

Le développement de la robotique industrielle

Les concepts, les méthodes ainsi que les techniques de la robotique constituent des enjeux scientifiques, économiques et sociaux majeurs. Selon la Japan Robotics Association, le marché global de la robotique, estimé à 11 milliards de dollars en 2005, pourrait passer à 24,9 milliards de dollars en 2010, puis décoller en 2025 en atteignant 66,4 milliards de dollars. Les fantasmes de la science fiction ont joué et jouent encore un rôle dans la robotisation de l'ensemble des domaines d'activité. La corrélation entre une forte culture de la robotique de science fiction et l'effort de robotisation de la société s'illustre par la situation particulière du Japon où l'industrie manufacturière en 2004 utilisait 322 robots pour 10000 personnes employées, alors qu'en Europe le nombre de robots pour 10000 personnes employées atteignait seulement 93.

Cependant, les raisons fondamentales liées au développement de la robotique se révèlent plus pratiques, notamment avec les avantages liés à la sécurité des individus, au contrôle de la qualité et à la vitesse de production. La naissance de la robotique industrielle remonte au début des années 60. Un robot industriel se définit succinctement comme une machine possédant plusieurs degrés de liberté et effectuant automatiquement ou semi-automatiquement des opérations de fabrication. Il se conçoit dans un cadre complètement déterminé tant au niveau des objectifs qu'au niveau des contraintes environnementales. La complexité de sa réalisation prend sa source dans la gestion des nombreux axes de liberté et dans leurs mises en œuvre en vue de répondre aux objectifs. En plus des avantages cités précédemment, la robotisation des chaînes de production offre une meilleure flexibilité, ce qui est devenu un critère important en économie. Entre 1990 et 2003, l'indice des prix des robots industriels chute de 100 à 16 en tenant compte à la fois de l'amélioration des performances et de l'augmentation de l'indice de la main d'œuvre dans les entreprises françaises. Cette diminution des coûts ainsi que l'amélioration des techniques entretient en moyenne une croissance régulière de 13,5% par an. En 2004, le parc de la robotique industrielle mondial regroupait environ 850 000 unités.

Il y a une dizaine d'années, le monde de la robotique se composait essentiellement de robots industriels. En 2005, la robotique de services représentait 42% du marché total, en 2025 elle devrait représenter les trois quarts. Les robots de services professionnels se scindent en deux catégories : d'une part les robots assistants qui participent à la réalisation d'une tâche en collaboration étroite avec un opérateur humain, et d'autre part les robots autonomes qui réalisent, indépendamment d'un opérateur humain, une tâche n'ayant pas pour finalité la participation à la fabrication.

La robotique d'assistance s'immisce dans des activités de plus en plus variées. La robotique de services ne se limite plus à la conquête spatiale, bien que, dans ce domaine, elle demeure toujours incontournable. Avec 5400 unités, les robots sous-marins participaient à 21% du nombre total de robots de services pour les professionnels en 2004. L'exploitation des ressources de la mer et la maintenance des centrales nucléaires (Kansai) mobilisent la majorité de ces robots. Les services de nettoyage, pour les avions par exemple (Skywash) et les services de manutention ou de démolition se répandent également, représentant respectivement 14% et 13% du parc des robots de services à destination des professionnels.

Bien que la robotique d'assistance à usage militaire soit devenue une réalité, il reste difficile de parvenir à une estimation chiffrée. Néanmoins, la société iRobot affirme que 150 de leurs robots participent au conflit irakien. Par ailleurs, dans le domaine de la santé, le robot permet aujourd'hui d'améliorer considérablement les pratiques de haute technicité pour des opérations bien définies et toujours sous le contrôle total du praticien (MKM, Zeus, CASPAR). Leur nombre dépassait déjà les 3000 unités en 2004. La robotisation du monde médical commence à s'étendre à l'assistance de personnes souffrant de cécité, en les accompagnant ainsi dans la vie quotidienne tout en veillant à leur sécurité et à leur santé. Ainsi apparaissent des robots prenant la forme d'un bras manipulateur sur fauteuil roulant (MANUS) ou de petits robots mobiles pouvant aider à transporter des objets (Care-O-Bot). La conception de ces derniers doit prendre en compte, pour la première fois, la notion de convivialité qui passe par une réflexion sur l'ergonomie et sur la communication homme-machine. Toutefois, l'interaction avec un robot de relation publique dans un cadre normal reste très limitée ; cela se traduit par un nombre restreint de mises en service de ce type de robot, 20 dans le monde en 2004.

Ce rapide aperçu des activités susceptibles d'utiliser la robotique d'assistance ne se trouve pas réservé aux domaines précédemment évoqués. Les besoins émergent de façon imprévisible, comme le montre l'insolite robotisation des jockeys pour la course de dromadaires en Arabie Saoudite. Tous ces robots d'assistance restent sous la supervision d'un opérateur humain. Les robots mobiles complètement autonomes se limitent à des tâches de nettoyage, des navettes de transport ou de surveillance (CyberGuard) dans des environnements clos et connus. L'autonomie se comprend comme la non intervention de l'homme pour indiquer ou pour aider la réalisation par le robot de la tâche définie lors de sa conception.

Malgré les difficultés dans la communication homme-machine, la diversité des systèmes robotiques ainsi que celle de leur mise en œuvre parfois en milieu hostile démontrent la robustesse des techniques employées et contribuent à encourager leur diffusion. Selon le World Robotics 2004, le nombre de robots de service pour professionnels aura triplé en 2008 pour atteindre 70 000 unités. En ce qui concerne la robotique de services pour particuliers, le marché explose. Introduit en 2001, le nombre de robots aspirateurs autonomes s'élève à 1,2 millions en 2004 dont 500 000 vendus cette

même année. Le marché des tondeuses à gazon autonomes prend la même envolée. Les prévisions pour 2008 estiment à 7 millions le nombre de robots ménagers. Un autre marché connaît un véritable essor, celui de la robotique ludique. Aibo, le précurseur et le plus renommé d'entre eux, s'apparente à un chien possédant plusieurs fonctionnalités dont certaines peuvent être adaptées à l'utilisateur comme la reconnaissance vocale. L'annonce de l'arrêt de la production de ce robot chien n'a pas découragé la concurrence qui propose déjà des modèles similaires. Le Robosapien, jouet en forme de robot humanoïde partiellement programmable, commercialisé par Wow-Wee, a été l'un des succès de 2004, avec plus de 1,5 millions d'exemplaires vendus. Les prix des robots domestiques et des robots jouets baissent continuellement. Ainsi l'offre s'ajuste de plus en plus à la demande. Toutefois, le nombre de robots vendus restent encore faible par rapport à la population susceptible d'acquérir ce nouveau type de matériel. Les enjeux économiques se trouvent donc principalement liés à la robotique d'assistance et domestique.

B - Deux approches pour la robotique contemporaine

La recherche et le développement de la robotique contemporaine se scindent alors schématiquement en deux directions. La première, qui représente le courant majoritaire, collecte, améliore et intègre les techniques résolvant des problèmes élémentaires mais non-triviaux, comme l'extraction d'informations, la gestion de l'espace, la prise de décision, ou encore l'optimisation des coordinations motrices. Les techniques viennent de différents horizons scientifiques comme la modélisation d'inspiration biologique ou la physique statistique. L'approche cartésienne qui consiste à décomposer un problème en sous-problèmes reste privilégiée. Un effort important est consacré à la spécification des problèmes. De véritables plates-formes de développement pourraient être constituées afin d'accélérer le développement et l'évolution des produits, d'augmenter les performances et les capacités d'adaptation des systèmes face à la diversité des tâches et de leur environnement. L'INRIA a depuis longtemps orienté ses efforts sur le concept de modularité. Microsoft a annoncé, en 2004, la mise au point d'un kit de développement pour robots. Des tentatives de standardisation des problèmes existent, tel le réseau thématique CLAWAR ou la spécification JAUS du département de la défense américaine. Pour l'instant, chaque système robotique conserve ses spécificités matérielles et logicielles adaptées à chaque situation et à des projets précis.

Lors de la conférence RoboBusiness, en 2005, Breazeal, chercheuse au Medialab du MIT résume assez bien les objectifs de la seconde direction de la recherche robotique : « Un robot n'est pas un outil, mais un partenaire. Les robots doivent être dotés d'une personnalité, et être capables de comprendre nos intentions et ce que nous sommes, pour devenir de véritables partenaires, utiles, capables de collaborer avec nous et de s'intégrer socialement à notre environnement ». Dans les faits, cela se comprend comme l'analyse des différents traits d'émotions perçus chez l'homme dans le but de créer une base communicationnelle à réutiliser dans les systèmes robotiques. La compréhension des intentions doit ici s'entendre comme la reconnaissance comportementale de problèmes humains types auxquels le robot aura associé un comportement plus ou moins appris. L'intégration à son environnement se veut être l'ensemble des réactions assurant le bon accomplissement de ses tâches et l'intégrité du système robotique. La décomposition fonctionnelle de la première direction de recherche se retrouve également dans la seconde mais elle reste centrée sur les aspects cognitifs de l'homme inhérents à une bonne interaction avec les machines, notamment la capacité de chaque être humain à projeter des intentions voire une « humanité » sur des choses animées qui en sont dépourvues.

Ces enjeux scientifiques inscrivent le développement de la robotique contemporaine dans une vision de « convergence intégrative » entre les sciences physiques, les sciences de l'ingénieur associées aux technologies de l'information, les sciences cognitives et les sciences sociales. Un défi majeur concerne leur intégration au sein d'un même système robotique.

C - Limitations de la robotique autonome

Néanmoins, ces approches avec leurs réalisations de haute technologie semblent être en contradiction ou du moins en dissonance avec les promesses médiatiques sur leur totale autonomie et leur intelligence. En effet, il existe une différence entre l'imitation d'un comportement qualifié d'intelligent et un comportement produit par un système intelligent, la différence résidant dans la capacité d'adaptation à un changement brusque et imprévu de l'environnement qui nécessite, a posteriori, une réévaluation des enjeux et une redéfinition des acteurs.

L'illustration de ce propos peut se faire en imaginant la situation suivante. Un robot autonome explore un conduit d'aération. À intervalles réguliers, il trace de petits ronds à l'aide d'un bras muni d'un feutre sur la surface plane la plus proche. Ces traces permettront ensuite au système de retrouver son chemin. Le bras peut toucher toutes les parois, mais le sol et les côtés se situent le plus souvent à proximité. Maintenant se présente une situation imprévue, le nouveau conduit à explorer se trouve être également le logement d'un rat qui apprécie le goût du feutre. Le rat efface systématiquement toutes les marques en les léchant. Un système se limitant à la stricte réalisation de la tâche ne perçoit pas le problème, et sans autre solution de secours, il sera condamné à rester bloqué dans le conduit. En robotique classique, la difficulté rencontrée par ce robot constitue une occasion pour mettre à jour les spécifications du problème de l'exploration dans les conduits d'aération, voire de reformuler toute la problématique. Les concepteurs parviendraient sans difficulté à obtenir un robot accomplissant sa fonction malgré la présence de rats. S'il y a adaptation ou apprentissage par essai-erreur, elle se trouve au niveau des concepteurs. Un robot doté de capacités cognitives serait capable d'identifier la présence de quelque chose, de repérer que celle-ci abîme les précieuses traces et de constater que cette même chose ne semble pas pouvoir atteindre le plafond ; puis il serait capable d'en conclure qu'il faut modifier son comportement en écrivant seulement au plafond. Ce type de scénario n'exige pas des capacités cognitives d'ordre supérieur, un corbeau dans une situation analogue y arriverait sans difficulté comme le montre les expériences éthologiques de Lorenz (1950) mais aucun robot pour l'instant n'en est capable dans le principe. Le problème n'est plus celui de l'exploration du conduit d'aération mais celui de la construction d'une problématique. Par ailleurs, les limites de la conception par desseins renvoient aux questions fondamentales posées par l'évolution biologique.

Mais la robotique a-t-elle réellement besoin de ces capacités cognitives si difficiles à définir ? La méthodologie de la robotique classique permet de résoudre des problèmes divers et variés. En 2004, le DARPA a organisé une compétition de robotique autonome dont l'épreuve consistait à parcourir 200 km dans un désert rocaillieux. La meilleure équipe, sur plus d'une vingtaine participantes, ne dépassa pas 13 km. L'année suivante, toutes les équipes atteignirent l'objectif à la même épreuve. En un an, il n'y a eu aucune révolution des outils ou des algorithmes en robotique autonome mais une réévaluation précise des caractéristiques environnementales, des besoins et des fins. Pour 2008, l'épreuve sera de traverser une grande ville. La puissance de la robotique moderne s'appuie sur une démarche d'ingénierie itérative, incrémentale. Il est légitime de penser que les 20 prochaines

années se nourriront de ces technologies. Le marché de la robotique s'ouvre et la technologie commence à être à la hauteur des premiers besoins. Les robots grand public seront peu onéreux, simples et surtout, ils assureront des tâches bien identifiées au sein du foyer. Cependant, la variété des problèmes (et leurs imbrications) pour un robot de service aux tâches complexes, reposant sur une interaction, est considérable ; non seulement à cause de la variabilité des personnes et de leurs intérêts, mais également à cause de leurs situations environnementales et sociales. Les robots classiques multifonctions et interactifs obligent à une spécification perpétuelle, au gré de l'activité du robot et des événements. Chaque robot devra être suivi par une équipe de roboticiens. Cet artisanat robotique restreint et restreindra toujours la robotique classique dans sa démocratisation et dans sa diffusion au sein des activités humaines.

L'espoir d'un avenir à long terme pour la robotique passe alors obligatoirement par une troisième voie de recherche : l'étude des propriétés cognitives et leurs possibles intégrations dans des systèmes robotiques en vue de leur conférer une autonomie cognitive. Cette autonomie permettrait au système robotique de spécifier lui-même ses propres problèmes. Dans ce cadre, la communication entre l'homme et une entité cognitive robotique s'apparenterait davantage aux interactions que l'homme peut avoir avec un animal doté de capacités cognitives, tel qu'un chien. Les représentations et les dispositions à agir étant intimement liées au corps de l'entité cognitive, il semble impossible qu'un humain puisse considérer un robot comme son homologue. En effet, de nombreux travaux en psychologie mettent en évidence l'importance des contingences sensori-motrices (Dewey, 1896 ; Piaget, 1987) dans l'élaboration des capacités cognitives. Dans la perspective plus large de concevoir un robot comme un animal, celui-ci ne serait plus programmé mais dressé pour une tâche. La phase de dressage ne doit pas être ici considérée comme un handicap mais comme une souplesse à la fois pour la réutilisation des systèmes robotiques et pour la prise en main par les utilisateurs. Le résultat d'un dressage pourrait être mémorisé et réutilisé pour un robot morphologiquement identique.

Toutefois, est-il concevable de créer une entité artificielle dotée de capacités cognitives ? Si oui, comment ? Si non, pourquoi ? Est-il possible de définir ces capacités cognitives ? Ces interrogations dépassent largement les enjeux évoqués précédemment. En effet, elles questionnent la source de notre propre cognition, notre faculté de penser. Naturellement, les questions relatives à la connaissance sont depuis longtemps traitées par les philosophes, et particulièrement par ceux du XX^e siècle. À ces philosophes se sont rajoutés les psychologues, les pédagogues, les épistémologues, les neurologues, les biologistes et les mathématiciens. Grâce à l'apparition de l'informatique, la robotique offre des moyens expérimentaux pour la simulation des modèles de processus ou principes cognitifs, ce qui représente un véritable tournant pour ces différentes investigations. Pour les positions qui admettent la faisabilité d'un tel projet, la robotique cognitive associée à l'intelligence artificielle représente l'incarnation d'un problème philosophique.

D - Objectifs de la thèse

Les cinquante dernières années de recherche rattachées aux sciences cognitives furent l'objet de nombreuses controverses sur le choix du paradigme. Bien qu'elles aient permis de dégager un grand nombre de concepts favorisant la discussion, à l'heure actuelle, aucun paradigme ne domine entièrement les sciences cognitives. Même s'il existe un continuum entre eux, quatre pôles participant à l'exploration des processus cognitifs apparaissent dans le paysage de la robotique : le fonctionnalisme, l'évolutionnisme, la modélisation neurophysiologique, et l'interactionnisme. Le premier courant revendique une approche

similaire à celle de la robotique classique en décomposant la cognition en fonctions élémentaires mais s'inspirant des situations et des concepts issus de l'éthologie et de la psychologie. L'évolutionnisme cherche les propriétés élémentaires de systèmes primaires dans leurs processus de transformation qui évolueront naturellement vers des systèmes cognitifs. La modélisation neurophysiologique considère que la compréhension de la cognition passe par l'analyse du substrat des propriétés cognitives, le système neuronal. Le dernier courant, l'interactionnisme, considère la cognition comme étroitement liée à deux principaux aspects : le couplage continu par le biais des activités sensori-motrices ainsi que l'ensemble d'activités endogènes auto-organisées en accord avec le contexte écologique. Les algorithmes dégagés au cours de ces années de recherche continuent à être exploités en robotique classique, cependant ils ne parviennent pas à atteindre les prémices d'une autonomie cognitive. Selon Brooks (2001), l'un des pères du renouveau de la recherche en robotique, le manque de résultats suggère une ou plusieurs impasses conceptuelles qui demeurent floues au regard de la communauté scientifique. Ici, ce mémoire souhaite contribuer au déblocage de ce verrou conceptuel.

L'identification de ce verrou conceptuel passe par une analyse fine des différents paradigmes présents en robotique cognitive. Avec cet objectif en vue, le premier chapitre présentera les quatre pôles des sciences cognitives sous un nouvel angle, c'est-à-dire définir une arborescence des approches à partir de la manière dont celles-ci abordent le problème de la description de l'individu autonome. La première bifurcation sépare les approches souhaitant décrire l'individu en soi de celles souhaitant décrire la construction de l'individu par ses capacités d'agir. Pour chacun de ces niveaux de description de l'individu, une synthèse des principales approches sera proposée. Au préalable, afin de les comparer, une grille d'analyse sera établie. Celle-ci, se voulant la plus large possible, reposera sur certains concepts philosophiques et épistémologiques qui seront rappelés. Cette grille d'analyse permettra de mettre en avant malgré leur grande variabilité, le point commun de toutes ces approches. Ce point commun situé au cœur des paradigmes révélera la nécessité d'analyser le concept de vérité afin de savoir si le projet d'une robotique cognitive est sensé, et si oui, à quelles conditions.

L'analyse du concept de vérité ouvrira le deuxième chapitre expliquant les quatre types de vérités implicitement liées aux paradigmes des sciences cognitives fondant la recherche en robotique. Les critiques épistémologiques et logiques de chacune d'entre elles conduiront à considérer la vérité comme une notion indéfinissable, expliquant ainsi l'origine du verrou conceptuel en robotique cognitive. Cependant, la présentation d'une définition pragmatiste de la vérité offrira l'occasion de sortir de cette impasse. L'explicitation des conséquences épistémologiques permettra d'avancer une généalogie de la cognition.

Dans ce cadre, le troisième chapitre définira précisément la cognition ainsi que les concepts nécessaires à sa compréhension. De cette définition, seront extraites les notions d'architecture cognitive et schèmes cognitifs qui offriront des éléments de réponses concernant la faisabilité et la pertinence de l'artificialisation de la cognition, soit de la robotique cognitive. À partir des algorithmes issus des systèmes de classeurs qui seront analysés, seront présentées successivement une spécification d'une architecture cognitive puis son implémentation.

Le dernier chapitre exposera l'évaluation de l'architecture cognitive implémentée avec un schème cognitif élémentaire afin de vérifier que celle-ci possède bien les propriétés nécessaires au développement de la cognition. Dans un premier temps, l'évaluation du

système robotique portera sur le matériel utilisé et la méthodologie employée afin d'apprécier les capacités d'adaptation. Dans un second temps, l'évaluation du système robotique portera d'une part sur les expériences réalisées en environnement simulé et d'autre part sur celles réalisées en conditions réelles. L'analyse des résultats montrera que l'architecture cognitive développée possède les propriétés que renferme ce modèle élémentaire et par extension le potentiel du formalisme dans lequel il s'inscrit.

La conclusion de ce mémoire rappellera l'enchaînement des principales étapes conduisant à la formalisation d'une philosophie pragmatiste de la cognition. Cette dernière se montera suffisamment explicite pour imaginer et implémenter des modèles cognitifs dans un robot mobile immergé dans un environnement réel. Les résultats obtenus confirmeront la pertinence de cette approche tout en ouvrant de nombreuses perspectives de recherche en robotique cognitive. Cette conclusion se terminera par l'exposition détaillée des pistes de recherche les plus prometteuses.