

Une brève introduction aux Sciences Cognitives

Sommaire

Une brève introduction aux Sciences Cognitives.....	1
1. Introduction	1
2. Objet et enjeux des Sciences Cognitives.....	2
2.1. Historique	2
2.2. Différentes approches.....	4
Intelligence Artificielle.	4
Psychologie cognitive.	6
Neurosciences.....	7
Linguistique.....	7
Philosophie.....	8
2.3. Un nouveau regard sur la cognition	8
2.4. Les domaines d'étude actuels et le concept d'intelligence	9
3. Que sait faire une machine de nos jours ?.....	10
3.1. Calculer	11
3.2. Reasonner.....	11
3.3. Communiquer.....	13
3.4. et le reste ?.....	13
4. Perspectives.....	14

1. Introduction

L'objet des Sciences Cognitives est l'étude de la *cognition* (du latin *cognitio*, connaissance), à plusieurs niveaux : les différentes formes qu'elle revêt, les mécanismes qui la fondent et lui permettent de s'exprimer et d'évoluer, et enfin les possibilités de reproduire l'intelligence naturelle au travers de machines artificielles. On cherche, par exemple, à caractériser les différents niveaux de traitements et de manipulation de l'information symbolique, ainsi que les substrats biologiques qui pourraient sous-tendre de tels traitements chez l'homme. Le programme est vaste puisqu'il vise à acquérir une compréhension globale de l'ensemble des capacités de l'esprit humain, comme, par exemple, le langage, le raisonnement, la perception, les activités motrices, ou la planification (Anderl, 2002). Cette compréhension de l'esprit humain passe par la *description*, l'*explication*, voire la *simulation* – lorsque cette dernière n'est pas possible – des processus mis en œuvre dans l'élaboration de nos connaissances.

Après l'étude de la *matière*, dont la discipline maîtresse est sans conteste la physique – et de nos jours la physique quantique, et du *corps*, au travers de la biologie, celle de l'*esprit* apparaît comme le défi du vingtième siècle. Les recherches menées dans ce sens font l'objet à l'heure actuelle d'une véritable approche pluri-disciplinaire, puisque différentes disciplines

scientifiques participent à ce vaste projet visant à la compréhension de la cognition : intelligence artificielle, psychologie cognitive, philosophie, neurosciences, sociologie, informatique et sciences de l'ingénieur, etc. Malgré la diversité des méthodes et des enjeux théoriques de chacune de ces disciplines, toutes concourent au même programme de recherches : définir la manière dont nous acquérons et utilisons nos connaissances, et utilisons ces capacités pour évoluer de manière adaptée dans notre environnement. Cette notion d'adaptation est bien vite apparue comme un concept central de l'évolution des systèmes naturels (cf. Darwin et sa thèse de la sélection naturelle), mais également des systèmes artificiels (cf. Wiener et les concepts de la cybernétique). À cette adaptation constamment mise à l'épreuve par les variations de l'environnement est naturellement associée une complexification des structures accueillant le système considéré (homme ou machine). L'ordre émergent de ces structures, en apparence tellement complexes, résulte alors d'un vaste ensemble de processus en interaction (cf. cours sur les Systèmes Adaptatifs Complexes). Mais l'idée maîtresse dans l'étude des systèmes artificiels et naturels demeure celle d'un système capable de traiter et de manipuler de l'information de nature symbolique.

L'intérêt porté à l'étude des mécanismes de traitement de l'information apparaît naturel pour les personnes travaillant à l'interface entre l'homme et la machine. L'informaticien doit en effet bien souvent développer un système devant interagir avec l'utilisateur. Cette interaction peut se situer à différents niveaux (interface utilisateur, langage de requête, etc.), peut être de différents types (uni- ou bi-directionnelle, directe ou à distance, etc.), et peut utiliser différents médias de communication (oral, clavier, souris, commande oculaire, etc.). Afin de permettre une interaction pertinente et efficace entre l'homme et la machine, il convient donc de prendre en considération l'ensemble des facteurs susceptibles d'affecter celle-ci. Cela comprend, pour l'homme : ses capacités perceptives (e.g. on ne perçoit les stimulations visuelles ou auditives que dans certaines gammes de fréquences), ses capacités de mémorisation et d'attention (on ne peut guère mémoriser plus de 7 éléments distincts, et on n'arrive pas à effectuer simultanément différentes tâches nécessitant une certaine précision), ses compétences langagières, etc. ; et pour la machine : la limitation de ses modes de communication (e.g. écran) et d'interaction (un langage ou une interface bien déterminés), etc. Les études réalisées dans le domaine de la psychologie cognitive, de la linguistique et de l'ergonomie ont permis de mettre en évidence les conditions nécessaires à l'établissement d'une communication « naturelle » entre deux interlocuteurs, et par extension entre un utilisateur et une machine (cf. cours de Linguistique).

2. Objet et enjeux des Sciences Cognitives

2.1. Historique

On s'accorde généralement à définir comme point de départ de la formalisation du programme des Sciences Cognitives un célèbre colloque qui eut lieu en 1946 à Macy (et qui fut suivi par d'autres jusqu'en 1953). Lors de cette réunion de chercheurs issus de différentes disciplines (neurophysiologie, informatique, mathématiques), il fut décidé d'adopter un programme commun de recherches sur la cognition, et plus particulièrement sur l'intelligence humaine et le rapport de l'homme à la machine et à son propre cerveau. Ce programme visait à termes à pouvoir caractériser un comportement « intelligent » et à le simuler à l'aide d'un programme informatique. L'idée fondamentale était donc celle de créer une intelligence « artificielle ». De nouvelles disciplines scientifiques virent le jour, notamment l'intelligence artificielle, les neurosciences et la psychologie cognitive. Les grands noms associés à la naissance des Sciences Cognitives sont sans conteste :

– N. Wiener (1894-1964), mathématicien et fondateur de la 1^{ère} cybernétique¹, s'est intéressé, entre autres, aux conditions permettant à un organisme artificiel de s'adapter à son environnement, et plus généralement de manifester des capacités de communication. L'influence de ce courant de pensée (par exemple, le concept de « feedback négatif », ou rétrocontrôle) s'étendra aux recherches sur la cognition naturelle et artificielle pendant près de vingt ans et donnera naissance à de nombreuses disciplines spécialisées. Dans l'ouvrage *Sciences Cognitives – Textes Fondateurs*, de A. Pélissier et A. Tête, on peut lire la remarque suivante :

« La cybernétique aura : introduit la conceptualisation et le formalisme logico-mathématiques dans les sciences du cerveau et du système nerveux ; conçu l'organisation des machines à traiter l'information et jeté les fondements de l'intelligence artificielle ; produit la « métascience » des systèmes, laquelle a laissé son empreinte sur l'ensemble des sciences humaines et sociales, de la thérapie familiale à l'anthropologie culturelle, en passant par l'économie, la théorie des jeux, la sociologie, les sciences du politique et bien d'autres ; fourni à point nommé à plusieurs 'révolutions scientifiques' du XX^e siècle, très diverses puisqu'elles vont de la biologie moléculaire à la relecture de Freud par Lacan, les métaphores dont elles avaient besoin pour marquer leur rupture par rapport à un ordre ancien. »

– W. McCulloch (1892-1969), psychologue et neurologue, s'est intéressé à la manière dont l'homme réalise des calculs et des déductions logiques. Il a pour cela proposé une équivalence entre le calcul des propositions de Whitehead et Russell et les règles régissant les interactions (excitation et inhibition) entre neurones dans le cerveau. Il est à l'origine du neurone formel, un modèle simplifié de neurone biologique reposant sur des règles d'activation booléennes.

– J. von Neumann (1903-1957), mathématicien, a d'abord travaillé dans le domaine des mathématiques appliquées, en tant que consultant du gouvernement (en guerre à l'époque), puis s'est intéressé à la modélisation des réseaux neuronaux à l'aide d'automates finis.

– D. Hebb (1904-1985), neurophysiologiste de formation, est considéré comme le père de la psychobiologie cognitive, qui vise l'étude des grandes fonctions mentales et de leur implémentation/régulation au sein du cerveau et du corps.

– C. Shannon (1916-2001), ingénieur en télécommunication aux laboratoires Bell, fondateur de la théorie de la communication, a développé la notion de capacité d'un canal de communication, et des concepts associés de bruit et de signal exprimés en fonction d'une mesure précise de l'information.

– A. Turing (1912-1954), mathématicien de renom, a remis en question la thèse de Hilbert selon laquelle les mathématiques devaient être (1) complètes, (2) consistantes, et (3) décidables². Il s'est illustré avec la conception de la machine qui porte son nom, une machine universelle capable d'effectuer la même tâche que n'importe quelle autre machine, mais surtout avec l'affirmation que tout ce qui peut être calculé par l'homme peut également l'être par une machine de ce type.

¹ La 2^{ème} cybernétique est plus récente et doit son renouveau à l'arrivée des modèles connexionnistes. Certains auteurs considèrent que ces deux courants de pensée réunis forment l'essence des Sciences Cognitives.

² A cette époque, Gödel venait de démontrer l'incomplétude de l'arithmétique (i.e. il existe des propositions qui, bien que vraies, ne peuvent ni être démontrées ni être infirmées). Turing a surtout travaillé sur la propriété de décidabilité, en montrant qu'il ne pouvait y avoir de méthode (ou, plus tard, ce qui allait devenir la fameuse machine de Turing) définie pour résoudre tous les problèmes mathématiques.

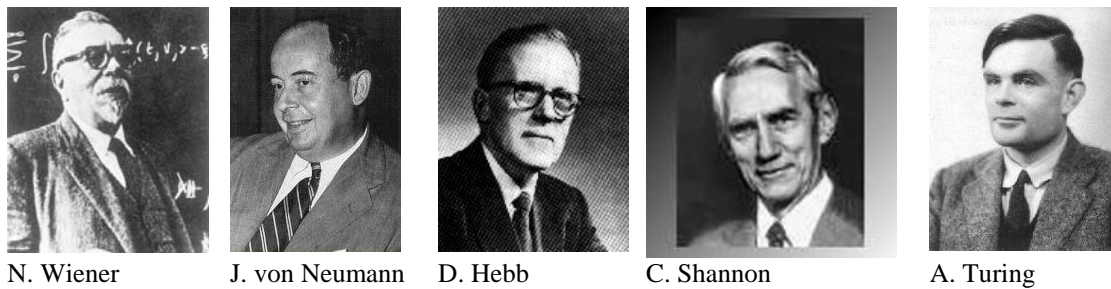


Figure 1 : Quelques-uns des grands chercheurs à l'origine des Sciences Cognitives

En 1960, J. Bruner et G. A. Miller fondent le Center for Cognitive Science à Harvard, et pendant une dizaine d'années de nombreux chercheurs et étudiants y affluèrent pour se former aux nouvelles recherches portant sur les problèmes liés à la connaissance (organisation, représentation, manipulation, etc.).

L'enthousiasme de l'époque était tel que l'on prédisait que dans 10 ans, les machines seraient capables de dialoguer avec l'homme, battre les champions du monde d'échecs et résoudre des problèmes de mathématiques.

Il est clair à présent que les ambitions initiales n'ont que très rarement été confortées par des résultats probants, du moins au sens où cela était envisagé à l'époque. Si la machine peut battre l'homme aux échecs, c'est sans doute plus grâce à sa puissance de calcul que parce qu'elle sait mieux « raisonner » que l'homme. Mais ce programme de recherches originel n'a eu de cesse d'alimenter la curiosité des chercheurs, et continue encore de favoriser le développement de systèmes dits « intelligents », bien que le champ d'applications se soit fortement élargi (statistique et aide à la décision, gestion et économie, etc.). La machine intelligente capable de *communiquer* avec l'homme n'est pas encore parmi nous, mais les concepts formulés dans les années 50 sont aujourd'hui présents dans une très grande majorité de théories scientifiques.

De nos jours, suite à l'évolution de chacune de ces disciplines et à la redéfinition des principaux axes de recherches, on considère plus volontiers que les cinq disciplines qui constituent à proprement parler le champ des Sciences Cognitives sont : l'intelligence artificielle, la philosophie, la psychologie, la linguistique et les neurosciences. A cette liste principale s'ajoutent aujourd'hui d'autres spécialités comme l'économie, l'ergonomie, l'éthologie, etc., qui toutes visent à étudier la dynamique d'un agent individuel (ou d'un ensemble d'agents) en contact avec son environnement, et des moyens qu'il met en œuvre pour produire un comportement adapté aux variations naturelles induites par l'évolution et les réponses de cet environnement.

2.2. Différentes approches

Intelligence Artificielle.

La place de l'intelligence artificielle (IA) au sein des Sciences Cognitives prend toute son importance par le fait que l'on cherche à comprendre la cognition naturelle à l'aide de modèles informatiques. De nombreuses définitions de l'IA ont été proposées, sans qu'aucun consensus n'ait clairement été établi. On pourra retenir comme définition celle proposée par

Alliot et coll. (2002) : « l'intelligence artificielle a pour but de faire exécuter par l'ordinateur des tâches pour lesquelles l'homme, dans un contexte donné, est aujourd'hui meilleur que la machine ». L'IA s'intéresse à de nombreux problèmes et les approches adoptées sont souvent très différentes (algorithmique, conceptuelle, etc.). On distingue principalement deux types d'approche : une *approche cognitive*, dans laquelle prime la modélisation du raisonnement humain, et une *approche opérationnelle*, ou pragmatiste, dans laquelle on cherche à définir des systèmes aussi « performants » que l'homme.

Les tenants de l'approche cognitive se donnent les moyens de proposer des théories du fonctionnement de l'esprit, et surtout de les tester empiriquement. Selon eux, « penser, c'est traiter de l'information » ; en d'autres termes, la pensée peut être assimilée à un ensemble coordonné de manipulations sur des représentations. L'esprit apparaît ainsi pour certains comme une fonction calculable, et par conséquent elle est modélisable sur une machine. Le support physique apparaît de bien moindre importance, et cette approche se situe volontiers dans un cadre purement fonctionnaliste (e.g. Newell & Simon, 1976 et leur hypothèse de systèmes à symboles physiques). L'objet d'étude de cette branche de l'intelligence artificielle est l'agent cognitif isolé (vs. la cognition distribuée ou située, cf. infra), et la pensée comme langage à part entière, c'est-à-dire comme un moyen d'accès privilégié à la connaissance (cf. le cours de linguistique), en particulier l'ensemble des connaissances déclaratives. Cette approche scientifique de la cognition est ainsi une approche analytique de la connaissance et du raisonnement. On parle alors souvent de paradigme *computo-symbolique* pour désigner le courant cognitiviste. L'ordinateur représente le niveau du cerveau ; le logiciel représente le niveau de l'esprit (du système cognitif) ; les informations symboliques représentent le niveau des représentations mentales.

On notera cependant que l'IA regroupe un ensemble d'approches différentes. Ainsi, comme on vient de le voir, l'école symbolique considère la pensée comme une séquence de transformations des représentations, et étudie des agents cognitifs délibératifs. Mais, selon l'école sub-symbolique, la pensée consiste en une transmission et une transformation de signaux, et travaille avec des agents réactifs. Quant à l'école de la cognition située, la pensée n'est pas propre à un seul individu isolé, mais est distribuée au sein d'une société d'individus (incluant son histoire et sa culture), et elle est suscitée par le contexte dans lequel celle-ci évolue. On trouve souvent associés à cette dernière approche les concepts d'émergence et d'auto-organisation.

Quant à l'approche pragmatiste, elle a plutôt pour but de construire des algorithmes – c'est-à-dire des procédures de calcul – en tenant compte des contraintes liées au support, ou à la structure, qui doit les accueillir : l'ordinateur. C'est d'une certaine manière la branche opérationnelle de l'IA, où prime la notion de finalité plus que celle de modèle plausible de fonctionnement de l'esprit humain, i.e. de système symbolique. L'objectif poursuivi est de permettre la reproduction d'un comportement observable chez l'homme (reconnaissance de forme, jeu de stratégie comme les échecs, etc.), mais dont l'implémentation sur la machine tire plus parti de l'architecture fonctionnelle et de la puissance de calcul de l'ordinateur que des schémas hypothétiques des processus de traitement de l'information modélisés chez l'homme. En somme, on est plus dans le domaine de l'optimisation que dans celui du traitement des connaissances formelles et symboliques. Le connexionnisme, qui s'est développé à partir des années 80, en constitue une des extensions les plus importantes. C'est ce penchant applicatif qui est souvent à l'origine de la classification de l'IA dans le domaine des sciences de l'ingénieur, c'est-à-dire comme une boîte à outils pour le calcul, à l'image des équations aux dérivées partielles en Automatique.

Psychologie cognitive.

La psychologie cognitive est une branche de la psychologie qui s'intéresse à la modélisation des fonctions cognitives, ou des activités mentales, chez l'homme. Cette discipline a vu le jour en opposition au courant anglo-saxon béhavioriste selon lequel le comportement résulterait d'un système de type stimulus-réponse : à chaque stimulation de l'extérieur (environnement, interlocuteur, etc.) serait associée une réponse bien précise et peu modulable. Le lien entre les deux est alors assimilé à une boîte noire, et n'est pas directement observable par des moyens scientifiques. L'un des précurseurs de la psychologie cognitive, qui a vu le jour dans les années 60, est U. Neisser (1968). Il expose d'ailleurs dans son livre *Cognitive Psychology* la position de la psychologie cognitive par rapport aux positions des neurophysiologistes qui considéraient que le comportement humain et la conscience dépendent entièrement de l'activité du cerveau, en interaction avec d'autres systèmes physiques. Pour lui, ce qui importe c'est essentiellement la façon dont on procède pour acquérir et traiter de l'information (niveau de la pensée, ou de l'esprit), et pas de savoir dans quelle structure cérébrale ce type de processus est réalisé (niveau du cerveau, ou support physique de la pensée).

En lien étroit avec les autres disciplines (notamment l'intelligence artificielle, la linguistique, et les neurosciences), elle propose des modèles de fonctionnement de la pensée et tente de les tester au travers d'expériences chez le sujet humain ou, parfois, de les simuler à l'aide d'un programme informatique. On peut par exemple proposer des problèmes de logique et observer comment le sujet les résout (approche par observation en situation naturelle ou semi-naturelle). On peut également mesurer des indicateurs plus ou moins objectifs de la performance humaine lors de la réalisation d'une tâche, comme le temps de réaction dans une tâche de détection d'objets sémantiquement différents, ou la typologie des mouvements oculaires (position des fixations, nombre et durée des saccades) lors de la lecture d'un texte (approche quantitative).

Du point de vue de la compréhension des fonctions cognitives, l'analogie avec un programme informatique, ou leur possible implémentation, est souvent très présente en arrière-plan des théories proposées. Selon Neisser, « un programme n'est pas un appareil de mesure de l'information, mais un moyen de sélectionner, de stocker, de récupérer, de combiner, de sortir et plus généralement de manipuler de l'information ». Cette conception n'est pas sans rappeler l'approche cognitive des chercheurs en IA Newell et Simon exposée dans les paragraphes précédents.



Figure 2 : Différentes disciplines concourant au même projet de recherche

Neurosciences.

Ce que l'on appelle à l'heure actuelle Neurosciences est un ensemble de disciplines issues principalement de la biologie – neurobiologie, neurophysiologie, neuropharmacologie, techniques d'imagerie cérébrale – qui tente également de modéliser les activités mentales à partir de l'étude du support physique de ces activités : le cerveau. Mais, à la différence de la psychologie cognitive, qui s'intéresse moins à la structure pouvant accueillir les modèles proposés, les neurosciences partent du principe que la pensée ayant pour support le cerveau, il faut d'abord étudier l'architecture et le fonctionnement de celui-ci car ce sont ces déterminants qui contraignent d'une certaine manière les activités qui peuvent en résulter. On retrouve là une dualité structure-fonction bien connue, où les uns cherchent avant tout un modèle formalisable de fonctionnement, tandis que les autres (neurosciences) ont une approche plus mécaniste et tiennent compte des particularités du matériel physique pouvant sous-tendre les activités mentales. Ces approches peuvent *en ce sens* être considérées comme complémentaires.

Les recherches dans ce domaine ont permis de mettre en évidence de nombreuses caractéristiques fondamentales du cerveau, par exemple :

- son aptitude à évoluer, et éventuellement à se réparer, au cours de la vie (plasticité cérébrale) ;
- sa capacité à traiter de l'information issue de multiples canaux sensoriels (œil, oreille, main, etc.) de manière intégrée, de façon à former une représentation cohérente et unifiée de l'environnement et des objets qui le composent ;
- l'extrême souplesse des mécanismes d'apprentissage (marche, dextérité manuelle, raisonnement, etc.) et de consolidation en mémoire.

A cette approche psychophysiologique des activités mentales est souvent associée une approche de modélisation (on dit également « computationnelle »), dans laquelle on cherche à reproduire ou simuler les réponses du cerveau à l'aide de réseaux de neurones artificiels. Contrairement au modèle du neurone formel de McCulloch, les neurones artificiels introduits ici sont beaucoup plus proches des contraintes biophysiques mises en évidence au niveau du neurone biologique. Ces modèles et programmes informatiques permettront peut-être un jour de proposer des systèmes de remplacement dans le cas de cerveaux endommagés (par exemple, à la suite d'un accident vasculaire ou d'une maladie génétique). Certains systèmes d'audition ou de vision prothétiques³ sont actuellement en cours de développement, même si les capacités qu'ils offrent sont encore bien loin des performances « naturelles » des systèmes perceptifs.

Linguistique.

La linguistique peut se définir comme l'étude de la langue, et de son rôle dans l'élaboration de nos connaissances. En effet, si la langue est l'outil qui nous permet de dialoguer, c'est également le support de l'ensemble de nos connaissances que nous exprimons et manipulons à l'aide de mots dont la signification est intimement liée à nos actes de pensée.

L'un des premiers objectifs des fondateurs des Sciences Cognitives et des tenants de l'IA dans les années 50 fut la traduction automatique. Ce champ de recherches intervenait comme une suite naturelle aux différents travaux réalisés sur la cryptographie lors de la seconde guerre mondiale. L'échec prévisible d'un tel système de traduction automatique est imputable à l'approche naïve de l'époque qui consistait à croire qu'un tel système ne relevait

³ Pour les rétines artificielles, il s'agit par exemple de micro-circuits électroniques insérés à l'interface de la rétine et des cellules nerveuses, qui envoient des projections vers les aires du cerveau dédiées au traitement de l'information visuelle.

que d'un ensemble de procédures syntaxiques, sans nécessité de comprendre le sens du texte à traduire. Ces aspects sémantiques sont au contraire déterminants, comme l'ont montré les différents travaux de linguistique des trente dernières années. La représentation et l'utilisation des connaissances (déclaratives et procédurales) chez l'homme, et le rôle des connaissances non-exprimées dans le raisonnement humain, sont également deux notions très liées, et qui sont à la base de la plupart de nos comportements.

Philosophie.

La philosophie intervient dans ce programme de recherches comme elle l'a toujours fait dans la démarche scientifique. Outre le fait que certains philosophes participent directement aux travaux de recherche des psychologues, par exemple, ils s'interrogent sur la validité des modèles de fonctionnement de la pensée proposés par les différentes communautés de scientifiques.

Par exemple, certains chercheurs en IA font l'hypothèse que les programmes informatiques peuvent être assimilés à des « états mentaux » (version forte de l'IA), alors que le philosophe J. Searle considère que cette théorie est fautive. Selon lui, la syntaxe (le programme formel) est insuffisante pour produire la sémantique (le sens) ; en d'autres termes, il y a une différence fondamentale entre le modèle (que la machine est capable de se représenter) et le concept sous-jacent, qui englobe bien plus de notions que la simple définition de relations spatiales ou temporelles. L'argument souvent cité est celui de la pièce chinoise :

« Supposons qu'on place dans une pièce un individu ne comprenant pas le chinois. Supposons également qu'on lui fournisse un ensemble d'instructions lui permettant, chaque fois qu'on lui donne un ensemble d'idéogrammes, de fournir une réponse qui soit correcte. Par exemple, à l'ensemble d'idéogrammes signifiant : 'quelle est votre couleur préférée ?', les instructions lui disent d'écrire un autre ensemble d'idéogrammes qui signifie : 'le bleu mais j'aime aussi le vert'. Notre individu ne sait pas ce que contiennent les idéogrammes. Les réponses qu'il fournit semblent prouver qu'il comprend le chinois alors qu'il se contente de manipuler un ensemble de symboles formels sans signification pour lui, et qu'il peut très bien, en fait, préférer le rouge. La manipulation correcte des symboles (syntaxe) ne permet pas de supposer la compréhension correcte (sémantique). » (Searle, 1985)

2.3. Un nouveau regard sur la cognition

Comment l'homme fait-il pour raisonner, parler, calculer, apprendre ? Comment s'y prendre pour créer une, ou plus généralement, de l'intelligence artificielle ? Deux types d'approches ont été essentiellement explorées, comme nous venons de le voir :

1) procéder d'abord à l'analyse logique des tâches relevant de la cognition humaine et tenter de les reconstituer par programme. C'est cette approche qui a été privilégiée par l'IA (branche cognitive) et la psychologie cognitive. Cette démarche est connue sous le nom de *cognitivisme*.

2) puisque la pensée est produite par le cerveau ou en est une propriété, il faut commencer par étudier comment celui-ci fonctionne. C'est cette approche qui a conduit à l'étude initiale des réseaux de neurones formels en IA, et que l'on retrouve dans les neurosciences. C'est l'approche du *connexionnisme*.

La complexité de l'organisation fonctionnelle du cerveau humain rend ces approches largement complémentaires : d'une part, il est nécessaire de proposer des modèles formels de traitement de l'information symbolique, qui sont sources de réflexion à la fois sur le fonctionnement des systèmes naturels, mais également sur les techniques de représentation des connaissances mises en jeu ; d'autre part, la prise en compte des contraintes biologiques et physiques des systèmes naturels peut amener à la conception de modèles plus réalistes lorsqu'il s'agira de les implémenter sur une machine.

Les répercussions de l'approche des Sciences Cognitives sont nombreuses pour l'informatique, et ne se limitent pas au développement de systèmes embarqués adaptatifs. Jusque dans les années 50, cette discipline n'était souvent enseignée que comme un ensemble de recettes permettant d'effectuer certaines opérations. L'avènement de l'IA a permis le renouveau des méthodes de programmation, en apportant une nouvelle vision de la conception des programmes. Nombreux sont les langages actuels (C++, Java) qui doivent à cette approche des systèmes symboliques et des langages créés pour leur développement (Lisp, Prolog, Smalltalk) leur force et leur originalité. Le langage Lisp, par exemple, dérive des travaux de A. Church sur le λ -calcul et de ceux de J. McCarthy sur les fonctions récursives. L'idée était d'avoir un langage suffisamment puissant pour permettre de manipuler des fonctions mathématiques. Contrairement au langage de l'époque, Fortran, Lisp ne permettait pas d'opérer simplement sur des quantités numériques. Il permettait en plus de manipuler des atomes abstraits – les symboles – et des combinaisons arbitrairement complexes de tels atomes – les listes. Ce caractère symbolique du langage en a fait l'un des principaux langages de modélisation de l'IA. De même, le langage Prolog a quant à lui été utilisé dans les applications nécessitant l'usage du calcul des propositions (raisonnement, traitement automatique du langage, systèmes experts). L'approche symbolique a également permis le développement de langages spécialisés dans la représentation des connaissances et la modularité des traitements, comme Smalltalk, que l'on retrouve aujourd'hui dans des langages modernes comme Java ou C++. La modélisation UML (« Unified Modelling Language ») est également fortement tributaire de cette approche des systèmes symboliques et des modalités de représentations des concepts du monde physique au sein de tels systèmes.

De manière générale, ce que l'on considère actuellement comme relevant du domaine de l'ingénierie des connaissances découle directement des concepts théoriques développés dans le cadre de l'étude du traitement et des modes de représentation de l'information chez l'homme, et qui ont été, pour une large part, formalisés par les Sciences Cognitives.

2.4. Les domaines d'étude actuels et le concept d'intelligence

Les domaines d'étude ont peu évolué depuis les années 70, si ce n'est que certaines des ambitions applicatives initiales ont souvent été ramenées à des considérations théoriques mieux identifiées et des champs d'action mieux circonscrits. Parmi l'ensemble des thématiques de recherches associées à l'IA, et plus généralement aux Sciences Cognitives, on peut mentionner :

- la résolution de problèmes, au sens général (c'est-à-dire qui ne se limite pas aux simples problèmes de mathématiques ou de raisonnement logique, mais inclut la prise de décision dans des situations plus « proches » de la réalité) ;
- la compréhension du langage naturel ;
- la reconnaissance de scènes visuelles⁴ ;

⁴ Il ne s'agit pas simplement de scènes statiques, comme c'est le cas avec les systèmes classiques de segmentation d'image, mais de scènes dynamiques où les objets sont en mouvement.

– l'apprentissage (sous toutes ses formes : développemental, sensorimoteur, cognitif).

Cette liste n'est bien évidemment pas exhaustive, et chacune de ces catégories se subdivise elle-même en plusieurs champs d'étude : par exemple, la compréhension du langage naturel inclut à la fois le développement de systèmes de dialogue intelligent, la reconnaissance vocale, la traduction automatique du langage parlé, écrit ou signé, etc.

Par ailleurs, l'enjeu initial des Sciences Cognitives étant d'étudier tout ce qui a trait à la connaissance, et par extension la propriété plus générale d'intelligence, il est légitime de s'interroger sur l'actualité des théories concernant l'intelligence. En fait, ce concept est sujet à beaucoup de discussions, et aucune théorie de l'intelligence n'est réellement admise. Pire encore, il n'existe pas de réelle définition du terme. Si dans les années 60, on savait clairement « mesurer » l'intelligence à l'aide d'indicateurs pseudo-objectifs comme le QI (ou pire encore, cf. Gould, 1986), l'approche cognitive, au travers notamment de son influence en psychologie, a entraîné une complète révision du concept d'intelligence. On parle plus volontiers des différentes facettes de l'intelligence (intelligence cristallisée, procédurale, formelle, etc.), que d'*une* intelligence en tant que caractéristique intrinsèque d'un individu. D'autre part, les Sciences Cognitives ont mis l'accent sur les notions de capacité limitée de traitement (on est limité quant à la somme d'opérations que l'on peut effectuer, par exemple mémoriser un grand nombre de chiffres), et de filtre sélectif pour le traitement de l'information. Cette approche cognitive permet d'expliquer en grande partie les différences inter-individuelles lors de la réalisation de tâches particulières (e.g. résolution d'un problème) en termes de performances « intellectuelles », ce qui remplace avantageusement le concept d'échelle d'intelligence défendu avant les années 60. L'intérêt de cette approche est avant tout de permettre d'expliquer ces différences entre individus non pas uniquement en termes de différences de capacité, mais également par des différences au niveau des traitements mis en jeu et de l'ensemble des connaissances (déclaratives et procédurales⁵) utilisées pour réaliser la tâche (A. Tricot).

L'échec relatif des systèmes d'IA symboliques et des modèles cognitivistes (dans les domaines de la résolution de problèmes, de la perception, etc.) découle alors sans doute du fait que le traitement de l'information par un système artificiel, tel qu'il est modélisé au travers de ces approches, s'éloigne considérablement de la manipulation des connaissances et de l'élaboration du sens chez l'être humain.

3. Que sait faire une machine de nos jours ?

Étant donné les objectifs affichés par les précurseurs des sciences cognitives dans les années 60, on est en droit de s'interroger sur ce que sait faire une machine « intelligente » aujourd'hui. En fait, comme on l'a déjà mentionné, il s'avère que les objectifs initiaux⁶ ont rarement été atteints, sauf peut-être dans le domaine des jeux de stratégie, mais que certaines activités peuvent être réalisées par une machine, *sous certaines conditions*. Les raisons sont multiples, et parmi celles-ci, l'un des problèmes vient souvent du fait que l'on a très peu de modèles formels de certaines activités, comme le raisonnement et la prise de décision ; d'autre part, le cerveau humain fonctionne sur un mode massivement parallèle (cf. le cours de

⁵ Ici, les termes déclaratives et procédurales réfèrent, respectivement, aux connaissances liées à l'interprétation de la tâche, de la situation et du résultat obtenu, et aux connaissances liées aux stratégies et procédures choisies par l'individu pour réaliser la tâche.

⁶ En 1984, Edward Feigenbaum définissait l'intelligence artificielle comme une méthodologie qui « doit permettre de rendre les ordinateurs plus intelligents de façon à ce qu'ils montrent des caractéristiques normalement associées à l'intelligence dans les comportements humains, c'est-à-dire la compréhension du langage, l'apprentissage, la résolution de problèmes, le raisonnement... ».

neurosciences), et dès lors il devient très difficile de le reproduire, tout ou partie, sur une machine qui effectue des opérations séquentiellement.

3.1. Calculer

On distingue généralement deux domaines dans le calcul par ordinateur : le *calcul numérique* (calcul de racines cubiques, des décimales de pi, etc.) et le *calcul symbolique* (dérivation et intégration de fonctions, manipulation de polynômes, etc.). Si dans le premier cas, la machine surpasse de loin l'homme, elle affiche de bien moindres performances dans le second, surtout lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre des procédures de raisonnement, et pas simplement de longues chaînes de calcul.

En effet, il est certain que l'ordinateur constitue un outil indispensable lorsqu'il s'agit d'épauler le travail des mathématiciens, comme en atteste la démonstration du problème des quatre couleurs⁷ en 1976, puis en 1997 (cf. Delahaye, 2002, pp. 87-88). Ceci tient essentiellement à la formidable puissance de calcul dont il dispose, et qui rend l'exécution d'opérations numériques complexes ultra-rapides. Ainsi, quand bien même l'être humain utiliserait la même formule optimisée de calcul pour les multiplications entre grands nombres que l'ordinateur⁸, il n'en mettrait pas moins de temps qu'avec la manière classique, et il mettrait en tout cas toujours plus de temps que ce dernier. Certaines tâches ne peuvent par ailleurs strictement pas être réalisées par l'être humaine : songez au calcul des 7816230 chiffres qui composent le dernier nombre premier connu ($2^{25964951}-1$)⁹ ou au 206158430000 décimales de Pi qui ont nécessité 46h07 de calcul et 817 Go de mémoire centrale ! Mais lorsque le problème suppose des raisonnements complexes, où prime parfois « l'intuition » du mathématicien, ou la manipulation d'entités abstraites, la machine n'est guère performante.

3.2. Reasonner

Depuis le Logic Theorist de Newell, Shaw et Simon (1956), le premier programme d'IA qui avait pour objectif la démonstration automatique de théorèmes, et le GPS (General Problem Solver) des mêmes auteurs, peu de systèmes informatiques sont capables de raisonner, au sens courant du terme – un enchaînement d'énoncés ou de représentations symboliques conduit en fonction d'un but, ce but pouvant prendre des formes variées : démontrer, convaincre, élucider, interpréter, décider, justifier, expliquer, etc. –, et les rares systèmes intelligents qui ont vu le jour sont généralement limités à un domaine d'expertise particulier, encore appelés « micro-mondes ».

Les systèmes experts sont sans doute les seuls programmes « intelligents » qui ont des retombées industrielles et économiques. Citons parmi ceux-ci MYCIN (1974), un système de diagnostic médical utilisé principalement pour aider les médecins dans leur formation,

⁷ Le problème des quatre couleurs, formulé en 1852, stipule que sur une carte de géographie, il est toujours possible de colorier, avec 4 couleurs uniquement, chacun des pays de sorte qu'aucun pays n'ait un pays voisin de la même couleur.

⁸ De nombreux logiciels de calcul utilisent en effet la règle de calcul de Karatsuba pour les multiplications entre grands nombres. Cette règle utilise la propriété suivante :

$(a + b \times 10^k)(c + d \times 10^k) = ac - [(a-b)(c-d) - ac - bd] \times 10^k + bd \times 10^{2k}$, et fait gagner 25 % de temps lors du calcul car les additions sont plus nombreuses mais sont d'un coût négligeable par rapport aux multiplications.

⁹ <http://www.mersenne.org/>

DENDRAL (1964), un système d'analyse chimique, R1/XCON (1982), un système permettant de calculer la configuration d'un système informatique, en fonction de contraintes données par un client (moyens financiers, espace disponible, mémoire requise, puissance de calcul désirée). Notons d'emblée que MYCIN ne présente pas vraiment les capacités de raisonnement d'un sujet humain, puisque ce système utilise un ensemble de règles probabilistes et de coefficients numériques de croyance. En fait, tous les systèmes experts reposent sur une architecture relativement similaire, qui inclut une base de connaissances (les faits de la réalité à connaître), une base de règles et un moteur d'inférence (un ensemble de règles procédurales permettant de manipuler les données fournies en entrée). Si l'organisation, ou la structure, de tels systèmes s'inspirent grossièrement des mécanismes de stockage et de représentation de l'information de l'être humain, tels que modélisés par la psychologie cognitive, leurs règles internes de fonctionnement s'en éloignent considérablement, et ils ne sont pas capables de transférer leurs connaissances à un autre domaine d'expertise. Cela est sans doute dû au fait que nos connaissances sur nos propres modes de raisonnement sont encore imparfaites, et seules certaines activités comme la prise de décision dans une situation particulière peuvent être modélisées de manière suffisamment précises. Un expert humain n'est pas capable d'explicitier toutes les connaissances, ni l'ensemble des règles de déduction, sur lesquelles reposent sa prise de décision. Le domaine de connaissances des systèmes experts est par conséquent fragmentaire, et les méthodes de calcul logique censés permettre le « raisonnement » du système sont donc encore loin de reproduire fidèlement le comportement de prise de décision chez l'humain.

Le problème essentiel vient du fait que le raisonnement ne peut se résumer à une simple succession d'opérations logico-mathématiques : en d'autres termes, raisonner n'est pas calculer ! La manipulation, la transformation et l'expression des connaissances dont nous sommes capables dans une situation nécessitant une évaluation objective, un jugement ou une prise de décision rationnelle font intervenir un ensemble de processus d'une grande complexité (cf. le cours sur la logique), dont une partie peut être de nature inconsciente, si bien que peu de modèles globaux du raisonnement humain sont actuellement satisfaisants.

A titre d'exemple, prenons le problème classique des tours de Hanoï : le jeu consiste à transférer des disques de grandeur décroissante d'un piquet à un autre (il y a 3 piquets au total), sans que jamais un disque de diamètre plus grand ne se trouve au-dessus d'un disque de diamètre inférieur. Lorsqu'il y a 3 disques, il faut 7 coups au minimum pour y parvenir, mais lorsqu'il y a 8 disques, il faut 255 coups pour parvenir à la solution. En fait, on peut montrer qu'il faut $2^n - 1$ coups au minimum (n désignant le nombre de disques). Il existe un algorithme qui permet de réaliser ces déplacements en $2^n - 1$ coups, car il existe un procédé systématique de résolution de ce type de problème. En revanche, si l'on donne ce type de problème à une personne quelconque, elle mettra soit plus de temps pour arriver à la solution, soit elle jouera le même nombre de coups que l'ordinateur, mais sans être capable d'explicitier la méthode – on parle également d'heuristique – qu'elle a utilisée...

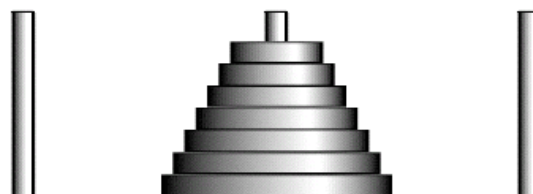


Figure 3 : Les tours de Hanoï.

3.3. Communiquer

Il n'existe pas à l'heure actuelle de machine capable de soutenir une véritable conversation avec l'être humain. En revanche, certains systèmes de reconnaissance vocale sont relativement performants (encore qu'ils sont bien souvent limités à l'identification de certains mots ou phrases isolés...). La difficulté vient essentiellement de ce que nous avons dit précédemment : la signification d'un énoncé ne résulte pas simplement de l'interprétation des mots qui composent cet énoncé. L'interprétation procède souvent de l'analyse d'un ensemble d'informations qui ne sont pas contenues dans l'énoncé même, comme le contexte d'énonciation, la connaissance du locuteur, etc. On retombe également sur le fossé qui sépare le modèle du concept : nous n'avons aucun mal à nous représenter le concept de table et ce qu'il sous-entend (sans parler du « pourquoi » du mot *table* pour désigner cet objet physique particulier), mais transférer ces connaissances à une machine est une chose très délicate. C'est le domaine de « l'apprentissage computationnel », qui allie des méthodes algorithmiques puissantes (mais souvent élémentaires) à des systèmes de base de connaissances élaborés. On peut, par exemple, imaginer que pour qu'une machine se représente correctement le mot *table*, elle doit posséder certaines connaissances sur ce concept, et ne pas avoir simplement un modèle de l'objet physique. Ces propriétés, qui alimenteraient sa base de connaissances, pourraient s'exprimer ainsi :

– possède 4 pieds	VRAI
– possède une queue	FAUX
– possède un siège plat	VRAI
– est de couleur marron	IRRELEVANT
– est un objet animé	FAUX

Cette liste n'est bien évidemment pas exhaustive, et n'est indiquée que pour illustrer la complexité d'une description complète d'un objet physique, que nous utilisons couramment sans même songer à le décrire explicitement. D'autre part, la notion de concept prend tout son sens lorsque l'on songe qu'il ne suffit pas simplement de fournir une description adéquate de l'objet physique à la machine, mais également des relations que celui-ci partage avec les autres objets physiques. Une table est ainsi souvent associée à l'objet chaise, dans une optique très utilitaire : manger, discuter (« autour d'une table »), ou beaucoup plus symbolique (le mot *chaise* vient spontanément à l'esprit lorsque l'on évoque le mot *table*).

De manière plus générale, la communication sur un sujet particulier implique de nombreuses co-références à des concepts voisins, que l'on traite sans y penser mais qui influence notre élaboration du sens du dialogue (cf. le cours de linguistique).

En revanche, l'utilisation de la machine pour visualiser des ensembles de données complexes est un domaine en pleine expansion. On a en général du mal à se représenter certaines données en 3 dimensions, et il n'est généralement pas possible d'aller au-delà (4D, 5D, etc.). Il est alors encore plus difficile de manipuler ces représentations (par exemple, le maillage d'un objet géométrique 3D). De la même manière, il est parfois utile de pouvoir filtrer la masse d'informations afin d'en faire ressortir les traits saillants (e.g. en statistique multidimensionnelle exploratoire, ou data-mining). Dans ces domaines, la machine offre un support de visualisation et de manipulation excellent., et apparaît, comme dans le domaine du calcul, un *outil* précieux.

3.4. et le reste ?

Il reste bien d'autres activités humaines sur lesquelles travaillent les chercheurs : la perception et l'action, l'apprentissage, etc. Cela dépasse l'objectif de ce cours qui visait

simplement à une présentation rapide des Sciences Cognitives et au survol de quelques-unes des applications informatiques qui découlent tout naturellement de ce programme de recherches. Le lecteur intéressé trouvera dans les ouvrages donnés en référence matière à de plus amples développements sur ces thématiques.

4. Perspectives : des automates de Vaucanson à la théorie du Chaos

L'ensemble de ces données met en lumière un autre aspect théorique très intéressant, celui de la *complexité*. En effet, les différentes problématiques exposées jusqu'ici, centrées autour de l'acquisition et la manipulation des connaissances, ont permis de mettre en évidence les diverses facettes du problème de l'étude de la cognition, et les moyens mis en œuvre pour tenter d'en cerner les modalités de fonctionnement. Bien que différents systèmes aient été étudiés, l'objet central est bien l'homme chez qui l'observation du comportement le plus élémentaire laisse entrevoir une complexité inégalée.

Cette notion de complexité est une notion très à la mode de nos jours, et on l'a trouve souvent associée à celle du *chaos*. Bien que ce champ d'étude intéresse des disciplines aussi variées que la biologie, la physique, les mathématiques, et soit promis à l'heure actuelle à des programmes de recherche très féconds en nouvelles théories explicatives, il n'existe pas à l'heure actuelle de définition générale de la complexité (cf. cours sur les Systèmes Adaptatifs Complexes), ou de la notion concomitante d'ordre. Chacun a sa propre vision et ses propres moyens d'étude du phénomène dans sa discipline. Mais, il ne fait aucun doute que cette nouvelle branche théorique pourra servir à termes de programme fédérateur de recherches au sein des Sciences Cognitives. A titre d'exemple, on peut mentionner les différents apports des Sciences Cognitives dans la compréhension de ce phénomène.

Du côté de la neurobiologie, il a ainsi été proposé que la transmission de la communication entre un neurone et les neurones de son voisinage est quantique, et par conséquent loin d'être garantie. En d'autres termes, l'information transmise entre les unités de traitement fondamentales du cerveau obéirait à un processus de transmission probabiliste, ce qui laisse entrevoir une combinatoire d'une richesse exceptionnelle. Mais, il a également été montré que ces interactions entre neurones peuvent être modulées par l'apprentissage, ce qui laisse suggérer que cette combinatoire possède une valeur adaptative indéniable pour le comportement. En économie, l'analyse des krachs financiers a remis en question l'idée que ceux-ci sont des phénomènes aléatoires imprévisibles (i.e. chaotiques), c'est-à-dire désordonnés, mais que, bien au contraire, ils sont le reflet de l'ordre total. Un krach boursier se produit lorsque tout le monde vend en même temps ses actions. Cette phase est précédée par ce que l'on appelle une « bulle spéculative », dans laquelle les agents économiques interagissent dans une boucle de rétroaction positive (les individus s'imitent les uns les autres car c'est dans leur intérêt) ; petit à petit, cette bulle spéculative se renforce, jusqu'à ce que le marché devienne instable et soit « corrigé » par un krach. L'ordre semble par conséquent émerger du désordre. En éthologie, une approche similaire dans le cadre de l'étude de l'évolution des colonies de fourmis a mis en évidence que, malgré le désordre apparent (certaines fourmis construisent des structures que d'autres détruisent aussitôt), certaines régularités existaient dans l'organisation globale de leurs comportements ainsi que dans les structures qui en découlent. Au niveau collectif, l'ordre semble ici résulter, ou plutôt émerger, de processus auto-organisés, dans lesquels les processus d'apprentissage et de compétition entre individus, associés à un mode de communication très efficace, jouent un rôle très important.

Si la modélisation des systèmes complexes bénéficie très largement de cette nouvelle approche de la complexité, il n'en demeure pas moins qu'au niveau de l'individu isolé, les

mécanismes qui régissent et organisent son comportement sont beaucoup moins bien compris. Et ce manque peut parfois se retrouver au niveau même de la compréhension du système collectif. Par exemple, on sait très bien modéliser le système du trafic routier à l'aide de modèles statistiques (à l'aide des variations du trafic sur les dix dernières années) ; en revanche, les modèles de chaos déterministe (le désordre « auto-ordonné » vu au paragraphe précédent) ne mènent à rien car il manque un paramètre essentiel : le comportement humain. Or, c'est bien l'interaction entre le conducteur, sa voiture et l'environnement qui permet d'expliquer les phénomènes d'embouteillage.

Bibliographie

- Alliot, J.-M., Schiex, T., Brisset, P. & Garcia, F. (2002). *Intelligence Artificielle & Informatique Théorique*. France, Cépaduès Éditions.
- Andler, D. (2002). *Introduction aux Sciences Cognitives*. Paris, Folio.
- Collectif (2002). *Ordre & désordre*. La Recherche Hors-Série
- Delahaye, J.-P. (2002). *L'intelligence et le calcul. De Gödel aux ordinateurs quantiques*. Belin, Pour la Science.
- Feigenbaum, E. & McCorduck (1984). *La cinquième génération*. Paris, InterEditions.
- Georges, C. (1997). *Polymorphisme du Raisonnement Humain*. Paris, Presses Universitaires de France.
- Gould, S.J. (1983). *La malmesure de l'homme*. Paris, Livre de Poche.
- Neisser, U. (1968). *Cognitive Psychology*. New York : Appleton-Century-Croft
- Pellisier, A. & Tête, A. (1995). *Sciences Cognitives. Textes fondateurs*. Paris, Odile Jacob.
- Searle, J.R. (1985). *Du cerveau au savoir*. Paris, Hermann.
- Simon, H.A. (1996). *The Sciences of the Artificial*. Cambridge, MA, The MIT Press.
- Tricot, A. (1998). Problèmes et actualité du concept d'intelligence.
http://www.bretagne.iufm.fr/ress-peda/ssh/concept_intell/pr.htm
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge, MA, The MIT Press.