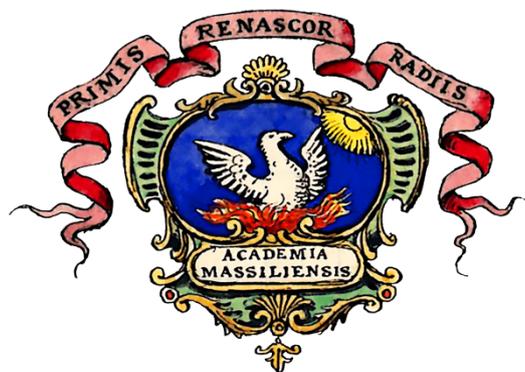


Discours de réception à l'Académie des Sciences, Lettres et Arts de Marseille

Jean Sequeira

Le 17 avril 2024



Madame La Présidente,
Monsieur le Chancelier,
Madame et Messieurs les secrétaires perpétuels,
Mesdames les Académiciennes et Messieurs les Académiciens,
Mesdames et Messieurs,

Je suis très ému, et très fier à la fois, de me retrouver devant vous pour ce discours de remerciements, vous qui m'avez fait l'honneur de m'accepter parmi les vôtres au sein de l'Académie des Sciences, Lettres et Arts de Marseille. De plus, le fait que cette cérémonie ait lieu dans cet amphithéâtre, me rappelle également les trois décennies que j'ai passées à l'Université d'Aix-Marseille, ce qui rend encore plus forte cette émotion.

Je voudrais remercier chaleureusement mes deux parrains, Messieurs Michel Delaage et Patrick Cozzone, qui m'ont amené à candidater à l'Académie. Ils ne m'ont pas simplement proposé de candidater mais m'en ont parlé, m'ont expliqué le rôle de l'Académie, de son action et surtout ce que sont et ce que font les Académiciens. J'ai été séduit, j'ai candidaté et vous, Académiciens, m'avez élu le 21 décembre dernier au fauteuil n°29, ce dont je vous remercie. Et je n'ai pas été déçu – il s'agit-là d'une litote : j'y ai trouvé des valeurs de partage et de transmission, beaucoup de chaleur et d'amitié, et aussi une ouverture très enrichissante en matière scientifique, littéraire et artistique. Quel bonheur que de pouvoir échanger et apprendre dans des domaines aussi divers et variés !

Pour tout cela, je remercie tous les Académiciens, et plus spécialement la Présidente, Madame Marina Lafon-Borelli, le Chancelier, Monsieur Gérard Detaille, et les secrétaires perpétuels.

Si je suis ici, devant vous, c'est aussi grâce à de nombreuses personnes qui ont su me donner des valeurs morales, me guider, me conseiller et m'aider à redresser ma route lorsque je me fourvoyais. Ces personnes ont été des membres de ma famille, des amis mais aussi certaines personnalités du monde de l'enseignement et de la recherche avec qui j'ai eu un lien étroit : je leur dois de m'avoir aidé à voir clair en moi et permis ainsi d'être pleinement heureux dans ma carrière professionnelle, et dans ma vie en général.

J'ai gardé pour la fin de ces remerciements les personnes qui me sont les plus chères et qui m'ont aussi le plus apporté, par leur amour et leur affection : je veux citer mon épouse, Claire, et mes quatre enfants, Sébastien, Nicolas, Julie et Nathalie. Je me permets de clôturer cette première partie des remerciements avec quelques mots supplémentaires pour mon épouse, ici présente, car elle m'a toujours soutenu (y compris dans les épreuves les plus terribles), elle s'est toujours intéressée à mon activité professionnelle, et ce malgré le fait qu'elle ait eu, et a toujours, elle-même une activité professionnelle dense. Et enfin, elle m'a même fortement aidé à préparer cette cérémonie : si elle est réussie, je le lui dois en grande partie.

Je vais à présent rendre hommage à mon prédécesseur au fauteuil n°29, le Professeur Henri Tachoire.

Je voudrais, avant même de rendre cet hommage, remercier Madame Marie-Christine Tachoire, fille du Professeur Henri Tachoire, qui m'a fait l'honneur d'accepter mon invitation à cette cérémonie, et qui se trouve ici, parmi nous. Et je salue également la présence de Thibault, petit-fils d'Henri Tachoire.

Je n'ai jamais eu le plaisir ni l'honneur de rencontrer Henri Tachoire, que ce soit à l'Académie, où je viens tout juste d'entrer, ou à l'Université car nous étions d'universités, de disciplines et de générations différentes. Et je le regrette car, à travers les témoignages que j'ai pu recueillir et les documents auxquels j'ai eu accès, j'ai compris que c'était quelque'un d'extraordinaire tant au niveau scientifique que sur le plan humain.

Je ne vais pas décrire les travaux scientifiques d'Henri Tachoire en matière de thermodynamique pour deux raisons :

- Tout d'abord, cela a été fait, et très bien fait, lors de la journée d'hommage qui lui a été consacrée, en particulier à travers l'intervention de Michel Delaage qui, à l'appui de son discours, a évoqué l'équation de convolution au cœur du problème du « calorimètre », a fait référence au phénomène d'instabilité de Tikhonov et a présenté l'idée, pragmatique et très intelligente, qu'a eue Henri Tachoire pour la résoudre, illustrant, par là même, sa capacité à prendre de la hauteur sur la manière d'aborder un problème scientifique, en ne restant pas « le nez dans les équations ».
- La deuxième raison est que mon dernier contact avec la thermodynamique date d'il y a une cinquantaine d'années et je serai certainement bien en peine d'exprimer clairement les idées novatrices qu'il a développées.

Comme cela a été dit lors de cette journée d'hommage, Henri Tachoire a laissé une trace forte et durable au niveau scientifique dans les domaines de la thermodynamique et de la thermochimie, et en particulier dans celui de la calorimétrie.

La modélisation et la résolution des problèmes en calorimétrie fait intervenir des notions complexes qui s'inscrivent dans des domaines scientifiques différents tels que la thermodynamique et la chimie, mais aussi les mathématiques, avec, entre autres, le traitement du signal et l'analyse spectrale. Tous ces domaines, Henri Tachoire les maîtrisait, ce qui montre son ouverture d'esprit, sa curiosité scientifique et sa capacité à approfondir un domaine différent de celui dans lequel il évoluait. C'est un atout nécessaire pour créer, inventer, innover, et qui est précieux pour pouvoir dépasser les clivages entre les disciplines et produire une recherche de qualité.

De prime abord, la recherche dans le domaine de la calorimétrie pourrait apparaître comme extrêmement spécifique, voire marginale : il n'en est, bien sûr, absolument rien tant au niveau

théorique qu'en ce qui concerne ses applications et son utilité dans des domaines extrêmement variés de la vie de tous les jours.

Nous pourrions, par exemple, nous demander « mais à quoi sert un calorimètre ? ». Et même, en premier lieu : « qu'est-ce que la calorimétrie ? ». Sans entrer dans les détails ni dans l'histoire des sciences, nous pouvons dire simplement que la calorimétrie est la partie de la thermodynamique qui a pour objet le calcul et la mesure de la chaleur – qui n'est pas juste la température – et cela concerne en particulier les échanges de chaleur dans des systèmes qui peuvent être complexes et très « fins », comme en microbiologie par exemple, ou dans des environnements que nous pourrions qualifier d'hostiles (à la température de l'azote liquide comme dans des phénomènes de combustion à plus de 1500°C). Qui plus est, les calculs et les mesures doivent être extrêmement précis et fiables.

La science s'est véritablement intéressée à la calorimétrie au XVIII^{ème} siècle, en essayant de donner un sens précis à la notion de chaleur. Et c'est à Marseille que s'est développée une véritable école scientifique dans ce domaine, dans la première partie du XX^{ème} siècle avec les travaux d'Albert Tian et d'Edouard Calvet, à l'origine de la calorimétrie moderne. Le calorimètre d'Albert Tian a été conçu en 1922 et la contribution d'Edouard Calvet a fait l'objet d'un brevet en fin 1949 et d'une utilisation dans les années 70 par un nombre important d'universités et d'industriels de premier plan de par le monde (comme IBM, Shell, Kodak, Aérospatiale, Texaco, Unilever, et bien d'autres). Ce sont eux, Albert Tian et Edouard Calvet, qui ont été les maîtres d'Henri Tachoire et qui lui ont donné la vocation pour cette discipline.

Prenant la suite de leurs travaux, Henri Tachoire a fait progresser de manière qualitative la calorimétrie, avec l'aide de Jean-Paul Dubès – qui a été son thésard, pour la partie « traitement du signal » et « électronique ». Il a mis en place des collaborations aux niveaux national et international, qui lui ont permis de confronter ses résultats avec ceux obtenus par d'autres approches, et d'améliorer ainsi son calorimètre. Enfin, il a développé une collaboration avec Paul Cléchet, de l'École Centrale de Lyon, pour aborder et résoudre certains problèmes théoriques, ce qui les a amenés à concevoir un calorimètre adiabatique pour la détection d'impuretés dans un échantillon dont les performances, en termes de sensibilité, ont permis de passer à une détection de 20 ppm (parties par million) alors qu'elle n'était que 50 ppm chez son concurrent, Rossini, du National Bureau of Standards (NBS). A la suite de cette prouesse, le NBS, qui est la référence mondiale, lui a proposé de rejoindre cet organisme – ce qui est un honneur rarissime pour un chercheur français.

Au-delà de ses capacités purement scientifiques et de son aptitude à élargir le spectre de ses connaissances dans d'autres domaines de la science, Henri Tachoire a su développer tout un réseau, établir des relations avec d'autres chercheurs, aussi bien institutionnels qu'industriels et faire en sorte que ses avancées dans le domaine de la calorimétrie soient utiles à la société. Et c'est le cas dans de nombreux domaines comme, par exemple, l'industrie pharmaceutique, la chimie du pétrole, la biologie, ou encore la polymérisation.

J'en viens à présent à un autre volet de l'activité d'Henri Tachoire : le partage et la transmission, qui sont deux valeurs importantes de l'Académie des Sciences, Lettres et Arts de Marseille. Patrice Bret, historien français des Sciences et Techniques, et Bruno Vila, de l'Université d'Aix-Marseille, ont qualifié Henri Tachoire d'historien des sciences et de contributeur à la sauvegarde du patrimoine scientifique. En tant qu'historien des sciences, il a en effet publié plusieurs ouvrages, parmi lesquels :

- Une « Histoire de la Thermochimie », en 1994, avec Louis Médard, Ingénieur Général des Poudres
- « Marseille – 2600 ans de découvertes scientifiques », en 2002, qui est un ouvrage en trois volumes, dont il a été le co-éditeur mais aussi l'auteur de près d'un tiers des articles

- Et tout un ensemble de monographies majeures dont celles dédiées à Pierre-Victor Galtier, dont les travaux sur la vaccination contre la rage ont précédé et inspiré ceux de Pasteur, mais aussi à Pierre-Antoine Favre, pionnier de la calorimétrie et de la thermochimie, et à Marcelin Berthelot, chimiste, biologiste et homme politique, entre autres.

La curiosité d'Henri Tachoire ne s'est pas arrêtée aux personnalités scientifiques puisqu'il a écrit également :

- sur l'Abbé Raynal, écrivain, historien et philosophe du XVIII^{ème} siècle qui s'est attaqué au colonialisme et à l'esclavagisme (le tricentenaire de la naissance de l'Abbé Raynal a été célébré en 2013, sous l'égide de l'UNESCO et Henri Tachoire y a pris part activement en y faisant une conférence)
- et sur Claude-François Achard, médecin et encyclopédiste provençal de la deuxième partie du XVIII^{ème} siècle, qui fit partie de l'Académie des Sciences, Lettres et Arts de Marseille.

Entré à l'Académie en 2001, Henri Tachoire en avait été le Secrétaire Perpétuel pour la Classe Sciences de 2005 à 2017. Il s'y était très fortement investi et y avait aussi établi des liens étroits avec plusieurs Académiciens ; c'est en discutant avec eux, que j'ai pu voir qu'il n'était pas qu'un confrère, mais beaucoup plus : un ami, quelqu'un sur qui ils pouvaient compter, avec qui ils ont partagé beaucoup de moments et dont le souvenir est toujours fortement présent.

Je terminerai donc ces remerciements en exprimant l'honneur que j'ai à succéder au Professeur Henri Tachoire au fauteuil n° 29, lui qui a tant donné à la science et à la mémoire de la science, et à laquelle il laissera une trace durable.

J'essaierai de me montrer digne de cet honneur et m'engage à transmettre et à partager mes connaissances dans le domaine où je suis expert, à savoir les mathématiques et l'informatique, et plus particulièrement les disciplines de l'Image Numérique et de l'Intelligence Artificielle. Je m'engage également à me mettre au service de l'Académie des Sciences, Lettres et Arts de Marseille et à contribuer à son bon fonctionnement.

Je vais à présent poursuivre mon discours sur un thème d'actualité que j'ai intitulé :

Des algorithmes à l'Intelligence Artificielle : entre craintes légitimes et fantasmes

L'Intelligence Artificielle est un sujet de recherche scientifique très sérieux, très complexe et très prometteur. C'est aussi une réalité technologique et c'est surtout ... un sujet à la mode dont se sont emparés les médias, le cinéma, les réseaux sociaux, les politiques et ... au final, tout le monde ! De même qu'à la suite d'une défaite de l'équipe de France de football, il y a plusieurs dizaines de millions d'entraîneurs potentiels qui expliquent, sans douter ne serait-ce qu'une seconde, ce qu'il fallait faire pour gagner, tout le monde a un avis sur l'Intelligence Artificielle, même si pour la plupart, ces personnes n'ont absolument aucune idée de ce dont il s'agit, ainsi que de ses capacités et de ses limites !

Alors, certaines craintes sont légitimes, et il est nécessaire de les prendre en compte. Et d'autres ne sont que des fantasmes issus de la difficulté à séparer ce qui est fiction de ce qui est réalité, fantasmes en général renforcés par la rumeur qui joue son rôle d'amplificateur. Je vais illustrer mon propos avec deux films que j'aime bien : « Ennemi d'état » avec Will Smith et Gene Hackman, réalisé en 1998, et « Soleil Levant », avec Sean Connery et Wesley Snipes, réalisé en 1993.

Dans « Ennemi d'état », Will Smith court dans la rue et ne relève pas la tête parce qu'on lui dit que s'il le fait, le satellite le détectera grâce à la reconnaissance faciale. Si on tient compte qu'à l'heure actuelle, en 2024, la résolution maximale des satellites est de l'ordre de 30 cm, c'est-à-dire qu'un carré de 30 cm de côté est représenté par un seul pixel, je vous laisse deviner la reconnaissance faciale qu'il est possible de faire ainsi ! Dans « Soleil levant », une personne passe, dans l'obscurité, devant un miroir dont on a une image grâce à une caméra de vidéo-surveillance ; on arrive quand même à voir quelques pixels (des gros carrés de couleur uniforme) et à partir de ça, grâce à « un algorithme » (c'est magique !), ils obtiennent le portrait de la personne qui est passé devant le miroir, avec un piqué qui rendrait jaloux les plus grands photographes ... étonnant, non ? Et je n'étais pas au bout de mon étonnement quand de nombreuses personnes, dont des scientifiques – et parmi eux des collègues – m'ont dit « ce doit être difficile, certes, mais ils y arrivent, tout de même ».

Pendant longtemps, on a entendu « dedans, il y a un algorithme » : ça conférait à la « chose » qui était « dedans » un mystère insondable qui laissait libre cours à l'imagination. Et puis, à force, l'imagination s'est fatiguée, s'est banalisée et on est passé à « c'est l'Intelligence Artificielle » ... et même « c'est une Intelligence Artificielle » ce qui n'a pas de sens au niveau scientifique, mais qui a un effet marketing très fort !

Récemment, nous avons dû faire installer une alarme pour notre maison et, ayant travaillé, il y a une quinzaine d'années, sur la « reconnaissance d'activité » avec l'Université de Montréal et aussi à la vidéo-surveillance dite « intelligente » avec la Police Scientifique de Marseille, je me suis dit « ils doivent avoir fait des progrès intéressants dans les systèmes d'alarme grand public », et ce d'autant plus que les vendeurs font état de la présence « d'une Intelligence Artificielle ». Malheureusement, en fait d'Intelligence Artificielle, il n'y en a pas le moindre soupçon ni même le moindre algorithme de détection digne de ce nom ... tout juste le comptage d'échos de radar ou de pixels ayant changé de valeur ! Mais le marketing a été bien fait.

Alors, prenons un peu de hauteur sur tout ça et voyons ce qu'il en est.

Tout d'abord, qu'est-ce qu'un algorithme ? Un algorithme n'est rien d'autre qu'une méthode numérique pour résoudre un problème. Le mot a été créé à partir du nom d'un mathématicien persan arabisé Al-Khwarizmi du début du IX^{ème} siècle, dont les travaux ont permis, entre autres, l'introduction de l'algèbre en Europe, après leur traduction en latin au XII^{ème} siècle. Mais les algorithmes existent depuis l'origine des mathématiques : nous connaissons, par exemple, l'algorithme d'Euclide, que nous avons tous étudié à l'école, pour trouver le Plus Grand Diviseur Commun de deux entiers et qui date de bien avant Jésus Christ. Vu sous cet angle, le concept d'algorithme devient bien moins mystérieux !

Il faut cependant ajouter quelque chose d'important : pendant que nous, êtres humains, avons besoin d'un temps conséquent (plusieurs secondes par exemple) pour effectuer une opération élémentaire, un ordinateur peut en effectuer plusieurs milliards. Par exemple, si je veux connaître tous les nombres premiers inférieurs à un million, le plus petit ordinateur portable les trouvera en moins d'une seconde, ce que, je pense, aucun être humain ne serait capable de faire. Qui plus est, le programme pour le faire est très simple et tient sur une dizaine de lignes de code mettant en œuvre un algorithme conçu par Ératosthène, il y a plus de 2200 ans.

Finalement, l'ordinateur n'a fait preuve ici d'aucune « intelligence », il n'a fait que ce que nous lui avons dit de faire, mais que nous n'étions pas capable de faire « pratiquement » ! En revanche, nous sommes capables de prendre une décision, en notre âme et conscience, en nous appuyant sur notre expertise, notre bon sens, nos valeurs, et en nous aidant aussi, bien sûr, de ce qu'a trouvé l'ordinateur. Il y a là une très bonne complémentarité.

La seule question, à ce niveau-là, est : devons-nous décider par nous-même ou devons-nous laisser l'ordinateur décider ? La réponse n'est pas binaire et dépend du niveau de prise de décision, de sa pertinence et surtout de ce qu'on aura conçu pour assurer une « protection » autour de la prise de décision.

Je vais prendre un exemple : la plupart d'entre nous disposent d'une carte de crédit et effectuent donc des paiements ou se connectent simplement à leur banque à distance. Il y a des milliards d'opérations chaque jour et pourtant, il n'y a jamais eu le moindre piratage à ce niveau-là ! La banque peut se faire pirater, nous pouvons nous faire pirater ... mais pas la transaction ! Surprenant, non ? En fait, il y a une petite cinquantaine d'années (en 1977), trois chercheurs – Rivest, Shamir et Adleman – ont inventé le cryptage RSA (ce sont leurs initiales) dit « à clé publique » : pour la première fois, deux personnes (ou deux ordinateurs) pouvaient communiquer de manière totalement publique (y compris le mode de codage et la clé) sans que les personnes (ou ordinateurs) qui « écoutent » puissent comprendre quoi que ce soit de ce qui a été échangé sur la ligne.

A la base de tout cela, il y a un algorithme extrêmement simple : une fonction (mathématique) dont le calcul est « instantané » (il s'agit de l'exponentielle modulaire), qu'on sait « inverser » théoriquement (il s'agit de la fonction dite réciproque - le logarithme modulaire) si ce n'est que le calcul de cette fonction inverse prendrait des milliards d'années sur les ordinateurs les plus puissants !

Revenons maintenant à la question-clé : « à présent que nous savons communiquer publiquement sans que quiconque ait accès à ce que nous échangeons, qu'allons-nous en faire ? » ... je veux dire « au niveau sociétal » et pas en termes d'usages (car ils sont nombreux). En effet, cela nous permet d'effectuer des achats à distance, de communiquer librement sans qu'il y ait d'atteinte à notre vie privée, etc. mais cela permet aussi à un groupe de terroristes de communiquer, organiser, perpétrer des actes odieux sans que nous puissions y faire quoi que ce soit !

En fait, dans toute avancée scientifique, technologique, ou technique, il y a potentiellement du très bon et du très mauvais. Essayer de bloquer ces avancées est utopique car impossible et inconséquent, même si la tentation est forte pour certains politiques et qu'il existe des médias pour le proposer ! Nous allons l'illustrer à partir de l'exemple précédent : l'idée développée par Rivest, Shamir et Adleman est géniale, mais un enfant du primaire peut la comprendre (l'opération la plus compliquée est la division de deux entiers !) et son codage ne nécessite qu'une dizaine de lignes de programme. Et, de toutes manières, un jour ou l'autre, cette idée aurait été trouvée par quelqu'un d'autre.

Alors que faire ? La réponse est simple et tient en deux points :

- le scientifique doit communiquer clairement et précisément au public, et au politique en particulier, ce que sont les enjeux, les tenants et aboutissants, et les risques de sa découverte
- le politique doit mettre en place les moyens humains, organisationnels et technologiques pour qu'on puisse profiter pleinement de cette avancée en évitant ou en limitant les risques associés.

Nous pouvons, à présent, tirer de tout cela quelques conclusions :

- tout d'abord, les algorithmes n'ont pas le caractère mystérieux et tout puissant qu'on voudrait bien leur attribuer
- ensuite, par essence, un programme, qui est la mise en œuvre d'un algorithme, prend des décisions au cours de son exécution pour arriver à un résultat ; mais, à la fin, le programme

n'a pas tout pouvoir pour « prendre une décision » à partir de ce résultat (sauf ... dans certains films de science-fiction)

- la réponse aux risques de toutes sortes liés aux « algorithmes » n'est pas dans la censure ni dans l'autocensure de la recherche scientifique mais dans la transparence de cette recherche et dans une gestion politique responsable de ces risques.

Comme vous avez pu vous en rendre compte, cette conclusion dépasse le cadre restreint des « algorithmes » mais elle sera pour nous une manière de poser les bonnes questions à propos du sujet qui nous intéresse, et qui celui de l'Intelligence Artificielle.

Alors qu'est-ce que l'Intelligence Artificielle ? Nous pouvons dire que c'est un ensemble de théories et de techniques permettant de simuler l'intelligence humaine. Le but, ici, n'est pas de dissenter sur une définition ni de confronter les différentes visions de ce qu'est l'intelligence – nous en aurions pour des journées de discussions, certainement très intéressantes – mais de fournir un cadre pour discuter des questions qui se posent autour de « l'Intelligence Artificielle ». De même, par la suite, j'utiliserai le mot « connaissance », qui peut couvrir des champs sémantiques totalement différents, même dans le domaine philosophique, et là aussi, je me référerai à un cadre « classique » de sa définition en essayant de ne pas offenser ceux qui l'appréhendent dans un cadre différent.

L'histoire commence dans les années 50 et plus précisément en 1956, lors d'une « École d'été ». Celle-ci, qui eut lieu au Dartmouth College d'Hanover, dans le New Hampshire aux Etats-Unis, en fut l'évènement fondateur. Ce séminaire regroupait des chercheurs prestigieux tels que Marvin Minsky, John McCarthy, Nathaniel Rochester, Claude Shannon, et bien d'autres encore. Et c'est au cours de cette « École d'été » que John McCarthy a proposé le nom d'Intelligence Artificielle et d'en faire un domaine à part entière des Mathématiques et de l'Informatique.

Les personnages que j'ai cités sont des références dans cette discipline, et autour de cette discipline :

- Marvin Minsky était également un expert en sciences cognitives et un philosophe (il a publié en philosophie, et en particulier deux ouvrages dont « La société de l'esprit » en 1986) – j'aurai l'occasion, par la suite, de revenir sur les liens entre l'Intelligence Artificielle et la philosophie et sur l'apport de Marvin Minsky
- John McCarthy est le père de l'Intelligence Artificielle dite « Symbolique » et par là-même du « raisonnement symbolique » ; pour cela, il a créé un langage qui est devenu très célèbre, le langage LISP
- Nathaniel Rochester a été le concepteur du premier ordinateur commercialisé et du premier langage de type « Assembleur » (c'était chez IBM)
- Claude Shannon est le père de la théorie de l'Information, avec le mathématicien russe Kolmogorov et le mathématicien hongrois Rényi

Je n'ai évoqué que ces quatre personnages mais il y eut, à la même époque, d'autres personnages importants, qui n'ont pas participé à cet évènement, et en particulier, un certain ... Frank Rosenblatt ! Frank Rosenblatt était psychologue et il a eu l'idée et la volonté, en 1957, de créer un cerveau artificiel basé sur un système de « neurones formels » interconnectés, chaque neurone formel ayant sa propre capacité d'apprentissage : c'était la naissance du « Perceptron », qui est « l'ancêtre » des systèmes actuels d'Intelligence Artificielle fonctionnant par apprentissage, parmi lesquels le « Deep Learning » dont vous avez certainement entendu parler.

L'idée du « Perceptron » de Frank Rosenblatt était excellente mais elle présentait trois défauts :

- L'idée de base était très bonne mais il ne l'a pas vraiment approfondie ; or, en l'état, elle ne permettait de résoudre que des problèmes linéaires ... ce qui est extrêmement pauvre et qui, d'ailleurs, a été fortement critiqué par Marvin Minsky et Seymour Papert (un autre chercheur important dans ce domaine)
- Elle ne laissait aucune place à la composante sémantique de l'intelligence, qui est incontournable
- Enfin, la technologie des années 50 à 70 (et même du début des années 80) ne permettait pas de développer cette approche, ce qui explique que la reprise des travaux de recherche sur les méthodes dites « connexionnistes » n'ait eu lieu qu'au cours des années 80.

Mais revenons à Marvin Minsky. Son recul et sa culture, à la fois scientifique et philosophique, l'ont amené à une vision très intéressante et fondatrice de l'Intelligence Artificielle. Quelque part, il s'appuie sur le fonctionnement supposé de l'être humain pour aborder cette question, sur la base d'une approche philosophique représentant un courant fort de ce qu'on appelle la « connaissance », auquel on associe le nom allemand de Weltanschauung. Je ne vais pas disserter au niveau philosophique, tout d'abord parce que je n'en ai pas les compétences et ensuite parce que ce ne serait pas pertinent dans cette présentation. Cela dit, dans l'évolution de la vision des rapports entre l'esprit humain et son environnement, il y a eu quelques philosophes qui ont apporté une touche novatrice forte et que je vais nommer ci-après, comme autant de jalons.

- Tout d'abord, dans la première moitié du XVIII^{ème} siècle, le philosophe irlandais George Berkeley, qui, dans son ouvrage « Principes de la connaissance humaine » va proposer une vision dans laquelle pour chaque être humain, le monde n'est pas ce qui est à l'extérieur de lui, mais en est sa représentation mentale propre qu'il appelle connaissance.
- Et puis, dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle, Emmanuel Kant, qui, dans la « Critique de la raison pure », présente le centre de la connaissance comme partie intégrante du « sujet connaissant » et non comme une réalité extérieure par rapport à laquelle nous serions passif. C'est lui qui est à l'origine de l'utilisation du mot Weltanschauung dont l'une des traductions est « Représentation du monde ».
- Et enfin, dans la même lignée, Arthur Schopenhauer puis Friedrich Nietzsche au XIX^{ème} siècle.

L'idée qui en émerge est que la connaissance n'est pas une description du monde (ce que nous pourrions qualifier de « savoirs ») mais est une représentation personnelle, pour chaque être humain, de ce qu'est le monde.

Naturellement, il existe d'autres courants de pensée qui présentent la connaissance différemment, et c'est l'essence même de la philosophie que de présenter des paradigmes différents qui nous amènent à nous questionner. Cela dit, ce paradigme-là représente un courant fort de la philosophie et si j'en parle ici, c'est tout simplement parce qu'il est à la base de la connaissance telle qu'utilisée en Intelligence Artificielle, en particulier sous l'impulsion de Marvin Minsky, si ce n'est qu'à présent c'est l'ordinateur et non l'être humain qui est au centre ... de toutes nos attentions !

Nous allons considérer un schéma de fonctionnement, un peu réducteur et pas totalement exact mais qui va nous permettre de comprendre un système d'Intelligence Artificielle. Ce schéma s'articule autour de quatre « blocs » qui sont les données, l'information, la connaissance et l'intelligence :

- Les données, c'est ce dont on dispose de manière brute : par exemple, pour un humain qui se déplace dans un environnement donné, ce sont, entre autres, les images qui arrivent sur sa rétine et qui vont aller vers le cerveau
- L'information, c'est ce que l'on peut extraire des données sans savoir à quoi celles-ci se rapportent ; par exemple, supposons qu'il acquière une image dans laquelle il y a simplement des lettres écrites en blanc sur un fond rouge ; l'information sera qu'il y a deux valeurs différentes (même pas deux couleurs !) dans des zones délimitées et qu'on peut séparer en composantes connexes
- La connaissance va lui permettre de reconnaître des caractères, de savoir que ces caractères peuvent être blancs sur fond rouge, qu'il existe des lettres « répertoriées » et qui va les associer aux lettres tracées
- L'intelligence, qui est notre capacité à réagir pertinemment par rapport notre environnement, va détecter qu'il y a écrit STOP et va nous faire nous arrêter ... si nous sommes en voiture !

L'Intelligence Artificielle doit permettre à un ordinateur de faire de même !

Revenons sur ces termes et tout particulièrement sur ceux d'Information et de Connaissance, dont nous avons déjà parlé.

Dans le langage courant, et en français en particulier, nous avons dévoyé le mot d'information en le mettant au pluriel, alors qu'il s'agit d'un concept global, et en l'associant parfois aux données et parfois à la connaissance, ce qui autorise tous les sophismes possibles. Ainsi, on parle « des informations » pour parler de la diffusion d'évènements à la radio ou à la télévision (ce sont typiquement des « données » - en anglais, on les appelle des « news ») ; et on entend aussi « avec les informations dont je dispose, je vais pouvoir agir de telle ou telle manière » alors qu'à ce moment-là il s'agit de la connaissance (enrichie par l'information acquise précédemment). Au final, en sautant ainsi d'un concept à un autre avec le même mot, on produit ce qu'on appelle ... de la désinformation. Claude Shannon avait très bien défini cela, en mettant au centre de son cadre théorique le concept d'entropie (introduit par Rudolf Celsius en thermodynamique en 1865) pour mesurer la quantité de désordre dans un signal – c'est-à-dire dans les données - comme dans un système en thermodynamique.

Nous avons parlé de la connaissance, et nous allons approfondir un peu ce concept. Nous sommes partis du principe que la connaissance est « la représentation du monde », et ce monde est formé de deux composantes : une composante tangible (les maisons, les ordinateurs, les êtres humains, etc.) et une composante intangible (le savoir-faire, les rêves, la foi, etc.). La question qui se pose à présent est : « comment acquérons-nous la connaissance ? ». Il y a deux voies principales pour l'acquisition de la connaissance :

- A travers l'enseignement : la connaissance est alors structurée, on apprend les schémas logiques porteur de cette connaissance, qui, de fait, à un sens – on l'appelle la connaissance sémantique (terme utilisé par Marvin Minsky en particulier)
- Et aussi, à travers l'usage : on pratique, en s'appuyant sur ce qu'on a appris, mais parfois, aussi, sans trop savoir ce que l'on fait et, à force de pratiquer, on s'améliore « intuitivement » - c'est la connaissance acquise par apprentissage, ou connaissance implicite.

Dans la pratique, l'acquisition de la connaissance n'est pas binaire : il est important d'apprendre pour comprendre, puis de pratiquer pour continuer à apprendre. C'était une idée maîtresse de Marvin Minsky qui disait : « aussi séduisante que soit une approche, elle ne peut se suffire à elle-même ; elle doit donc être multiple » (d'où sa critique du Perceptron et de Frank Rosenblatt qui pensait avoir trouvé le « modèle unique » à travers « le neurone formel »). Entre autres, Marvin Minsky est à l'origine de l'approche dite « de type multi-agents ».

Parfois aussi, l'apprentissage permet de découvrir des règles et d'enrichir ainsi la connaissance sémantique. On pourrait aussi dire que la connaissance sémantique, c'est la connaissance « avec modèle » et que la connaissance par apprentissage c'est la connaissance « sans modèle ».

Par exemple, un athlète de saut en longueur sera à l'écoute de son entraîneur, qui va lui expliquer comment gérer sa foulée, prendre son appel et se maintenir en l'air pendant le saut – l'athlète disposera alors d'une connaissance sémantique qui lui servira de support intellectuel pour améliorer ses sauts, corriger ses défauts. Ensuite cet athlète pratiquera, pratiquera, pratiquera – c'est l'apprentissage – et ainsi il s'améliorera, mais, peut-être aussi, comprendra-t-il comment il peut améliorer sa technique et enrichir ainsi sa connaissance sémantique.

C'est en se calquant sur ce schéma de fonctionnement que l'Intelligence Artificielle a évolué.

Depuis la fin des années 50, il y a eu les approches multi-agents, et puis aussi les systèmes experts et toute la problématique de la représentation de la connaissance : tout cela se rapportait (et se rapporte toujours) à l'exploitation de la connaissance sémantique.

A la fin des années 50, il y a eu le Perceptron ... belle idée, très belle idée même, mais qui n'a rien donné. Dans les années 80, la puissance des ordinateurs a permis de faire évoluer l'apprentissage par ordinateur ... et on connaît la suite : la puissance des ordinateurs explosant littéralement, il a été possible d'utiliser de très gros corpus de données et d'avoir des temps de réponse corrects pour l'apprentissage. Mais surtout, de nombreux progrès ont été faits à un niveau purement scientifique, sur la structure des réseaux de neurones de convolution – c'est leur nom ! Cela nous a amené à des résultats spectaculaires, en particulier avec l'introduction, par Geoffrey Hinton en 1986, des réseaux multicouches et par là même du Deep Learning, vingt ans plus tard.

Pendant longtemps, le jeu d'échecs a été le support d'évaluation des méthodes d'Intelligence Artificielle et, en particulier, il était au centre des discussions à l'École d'été de Dartmouth, en 1956.

Dans un premier temps, on a pensé qu'une méthode utilisant le « back-tracking » (méthode de test, puis de retour si ça ne fonctionne pas) avec des heuristiques « bien choisies » devrait donner des résultats intéressants. Cela n'a pas du tout fonctionné, et ce pour deux raisons : la combinatoire (qui était exponentielle) faisait exploser les calculs mais surtout, les joueurs d'échecs ne fonctionnent pas du tout ainsi ! Un joueur d'échec ne va pas explorer tous les cas. En revanche, il va concentrer ses forces en certains points, maintenir des équilibres, protéger son roi, laisser à ses pièces la possibilité d'évoluer le plus librement possible ... et produire ainsi un système basé sur sa connaissance sémantique qui est beaucoup efficace que le simple test de toutes les possibilités.

C'est en introduisant ces règles dans la connaissance sémantique du programme de jeu d'échecs, avec en plus une puissance de calcul plus importante, que Deep Blue a battu Gary Kasparov en 1997.

En parallèle, l'Intelligence Artificielle s'est attaquée au jeu de Go. Le jeu de Go est un jeu d'origine chinoise, mais également beaucoup pratiqué au Japon et en Corée, et qui est une véritable institution en Extrême-Orient. Les règles en sont très simples, les techniques de base sont très simples, mais le

jeu en lui-même est très complexe. On dispose d'un plateau – le Go Ban – sur lequel sont tracées 19 lignes horizontales et 19 lignes verticales, définissant ainsi 361 points d'intersection sur lesquels les joueurs posent alternativement une pierre (c'est le nom donné au « pion »), et le but est de créer des territoires afin d'avoir, à la fin du jeu, plus de points de territoire que son adversaire. Le problème est qu'il faut maintenir en permanence un équilibre subtil entre le renforcement de zones qu'on pense posséder (posture de défense) et l'attaque de zones dont on pense que l'adversaire les possède (posture d'attaque). Tout est dans cet équilibre, qu'il est très difficile d'appréhender, et le joueur qui n'arrive pas à le maintenir perd la partie. Comment exprimer cela sous la forme de connaissance sémantique ? C'est la question à laquelle les chercheurs ne sont pas arrivés à répondre. Quand on regarde une partie de Go de bon niveau, on ne comprend pas toujours pourquoi un joueur a posé une pierre à une intersection donnée – et ce sera qualifié de « joli coup » – et pourquoi s'il l'avait posée juste à côté, ça aurait été catastrophique ! En fait, pour jouer correctement au Go, il ne faut pas juste se concentrer et réfléchir, mais aussi avoir une appréhension globale, un ressenti global du jeu, de l'adversaire et de soi-même : il y a une dimension bouddhiste forte dans ce jeu. Du reste, Yasunari Kawabata, prix Nobel de littérature en 1968, a écrit une très jolie nouvelle à ce propos, qui s'intitule « Le maître ou le tournoi de Go ».

Au final, pendant que Deep Blue battait Gary Kasparov, aucun ordinateur n'arrivait à battre un joueur de Go moyen ! Cependant, les travaux de recherche sur les modèles de réseaux de neurones de convolution, pour simuler et produire un apprentissage par l'ordinateur, ne cessaient d'avancer ; le corpus des parties de Go jouées par des Maîtres et accessibles par Internet devenait très important ; et en 2016, Google Deepmind, filiale de Google spécialisée dans le domaine de l'Intelligence Artificielle, a produit Alpha Go, programme qui a battu le sud-coréen Lee Sedol, champion du monde de Go et légende vivante du Go.

On retrouve ainsi, dans l'Intelligence Artificielle, les deux composantes fortes sur lesquelles s'appuie l'intelligence humaine : la connaissance sémantique et la connaissance issue de l'apprentissage. On peut aussi dire que la première s'appuie sur la notion de modèle, comme je l'ai déjà dit, et la seconde sur le vécu.

Chaque être humain peut aussi enrichir sa connaissance à partir de la réflexion et du raisonnement : c'est ainsi que nous faisons de petites découvertes ou que nous démontrons de grands théorèmes. Souvenez-vous du sauteur en longueur dont nous avons parlé. Pourquoi ne ferions-nous pas de même avec l'Intelligence Artificielle ? C'était le rêve de John McCarthy, concepteur, à cet effet, du langage LISP. Et Marseille a aussi eu son heure de gloire dans ce domaine, avec le langage Prolog, conçu par Alain Colmerauer à l'Université d'Aix-Marseille.

Après cet état des lieux, ou plutôt cette tentative pour cerner l'Intelligence Artificielle, que faut-il en retenir et comment appréhender les questions que nous nous posons tous à propos de l'Intelligence Artificielle ?

L'Intelligence Artificielle n'est que l'expression, sous la forme de programmes informatiques, de ce que nous avons compris du fonctionnement du cerveau humain, avec un pont intéressant vers un grand courant philosophique qui exprime une vision riche de ce qu'est la connaissance. Mais l'être humain ne se résume pas à son cerveau, et son cerveau ne se résume pas à la connaissance sémantique, à l'apprentissage et au raisonnement ! Que dire de l'intelligence émotionnelle, de l'intuition, des sentiments, ... La connaissance, au sens philosophique évoquée précédemment, contient tout cela mais autant que je sache, et malgré de nombreuses tentatives de « savants fous », personne ne s'en est seulement approché ! En revanche, comme nous l'avons vu pour les algorithmes, on arrive, sur le schéma décrit précédemment, à des résultats assez extraordinaires. Mais ne nous y trompons pas : le maître de Go s'appuie sur le bouddhisme pour produire un jeu qui « maintient les équilibres » mais Alpha Go n'a rien de bouddhiste ! C'est à ce niveau-là, en particulier, qu'il faut éviter les sophismes !

Ce n'est pas parce qu'un Maître de Go bat un autre joueur grâce à une posture mentale bouddhiste et qu'Alpha Go bat un Maître de Go qu'Alpha Go est bouddhiste !

L'Intelligence Artificielle va-t-elle créer du chômage ? La réponse est clairement « non ». C'est assez facile à comprendre si nous prenons un peu de hauteur et si nous abordons la question sous l'aspect sociologique. Il est certain que certains emplois vont disparaître, mais d'autres vont être créés, et le bilan sera positif en termes de qualité pour ces emplois. Qui plus est, l'Intelligence Artificielle est en soi créatrice de richesse ! Il y a une cinquantaine d'années, j'ai eu la chance d'avoir Alfred Sauvy comme Professeur de Sociologie (il s'agissait d'un enseignement dit d'Humanités et Sciences Sociales) qui m'a fait comprendre certains mécanismes liant la machine et le travail au niveau social. Et d'ailleurs, il a écrit un livre excellent sur le sujet, qui s'intitule « La machine et le chômage ».

Une autre crainte est qu'un jour l'Intelligence Artificielle domine l'Humanité. Sincèrement, je ne vois pas comment cela serait possible ... à part dans les films de Science-Fiction, dans les médias en quête de sensationnel, chez des hommes ou femmes politiques en campagne électorale, ou chez des scientifiques dont l'égo est en souffrance et qui sont en quête de visibilité. Il est certain que la peur fait « vendre » et que les réseaux sociaux entretiennent cette peur. Mais l'Intelligence Artificielle n'est qu'un outil. En revanche, c'est un outil puissant et il est de la responsabilité de la société, des politiques et des citoyens de créer les conditions permettant d'utiliser cet outil de manière contrôlée.

Encore une question quant au rapport de l'homme à l'ordinateur. On entend parfois la réflexion suivante : ça n'a plus d'intérêt de jouer aux échecs puisqu'on est sûr d'être battu par un ordinateur ! Cette question est analogue à celle qui était posée au début du siècle dernier : « A quoi cela sert-il de courir aux Jeux Olympiques puisqu'à présent, il y a des automobiles qui vont plus vite que l'homme ? ». Je pense qu'il est inutile d'en dire plus ...

Avant de conclure, je vais revenir sur une réflexion précédente et vous raconter une anecdote.

J'ai essayé de présenter l'Intelligence Artificielle de manière schématique, mais il est évident que les « blocs conceptuels » dont j'ai parlé ne sont pas hermétiques : ils interagissent même fortement. On ne cherche pas à extraire de l'information sans s'appuyer sur la connaissance, et on parle alors d'information contextuelle. Et, comme je l'ai évoqué précédemment, il se peut que l'apprentissage, associé au raisonnement permette d'enrichir la connaissance sémantique, en créant un nouveau modèle. Il y a là un véritable phénomène d'osmose : on pratique et on observe, et puis aussi on réfléchit et on raisonne, et tout à coup, on comprend ou on pense comprendre ce qui se passe. Mais tout le monde ne s'appelle pas Newton ou Einstein.

Le premier dimanche de cette année 2024, en début d'après-midi, mon épouse était allée faire quelques courses, il était 15h et j'étais tout seul à la maison ; le dimanche suivant, 14 janvier, nous y étions tous les deux à cette même heure ; le dimanche 21 janvier, nous avons invité un couple d'amis et nous étions 4 à la maison à 15h ; et le dimanche 28 janvier, les enfants et petits-enfants étaient là à 15h et nous étions 8. Alors, dans une illumination, je suis allé à mon bureau, j'ai pris fiévreusement une feuille de papier, et j'ai tracé un ensemble de points correspondant à ces événements ... et je venais de trouver une loi, un modèle : le nombre de personnes à la maison le dimanche à 15h suivait exactement, parfaitement une loi exponentielle (et c'était une exponentielle à base 2 !). A ce moment-là, j'ai eu une inquiétude et je me suis dit : mais alors, le 27 février, nous serons 128 ? Et là, j'ai entendu la voix de Laurent Schwartz (que j'avais eu comme Professeur il y a cinquante ans et avec qui j'ai continué à échanger pendant près de 25 ans) qui me disait « mais par 4 points, il passe une infinité de courbes continues, dérivables, etc. ... pourquoi avoir choisi une exponentielle ? » et puis j'ai entendu à nouveau la voix d'Alfred Sauvy qui me disait « ça ne tient pas debout, on ne peut pas extrapoler ainsi, le système se régule naturellement, vous ne croyez pas que dans 20 semaines vous aurez un million de personnes chez vous, non ? ». J'étais assez fier de mon modèle mais ... il ne

correspondait à aucune réalité ! Comme je l'ai dit juste avant, tout le monde ne s'appelle pas Newton ou Einstein.

Il y a parfois matière à définir un modèle, qui permette de comprendre un phénomène et d'enrichir la connaissance sémantique et parfois, le système est trop complexe et une simple extrapolation sur la base de quelques échantillons, sans aucune compréhension de ce qui se passe, est plus qu'hasardeuse, même si le modèle est séduisant.

Alors, je terminerai avec deux réflexions :

- L'Intelligence Artificielle n'a pas intégré le bon sens et il appartient, et appartiendra toujours, aux humains de décider
- Et à la question « L'intelligence Artificielle » doit-elle produire des modèles et de la connaissance sémantique, ou pas ? » je ferai une réponse de normand, qui pourrait, après mon clin d'œil précédent au bouddhisme, faire référence au taoïsme : la réponse n'est pas binaire, il faut simplement placer le curseur au bon endroit, en fonction du bon sens, du contexte et du ressenti.

Je vous remercie pour votre attention