'instruire le peuple en imaginant des procédés qui mettraient la résolution de problèmes mathématiques à la portée de tous. Ce dernier ne se doutait certainement pas que le terme « tous » allait englober, quelques siècles plus tard, des machines qui pourraient aussi appliquer ces recettes et paraître intelligentes.

Algorithmi ne se contenta pas de l'addition : il inventa toute une collection de procédés et les rassembla dans un livre intitulé *Algèbre et Comparaison*, inaugurant du même coup une nouvelle branche des mathématiques consacrée aux nombres et aux équations. Son livre de recettes était le premier livre consacré aux algorithmes. Il contenait par exemple la multiplication basée sur la notation positionnelle décimale, que vous avez aussi apprise dès le plus jeune âge. Cet algorithme est un peu plus complexe que l'addition. D'une part, il nécessite la mémorisation d'une table de multiplications, d'autre part, il faut exécuter plusieurs opérations élémentaires. Nous y reviendrons dans le chapitre suivant.

Ce livre exposait aussi une méthode simple aujourd'hui enseignée au lycée pour résoudre toute équation du second degré. Encore une fois, et contrairement à d'autres, Algorithmi ne chercha pas seulement à trouver les solutions d'une équation donnée. Tous les mathématiciens en étaient déjà capables. Ils s'appuyaient sur ce que l'on appelle les « identités remarquables », c'est-à-dire des égalités qui permettent de modifier l'écriture des équations par des factorisations et des développements

successifs. Cependant, la manipulation de ces identités remarquables s'avère parfois compliquée, surtout avant l'arrivée de l'algèbre d'Algorithmi.

Le génie d'Algorithmi fut de réfléchir à une recette systématique. Avec cette recette, il suffit d'exécuter quelques opérations arithmétiques simples, à savoir trois multiplications et une soustraction, pour calculer un premier nombre, le fameux «discriminant». Sa valeur fournit des informations précieuses sur le nombre de solutions de l'équation. On exprime ensuite très facilement les solutions à partir de ce discriminant.

On n'appela toutefois pas ces recettes des «algorithmes» tout de suite. Il fallut attendre deux cents ans pour qu'un moine anglais du XII^{e} siècle, Adelard de Bath, suggère d'utiliser le nom latinisé du mathématicien perse pour nommer les procédés de calculs «algorithmes».

Avec ces algorithmes, quiconque peut paraître «intelligent». Il suffit d'effectuer les calculs exigés par l'algorithme. Et de façon étrange, il n'est pas nécessaire de comprendre pourquoi l'algorithme fonctionne, ni de comprendre ce que nous faisons pour paraître intelligent.

Si Algorithmi fut vraisemblablement le premier à réunir dans un livre un ensemble d'algorithmes, et à les décrire dans un langage unifié, il ne fut pas le premier à en imaginer. Les algorithmes existent depuis que des humains ont eu l'idée de concevoir des recettes permettant de résoudre des problèmes compliqués à partir d'étapes élémentaires simples.

Plus de 3 000 ans avant notre ère, par exemple, les bergers du Croissant fertile appliquaient déjà un algorithme pour vérifier qu'ils n'avaient perdu aucun mouton suite à un déplacement du troupeau. Au moment du départ, à chaque fois qu'un mouton quittait l'enclos, le berger déposait un caillou dans un récipient initialement vide. À l'arrivée, à chaque fois qu'un mouton entrait dans l'enclos, le berger retirait un caillou du récipient. Une fois que la totalité du troupeau s'était massée dans l'enclos, le nombre de cailloux qui demeuraient dans le récipient correspondait au nombre de moutons perdus. En un sens, le récipient et ses cailloux servaient ainsi de machine à calculer. D'ailleurs, le mot latin « *calculus* », qui signifie « caillou », donnera plus tard le terme « calcul », l'unité élémentaire d'exécution d'un algorithme.

L'exécution d'un algorithme n'est ainsi qu'une succession de calculs aussi simples qu'ajouter ou retirer un caillou d'un récipient.

Plus tard, dans l'Antiquité, le mathématicien grec Euclide (actif autour de 300 avant notre ère) décrivit par exemple un algorithme permettant de trouver le plus grand diviseur commun entre deux entiers. Son algorithme très simple se contentait de répéter des divisions dites « euclidiennes », où l'on met en valeur le quotient et le reste. Les historiens ont également rapporté des exemples d'algorithmes chez les Babyloniens, ainsi que dans les anciennes civilisations égyptiennes, indiennes et chinoises – c'est le cas par exemple de l'utilisation d'un triangle de côtés 3, 4 et 5 pour tracer un angle droit.