TECHNO 20

Publication technique de la SmalS-MvM / Technische uitgave van de SmalS-MvM

L'intelligence artificielle:

Quelques éléments de base

Première partie

Marco Saerens

est consultant à la section des Recherches, au sein de la division Consultance de la SmalS-MvM depuis 1999. Depuis déjà plus de dix ans, il mène à bien des projets d'analyse de données, de data mining et d'intelligence artificielle, tant dans le monde de l'entreprise que dans le monde académique. Il contribue régulièrement à des revues d'intelligence artificielle telles que "IEEE Transactions on Neural Networks", "Fuzzy Sets and Systems", "Neural Computation" ou "Machine Learning Conference".

Contact : 02/509.59.92

«J'estime que comprendre ce qu'est l'intelligence implique la compréhension des mécanismes d'acquisition de la connaissance, de sa représentation, de sa mémorisation, de la manière dont un comportement intelligent est généré et appris, de la manière dont les motivations, les émotions et les priorités se développent et sont utilisées, des procédures d'extraction de symboles à partir de signaux, et encore des processus de manipulation de ces symboles afin de faire des déductions logiques, de raisonner à partir du passé, et de planifier le futur, des mécanismes de l'intelligence qui entraînent les phénomènes de croyance, d'espoir, de crainte, de rêve – et aussi de bonté, d'attachement ou d'amour. Comprendre ces fonctions à un niveau fondamental, je pense, serait une avancée scientifique du niveau de la physique nucléaire, de la relativité et de la génétique moléculaire.»

James Albus, Response to Henry Hexmoor[1]

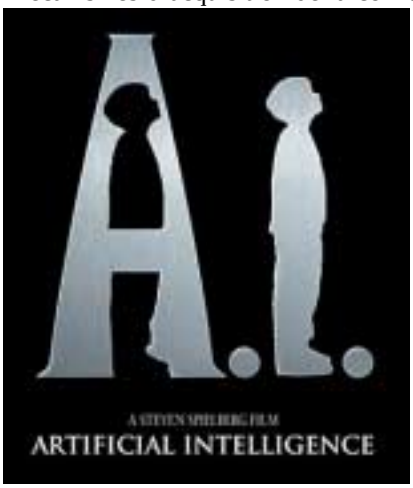

Figure 1: Affiche du prochain film de Steven Spielberg.

1. Introduction

Alors que tout le monde attend le nouveau film de Spielberg "Artificial Intelligence" (voir Figure 1), voici un techno qui a pour ambition, non pas de résumer le film, ni de prétendre vous faire comprendre ce qu'est l'intelligence artificielle, mais bien de vous faire partager ma passion pour ce domaine, et, idéalement, d'expliciter certains concepts de base et voir dans quelle mesure ceux-ci peuvent s'appliquer.

En raison de l'ampleur du sujet, et afin de ne pas surcharger le lecteur, ce techno a été scindé en deux parties. Le présent document contient les sections 1 à 6; la suite (deuxième partie; sections 6 à 8) sera publiée dans un deuxième document qui suivra prochainement.

[1] Disponible à http://tommy.jsc.nasa.gov/er/er6/mrl/papers/symposium/albus.txt

Après une introduction générale (section 2), une introduction historique (section 3), un petit détour philosophique (section 4) et quelques "success stories" (section 5), nous passons en revue les différentes capacités reflétant, et indispensables à, l'intelligence, à savoir (1) les capacités perceptives (section 6), (2) la structuration de la connaissance, le raisonnement et la planification (à paraître dans la deuxième partie, section 7), (3) l'apprentissage (à paraître dans la deuxième partie, section 8) et (4) la communication (à paraître dans la deuxième partie, section 9).

2. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle?

L'homme aime se qualifier d'«homo sapiens», en raison du rôle prépondérant des capacités mentales dans la vie de tous les jours, dans la perception du réel et de soi-même, ainsi que dans la conscience. L'intelligence n'est-elle pas l'essence même de l'homme puisqu'elle semble différencier l'être humain de l'animal. Le domaine de l'«intelligence artificielle» (IA) tente, justement, de construire des machines (robots) et des programmes (softbots) qui reproduisent un comportement intelligent. Projet ambitieux, faut-il le souligner, mais qui doit être tenté car, finalement, qu'y a-t-il de plus mystérieux que l'intelligence, à part la vie même?

Encore faut–il définir ce qu'est l'intelligence. Consultons le "Petit Larousse":

Intelligence. Faculté de comprendre, de saisir par la pensée.

Penser. Concevoir des notions, des opinions par l'activité de l'intelligence, par la réflexion.

Remarquons la circularité, qui se rencontre fréquemment dans les dictionnaires (les mots ne sont-ils pas définis à partir d'autres mots). Cela nous indique, néanmoins, si ce n'était pas clair dès le départ, que l'intelligence n'est pas simple à définir. Aussi, les chercheurs en intelligence artificielle et en «computer science» s'en tirent-ils en donnant une définition opérationnelle et empirique, plus pragmatique. Elle consiste à comparer l'«entité supposée intelligente» à l'homme, qui, lui, par définition, possède cette faculté: le test de Turing (la sous-section 2.1 est consacrée au test de Turing). En termes mathématiques, cela signifie que l'on donne une définition non-constructive[2] de l'intelligence. Car, finalement, si l'on pouvait précisément, de manière constructive, définir ce qu'est réellement l'intelligence, on pourrait également la construire. Mais voici la description du fameux test de Turing.

2.1 Le test de Turing

L'intelligence artificielle a aussi bien un objectif **technique/ingéniériste** que **scientifique**. Scientifiquement, l'intelligence artificielle s'intéresse à la modélisation de l'intelligence, et à sa transposition informatique. Du point de vue ingéniériste, les chercheurs et experts de l'intelligence artificielle, bien qu'amenés à réfléchir sur le concept de machine intelligente ou pensante (voir section «Un peu de philosophie», ci-dessous), n'espèrent pas modéliser ou comprendre l'intelligence, mais bien reproduire des comportements réputés intelligents. Le test de Turing, communément accepté en tant que test de comportement intelligent, illustre bien ce fait.

Ce test fut donc proposé par Alan Turing (1950), dans le but de fournir une définition pragmatique et opérationnelle de l'intelligence. Turing définit un comportement intelligent comme un comportement atteignant des performances similaires à celles de l'homme dans l'ensemble des tâches cognitives; et en tout cas suffisamment bonnes pour pouvoir tromper un examinateur. La machine, dans ce cas, possède des facultés suffisamment intelligentes pour se faire passer pour un humain.

[2] Une définition constructive suppose que l'on fournit un algorithme ou une recette qui permet de construire l'objet défini. Les définitions de médicaments sont un bon exemple de définition constructive.

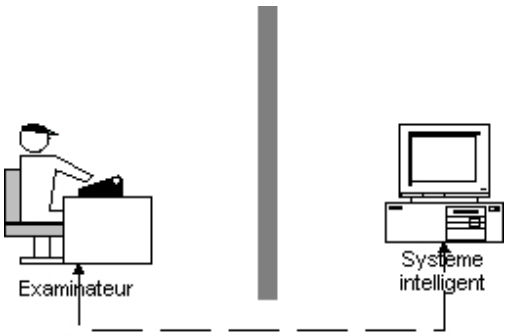

Figure 2. Un examinateur interroge la machine, en ne sachant pas qu'il a affaire à une machine. Si l'examinateur ne peut pas différencier la machine d'un être humain, la machine est déclarée intelligente.

Très grossièrement, le test de Turing consiste à interroger la machine, supposée intelligente, par l'intermédiaire d'un terminal. L'examinateur (un humain, voir Figure 2) ne voit pas son interlocuteur, et ignore s'il a affaire à une machine ou à un être humain. La machine passera le test avec succès si l'examinateur ne peut pas dire si le système qui se trouve au bout du terminal est une machine ou un être humain. Bien sûr, il s'agit d'une simplification grossière; la personne intéressée peut se référer à Haugeland (1985). L'avantage de cette méthode est bien sûr sa falsifiabilité (si un nombre significatif d'examinateurs estiment que la machine n'est pas intelligente, celle-ci sera déclarée non-intelligente). Nous pouvons réellement tester empiriquement l'«intelligence» de la machine. Mais bien entendu, cette définition ne nous renseigne pas sur le fait que la machine soit réellement intelligente.

Cela suppose, entre autres, que la machine ait des capacités:

- De **traitement du langage naturel**, afin de communiquer efficacement;
- De **représentation de la connaissance**, afin d'enregistrer efficacement les informations fournies lors de l'interrogatoire;
- De **raisonnement automatique et logique**, afin d'analyser les informations fournies et d'aboutir à des conclusions;
- D'**apprentissage**, afin de s'adapter à de nouvelles circonstances, et extrapoler la connaissance acquise.

Le test de Turing évite toute interaction physique directe entre l'examinateur et l'ordinateur, tout simplement parce que le physique n'a rien à voir avec l'intelligence. Cependant, un test plus élaboré, le test de Turing total, inclut des signaux d'entrée (un signal vidéo), de manière à pouvoir également tester les capacités perceptives de l'entité intelligente. Pour passer avec succès le test de Turing total, l'ordinateur devra également bénéficier de capacités perceptives et éventuellement motrices importantes, à savoir,

- Des capacités de **vision**;
- Des capacités de **perception auditive**;
- Des capacités **robotiques** et de **perception tactile**.

Aussi, l'intelligence artificielle est un champ très interdisciplinaire, interagissant avec des domaines très divers tels que l'informatique, la psychologie cognitive, la philosophie (anglo-saxonne), les mathématiques, la linguistique, l'automatique, les statistiques, le traitement du signal, la robotique, etc.

Bien entendu, il faut rester réaliste, et donc modeste: au niveau des applications concrètes, nous sommes encore loin du compte! Dans chacun des domaines précités, les performances humaines surpassent très largement celles des ordinateurs. D'énormes efforts ont cependant été consentis et les résultats, s'ils ne sont pas révolutionnaires, sont cependant loin d'être négligeables. Nous aurons l'occasion de les aborder dans la section «Quelques success stories» ci-dessous.

2.2. Intelligence artificielle symbolique et sub-symbolique

En plus de la vision technique/ingéniériste, on peut distinguer deux écoles dans le domaine général de l'intelligence artificielle: L'école **symbolique** et **sub-symbolique**.

L'école **symbolique** s'intéresse aux processus de raisonnement, déduction logique, planification; tout ce qui peut être qualifié de «haut niveau». C'est l'école qui a dominé l'intelligence artificielle jusqu'à présent. Cette école manipule essentiellement des données symboliques – des propositions logiques, des mots; contrairement à l'école sub-symbolique qui s'intéresse aux signaux, et au passage du signal au symbole. Les systèmes symboliques fonctionnent selon l'approche «top-down», c'est-à-dire que l'analyse d'un comportement part des entités de haut niveau, pour ensuite descendre progressivement vers les symboles de bas niveau (plus proches de la perception). Les symbolistes s'intéressent donc avant tout à la représentation de la connaissance, à son extraction et à son exploitation. Très souvent, ces systèmes s'orientent vers la programmation logique, l'inférence automatique et probabiliste avec, en toile de fond, la logique du premier ou second ordre et ses extensions. Un exemple prototypique de cette approche est le langage Prolog.

L'école **sub-symbolique** s'intéresse donc plutôt au passage du signal au symbole, tout en utilisant des paradigmes biologiques (les réseaux de neurones artificiels, par exemple). Les systèmes sont agencés de manière «bottom-up», partant du niveau le plus bas – un signal électrique, une image de caméra, etc – pour ensuite abstraire et conceptualiser jusqu'au symbole, et peut-être même au-delà.

Les systèmes sub-symboliques d'inspiration biologique sont dès lors très souvent utilisés pour remplir des tâches de «reconnaissance des formes». La reconnaissance des formes est une discipline ingéniériste qui s'attache à extraire de l'information à partir de données brutes de très bas niveau (images, signaux) – par exemple la reconnaissance de visage à partir d'une image caméra, la reconnaissance de caractères manuscrits à partir d'un document scanné, la reconnaissance vocale à partir du signal acoustique, etc. Très schématiquement, la reconnaissance des formes essaie donc de développer des systèmes qui remplissent des tâches perceptives, sans toujours se préoccuper de la plausibilité biologique. Les systèmes sub-symboliques les plus populaires sont les réseaux de neurones artificiels.

Les sub-symbolistes argumentent souvent du fait que nombre de tâches de bas niveau ne sont pas modélisables sous forme logique, ou du moins très difficilement. Lorsque je reconnais un visage parmi des centaines d'autres, je n'applique aucun raisonnement logique; je reconnais la personne de manière globale, holistique, uniquement à partir du signal, sans faire appel à la notion de symbole.

Comme nous venons de le voir, ces deux écoles sont complémentaires, et sont en effet considérées comme telles par les chercheurs. Il est très courant d'équiper les robots perfectionnés d'une batterie de systèmes sub-symboliques pour les tâches perceptives, et des systèmes symboliques par-dessus, assurant les tâches de planification, de prise de décision et de raisonnement.

Prenons un exemple que nous connaissons bien, la reconnaissance de la parole. Le signal de parole est capté par un microphone, transformant les vibrations d'ondes sonores en signal électrique. Ce signal électrique est digitalisé, et traité afin d'en extraire des paramètres résumant l'information contenue dans le signal. Ces paramètres sont ensuite injectés dans des systèmes de reconnaissance des formes – réseaux de neurones artificiels, modèles de Markov cachés – qui ont pour tâche l'identification de la séquence de phonèmes associée. Ainsi, nous avons donc effectué un mapping entre le signal de parole et les symboles atomiques que sont les phonèmes. Nous pouvons maintenant utiliser un système symbolique afin de reconnaître les phrases et générer les réponses. Cela se fait généralement en utilisant des grammaires définissant la syntaxe valide des phrases à identifier.

2.3. Quelques autres définitions

Voyons maintenant comment l'intelligence artificielle est définie dans les ouvrages de référence. La Figure 3 reprend quelques définitions empruntées à des ouvrages faisant autorité dans le domaine (tiré de Russell & Norvig, 1995). Ces définitions varient selon deux dimensions principales. Les définitions du dessus se focalisent davantage sur l'aspect **processus de pensée**, alors que celles du dessous se focalisent sur **l'aspect opérationnel** et le **comportement du système** uniquement. Par ailleurs, les définitions de gauche mesurent le succès de l'entreprise en termes de **performances similaires à l'humain**, alors que celles de droite se comparent à un **concept idéal** d'intelligence, que nous appellerons «rationnalité». Ceci nous fournit quatre objectifs qui pourraient être poursuivis par l'intelligence artificielle.

(1) Des systèmes qui pensent comme l'homme «L'effort excitant visant à bâtir des machines qui pensent … des machines avec un esprit, dans le plein sens du terme» (Haugeland, 1985) «L'automatisation des activités qui sont associées à la pensée (human thinking), c'est-à-dire des activités telles que la prise de décision, la résolution de problèmes, l'apprentissage…» (Bellman, 1978)	**(2) Des systèmes qui pensent rationnellement** «L'étude des facultés mentales en utilisant des modèles computationnels» (Charniak & McDermott, 1985) «L'étude des processus computationnels qui rendent possible la perception, la raison et l'action» (Winston, 1992)
(3) Des systèmes qui agissent comme l'homme «L'art de créer des machines qui réalisent des actions exigeant de l'intelligence de la part de l'homme» (Kurzeil, 1990) «L'étude des moyens computationnels qui pourraient amener les ordinateurs à réaliser des tâches pour lesquelles les humains sont plus performants» (Rich & Knight, 1991)	**(4) Des systèmes qui agissent rationnellement** «Le domaine d'étude qui essaie d'expliquer et émuler un comportement intelligent en terme de processus computationnels» (Schalkoff, 1990) «Le domaine des sciences computationnelles (computer science) qui s'intéresse à l'automatisation de comportements intelligents» (Luger & Stubblefield, 1993)

Figure 3. Quelques définitions de l'intelligence artificielle regroupées en quatre catégories.

Au niveau opérationnel, et ingénieriste, c'est la dernière définition (4) – agir rationnellement – qui est souvent retenue. En effet, au niveau opérationnel, on se soucie fort peu du fait que la machine pense réellement, ou qu'elle soit similaire à l'homme. Cette approche est souvent appelée «agent rationnel».

La définition (3) – agir humainement – s'apparente au test de Turing, en se mesurant aux performances de l'homme. La définition (1) – penser humainement – est davantage du ressort des sciences cognitives, qui élaborent des modèles perceptifs, cognitifs, ou du comportement humain, et observent si ce modèle colle à la réalité expérimentale. La définition (2), elle, s'apparente à l'élaboration de systèmes idéaux, possédant une intelligence rationnelle. Cette voie est suivie par la tradition «logique» de l'intelligence artificielle, qui espère obtenir des systèmes intelligents basés sur la logique formelle. Bien entendu, les systèmes (2), qui représentent des concepts idéaux de l'intelligence et, de ce fait, ne se comparent pas à l'homme – et refusent le test de Turing – se heurtent à des problèmes importants d'interprétation et de validation.

2.4. En résumé

En résumé, l'intelligence artificielle a aussi bien un objectif technique/ingénieriste que scientifique. Le test de Turing, communément accepté en tant que test de comportement intelligent, illustre l'approche ingénieriste.

L'école symbolique s'intéresse aux raisonnements de haut niveau – la planification, la déduction – en utilisant le plus souvent la programmation logique et ses extensions. L'école sub-symbolique s'intéresse aux tâches de bas niveau, essentiellement perceptives comme la reconnaissance des formes, tout en utilisant des paradigmes biologiques tels les réseaux de neurones artificiels.

Il convient néanmoins de rester modeste. Reproduire l'intelligence – tout comme reproduire la vie (voir le domaine «Artificial Life») relève bien plus du mythe, du domaine de la science-fiction, que de la science actuelle.

3. Un bref historique

Bien que le concept de robot intelligent soit déjà ancien, on considère généralement que l'intelligence artificielle est née au cours de l'été 1956, date à laquelle une conférence tenue à Dartmouth réunit un ensemble de scientifiques de haut niveau, dont McCarthy, Minsky, Shannon, Newell, Simon, qui se proposaient d'étudier la possibilité de réaliser des programmes d'ordinateur doués d'intelligence. Le terme «artificial intelligence», qui a émergé à cette occasion, a perduré malgré ses défauts. Les premiers programmes d'intelligence artificielle apparurent aussi à cette époque : un démonstrateur de théorèmes (Logic Theorist) et un programme de jeu d'échec capable d'apprentissage, ainsi que le langage-phare de l'intelligence artificielle : LISP.

3.1. Dès l'Antiquité…

Mais cette naissance «officielle» fut précédée d'une longue période de gestation qui remonte à l'Antiquité où apparaît déjà le concept de «machine intelligente». Ainsi par exemple, l'Iliade nous rapporte que Héphaistos, dieu du feu, avait construit des tables à trois pieds munies de roulettes qui se déplaçaient toutes seules dans les palais des dieux. Héphaistos aurait également construit des femmes en or pour l'aider. Douées de raison, elles étaient capables de travailler et de parler.

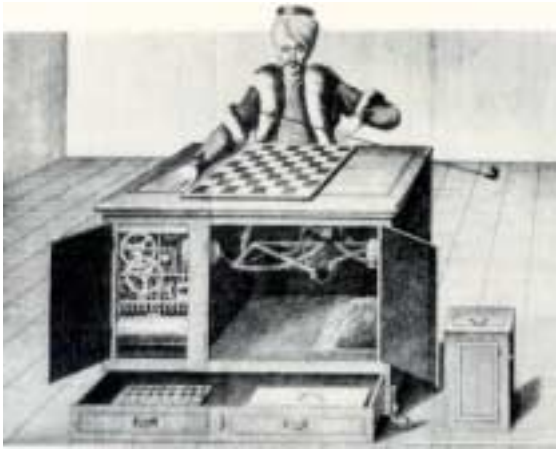

Figure 4. Une machine mécanique sensée jouer aux échecs. Au XIIIe siècle, les esprits étaient prêts à croire qu'un mécanisme d'horlogerie pouvait reproduire la pensée d'un joueur d'échecs, et qu'il n'y aurait pas de limites aux possibilités de la mécanique.

Depuis, les machines intelligentes n'ont pas cessé d'exercer une grande fascination sur le public. Au XVIIe siècle, Descartes introduit l'idée de l'«homme machine», auquel il refusait néanmoins une intelligence complète. Au XVIIIe siècle, Vaucanson réalisa des automates tout à fait remarquables. Il tenta même de fabriquer un automate qui parle. A sa suite, De Kempelen présenta en 1769 son célèbre automate joueur d'échecs, qui était en réalité une escroquerie (il battit entre autres Napoléon). C'était l'époque où l'on croyait très fort au potentiel de la mécanique (voir Figure 4). Les esprits étaient prêts à croire qu'un mécanisme d'horlogerie pouvait reproduire la pensée d'un joueur d'échecs. Et en effet, il s'avérera que l'on peut théoriquement concevoir des ordinateurs mécaniques qui ont la même puissance de calcul que les machines de Turing (ce sont des "machines universelles" qui ont la même puissance que l'ordinateur, de même pour le jeu de la vie).

Sur le plan scientifique, les développements théoriques et pratiques sur les automates d'une part, et les travaux en logique mathématique d'autre part, constituent les fondements de l'intelligence artificielle. Sur le premier point, on peut citer Babbage et sa machine analytique (1842), Turing et sa machine universelle (1936), la cybernétique, née vers 1943 notamment avec Wiener, qui a mis en évidence des phénomènes de rétroaction dans le traitement d'informations dans le cerveau. Sur le second point, les travaux marquants sont dus, entre autres, à Leibniz, Boole, Hilbert, ainsi qu'à Goedel et Church, débouchant sur le fait qu'il existe des classes de problèmes dont la solution n'est pas algorithmique (ne s'exprimant pas sous la forme d'une suite finie d'opérations à effectuer dans un ordre précisé).

Mais bien entendu, le catalyseur qui a conduit à la véritable naissance de l'intelligence artificielle a été l'apparition de l'ordinateur vers 1943. Dès cette époque, quelques pionniers ont abordé les problèmes de l'intelligence artificielle. Ainsi, en 1950, Turing propose son célèbre test de Turing.

3.2. Les grandes phases de développement au 20ème siècle

Au cours du 20e siècle, l'histoire de l'intelligence artificielle peut, très schématiquement, se diviser en cinq phases:

- Comme nous l'avons vu, les années 1950 ont vu la naissance de l'intelligence artificielle, celles-ci furent marquées par un optimisme exagéré des chercheurs qui n'avaient pas encore pris la mesure exacte de l'énorme difficulté des problèmes abordés;
- La décennie suivante marque le véritable démarrage de la discipline, avec de nombreux projets et quelques résultats significatifs: MACSYMA, système de calcul formel en mathématiques, etc.;
- Les années 70 correspondent à une explosion de travaux qui permettent de poser les bases de l'intelligence artificielle en ce qui concerne la représentation de la connaissance, le raisonnement et la robotique. L'intelligence artificielle devient une discipline à part entière;
- La décennie 80 est celle de l'entrée de l'intelligence artificielle dans la vie économique avec des réalisations pratiques et un accroissement notable de l'effort de recherche. Une certaine désillusion apparaît également car les réalisations pratiques sont en-deçà des espérances;
- La fin des années 80 et les années 90 ont vu l'apparition du paradigme connexionniste (les réseaux de neurones artificiels), par opposition aux systèmes basés sur le raisonnement, ainsi que d'autres paradigmes d'inspiration biologique (la discipline «artificial life»).

Aujourd'hui, on peut dire que de grands succès ont été obtenus, mais aussi que la communauté de recherche a pris conscience de l'énorme difficulté des problèmes traités.

Prenons par exemple le problème de la vision. Alors que l'information fournie par le toucher est relativement facile à interpréter, nous ne savons toujours pas analyser vite et bien une image prise par une caméra dans l'environnement normal d'une usine ou d'une cuisine, qui comporte des objets nombreux de formes variées, plus ou moins bien éclairés et dont certains peuvent être nouveaux pour le système. Il existe une réelle faiblesse au niveau des systèmes de perception artificiels.

4. Un peu de philosophie…

4.1. Introduction

Avant d'aborder la réalité du concret, nous allons passer en revue, très brièvement, quelques réflexions qui émanent du domaine de l'intelligence artificielle. Et cela tout simplement parce que cette réflexion nous mène au coeur des concepts fondamentaux d'algorithme ou de machine.

4.2. Une machine peut-elle penser?

La question fondamentale qui sous-tend toute recherche en intelligence artificielle, est bien entendu «**une machine peut-elle penser ?**», ainsi que son corollaire: **«l'homme est-il une machine ?**». Bien entendu, si l'homme est une machine, alors une machine peut penser, puisque nous avons une preuve d'existence. Une quantité énorme d'arguments, paradoxes, expériences par la pensée, ont été publiés sur ce sujet, qui fait encore couler beaucoup d'encre. Il existe des revues scientifiques presque entièrement consacrées à ce sujet passionnant (la revue *Mind*, par exemple).

Mais, pour pouvoir répondre à cette question, encore faut-il définir précisément chacun de ses termes.

Considérons le terme «**peut**». Par pouvoir, entendons-nous une preuve qu'une machine, idéalement, est capable de penser sans connaître l'algorithme qui permet d'atteindre cet objectif. Cette situation est courante en mathématiques et en informatique théorique: on démontre que quelque chose est techniquement possible, sans pouvoir dire comment y arriver. Nombre de chercheurs pensent qu'une machine pourrait en effet penser, mais que cette machine serait tellement complexe que nous ne serons jamais capable d'en construire une. Prenons un autre exemple : les simulations météorologiques. Aucun système actuel n'arrive à simuler exactement l'évolution des conditions climatiques.

Ensuite, le terme «**machine**». Pour la plupart d'entre nous, une machine est quelque chose d'inerte, comme une rotative. Cependant, l'ordinateur a changé notre conception de la machine; la machine se rapproche du robot.

L'ordinateur ajoute l'intelligence à la machine. Et contrairement à l'intelligence, un ordinateur peut être défini précisément. Il a été formalisé de plusieurs manières différentes, qui se sont toutes révélées équivalentes. Un de ces modèles a été nommé «Machine de Turing», du nom de son concepteur (le même Turing qui a proposé le «test de Turing»). Une machine de Turing est très rudimentaire: elle ne peut qu'écrire sur un ruban de longueur arbitraire, lire un symbole du ruban, ou en effacer un. Elle possède, par ailleurs, une bande qui fournit les instructions qu'elle doit suivre (le programme) – déplacer le ruban de *n* symboles, effacer un symbole, etc. On a démontré que tout ordinateur possédant une mémoire arbitrairement grande est équivalent à une machine de Turing – la machine "universelle".

Mais, malgré leur simplicité, les machines de Turing possèdent des propriétés tout à fait remarquables. Par exemple, on a pu démontrer qu'il existe des problèmes qui sont «indécidables», à savoir, pour lesquels il n'existe pas d'algorithme qui permet de les résoudre. Notons que cela ne signifie pas que l'algorithme n'est pas connu, mais bien qu'aucun algorithme ne pourra jamais résoudre le problème en question. Le problème du pavage du plan par un ensemble de polygones est un de ces problèmes insolubles. Aucun algorithme recevant en paramètre toutes les données du problème ne pourra jamais résoudre cette question.

Mais une machine est plus qu'un ordinateur: une machine possède également une autonomie, peut interagir, ainsi que produire une action sur son environnement. Il s'agit, très grossièrement, d'un ordinateur qui peut se déplacer, et agir. Elle peut éventuellement aussi évoluer par un processus d'apprentissage.

Mentionnons encore les recherches menées dans le domaine de la compréhension des mécanismes biologiques, qui nous ont menés à une nouvelle interprétation de la notion de machine. Considérons, par exemple, le virus *E6 Bacteriophage*. Ce virus a un comportement préprogrammé tout à fait stupéfiant. Ce virus contient du DNA viral. Il s'attache à une cellule ou une bactérie, perce la paroi de la cellule, et injecte son DNA dans celle-ci. La cellule – ou plutôt son usine biochimique – exécute ensuite les ordres contenus dans le code injecté, produisant des copies des pièces élémentaires du virus. Ces parties s'assemblent ensuite automatiquement pour former de nouveaux virus, qui une fois libérés de la cellule, vont répéter le processus et infecter d'autres cellules. N'est-ce pas là un exemple tout à fait remarquable de machine.

Finalement, nous en venons au verbe «**pense**». La pensée est intimement liée à l'intelligence et à la conscience. Dans le cas de l'intelligence, nous avons donné une définition opérationnelle, discutable et discutée – des centaines de livres et articles développent et commentent cette argumentation – à savoir le test de Turing. Mais de nombreux chercheurs refusent le test de Turing, en argumentant du fait que ce test ne permet évidemment pas de dire si «la machine pense vraiment»; il confond pensée et simulation de pensée. Il apparaît qu'un test ou un critère valable, permettant de détecter la pensée, n'existe pas. Il est en outre amusant de constater que le concept de pensée a évolué au cours du temps. Selon Descartes, et très grossièrement, la pensée était intimement liée à la rationnalité, à la déduction logique, par opposition à l'émotion, les sentiments. Au contraire, actuellement, la rationnalité a été modélisée, automatisée, du moins en partie, alors que l'émotion, les sentiments échappent complètement à la puissance de l'ordinateur.

Diverses écoles se sont formées; leurs argumentations relèvent de la «philosophie de l'esprit» (philosophy of mind). Nous n'entrerons pas dans ce débat, qui sort du cadre de notre étude. Mais nous ne pouvons cependant pas résister à exposer l'argumentation de l'école «**fonctionnelle**». Cette école pose la question de l'indépendance de l'intelligence par rapport au substrat physique qui véhicule cette intelligence. Prenons l'exemple d'un ordinateur. Il y a bien sûr le niveau physique – le hardware – et le niveau applicatif – le software. On peut raisonnablement dire que ces deux niveaux sont indépendants en ce sens que si l'on remplace chaque composant hardware (les puces, les condensateurs, etc) par un équivalent fonctionnel construit dans une autre matière (ou même simulé par du code ou une machine virtuelle), cela ne changera rien au niveau applicatif, si ce n'est du point de vue des temps de réponse. «Remplacer par un équivalent fonctionnel» signifie substituer le composant par un autre composant ayant les mêmes caractéristiques entrée-sortie. D'autre part, on peut étudier de manière aussi détaillée que l'on veut les composants physiques d'un système informatique, cette connaissance ne nous permettra jamais de comprendre ce que la machine effectue au niveau applicatif ou logiciel (il se peut qu'elle calcule des statistiques, qu'elle tienne la comptabilité, etc). Cette séparation reste-t-elle valide pour l'homme ? Dans le cas des membres physiques, on aurait tendance à répondre par l'affirmative. Mais en ce qui concerne le cerveau ? Si on substituait chaque unité simple, par exemple le neurone, par

des équivalents en silicone, la conscience est-elle conservée? C'est donc ce qu'étudie l'école fonctionnelle. Le débat est loin d'être terminé.

Pour terminer cette section où nous n'avons pu qu'effleurer la problématique philosophique liée à l'intelligence artificielle disons encore qu'il existe de nombreuses écoles et opinions, essayant de formaliser les concepts d'intelligence, avec plus ou moins de succès. Ces écoles se basent sur certaines hypothèses – par exemple l'hypothèse fonctionnelle – et en déduisent des conséquences. Comme, malheureusement, peu de choses sont vérifiables expérimentalement, les chercheurs se basent souvent sur des «expériences par la pensée», avec tous les dangers que cela comporte.

5. Quelques "success stories"

Dans cette section, avant de développer les différents concepts, nous décrivons une série d'applications – ou plutôt success stories – issues de l'intelligence artificielle. Ces applications réelles, mais développées par des laboratoires de recherche expérimentés, décrivent bien l'état de l'art de la technologie. Bien entendu, elles ont bénéficié du dévouement de chercheurs et développeurs acharnés et passionnés par les technologies de l'IA.

Plus que pour toute autre discipline, les espoirs qui ont été placés dans l'intelligence artificielle ont trop souvent été déçus; le bilan, cependant, reste positif même si un projet d'intelligence artificielle requiert des ressources souvent considérées comme prohibitives dans le monde industriel. C'est donc dans les universités et les importants laboratoires de recherche et développement (NASA, IBM, etc) que naissent les réalisations les plus marquantes.

Voici donc quelques réussites (le lecteur soucieux d'objectivité m'excusera de ne pas avoir inclu des exemples d'échecs !).

- Le Grand Maître Arnold Denker examine les pièces qui se trouvent sur son échiquier. Rien à faire, il a perdu la partie. Son opposant, le système Hitech devient le premier programme à tenir en échec un Grand Maître (Berliner, 1989). Depuis lors, Big Blue, comme vous le savez probablement, a encore fait mieux. Par ailleurs un système basé sur des réseaux de neurones artificiels a été classé parmi les trois premiers joueurs de Backgammon dans le monde (Tesauro, 1992);
- «Je veux un vol de Boston à San Francisco», demande le voyageur dans son micro. «Quel jour, quelle heure voulez-vous voyager ?», réplique le système. Le voyageur explique qu'il veut partir le 20 octobre au matin et qu'il veut un vol bon marché. Un système de compréhension de la parole, appellé PEGASUS, lui propose une place sur un vol régulier, tout en lui réclamant la somme. Même si le système de reconnaissance n'identifie correctement qu'un certain pourcentage des mots, il peut se corriger en utilisant des grammaires (Zue et al., 1994);
- Un analyste du «Jet propulsion Laboratory» a l'attention attirée par un message indiquant qu'une anomalie est apparue au cours de la mission Voyager, qui se trouve près de Neptune. Le problème a pu être corrigé à partir du sol. C'est MARVEL, un système expert, chargé de gérer le flux massif de données transmises par la navette qui a alerté le personnel (Schwuttke, 1992);
- Roulant sur une autoroute aux alentours de Pitsburg, la personne qui se trouve dans le véhicule n'a pas touché le volant ni les pédales de commande depuis plus de 10 km. Et pour cause: le conducteur est un système robotique qui récolte les informations de caméras vidéos, des sonars, et des jaugeurs. Après avoir mémorisé le comportement du conducteur humain durant une phase d'apprentissage, il a appris à combiner les entrées de manière à pouvoir conduire le véhicule sur une autoroute (Pomerleau, 1993);

- Un expert en pathologie des glandes lymphatiques soumet un cas difficile au système de diagnostic basé sur des graphes probabilistes. Il n'est pas d'accord avec le diagnostic de l'ordinateur et lui demande d'expliciter sa décision. Le système décompose les interactions entre les différents facteurs et symptômes influençant sa décision et l'expert reconnaît la pertinence du diagnostic (Heckerman, 1991);
- A partir d'une caméra perchée sur un feu de signalisation, l'analyseur de trafic surveille la scène. Un accident grave vient de se produire. Celui-ci rapporte au centre de gestion de trafic: «Incident majeur sur la place de la Concorde», et prévient automatiquement les services d'urgence (King et al., 1993; Koller et al., 1994);
- L'utilisateur lance Excel et effectue une manipulation de données. Le résultat n'est pas celui escompté. L'utilisateur, irrité, fait appel à l'aide en ligne. Celle-ci lui dit « Peut-être pourriez-vous utiliser le module x, que vous n'avez jamais investigué ». L'assistant mémorise le comportement de l'utilisateur, et à partir de ce modèle, tente de fournir une réponse personnalisée;
- Mon petit chien-robot "Smaly" me suit au salon. Je lui dis "la balle est au fond de la pièce". Il lève la tête et regarde autour de lui; il repère la balle et me la ramène afin de jouer au ballon avec moi[3].

Bien entendu, chacun de ces systèmes "sur mesure" a demandé des années-homme de développement. Et on peut se poser la question de savoir si ce genre d'application sortira un jour des milieux de recherche et développement pour se répandre au sein des entreprises.

C'est là, pensons-nous, le challenge de l'intelligence artificielle du 21ème siècle. Personnellement, nous pensons que l'IA ne deviendra jamais le paradigme dominant de l'informatique, mais qu'elle jouera un rôle de plus en plus important (sera de plus en plus présente) dans les applications high-tech, comme c'est déjà le cas pour la reconnaissance de caractères, la régulation des machines à laver par logique floue (fuzzy logic), etc. En effet, la plupart des tâches demandées à une machine ou à un ordinateur sont essentiellement de nature répétitive et ne nécessitent que peu d'intelligence : comptabilité, traitement de textes, etc.

6. Percevoir

6.1. Introduction

La perception est bien entendu un processus fondamental qui permet aux agents de collecter des informations concernant le monde qui les entoure et, dès lors, de communiquer. La perception est initiée par les senseurs. Un senseur est un instrument qui change l'état d'un agent suite à un changement extérieur qui se produit dans le monde qui l'entoure. Le senseur peut être aussi bien rudimentaire, par exemple un senseur qui détecte si un commutateur est «on» ou «off», ou d'une complexité extrême, comme l'est un oeil humain.

Les sensations les plus répandues chez les agents «intelligents» sont le toucher, la vision et l'audition. Ces perceptions sont ensuite combinées afin de corroborer des hypothèses concernant la présence ou non d'un objet. Mais parfois les différentes informations perceptives sont contradictoires menant dès lors à des conflits potentiels. Mentionnons les expériences perceptives qui consistent à présenter un stimulus auditif contenant un son de phonème «b» parallèlement à un visage dont les lèvres prononcent un «k». Les informations auditives et visuelles sont contradictoires dans ce cas – et des expériences ont en effet montré que les sujets ont des difficultés à identifier le phonème.

[3] Voir le robot Aibo commercialisé par Sony; http://www.aibo.com.

Il est cependant important de signaler que, très souvent, parmi la très grande quantité d'informations qui nous assaille, seulement une très petite quantite est exploitée à l'instant où elle est perçue. Elle permet d'identifier des éléments dont nous avons besoin à l'instant même de l'acte de perception. Par exemple: «Y a-t-il un obstacle devant moi ?» ou encore «où se trouve la tasse de café?». Dans ce cadre, nous n'avons pas besoin de connaître la couleur du trottoir ou la structure de la table sur laquelle repose la tasse. L'agent s'attachera donc à détecter l'obstacle ou la tasse, sans se préoccuper des autres éléments, ce qui, déjà, constitue une tâche formidablement complexe.

En effet, bien que les tâches perceptives s'effectuent sans trop d'efforts chez l'être humain, il en est tout autrement pour la machine. Le problème du traitement des informations perceptives est très loin d'être résolu.

6.2. La vision

L'acte de vision se définit par la mise en correspondance entre une ou plusieurs images digitales (représentant une «scène») et des entités conceptuelles de haut niveau (une table, une tasse de café, etc). Cette tâche se subdivise en trois sous-catégories:

- La formation de l'image sur la rétine;
- Les opérations d'analyse d'image qui s'effectuent très tôt dans le processus de vision (image processing – «early vision»);
- La détection d'objets, de textures, de couleurs, etc.

La formation de l'image

L'étape de formation de l'image sur la rétine est relativement bien connue, aussi bien du point de vue biologique que géométrique. Elle s'apparente à la formation d'une image dans une caméra – et peut d'ailleurs être simulée par une caméra. Cependant, une fois que cette image est digitalisée, il s'agit de la traiter et d'en extraire les informations pertinentes.

Figure 6. Le système de traitement d'image a identifié et extrait le visage du sphinx. Mais pourra-t-il déduire qu'il s'agit d'une statue, et non d'un être vivant ?

Opérations d'analyse d'image

Il s'agit ici d'analyser l'image digitale afin d'en extraire des informations intéressantes. Par exemple, on peut extraire les contours des objets (voir Figure 6). Pour ce faire, il est nécessaire de prétraiter l'image en essayant d'éliminer le bruit (filtrage). On peut également extraire des indices permettant de faciliter le traitement ultérieur. Toutes ces opérations sont reprises sous le vocable de «traitement d'image» (image processing). Ces techniques, très pointues, sont très largement étudiées dans les domaines du traitement d'image et de la reconnaissance des formes.

La détection d'objets, de textures, de couleurs, etc.

Dans ce contexte, il s'agit de retrouver les objets tridimensionnels dans une ou plusieurs images à deux dimensions. Trois éléments essentiels rendent cette opération très difficile:

- Les objets sont tridimensionnels mais l'information à laquelle nous avons accès est bidimensionnelle;
- La reconnaissance d'objets est à vocabulaire illimité, c'est-à-dire que la quantité et le type d'objets rencontrés dans une image est potentiellement illimitée;
- Il est très difficile de modéliser l'aspect sémantique et les informations «top-down».

Une difficulté importante apparaît ici, puisque les objets ont été projetés sur un plan (la surface rétinienne), alors qu'en réalité ils sont tridimensionnels. Donc, un même objet peut avoir une forme complètement différente, selon l'angle de vue, ce qui est extrêmement difficile à traiter.

Par ailleurs, les techniques actuelles permettent tout au plus de rechercher des objets précis dans une image – et non pas de faire l'inventaire de tous les objets présents dans l'image. Ainsi, il existe des techniques très spécifiques capables de détecter une ligne ou un cube dans une image (dans ce cas, il y a un vocabulaire d'objets limité), mais il n'existe pas de technique générale permettant de relever tous les objets présents (dans ce cas, il y a un vocabulaire d'objets illimité). Autrement dit, il existe des algorithmes du type «recherche_ligne(image)» ou «recherche_cube(image)», mais pas d'algorithme général du type «énumère_tous_les_objets(image)».

La troisième difficulté provient de l'usage de l'information sémantique. L'être humain utilise continuellement une quantité très importante d'informations de nature sémantique de très haut niveau. Par exemple, lorsqu'on se lève le matin et que l'on se rend dans notre salle à manger et que notre épouse et nos enfants sont déjà levés, on s'attend à trouver des croissants et des tasses de café. L'intégration des informations sémantiques facilite grandement le traitement. On a par exemple observé que des informations sémantiques peuvent modifier des seuils perceptifs. Dans ce cas, on dit que des informations de haut niveau (top-down) interfèrent avec des informations de très bas niveau (bottom-up) afin de décoder une image. Or, les informations sémantiques sont très complexes à modéliser.

Autant dire que, malgré les efforts et progrès considérables dans ce domaine, ce problème est très loin d'être résolu. Dans certains cas, il y a une base d'objets limitée, les objets sont de nature bidimensionnelle et l'information sémantique est peu relevante, ce qui simplifie considérablement le traitement du problème. Prenons pour exemple le cas de la reconnaissance de caractères imprimés. Dans ce cas précis, des techniques sophistiquées ont été développées, et les résultats sont satisfaisants.

6.3. La perception de la parole

Dans cette section, nous nous intéressons à une autre modalité de perception, la parole (pour obtenir davantage d'informations, consulter le "délivrable" sur la reconnaissance vocale de Hervé Haut, paru en 1999). La parole est l'un des composants les plus importants de la communication entre êtres humains (avec l'écriture). La reconnaissance de la parole se définit par la mise en correspondance entre un signal acoustique vocal et une suite de mots. La compréhension de la parole, tâche plus complexe, est la mise en correspondance entre un signal acoustique vocal et une interprétation de la signification du message.

Plusieurs étapes sont présentes en compréhension de la parole:

- L'extraction d'indices pertinents à partir du signal acoustique digitalisé;
- La classification de segments de signal en phonème;

- Le regroupement de la séquence des phonèmes en mots;
- L'interprétation sémantique du message.

Plusieurs approches sont envisageables dans le cadre de la reconnaissance de la parole. Les deux approches les plus populaires sont orientées «base de connaissance» et «modèles statistiques». Les modèles basés connaissance essaient de modéliser nos connaissances en matière de production et perception de la parole. De bons résultats ont été obtenus, bien qu'actuellement ces modèles soient supplantés par les modèles statistiques et connexionnistes. Les modèles statistiques, au contraire des modèles basés connaissance, sont bien plus «boîte noire» et néçéssitent une phase d'apprentissage très importante.

En résumé, les modèles basés connaissance s'inspirent de nos propres facultés de production et perception de la parole, alors que les modèles statistiques reposent entièrement sur l'apprentissage statistique. Dans la suite, nous décrivons succinctement les modèles statistiques. Le lecteur désirant obtenir davantage de détails pourra se référer au "délivrable" publié en 1999 par Hervé Haut.

Extraction des indices

Cette étape est purement de l'ordre du traitement du signal. Le signal acoustique est digitalisé et ensuite analysé en vue d'obtenir des indices acoustiques. Par exemple, on peut extraire le spectre fréquentiel du signal, la fréquence fondamentale (le ton) du signal, etc. Le signal acoustique est ainsi résumé par un nombre restreint de valeurs (une vingtaine) calculées toutes les 10 ms environ. Ces indices sont ensuite transmis au niveau de classification phonétique.

Classification phonétique

L'étape suivante consiste à identifier des segments phonétiques à partir des indices qui ont été extraits. Cette tâche de classification est réalisée par des modèles statistiques qui intègrent l'aspect temporel du signal de parole. En effet, si je prononce «maaaaaaaaarco» ou bien «marcoooooooooo», même si la réalisation acoustique est très différente à chaque fois, le mot prononcé (et qui doit être reconnu) reste bien le même – «marco». Ces modèles statistiques sont préalablement entraînés sur de larges corpus d'exemples – parfois des heures de parole!

Ils fournissent donc une suite de phonèmes (ou plus précisément une suite de probabilités de présence des phonèmes), qui devra être interprétée au niveau supérieur.

Regroupement en mots

Les modèles statistiques fournissent donc des probabilités de présence des phonèmes. Des modèles de mots ou des grammaires formelles peuvent être utilisés afin d'évaluer la séquence de mots la plus probable véhiculée par le signal. Cette étape se base sur une grammaire formelle qui est définie pour les besoins du problème. Uniquement les séquences de mots qui sont syntaxiquement correctes sont déclarées valides et des techniques sophistiquées permettent d'identifier la séquence de mots syntaxiquement correcte la plus probable étant donné le signal observé. Nous reviendrons sur le concept de grammaire formelle en section 8 (communication) avec davantage de détails.

Analyse sémantique

L'analyse du contenu sémantique est extrêmement complexe et difficile à mettre en oeuvre. Une des solutions les plus pratiquées est d'augmenter la grammaire de son contenu sémantique traduit sous forme de logique; nous reviendrons là-dessus en section 8. La prise en considération de la sémantique n'est actuellement concevable que dans des cas bien définis et délimités.

En résumé

Le domaine de la reconnaissance de la parole a déjà obtenu certains succès. Les performances des systèmes dépendent de trois facteurs importants: s'agit-il d'un problème

- De reconnaissance de parole continue ou de mots isolés;
- A vocabulaire limité ou illimité;
- Locuteur-dépendant ou locuteur-indépendant.

Dans le cas de la parole continue à vocabulaire illimité, le vocabulaire et la syntaxe sont potentiellement illimités, ce qui signifie que notre système doit pouvoir reconnaître pratiquement n'importe quelle suite de phonèmes. En revanche, dans le cas de systèmes de reconnaissance à vocabulaire limité, seuls certains mots doivent être reconnus (par exemple des chiffres).

Par ailleurs un système dépendant du locuteur est spécifiquement entraîné pour reconnaître la voix d'une personne spécifique (un système de dictée personnalisé), alors qu'un système indépendant du locuteur est susceptible de reconnaître la parole de chacun (par exemple un système automatique de réservation).

Les systèmes à vocabulaire limité et dépendants du locuteur atteignent de très bonnes performances de reconnaissance, alors que les systèmes pour parole continue, à vocabulaire illimité et indépendants du locuteur sont médiocres.

7. Conclusion de la première partie

Dans ce court document, nous avons dressé un panorama, honteusement incomplet en raison des contraintes de place, de l'intelligence artificielle.

Après nous être interrogé sur le concept d'agent intelligent, nous avons très brièvement parcouru quelques-unes des propriétés qui concourent à l'«intelligence» des machines. Une machine intelligente doit être capable de percevoir, planifier et agir, raisonner, apprendre et communiquer. Bien que des succès plus qu'encourageants ont été obtenus, nous sommes encore très loin des facultés humaines. Les concepts de planification, raisonnement, apprentissage et communication seront traités dans la deuxième partie de ce techno qui paraîtra très bientôt.

Cependant, dans des domaines restreints et bien définis, les techniques de l'intelligence articielle peuvent donner des résultats remarquables. Il faut néanmoins bien se rendre compte que l'intelligence artificielle est, et restera encore longtemps, peu présente dans l'informatique opérationnelle, tout simplement parce que celle-ci s'occupe essentiellement de la systématisation de tâches séquentielles répétitives – consulter une base de données, émettre des factures relatives à une période donnée, etc – pour lesquelles les «requirements» ont été définis par des analystes. Mais dans les cas où la systématisation est difficile en raison, par exemple, de l'environnement ou de l'objectif à atteindre qui se modifie au cours du temps, une certaine adaptativité ou «intelligence» peut jouer (et joue déjà) un rôle. Les applications informatiques qui requièrent de l'intelligence restent néanmoins assez rares.

Je pense personnellement que les applications de l'intelligence artificielle vont croître dans les prochaines années, essentiellement en raison du nombre croissant d'applications se déroulant dans un univers virtuel digital (un réseau d'ordinateurs (internet), des jeux informatiques, des bases de données, etc), pour lequel les tâches de perception sont largement facilitées. Nous rencontrons déjà de nombreux exemples (jeux informatiques, agents intelligents récoltant des informations sur le web, systèmes logiciels permettant de définir le profil d'un internaute faisant ses achats sur le web, etc).

Par ailleurs, il faut noter que l'intelligence artificielle a aussi bien un but appliqué/ingénieriste qu'un but scientifique plus fondamental (l'étude de l'intelligence potentielle de la machine). De par sa nature, elle est donc très interdisciplinaire – les experts en intelligence artficielle sont aussi bien ingénieur, informaticien, mathématicien que psychologue, linguiste, automaticien (cybernéticien), biologiste ou même philosophe.

8. Références

Nous conseillons sans retenue deux ouvrages résumant très pédagogiquement les techniques récentes de l'intelligence artificielle:

- Nilsson N. (1998). «Artificial Intelligence: A new synthesis». Morgan Kaufmann Publishers.
- Russell S. & Norvig P. (1995). «Artificial Intelligence: A modern approach». Prentice-Hall.

Les références citées dans ce techno s'y trouvent. Les revues les plus populaires en intelligence artificielle sont:

- IEEE Expert (édité par IEEE Computer Society)
- Artificial Intelligence (édité par Elsevier Science)

Il existe également une conférence internationale où les applications importantes de l'intelligence artificielle sont présentées:

- Annual Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence (IAAI; http://www.aaai.org/Conferences/IAAI)

La conférence scientifique et technique la plus populaire est:

- International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI; http://www.aaai.org/Conferences/IJCAI/)

La société américaine pour l'intelligence artificielle possède un site très informatif:

- http://www.aaai.org