

DOC EN POCHE

PLACE AU DÉBAT

Le robot est-il l'avenir de l'homme ?

Rodolphe Gelin
et Olivier Guilhem



La
documentation
Française

Le robot est-il l'avenir de l'homme ?

Rodolphe Gelin

responsable de l'innovation chez SoftBank Robotics

Olivier Guilhem

directeur juridique chez SoftBank Robotics,
vice-président de l'Association du droit des robots

Responsable de la collection

Isabelle Flahault

Titre dirigé par

Clément Drouin

Secrétariat de rédaction

Anne Biet Coltelloni

Martine Paradis

Conception graphique

Sandra Lombroso

Bernard Vaneville

Mise en page

Éliane Rakoto

Édition

Julie Deffontaines

Ugo Bardeau

Promotion

Stéphanie Pin

Remerciements

Merci à Jean-Claude Heudin pour son érudition robotique.

Avertissement au lecteur

Les opinions exprimées n'engagent que leurs auteurs.

Ces textes ne peuvent être reproduits sans autorisation.

Celle-ci doit être demandée à :

Direction de l'information légale et administrative

26, rue Desaix

75727 Paris cedex 15

« En application du Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992, une reproduction partielle ou totale à usage collectif de la présente publication est strictement interdite sans autorisation de l'éditeur. Il est rappelé à cet égard que l'usage abusif de la photocopie met en danger l'équilibre économique des circuits du livre. »

© Direction de l'information légale et administrative, Paris, 2016.

ISBN : 978-2-11-010347-5

Sommaire

Préambule.....	5
Chapitre 1	
Où en sommes-nous avec les robots ?	17
Chapitre 2	
L'intelligence des robots.....	37
Chapitre 3	
Pourquoi et comment avoir un robot chez soi ?	65
Chapitre 4	
Les croyances.....	87
Chapitre 5	
Des problèmes éthiques et sociaux.....	97
Chapitre 6	
Robots et droit.....	123
Conclusion	151
Bibliographie et sitothèque.....	157

Préambule

Après des années passées à travailler sur des robots humanoïdes, nous pourrions les considérer avec un certain détachement. Traversant tous les jours des pièces remplies de robots, rédigeant des contrats de centaines de pages pour formaliser une collaboration avec un partenaire ou consacrant des heures à mettre au point une nouvelle procédure de tests, nous aurions pu finir par ne plus y voir que de banals produits manufacturés, expédiés aux clients dans des boîtes en carton. Pourtant, ces petites machines continuent de nous fasciner. Partageons ici les raisons qui font durer cette passion.

Le robot, un objet comme les autres ?

D'un point de vue juridique, rien ne distingue un robot d'un autre bien. En effet, selon le Code civil, « tous les biens sont meubles ou immeubles » (art. 516) et « sont meubles par leur nature les biens qui peuvent se transporter d'un lieu à un autre » (art. 528). Les robots, à l'instar des fours à micro-ondes ou des machines à laver, sont donc aux yeux de la loi des biens meubles.

Pourtant, sans qu'il soit possible de réellement l'expliquer, il est instinctivement perceptible qu'un robot possède quelque chose en plus. Un supplément impalpable le distingue des autres biens. Pour les robots

humanoïdes, cela pourrait s'expliquer par leur capacité à reproduire nos mimiques, à interagir avec nous (par la parole, les gestes...). Mais sont-ils davantage que des automates perfectionnés, de pâles copies de l'homme ? Ce sentiment d'avoir affaire à un objet de nature différente ne serait alors que la projection de la perception que nous en avons. Bercés par les films, aurions-nous simplement fantasmé ce qu'est un robot et oublié peut-être qu'il ne s'agit que d'une simple machine ? Dans cette hypothèse, il n'y aurait nul besoin de beaucoup s'interroger sur les enjeux liés à l'émergence d'un monde robotisé.

Les quatre qualités qui font le robot

Cependant, un tel raisonnement laisse inévitablement un goût d'inachevé. Tout un chacun se rend bien compte qu'il existe objectivement une différence entre un robot et un presse-agrumes.

À bien y regarder, le robot réunit, dans un même objet, quatre facultés principales : la polyvalence, la capacité d'interaction, l'autonomie décisionnelle et l'aptitude à l'apprentissage. Chacune d'entre elles peut être retrouvée individuellement dans d'autres objets. Mais leur combinaison rend le robot unique et justifie les interrogations de la société sur les conséquences de son arrivée dans notre quotidien.

Des machines multitâches...

La polyvalence est souvent avancée en guise d'argument commercial pour différencier un objet de ses concurrents directs. Ainsi, pour vous aider à choisir entre deux canapés, un vendeur avisé s'empresse de vous indiquer que celui qu'il cherche à vous vendre est convertible ou encore qu'il possède un appui-tête. Pour un objet classique, cette accumulation de fonctions supplémentaires reste toutefois limitée. Il en va différemment en robotique. À terme, les robots pourraient être aussi polyvalents que le sont les hommes, et sans doute meilleurs que ces derniers dans de nombreux domaines. Cet objectif de polyvalence les distingue assez radicalement des autres objets. Et pour l'atteindre dans un monde conçu par l'homme et pour l'homme, la forme ultime du robot ne devra-t-elle pas être humanoïde puisque, selon les designers, l'usage doit définir la forme ?

... qui interagissent avec les hommes...

L'interaction n'est pas *a priori* une singularité du robot. L'homme interagit déjà au quotidien avec plusieurs objets : ordinateur, téléphone portable, tablette... En quoi l'interactivité du robot est-elle alors spécifique ? D'abord, parce qu'il est le seul objet à proposer une interaction physique avec son utilisateur et son environnement. Il est le seul à pouvoir, de façon autonome, se déplacer, toucher les gens et déplacer d'autres objets.

Ensuite, parce que le robot, surtout sous sa forme humanoïde, pourra atteindre un niveau de communication inégalée en termes d'interaction cognitive, c'est-à-dire d'échange d'informations. Le développement de la robotique émotionnelle va dans ce sens. Le robot s'adapte à son interlocuteur en fonction des émotions perçues. Il pourrait ainsi tenter de calmer un individu en colère ou de reconforter une personne triste. Cette interactivité cognitive peut aussi susciter des interrogations notamment en termes de dépendance, d'influence et de manipulation possibles. Avec l'émergence de la robotique émotionnelle, certaines personnes pourraient s'attacher de façon trop importante à leur robot. Ce dernier ayant accès aux goûts et aspirations de leur propriétaire, les données collectées pourraient être utilisées, par exemple, pour pousser à l'achat de certains biens ou services.

Enfin, pour être complet, il est sans doute nécessaire d'évoquer la notion d'interaction sociale. À l'évidence, les robots ne font pas partie de la communauté des hommes. En revanche, leur présence de plus en plus prégnante dans notre quotidien peut à terme modifier notre société : nouveaux emplois, nouveaux services, nouveaux usages... Or, c'est dans la multiplicité des interactions que se construit chaque individu. Le robot ne contribuera-t-il pas, dans une certaine mesure, au façonnage de la société et de ses membres ?

... qui sont capables de prendre des décisions...

L'autonomie décisionnelle s'oppose à l'automatisme. Elle implique que le robot puisse faire preuve d'une certaine capacité d'adaptation face à une situation donnée. Cette adaptation doit s'opérer sans l'intervention d'un opérateur humain pendant que le robot réalise sa tâche. Pour ce faire, les programmeurs du robot doivent essayer de prévoir tous les cas de figure possibles. Ils vont spécifier tous les critères qui lui permettront de reconnaître la situation dans laquelle il se trouve de façon à déclencher l'action qu'ils auront jugée la plus appropriée pour y répondre. Le robot n'est alors qu'un outil programmable qui exécute ce qui lui est demandé quand les conditions nécessaires et suffisantes sont remplies.

Si cette adaptabilité préprogrammée trouve toute son efficacité dans un milieu contrôlé, comme celui dans lequel évoluent les robots industriels, elle risque d'être prise en défaut dans un environnement moins maîtrisé, comme le contexte domestique. En effet, sera-t-il possible, pour les programmeurs, de prévoir toutes les conditions et tous les états du cadre dans lequel le robot va se situer ? Probablement pas. Même si des batteries de tests sont réalisées par des équipes différentes de celles des développeurs, le robot pourra se retrouver dans une situation non prévue par ses programmeurs ou, plus préoccupant, mal prévue entraînant le déclenchement d'une action inappropriée.

Les limites de l'autonomie décisionnelle dans *RoboCop*

L'Enforcer Droid 209 est le robot autonome concurrent de RoboCop dans le film de Paul Verhoeven. Lors d'une démonstration dans une salle de réunion, l'ED209 détecte qu'un ingénieur, qui jouait le rôle d'un mauvais garçon, le menace de son arme. Il intime donc au « malfrat » de jeter son revolver. Ce que l'ingénieur fait aussitôt. Néanmoins, le robot répète sa sommation et finit par cribler de balles le pauvre cobaye. Un des scientifiques en blouse blanche explique : « C'est normal, le robot n'a pas entendu l'arme tomber par terre. » En effet, étant prévu pour fonctionner dans la rue, l'ED209 s'attend à entendre le son sec du métal sur le bitume. Le bruit étouffé du revolver tombant sur l'épaisse moquette de la salle de réunion ne l'a pas convaincu que l'arme avait été lâchée. Il a donc déclenché la procédure de traitement des récalcitrants.

C'est pour pallier ces limitations d'une programmation initiale trop déterministe (telles conditions entraînent telle action) que le robot doit se doter d'une capacité d'apprentissage tout au long de son existence pour apprendre de ses éventuelles erreurs et améliorer la pertinence de ses actions.

... et d'apprendre

L'apprentissage est la capacité qui permettra au robot de s'intégrer définitivement à notre environnement. Grâce à elle, il sera possible de s'affranchir de l'étape de programmation pour enseigner de nouvelles tâches au robot. Chacun pourra enseigner à son robot comment faire des crêpes, repeindre son plafond ou ranger une chambre sans avoir à écrire une seule ligne de code informatique. Les importantes avancées réalisées dans ce domaine particulier de l'intelligence artificielle, notamment avec le *deep learning* (voir chapitre 2), font espérer (ou craindre pour certains) l'avènement de systèmes qui apprendront de leurs expériences et évolueront pour minimiser leurs erreurs lors de la réalisation de leurs tâches. Si, par ailleurs, les robots ont le moyen de partager leur expérience et leurs connaissances, ils apprendront encore plus vite. Il sera alors indispensable de disposer de systèmes pour valider, vérifier et comprendre ce qu'ils auront appris.

Un statut juridique à déterminer

C'est dans la combinaison de ces capacités – polyvalence, interaction, autonomie décisionnelle et apprentissage – que réside la singularité du robot. Sans compter qu'en se conjuguant, elles se renforcent de manière continue : par l'apprentissage, le robot gagne en autonomie, en interactivité et en

polyvalence, et plus il interagit, plus il apprend, ce qui augmente d'autant sa polyvalence et son autonomie décisionnelle...

On obtient alors un mélange hybride propre à aiguïser l'appétit de tout juriste. Cette extraordinaire capacité du robot à s'adapter au fil de son expérience ne sera en effet pas sans conséquence d'un point de vue juridique : la multiplication des interactions augmentant proportionnellement les risques de dommages potentiels. Se pose alors la question de la responsabilité. Celle du producteur doit-elle évoluer, sachant que l'utilisation qui est faite du robot est quasi imprévisible, quasi illimitée ? Si un robot est capable d'exécuter n'importe quelle tâche à la demande de son propriétaire, ce dernier devrait-il lui-même avoir les connaissances et les capacités pour superviser la tâche demandée ? Certaines fonctions ou actions devraient-elles être interdites, encadrées ? Devrait-on instaurer un « permis d'utilisation » pour certains modèles de robots ou pour l'usage de certaines fonctionnalités ? Si oui, cela justifie probablement qu'une réflexion juridique soit menée et qu'à terme certaines règles soient adoptées. Quelles sont les pistes existantes ? Quel système juridique pourrait appréhender la nature si particulière des robots ? Mais les questions juridiques soulèvent également des interrogations éthiques et sociales sur le bien-fondé de confier à des machines des tâches de plus en plus sophistiquées qui n'étaient

jusqu'à présent réalisables que par des êtres humains. Dans des situations complexes, comment le robot pourra-t-il avoir une notion du bien et du mal, afin d'évaluer les actions qu'on lui demande de réaliser ? C'est à ces questions que nous souhaitons répondre dans ce livre après être revenus sur la longue histoire de la robotique et les promesses de la technologie.

Chapitre 1

Où en sommes-nous avec les robots ?

L'homme a toujours eu envie de fabriquer des êtres à son image qui obéiraient à ses moindres désirs. L'idée du robot existait déjà bien avant que le mot ne soit inventé. Pendant très longtemps, elle est demeurée liée à la magie ou aux interventions divines. Mais à partir des années 1950, chercheurs et ingénieurs ont pu bénéficier des progrès de l'électronique, puis de l'informatique, pour donner enfin une réalité à ces machines. Aujourd'hui, la recherche est très prolifique dans tous les domaines nécessaires à la réalisation de nos futurs robots compagnons.

Des robots vieux comme le monde

Si le mot *robot* est officiellement apparu sous la plume de l'écrivain tchèque Karel Čapek en 1920, le concept de créature artificielle fabriquée par l'homme pour lui épargner d'accomplir des tâches fastidieuses est bien plus ancien. Avec le golem de la mythologie juive, la Galatée de Pygmalion et le monstre de Frankenstein, l'idée de construire un être doté d'une certaine forme de vie, et donc d'autonomie, est présente dans l'esprit des êtres humains depuis la nuit des temps. Aristote évoquait, de son côté, « des instruments qui, sur un ordre reçu ou même deviné, pourraient travailler d'eux-mêmes comme les statues de Dédale. [...] Les entrepreneurs pourraient se passer d'ouvriers et

Le golem et Galatée, les ancêtres du robot ?

Le golem est une créature artificielle issue de la tradition juive. Façonné dans l'argile, il n'a pas de libre arbitre et n'existe que pour obéir à son créateur. Le mot n'apparaît qu'une fois dans la Bible (Psaume 139 : 16) pour désigner un homme qui n'a pas encore connu Dieu. Cela pourrait être l'état d'Adam, tiré de la glaise, avant que Dieu ne lui donne la vie. Il est ensuite évoqué dans le Talmud comme un être humain artificiel pas très abouti et créé par l'homme. Des auteurs du Moyen Âge ont brodé sur ce thème qui a connu un certain succès dans les films fantastiques, depuis celui de Paul Wegener en 1920 jusqu'à un épisode de la série télévisée américaine *X-Files* en 1997.

L'histoire de Galatée est racontée par Ovide dans les *Métamorphoses*. Galatée est une statue d'ivoire dont le sculpteur, Pygmalion, est tombé amoureux après avoir renoncé aux femmes de Chypre, les Propétides, dont il regrette le peu de vertu. Il supplie Vénus de donner vie à sa création, ce que la déesse de l'amour lui accorde. Galatée et Pygmalion se marient et ont même deux enfants. Pour faire bonne mesure, Vénus transformera toutes les Propétides en statues d'ivoire afin de les punir de leur inconduite.

les maîtres d'esclaves » (*Politique*, I, 4, 1253-b). Son point de vue est plus proche de ce qu'est la robotique aujourd'hui. En effet, le roboticien ne cherche pas à

créer du vivant mais un objet qui comprend les ordres et les exécute de façon autonome. Aristote ne remet pas en question l'esclavage, mais il pressent que son remplacement par le travail d'une machine serait sans doute préférable. Sans aller jusqu'à y voir les prémices d'une prise de conscience anti-esclavagiste, il témoigne dès cette époque de l'idée que des machines devraient pouvoir effectuer à la place des humains les travaux rudimentaires ou pénibles, une idée déterminante dans la genèse des robots. En considérant l'état très embryonnaire de la mécanique à l'époque d'Aristote, il était tout de même assez visionnaire de songer à des machines capables de tels prodiges.

Les robots, tels que nous nous les représentons aujourd'hui, s'inscrivent donc davantage dans la veine « aristotélicienne », puisque ce sont des mécaniques équipées de capteurs et de moteurs reliés à un ordinateur. C'est pourquoi certains considèrent que leurs ancêtres sont plutôt à chercher parmi les automates de Vaucanson qu'au sein des créatures mythologiques. Cela dit, sans nier l'extraordinaire finesse des réalisations de ce mécanicien du XVIII^e siècle resté célèbre pour son joueur de flûte traversière et son canard digérateur, ses réalisations tenaient plus de l'horlogerie que de la robotique. S'ils étaient capables d'enchaîner plusieurs mouvements, ses automates ne pouvaient pas acquérir d'informations sur leur environnement et modifier en conséquence

leur enchaînement de mouvements. Mais aucun reproche ne peut vraiment être adressé à Vaucanson, qui a réalisé ce qu'il pouvait faire de mieux en attendant l'invention de l'électricité, des capteurs et des ordinateurs. Il a tout de même prouvé qu'il était possible de répliquer, mécaniquement, des gestes très sophistiqués. Le recours à l'esclave ou au golem, donc à la créature biologique, n'est plus la seule solution envisagée pour réaliser des tâches complexes à la place des hommes.

Mais revenons en ce début de xx^e siècle où la fiction et la technologie font émerger les « vrais » robots. C'est donc un auteur de théâtre tchèque qui utilise le vocable pour la première fois sur la base du mot *robot* qui signifie corvée. Dans sa pièce, les robots sont conçus pour effectuer des travaux pénibles mais, conformément à ce qui est devenu un cliché aujourd'hui, ils se rebellent contre leurs créateurs et décident d'éradiquer l'humanité. Si Čapek invente le mot, il ne l'emploie pas encore tout à fait comme nous le faisons aujourd'hui. En effet, ses robots sont des créatures synthétisées à partir d'une matière vaguement organique pour ne garder de l'homme que ce qui est utile au travail (donc sans sensibilité et sans sentiment). Nous avons le mot mais nous sommes toujours plus proches du golem et de Frankenstein que des machines.

Les robots sortent des livres

Avec l'avènement de l'électronique, les robots, tels que nous les envisageons aujourd'hui, font réellement leur apparition. Grâce à elle, puis à l'informatique, il est possible de faire bouger « intelligemment » une mécanique. Les organismes de normalisation comme l'ISO (International Standard Organisation) débattent toujours de la définition exacte d'un robot, mais comme disait Joseph Engelberger, considéré comme le père de la robotique : « Je ne sais pas définir ce qu'est un robot mais j'en reconnais un quand je le vois. » Pour aller au-delà de cette boutade, il est possible de considérer qu'un robot est une mécanique dont les mouvements prennent en compte des informations issues de capteurs. Cette mécanique peut comporter des roues, des chenilles, des jambes, des bras et même des mains. Ses moteurs peuvent être électriques, pneumatiques, hydrauliques, piézoélectriques (faits de matériaux qui se contractent quand ils sont traversés de courant électrique), basés sur des alliages à mémoire de forme, etc. Cependant, pour être davantage qu'un automate, le robot doit en plus être doté de capteurs qui le renseignent non seulement sur son propre état (la position de ses articulations, son inclinaison...) mais également sur celui du monde qui l'entoure (caméras, micros, télémètres...). Il doit enfin posséder un calculateur qui détermine le mouvement de chaque articulation

de la mécanique en fonction de la tâche à réaliser et des informations récoltées par les capteurs.

Si le robot est une pure mécanique, ses liens avec le monde du vivant sont profonds : bien qu'il s'agisse d'une machine, on parle à son endroit de jambes, de bras, de main et de tête. Cette analogie terminologique entretient le flou autour de la frontière entre les robots et les êtres vivants. Ce n'est pas parce que nous avons renoncé (du moins temporairement) à créer des robots à partir de matière vivante que le lien entre robotique et biologie s'est estompé.

Il est à craindre néanmoins que la formule d'Engelberger n'ait pas très bien vieilli. Sans aller jusqu'à ce que présentent les œuvres de science-fiction, comme le film de Ridley Scott, *Blade Runner*, dans lequel un détective privé, incarné par Harrison Ford, était chargé de repérer des robots se faisant passer pour des êtres humains pour accomplir un sinistre projet (les « répliquants »), on peut se demander si les avions dotés d'un pilote automatique ou les voitures se conduisant toutes seules ne constituent pas eux aussi des robots indétectables. Notre vie est déjà peuplée de robots qui ne disent pas leur nom et Harrison Ford ne peut pas nous aider à les repérer. Heureusement, ces robots ne nous veulent que du bien. Les rares accidents impliquant ces machines sophistiquées sont plus souvent dus à une erreur humaine qu'à un défaut du système de pilotage. En tout cas, ils ne relèvent jamais de la volonté délibérée du véhicule de nuire à ses occupants.

////////////////////////////////////

Le père de la robotique moderne

Joseph Engelberger est un ingénieur américain né en 1925 et mort en décembre 2015. En 1956, il rencontre George Devol qui, deux ans plus tôt, a conçu et breveté l'ancêtre du robot industriel. En 1957, ils fondent ensemble la société Unimation, première compagnie robotique, qui produit le robot Unimate dont le premier exemplaire est installé en 1961 dans une usine de General Motors. Rapidement, Chrysler et Ford s'équipent à leur tour de robots Unimates. En 1982, Engelberger vend Unimation à Westinghouse pour 107 millions de dollars et se consacre à la robotique mobile. En 1984, il fonde la Transition Research Corporation au sein de laquelle il crée HelpMate, un robot mobile à roues destiné à la distribution de médicaments dans les hôpitaux. En dix ans, une centaine d'hôpitaux achètent des robots à sa société qu'il renomme HelpMate Robotics Inc. À 80 ans passés, il quitte son entreprise mais reste un ardent défenseur de la cause robotique, notamment pour l'assistance aux personnes âgées. S'il a travaillé sur des robots mobiles équipés de deux bras, il a toujours été très réticent à l'idée de leur ajouter des jambes : mettant en danger leur équilibre sans apporter de fonctions vraiment déterminantes dans les usages envisagés, elles ne lui paraissaient pas pertinentes du tout.

////////////////////////////////////

À côté de ces robots qui n'en portent pas le nom, figurent aussi des robots qui n'en sont pas. Il s'agit par exemple des logiciels utilisés par les moteurs de recherche qui explorent, à la manière des robots envoyés sur des planètes lointaines, le web pour y répertorier les informations recueillies sur les sites qu'ils visitent. Cette recension est réalisée de façon automatique : les programmeurs définissent des règles permettant à ces logiciels de repérer des mots, des phrases, des expressions et de les ranger soigneusement en notant l'adresse à laquelle ils les ont trouvés. Comme un robot planétaire, ces logiciels cherchent des informations dans des « coins perdus » et les mettent à notre portée, mais ils ne sont que des créatures virtuelles, à l'instar des virus informatiques et autres *cookies*. Sans rien enlever à leur mérite, Engelberger ne les reconnaîtrait pas comme des robots et il aurait raison puisqu'ils n'ont pas d'incarnation physique. C'est pourquoi ces robots purement informatiques sont parfois appelés des « bots », pour bien les différencier des « vrais » robots, caractérisés par leur présence physique dans un monde de l'intelligence numérique.

Les robots découvrent notre monde

Le robot est donc doté de capteurs qui collectent de l'information dans son environnement : caméra filmant des personnes, des routes, des paysages ; micros saisissant les voix et percevant les bruits ; lasers

mesurant la distance à laquelle se situent d'éventuels obstacles. À la différence des données que récupère un moteur de recherche sur internet dans des fichiers informatiques, celles extraites du monde réel sont « bruitées ». Ce terme, qui se comprend bien pour un signal acoustique, s'applique en réalité à tous les signaux issus de capteurs. De la même façon qu'une voix enregistrée dans la rue risque d'être couverte par le bruit du passage des voitures, du souffle du vent ou des aboiements des chiens, une image prise par la caméra d'un robot dans un environnement quotidien peut être « bruitée » par un contre-jour, une ombre portée sur un visage, un flou de bougé. Avant de commencer à analyser les informations qu'il a récupérées, le robot doit les nettoyer pour en extraire ce qui sera utile à son raisonnement.

Quand il nous écoute parler, le robot est dans une situation similaire à ce que serait la nôtre, par exemple, si un étranger avec un accent « à couper au couteau » nous posait une question sur une piste de danse avec de la musique jouant à plein volume et des dizaines de personnes hurlant le refrain du moment. Généralement, si nous arrivons à répondre, c'est parce que nous avons une idée de ce qui nous est demandé dans de telles circonstances (localisation du bar, des toilettes ou situation maritale de son interlocuteur). La sémantique vient combler les défaillances de notre audition. En ayant compris un seul mot, nous

pouvons reconstituer le sens global d'une phrase. Si des algorithmes permettent petit à petit d'obtenir ce résultat : analyse du contexte, connaissance des données linguistiques qui lui sont associées, répartition probabiliste de l'occurrence d'un mot dans un acte de langage..., il est parfois difficile d'imaginer que cet arsenal technologique est nécessaire pour demander l'heure au robot que nous croiserions en plein jour dans notre salon. Notre accent serait alors plutôt bon, et il n'y aurait pas de musique ni de danseurs survoltés dans notre appartement à cette heure de la journée. Cependant, nous serions à une certaine distance des micros du robot quand nous lui parlerions, le signal qui lui parviendrait serait donc affaibli et, de plus, aurait résonné sur les murs. Même si c'est imperceptible à notre oreille, la machine entend alors bien plusieurs fois le même son arriver dans ses micros. En outre, le robot bougerait, ses moteurs feraient du bruit, que les micros enregistreraient aussi, et qui constituerait souvent le principal son qu'ils entendraient, notre voix n'étant alors qu'un bruit de fond pour eux. Après un nettoyage numérique du signal audio capté par ses micros, le logiciel de reconnaissance de la parole identifierait peut-être alors le mot « heure » ou le groupe « est-il » qui sonnerait un peu plus. À partir de ces indices, il irait chercher dans sa base de conversations ce qui pourrait, le plus probablement, leur correspondre. Il répondrait donc « 14h15 », ce qui en l'occurrence nous satisferait.

En fait, dans l'état actuel de la technologie, le risque est plutôt que le robot ne comprenne pas le moindre mot mais détecte simplement qu'un humain a parlé. Il s'arrêterait donc, chercherait à repérer un humain dans l'image renvoyée par sa caméra et lui dirait : « Désolé, je n'ai pas entendu, que puis-je faire pour vous ? » Ou, encore plus humiliant, il continuerait son chemin, n'ayant rien entendu du tout. En réalité, le robot devrait agir en amont, à un niveau encore plus fondamental : dès qu'il voit un humain, il s'arrête pour faire cesser ses bruits internes, vérifie si l'humain tourne son visage vers lui pour être sûr de ne pas manquer sa demande. Autre possibilité : l'humain, connaissant les limitations actuelles de son robot, s'assurerait que celui-ci l'a vu et s'est mis en écoute avant de lui demander l'heure, tout en se disant que la montre-bracelet a du bon aussi...

Même s'il ne s'agit pas d'un des services principaux attendus de la robotique, cet exemple a le mérite de souligner clairement que l'interaction avec un robot est fondamentalement différente de l'échange, *via* un clavier ou un micro, avec un autre objet communicant.

Toutes les difficultés rencontrées par le robot en matière d'audition se retrouvent dans le domaine de la vision. Les sources de dégradation de la qualité des images ont été évoquées plus haut (flou, contre-jour, ombre portée, mauvais cadrage). Mais, puisque chacun a déjà raté une photo, il est plus facile de se

représenter les problèmes qu'un robot peut connaître pour réussir un beau cliché de façon automatique. En outre, les questions soulevées par les compétences auditives sont assez révélatrices de l'évolution de la robotique. Le robot, qui interagissait autrefois principalement avec d'autres objets (des châssis de voiture à souder notamment), n'était, de fait, pas souvent amené à converser avec eux. Maintenant qu'il peut partager le quotidien de l'homme, il doit en adopter le mode principal d'interaction, la parole. La vision par ordinateur demeure cependant un défi à relever, dont les progrès sont également dépendants d'une bonne exploitation de l'audition. En repérant la position d'une source sonore dans l'environnement, le robot pourra orienter sa caméra vers elle pour la faire entrer dans son champ de vision et régler ainsi une partie de ses problèmes de cadrage.

Les robots passent à l'action

Le robot est donc une machine qui sent, mais c'est aussi une machine qui agit. C'est ce qui la rend si fascinante et si reconnaissable pour Engelberger. Cependant, un geste aussi simple pour nous que lever le bras à l'horizontale présente une certaine complexité pour notre robot. Tout d'abord, le mouvement de son bras est bien sûr une affaire de moteurs... mais encore une fois de capteurs. Il est en effet difficile de positionner le bras à l'horizontale si son articulation n'est

pas dotée d'un capteur permettant d'en connaître l'inclinaison. Le principe de la commande consiste alors à faire tourner le moteur de l'épaule jusqu'à ce que ce capteur indique que l'inclinaison du bras a atteint l'horizontale. Mais si le moteur tourne à vitesse constante et s'arrête lorsque le capteur indique que l'horizontale est atteinte, le bras risque, le temps de freiner, de s'immobiliser trop tard et de se trouver dans une position légèrement inclinée. À titre de comparaison, pour arrêter une voiture à un stop, il ne faut pas freiner au moment où elle atteint le stop mais un peu avant pour prendre en compte la distance de freinage. De la même façon, la commande du bras doit anticiper l'arrivée à la position horizontale pour faire décroître progressivement la vitesse afin de parvenir à l'arrêt au moment exact auquel l'angle souhaité est atteint. C'est la science de l'automatique, une des plus belles matières scientifiques alliant théorie mathématique et compréhension du monde physique, qui offre les solutions pour déterminer la variation de vitesse permettant d'arrêter le bras du robot au bon moment. L'automatique est également capable de prendre en compte la gravité : lorsque le bras monte vers l'horizontale, il a besoin de beaucoup de courant dans le moteur pour vaincre la gravité. S'il descend en revanche, peu de courant lui sera nécessaire.

Maintenant que nous savons faire bouger une articulation du robot, il est temps d'aborder la dernière étape de cette formation accélérée en robotique en évoquant la commande cartésienne. Il était jusqu'à présent question de la commande articulaire : une position à atteindre, exprimée en degrés, est donnée à chaque articulation. Quand le robot tourne l'épaule de 90° , sa main décrit un arc de cercle, ce qui n'est pas toujours l'effet souhaité. La commande cartésienne tire son nom du philosophe et mathématicien René Descartes qui, dans l'imaginaire populaire, aimait bien que les choses soient carrées. La commande cartésienne permet donc à la main du robot de décrire des carrés et pas seulement des arcs de cercle. Les mouvements de plusieurs articulations du bras doivent alors être synchronisés. Connaissant la longueur du bras et celle de l'avant-bras et en utilisant les sinus et les cosinus des angles des articulations, il est possible de calculer les positions successives de l'épaule et du coude pour que la main décrive les lignes droites qui forment les côtés du carré. Bien sûr, malgré son génie, Descartes n'avait pas imaginé ses théories mathématiques pour les robots, mais elles y ont trouvé un très beau champ d'application. Cependant, notre robot va une fois de plus se heurter à la réalité. Après avoir voulu dessiner un beau carré sur une feuille de papier, il percevra peut-être une légère déception dans l'œil de son propriétaire. En effet, son carré est un peu tordu : les jeux dans les engrenages ont

légèrement déformé les angles droits, l'imprécision dans la fabrication des plastiques composant son bras a conduit à utiliser dans les calculs des longueurs qui ne sont pas tout à fait exactes et la synchronisation des articulations n'est pas parfaite. En conséquence, les lignes droites ne sont pas très droites. Il n'est pas reproché au robot de ne pas dessiner de jolis carrés, les imprimantes s'en chargent très bien, mais, quand la commande cartésienne est utilisée pour lui faire attraper un objet, il existe davantage de risques d'être déçu. La position de l'objet à saisir est connue. La main du robot est dirigée vers cette position mais toutes les sources d'erreur décrites plus haut aboutissent à ce que la main se referme à côté de l'objet ou après l'avoir renversé.

Dans notre vie quotidienne, nous avons l'occasion de constater ce type d'erreur de calcul dans la commande cartésienne. Quand nous roulons en voiture, notre compteur peut indiquer 130 kilomètres/heure. Il connaît la vitesse de rotation des roues (vitesse articulaire calculée en tours par seconde) et la multiplie par le diamètre de la roue pour en déduire la vitesse linéaire (cartésienne en mètres par seconde donc en kilomètres/heure). Si le diamètre de la roue n'est pas bien connu (les pneus sont usés ou dégonflés), l'estimation de la vitesse en kilomètres/heure est alors fautive : une voiture autonome qui roulerait pendant une heure à la vitesse de 100 kilomètres/heure ne

parcourrait pas 100 kilomètres mais un peu moins. Si elle devait tourner à droite au bout de 100 kilomètres, elle ne prendrait donc pas la bonne route. Cette erreur, dite d'odométrie, se répercuterait aussi dans les virages (amplifiée même par le comportement difficile à modéliser des roues dans une courbe). Une voiture automatique qui devrait parcourir un carré de 100 mètres de côté en ne se basant que sur la mesure de ses mouvements articulaires – déplacement des roues motrices et orientation des roues directrices – ne décrirait en fait qu'une trajectoire non fermée (la voiture ne reviendrait pas à son point de départ). Celle-ci ne ressemblerait qu'assez vaguement à un carré, sans doute similaire à celui qu'un petit enfant dessinerait les yeux fermés. Sans autres repères, le robot ne diffère pas de ce petit enfant.

Pour éviter ces erreurs dues à la mauvaise connaissance de paramètres géométriques, les roboticiens utilisent une procédure de calibration. Le principe est simple : le robot effectue un mouvement et un système de mesure extérieur permet de donner la « vérité terrain » de ce mouvement. Pensant que son bras fait un mètre de long, le robot estime que sa main décrit un cercle d'un mètre de rayon. Mais le système de mesure indique que ce cercle présente un rayon de quatre-vingt-dix-neuf centimètres. La calibration consiste à rectifier, dans la mémoire du robot, la taille de son bras. Elle s'applique au modèle cinématique

du robot (taille des segments qui le composent et position des articulations qui les relient) mais aussi à son modèle dynamique (estimation du poids et de la position du centre de gravité de chacun des segments). Elle est réalisée « à la naissance du robot » mais doit parfois être renouvelée régulièrement au cours de sa vie pour prendre en compte l'usure ou la déformation de certains composants avec le temps.

Cependant, il manque un dernier élément à cette description de la dure condition des robots. Quand les robots qui partagent notre vie quotidienne sont fabriqués, la résolution des difficultés présentées ci-dessus s'effectue sous une contrainte très prosaïque : il faut qu'ils ne coûtent pas trop cher. Impossible de mettre des micros de très bonne qualité, des caméras dotées d'autofocus ou de correcteur automatique de flou de bougé ou de contre-jour, ou encore d'employer des mécaniques sans jeu et de très haute précision. Tout cela existe et est utilisé pour des produits très « haut de gamme » à usage professionnel, mais cela rendrait vite les robots inaccessibles au grand public. Certes, il est possible d'espérer qu'avec le développement du marché de la robotique personnelle, le prix des composants de bonne qualité baissera. Mais les roboticiens ne se contentent pas d'attendre. Ils cherchent des solutions pour résoudre ces difficultés en prenant en compte toutes les contraintes de la vie réelle, eux aussi.

Chapitre 2

L'intelligence des robots

Une fois la mécanique équipée de capteurs, toute la beauté de la robotique consiste à faire en sorte qu'elle puisse réaliser de façon autonome la tâche attendue tout en tenant compte de ce qui l'entoure. Cette faculté, qui lui permet de déterminer la bonne action à accomplir à partir de ce qu'elle perçoit de son environnement, est ce qu'on appelle l'intelligence d'un robot. Mais comment fonctionne-t-elle ? Et pourquoi est-elle dite « artificielle » ?

Où commence l'intelligence des robots ?

On qualifie souvent les robots d'autonomes. Pourtant, cette expression est pléonastique. C'est en effet la capacité d'une machine à modifier toute seule ses mouvements en fonction des données transmises par ses capteurs qui fait d'elle un robot. Tant et si bien que, formellement, les robots téléopérés utilisés par les démineurs pour aller inspecter un colis piégé usurpent l'appellation de robot. Ils ne sont que des voitures téléguidées un peu sophistiquées, qui n'ont des robots que l'apparence. Cela dit, même ces machines conduites à distance peuvent être dotées d'un peu d'autonomie : certaines s'arrêtent automatiquement devant un trou ou un obstacle que le pilote n'a pas vu ; d'autres sont capables de revenir automatiquement sur leurs pas quand elles ont perdu la liaison radio avec

leur poste de commande. D'autres encore, comme les robots explorateurs spatiaux envoyés sur Mars, font preuve de plus d'indépendance : les ingénieurs leur assignent, depuis la Terre, un territoire à explorer et ils s'exécutent, définissant leur trajectoire, évitant les obstacles, gérant l'énergie de leur batterie. Le robot effectue sa tâche sans contrôle continu d'un pilote. Il est donc autonome mais cela ne veut pas dire qu'il est « sans maître » pour autant. S'il peut réaliser son travail sans aide extérieure, il n'exécute que la tâche qui lui a été confiée. Si on ne donne rien à faire à un robot, aussi autonome soit-il, il ne fera rien. L'autonomie robotique a ses limites.

Cela étant dit, voyons ce qui rend possible cette autonomie. Pour effectuer la bonne action en fonction de la tâche à réaliser et des informations que lui transmettent ses capteurs, le robot doit prendre la décision la plus adaptée, donc la plus intelligente. Cette intelligence sera qualifiée d'artificielle aussi longtemps que son siège en sera un ordinateur. Les recherches à ce sujet couvrent des champs très divers, dont les contours varient avec le temps.

Dans les années 1950, un petit véhicule à deux roues qui se dirigeait automatiquement vers une source de lumière constituait une performance de l'intelligence artificielle (IA) de l'époque : on avait fabriqué un rat (symbolisé par la petite voiture à deux roues) se dirigeant de façon autonome vers sa nourriture (la source

de lumière). Son intelligence consistait à faire tourner un peu plus vite sa roue droite si la source de lumière était vue à gauche et inversement. Aujourd'hui, cette expérience relèverait plutôt de la « commande référencée capteur », c'est-à-dire davantage du réflexe que de la véritable intelligence.

Dans les années 1980, les recherches en intelligence artificielle visaient à permettre aux ordinateurs de reconnaître des éléments dans une image (par exemple, une balle rouge), voire de disposer de certaines capacités de raisonnement humain, en implémentant un système de règles. On imaginait alors qu'il leur serait possible de formuler un diagnostic, à l'instar des docteurs : « si le patient tousse, s'il a le nez qui coule et s'il n'a pas de fièvre, alors il a un rhume » ; « s'il est fatigué et s'il a de la fièvre, alors il a la grippe » ... La grande avancée de l'époque résidait dans le fait que l'ordinateur ne traitait plus seulement des valeurs numériques mais aussi abstraites : « avoir de la fièvre », « être fatigué »... Un premier niveau de règles permettait le passage des premières aux secondes : « si la température est supérieure à 38 °C, alors le patient a de la fièvre. » Mais quels éléments considérer pour évaluer la fatigue du patient ? Certes, l'ordinateur peut demander au malade s'il est fatigué, comme le ferait un docteur ; mais la réponse peut être très subjective. Le médecin va s'appuyer sur l'attitude générale du patient, sa façon de répondre, l'énergie

avec laquelle il se lève et s'assoit pour se faire sa propre opinion. C'est là qu'apparaît la véritable intelligence : comment extraire une information significative d'un ensemble de signaux difficiles à mesurer explicitement ? Appliquer des règles une fois qu'on dispose des bonnes informations n'est pas le plus compliqué. C'est la récupération même de l'information pertinente qui constitue souvent le principal obstacle à une réflexion réellement intelligente.

Un bon exemple d'une intelligence qui n'en est pas vraiment une est celui du jeu d'échecs. Pendant très longtemps, il était convenu de penser que les gens très intelligents faisaient de bons joueurs d'échecs. Si un ordinateur était capable de jouer aux échecs, il ferait donc preuve d'intelligence. Et, *a fortiori*, le jour où une machine battrait le champion du monde d'échecs, elle serait devenue plus intelligente que le plus intelligent des humains. Mais en fait, jouer aux échecs s'avère beaucoup plus facile pour un ordinateur que pour nous. Dans le principe, il n'est pas difficile de gagner : il suffit de bouger ses pièces de façon à attraper le roi adverse sans que le sien ne se fasse prendre. Pour ce faire, une fois les règles de déplacement des pièces connues, on imagine tous les coups possibles puis tous ceux de son adversaire en réaction. On évalue alors les différentes possibilités et on choisit le coup le plus dévastateur pour l'adversaire et le moins dommageable pour soi, tout

Un robot humanoïde champion du monde d'échecs ?

Si le robot humanoïde peut compter sur sa puissance de calcul pour choisir le meilleur coup possible et rivaliser avec les meilleurs joueurs du monde, il aurait néanmoins le plus grand mal à utiliser son intelligence devant un véritable échiquier. En effet, la perception de la position des pièces, entassées sur un espace réduit et se masquant plus ou moins les unes les autres, lui poserait un premier et sérieux problème. La simple observation du coup joué par son adversaire lui demanderait probablement plus de calculs que le choix du coup à jouer. Une fois celui-ci déterminé, il lui faudra attraper délicatement sa pièce, sans renverser celles qui l'entourent et la reposer à sa nouvelle place avec les mêmes précautions. Si cette opération dite de *pick and place* est très bien maîtrisée par les robots industriels sous un éclairage de bonne qualité, avec une caméra idéalement placée et une pince optimisée pour la saisie d'un objet particulier, elle est encore très difficile à réaliser pour un robot humanoïde, tributaire d'un éclairage et d'un angle de vue contraints et dont la main à cinq doigts est encore assez malhabile.

en considérant que l'adversaire cherche à faire de même. Pour un être humain normalement constitué, il est possible d'anticiper trois ou quatre coups, avant de commencer à s'embrouiller et à oublier les hypothèses échafaudées lors des tours précédents.

L'ordinateur, lui, ne s'embrouille pas. Il peut projeter plusieurs dizaines de mouvements à l'avance. Grâce à des algorithmes de planification, il est capable d'analyser tous les coups imaginables jusqu'à la fin de toutes les parties possibles. Il n'a plus qu'à choisir ceux qui l'emmènent vers la victoire. Est-ce vraiment une preuve d'intelligence ?

La statistique au service de l'intelligence

Les échecs illustrent bien les possibilités d'une IA réflexive dans un environnement très contrôlé, régi par des règles du jeu précises. Mais qu'en est-il d'une IA capable de tirer des informations d'un cadre complexe, profus et peu structuré ? Elle nous est, en fait, encore plus familière. Quand un moteur de recherche retrouve, à partir de quelques mots que nous lui indiquons, la page internet qui correspond exactement à nos attentes, nous avons affaire à une intelligence artificielle évoluée qui fait bien plus que de la simple recherche de mots-clés, en s'appuyant sur des statistiques. Elle développe une compréhension sémantique de notre question. Si vous demandez l'âge d'une personnalité vivante à un moteur de recherche, celui-ci ne va pas chercher un texte contenant le mot « âge » et le nom de la personne, il saura qu'il lui faut trouver des informations sur sa date de naissance ou le mot « ans » précédé d'un chiffre.

Deux méthodes, historiquement exclusives mais qui tendent à devenir complémentaires, permettent aux moteurs de recherche d'interpréter une question.

La première, probablement la plus intuitive pour nos esprits cartésiens, consiste à modéliser le calcul de l'âge à partir d'une date de naissance et de la date actuelle et à apprendre au système que la première est indiquée par des parenthèses à côté du nom de la personne ou suit directement les mots « est né », « a vu le jour », etc. Le programmeur va ainsi décrire toutes les relations qui peuvent exister entre les concepts du langage : « train » est lié à « gare », concept lui-même lié à un nom de ville, à « départ » et à « arrivée », mais aussi à « voyage », lui-même connecté à « vacances » ou à « affaires » ... Cette description du monde s'appelle une ontologie. Une bonne ontologie, alliée à une analyse syntaxique de la question, simplifie la recherche d'informations en réponse à la question posée. L'ordinateur « comprend », au moins sommairement, la requête qui lui est faite et cherche la réponse la plus adaptée.

La seconde méthode est beaucoup plus brutale. Le moteur de recherche s'aperçoit qu'à chaque question posée sur l'âge, l'utilisateur passe davantage de temps sur des pages où, plutôt que le mot « âge » lui-même, apparaît l'expression « est né ». C'est pour cette raison que les moteurs de recherche nous demandent si nous sommes satisfaits de ce qu'ils ont trouvé : ils

ont besoin d'affiner leurs algorithmes de recherche en fonction de notre appréciation. C'est le principe de l'apprentissage par renforcement. En grossissant le trait, il faut imaginer que le système ne comprend pas ce qu'on lui demande et répond n'importe quoi. Comme nous lui indiquons que nous ne sommes pas contents, il propose autre chose jusqu'à ce que cela nous convienne. Puisqu'en général tout le monde lui demande toujours à peu près la même chose, il fournira ensuite spontanément la réponse qui a donné satisfaction au plus grand nombre de gens. Cette approche purement statistique de l'intelligence est un peu décevante d'un point de vue intellectuel mais terriblement efficace. Bien entendu, elle ne peut fonctionner qu'avec les grands nombres. Voilà pourquoi un moteur de recherche gratuit donne de meilleurs résultats qu'un éventuel moteur payant : davantage de gens l'utilisent, il récolte donc plus de données, est plus performant... et attire encore davantage d'utilisateurs puisqu'il est de bonne qualité et gratuit. Cela ressemble à un parfait cercle vertueux (même si nous avons maintenant compris que cette gratuité n'est pas que philanthropique). Les méthodes statistiques ont également pris leur essor quand les ordinateurs ont été capables de puissances de calcul leur permettant de traiter des milliards de données pour retrouver une aiguille dans une botte de foin.

Si la première méthode semble plus « intelligente » que la seconde, qu'on ne s'y trompe pas : celle-ci utilise des algorithmes au moins aussi complexes que celle-là. La première mime une intelligence humaine, capable de traiter des relations compliquées mais en nombre relativement réduit ; la seconde est une intelligence véritablement artificielle qui ne comprend pas ce qui lui est demandé mais réalise ce que l'ordinateur sait faire de mieux : calculer, manipuler les chiffres, trier des données, les indexer, les recouper...

Pour conclure cette présentation un peu caricaturale (les experts du domaine nous en excuseront), il est bon de préciser que la méthode statistique s'appuie tout de même sur une base de représentation du monde, construite par des humains, qui lui permet de ne pas répondre absolument n'importe quoi quand on lui pose une nouvelle question. Et inversement, l'intelligence humaine a, elle aussi, recours à la statistique : combien de fois un interlocuteur répond-il à côté parce qu'il n'a écouté qu'un mot de notre question ? « – Est-ce que je peux voir le docteur demain ? » « – Non, le docteur n'est pas là aujourd'hui », nous répond-on après avoir déjà dit non aux vingt personnes ayant demandé un rendez-vous pour le jour même.

Comprendre une image

Le domaine dans lequel l'intelligence artificielle a probablement fait ses premières armes, nous l'évoquons plus haut, a été l'interprétation des images prises par les caméras, et notamment par celles des robots. Quand un robot industriel devait faire un trou au centre d'une plaque rectangulaire, celle-ci était posée sur un fond d'une couleur bien différente. Le système cherchait alors dans l'image les bords de la plaque, c'est-à-dire l'ensemble des points qui délimitaient un changement de couleur dans l'image. Il déterminait ensuite les quatre droites qui reliaient au mieux tous ces points (les quatre bords de la plaque rectangulaire), dont il déduisait la position du centre de la plaque dans l'image. En considérant que tous les problèmes de calibration décrits plus haut avaient été réglés, il pouvait alors amener la perceuse tenue au bout de son bras au bon endroit.

Le système dispose donc d'un modèle du monde assez simple : il cherche un rectangle d'une couleur connue placé sur un fond de couleur également connue. Les choses se compliquent quand le robot sort de l'usine pour entrer dans nos maisons. Il ne s'agit plus alors de reconnaître des plaques rectangulaires blanches sur fond noir mais des visages humains. Le modèle d'un visage est plus compliqué à déterminer : c'est une forme ovoïde avec deux taches blanches dans la partie supérieure (les yeux) surmontées de deux traits

(les sourcils), une ligne qui peut être un rond dans la partie inférieure (la bouche), parfois il y a des cheveux, parfois une moustache ou une barbe... En outre, le visage à détecter ne se trouve pas nécessairement devant un fond blanc : le robot doit l'identifier devant un papier peint rempli de motifs compliqués, voire devant d'autres visages.

Malgré toutes ces difficultés, la détection automatique de visage fonctionne assez bien. À cette simple détection (« y a-t-il un visage dans l'image ? ») s'ajoute la reconnaissance de certaines caractéristiques. En exploitant des statistiques sur la forme du visage, l'écartement des yeux, la taille du nez, la forme de la bouche, l'implantation des cheveux, la présence de rides, le logiciel peut formuler une hypothèse sur le sexe de l'individu qu'il regarde et estimer son âge. Enfin, en se basant sur plusieurs photos d'une même personne, il sera possible au système d'identifier ses données caractéristiques pour l'identifier sur une nouvelle image. Bien sûr, si elle se laisse pousser la barbe, met des lunettes ou change radicalement de coiffure, le logiciel risque de ne plus la reconnaître. Mais n'avons-nous pas le même problème (auquel s'ajoute notre faible mémoire qui nous empêche parfois de remettre un nom sur un visage connu) ?

L'utilisation des statistiques pour caractériser, voire reconnaître, un visage relève de l'apprentissage pour un robot (et plus généralement pour un ordinateur).

Une grande quantité d'exemples lui est montrée, on lui explique ce qu'il doit en conclure pour chacun et, petit à petit, il devient capable de tirer des conclusions tout seul. Ses déductions ne s'appuient alors plus vraiment sur des règles explicites du type « si le visage a des rides, la personne est âgée ». Comme chez l'être humain, l'expérience peut donner des *a priori* au robot. S'il est formé en ne lui présentant que des hommes vieux d'une part et des femmes jeunes de l'autre, le jour où il devra analyser la photo d'un homme jeune, il risque d'en conclure que c'est une femme, les critères « jeunesse » l'emportant sur les autres. Il est donc très important de veiller à ce que les données utilisées lors de l'apprentissage des robots soient représentatives des situations qu'il rencontrera. Sur le cas simple de la reconnaissance des visages, cela semble facile à réaliser. Mais cela peut se révéler nettement moins évident lorsque l'apprentissage porte sur des situations plus complexes.

Pour lui permettre de reconnaître une plaque ou un visage, il est donc possible d'indiquer au robot les indices qu'il doit rechercher dans une image. À partir de ceux-ci, ou de statistiques les concernant, il est capable de tirer une conclusion. Mais les spécialistes de la reconnaissance d'image, pour généraliser leur approche, ont essayé de se passer de la description explicite de ce qui est à analyser dans l'image. Décrire au robot tout ce qui caractérise un vélo, une voiture,

un arbre, une maison, un footballeur, une mitraillette ou un raton laveur représenterait un travail infini. Ils ont alors imaginé de ne rechercher dans les images que de tout petits motifs, quasiment sans aucune sémantique. Le logiciel ne cherche plus un œil, une roue ou une gâchette, mais un angle ou un changement de couleur rapide par exemple. Le génie de ces informaticiens a été de déterminer la description de ces points d'intérêt (SIFT et SURF sont les algorithmes les plus connus), reconnaissables dans n'importe quelle image, indépendamment de son contenu. Une image est alors décrite sous la forme d'un ensemble de points d'intérêt et de leurs positions relatives. Elle est déclarée similaire à une autre si elle présente des points d'intérêt identiques répartis de la même façon. Si la première montrait une photo de la tour Eiffel, il est fort probable que ce soit également le cas de la seconde. À aucun moment il n'aura été expliqué au logiciel de reconnaissance que la tour Eiffel est une construction métallique vaguement triangulaire, mais il sait la reconnaître quand il la voit (comme dirait Engelberger). Pour être plus précis, il ne reconnaît pas la tour Eiffel à proprement parler. Il trouve beaucoup de ressemblances entre l'image qui lui est présentée et celle qu'il connaît, a mémorisée, et dont on lui a dit qu'elle représentait la tour Eiffel. Plus que la forme générale, c'est probablement la répétitivité du treillis qui va retenir son attention. En conséquence, si un dessin simplifié de la tour Eiffel

lui est montré, comme celui figurant sur le logo d'un club de football parisien par exemple, le logiciel risque de ne pas l'identifier.

Cette technique s'éloigne de notre façon de reconnaître les objets qui nous entourent. Si on demande au robot de décrire la tour Eiffel à quelqu'un qui ne l'a jamais vue, il est à espérer qu'il pourra en afficher une photo sur un écran. En effet, la description textuelle qu'il en ferait à partir de la représentation stockée dans sa mémoire (une suite de paquets de chiffres) serait complètement ininterprétable par le commun des mortels.

Des neurones dans le cerveau des robots

Les informaticiens ont poussé l'idée encore plus loin, en s'inspirant du fonctionnement du cerveau et de la façon dont les bébés prennent conscience de leur environnement. Ils ont alors cherché à reproduire l'activité d'un réseau de neurones. Les systèmes modélisent l'interprétation d'un signal capteur et la prise de décision correspondante au moyen d'une combinaison d'opérations très simples. Les neurones sont répartis sur différentes couches. Chaque neurone de la première couche capte une partie du signal, lui fait subir une transformation et transmet le résultat aux neurones de la deuxième couche. Chacun d'entre eux récupère les résultats de plusieurs neurones de la première couche, les combine grâce à une opération

simple et transmet une information unique aux neurones de la troisième couche, etc. Un tel système peut permettre d'identifier un son, par exemple. Le signal sonore est transmis aux neurones de la première couche... et sur la dernière couche, un neurone s'active si le son de départ est une sonnerie de téléphone, un autre s'il s'agit d'une alarme incendie, un autre encore pour un applaudissement... Quand le réseau vient d'être créé, les opérations effectuées par chaque couche sont quelconques et les neurones de sortie sont donc activés de façon complètement aléatoire. Un entraînement est nécessaire pour que les opérations de chaque neurone et les connexions entre les différents niveaux aboutissent aux sorties attendues. Cette adaptation des connexions neuronales par l'apprentissage ressemble un peu à ce qui se passe dans le cerveau des bébés qui découvrent le monde qui les entoure. Cela a contribué à donner à l'intelligence artificielle modélisée par ces réseaux de neurones une dimension moins artificielle et, du même coup, probablement un peu plus inquiétante. Il serait légitime de se poser la question suivante : « Maintenant que les ordinateurs disposent de neurones comme notre cerveau, qu'est-ce qui les empêche d'être aussi intelligents que nous ? »

Si les premiers réseaux de neurones ne comportaient que trois ou quatre couches, les progrès de l'informatique ont permis d'en démultiplier le nombre et

d'obtenir des systèmes dits de *deep learning*. Cette nouvelle technologie donne aujourd'hui des résultats assez fascinants. Par exemple, dans le cas du traitement des images, les neurones vont être chargés de trouver des motifs caractéristiques dans les images qui leur sont soumises. Mais on ne leur précise plus ce que sont ces motifs qu'ils doivent chercher (on ne dit pas, comme dans les approches évoquées plus haut qu'il faut identifier des yeux, des bords, des points d'intérêt caractérisés par des formes ou des changements de couleurs dans un paquet de pixels). Le système doit simplement repérer des motifs de pixels qui se répètent. Le logiciel identifie des combinaisons de pixels sur un fragment d'image et les recherche ensuite dans les millions de visuels dont il dispose, pour faire son apprentissage. Après cette première passe, il choisit les cent combinaisons qui reviennent le plus souvent. Il trouve bien sûr des bords (qui délimitent deux surfaces de couleurs différentes), des motifs qui ressemblent aux points d'intérêt des méthodes classiques et encore d'autres combinaisons. Ensuite, il recherche la façon dont ces motifs de premier niveau s'agrègent le plus souvent pour former des motifs de motifs. Pour ce faire, une nouvelle passe est effectuée au sein de la base de données pour identifier, disons, les cent motifs de motifs les plus fréquents. Et ainsi de suite : on repère un troisième niveau de motifs, puis un quatrième...

Qu'est-ce qu'un pixel ?

Un pixel est un point de couleur dans une image numérique. Plus une image est de bonne résolution, plus elle compte de pixels au cm^2 . Les pixels sont significatifs aussi bien en termes d'affichage (nombre de pixels sur un écran) que de perception (nombre de pixels d'une caméra ou d'un appareil photo). Pour un robot, une image n'est qu'un amas de pixels organisés en lignes et en colonnes.

Chaque couche du réseau est chargée d'extraire un motif de motifs à partir du motif créé par la couche inférieure. Au bout d'un moment, ces agrégations atteignent des dimensions de morceaux d'images interprétables par l'œil et, surtout, le cerveau de l'homme. Dans un article fameux, les équipes de Google, très en pointe sur le sujet, ont montré que, parmi les motifs interprétables, identifiés à partir des milliards d'images référencées par leur moteur de recherche, deux dépassaient tous les autres : le visage humain, bien sûr, et, plus surprenant, la tête de chat (Alexander Mordvintsev et al. « Inceptionism: Going Deeper into Neural Networks », disponible en ligne). Après l'être humain, le chat est donc le deuxième sujet préféré des photographes qui publient leurs clichés sur internet. Mais bien sûr, d'autres « macromotifs » apparaissent : voitures, chevaux, etc. Cela peut donner dans un premier temps des interprétations d'images

assez psychédéliques : le réseau de neurones voit des visages, des chatons, des voitures un peu partout, dans des nuages, des montagnes... Mais après quelques couches de neurones supplémentaires, tout rentre dans l'ordre et le contenu des images est convenablement identifié.

Vers une intelligence supra-humaine ?

Selon ses promoteurs, la beauté de la méthode de *deep learning* réside dans le fait que l'intelligence artificielle comprend par elle-même ce qu'il faut trouver et la façon de le trouver, tel un enfant qui découvrirait le monde. On ne lui apprend pas comment reconnaître un chat, on lui indique que cet être qu'il voit régulièrement s'appelle un chat. De la même façon, il faut signifier à l'intelligence artificielle que ce paquet de pixels qu'elle repère dans un grand nombre de photos est un chat, pour qu'elle puisse ensuite nous proposer des images de chats quand on le lui demande, ou que le robot soit capable d'en identifier un devant ses caméras et d'agir en conséquence. Les travaux en cours des chercheurs en robotique développementale visent d'ailleurs à étendre ce principe d'apprentissage aux actions liées à la situation perçue par la machine. À l'instar du bébé qui découvre que la balle rouge qu'il a sous les yeux bouge quand sa main la touche, l'intelligence artificielle apprendra à évaluer les conséquences des mouvements des moteurs

qu'elle contrôle, pour pouvoir ensuite déclencher les bons gestes et atteindre les objectifs visés. Si un bébé finit par y arriver, pourquoi un robot doté des mêmes mécanismes d'apprentissage n'y parviendrait-il pas ?

Nous touchons là une des questions fondamentales qui préoccupent les roboticiens mais aussi les neurologues et les physiologistes : si le robot est doté des mêmes « mécanismes » de perception, de décision et d'action qu'un être humain, obtiendra-t-on pour autant un être aussi efficace (nous évitons le mot « intelligent » à dessein) ? Et si ce n'est pas le cas, sera-ce parce que les roboticiens n'auront pas réussi à reproduire assez fidèlement ces mécanismes ? Ou parce que les scientifiques qui étudient l'homme n'ont pas encore saisi toute la subtilité de son fonctionnement ? Existe-t-il chez l'homme un ingrédient transcendant que la physiologie ne peut pas identifier ? Physiologistes et roboticiens se sont beaucoup rapprochés ces dernières années pour tenter de répondre à ces questions. La physiologie voit dans la robotique un moyen d'expérimenter ses théories en les implémentant sur une matière inerte et la robotique a compris le parti qu'elle pouvait tirer d'une meilleure compréhension du fonctionnement humain.

En attendant que les robots soient dotés de capacités d'apprentissage semblables à celles des bébés, les chercheurs trouvent également l'inspiration du côté des adultes. Lorsque quelqu'un désire apprendre à

faire quelque chose, il lit des livres et se forme auprès de personnes compétentes. C'est également le cas des équipes de roboticiens rassemblées au sein du projet européen RoboHow. Son but est d'enseigner à un robot comment réaliser des plats cuisinés, en interprétant les recettes disponibles sur les sites internet et en imitant les gestes qu'un cuisinier humain lui montre. Ce type d'apprentissage utilise des modèles : la recette de cuisine décrit de façon littérale les ingrédients et le processus, et la gestuelle du cuisinier humain est à imiter. Mais dans les deux cas, ces modèles nécessitent une interprétation moins simple qu'il n'y paraît. Quand la recette précise qu'il faut ajouter « des œufs entiers », cela signifie le jaune et le blanc, mais pas la coquille. Quand il faut « battre les œufs », ce n'est pas avec des gants de boxe mais avec un fouet (de cuisine). Et quand le robot voit le cuisinier verser les œufs et la farine, il doit bien noter que ces ingrédients sont versés dans un saladier. Quant au geste de remuer, il ne s'agit pas d'appliquer une trajectoire pour que l'extrémité du bras atteigne un endroit donné mais de réaliser un mouvement qui brasse effectivement les ingrédients contenus dans le saladier. L'implémentation d'une telle méthode d'apprentissage nous est donc plus naturelle, mais elle implique une capacité d'interprétation assez poussée du robot. Son intérêt réside dans le fait que le robot peut expliquer comment il a réalisé son plat (ou d'une manière générale son plan) : il peut citer

Un psy pour les robots ?

Si le comportement d'un robot dépend de ses expériences passées, il faudra explorer sa mémoire pour comprendre l'origine d'un éventuel dysfonctionnement. L'auteur de science-fiction Isaac Asimov (1920-1992) l'avait pressenti en créant, dès 1940, le personnage de Susan Calvin, une « robopsychologue » chargée d'explorer les arcanes des cerveaux « positroniques » des robots créés par l'US Robot. Elle apparaît dans une douzaine de romans et nouvelles d'Asimov.

la recette qu'il a suivie, montrer les vidéos qu'il a utilisées pour apprendre les gestes. Avec des méthodes extrêmement génériques, comme celles issues du *deep learning*, les sources de l'apprentissage peuvent être très difficiles à retrouver.

Les mécanismes d'intelligence artificielle décrits ici sont de plus en plus sophistiqués mais ils ont un point commun : ils s'inspirent de l'existant et le reproduisent, de plus en plus efficacement, en exploitant des quantités de données de plus en plus importantes et en y appliquant des calculs de plus en plus compliqués. Ils ne consistent cependant qu'en l'implémentation d'idées et de principes créés par les humains. Il existe donc une limite à leur créativité. L'ordinateur ne peut, par nature, sortir de son cadre calculatoire. C'est ce

qui le différencie, par exemple, du sportif pratiquant le saut en hauteur. Jusqu'en 1968, les athlètes utilisaient la technique du rouleau ventral et franchissaient la barre en la regardant passer sous leur ventre. Si les ordinateurs avaient été disponibles à l'époque, ils auraient pu optimiser les paramètres du saut : le nombre de pas de la course d'élan, sa vitesse, la position du pied d'appui, la trajectoire des bras pour tirer le meilleur parti de leur inertie, etc. Cependant, un logiciel n'aurait jamais pu proposer l'idée de Dick Fosbury aux Jeux olympiques de Mexico : sauter par-dessus la barre en lui tournant le dos. Pour qu'il le fît, il aurait fallu faire figurer, parmi les paramètres modulables dans l'optimisation du saut, la configuration du corps au moment du franchissement. C'est donc le programmeur du logiciel qui aurait eu l'idée de cette remise en cause. La machine ne l'aurait qu'aidé à trouver la meilleure configuration parmi toutes les façons de franchir une barre à plus de deux mètres du sol.

Les émotions sont-elles inaccessibles à l'intelligence robotique ?

Pour finir, nous voudrions évoquer l'idée assez répandue selon laquelle les robots ne seront jamais aussi intelligents que l'homme parce qu'ils ne peuvent pas percevoir et exprimer des émotions. On entend par-là qu'il leur manquera toujours une dimension

affektive, et que la véritable intelligence n'est pas celle du calcul mais celle du cœur. Sans s'attarder sur cette dernière assertion, il est déjà possible de remarquer que la modélisation des émotions est une tâche presque plus facile que l'ensemble des problèmes que les roboticiens ont eu à régler jusque-là. Principalement, parce que le sujet est traité depuis des milliers d'années par des artistes de grand talent (écrivains, peintres, cinéastes, musiciens) et qu'il existe même une industrie capable de tirer, sur commande, des rires ou des pleurs aux spectateurs de fictions télévisées. Une série en dévoile même tous les secrets, dans une forme de mise en abîme. Le héros de *Lie to me* est en effet capable de déceler les émotions des protagonistes de l'épisode à partir de leurs micro-expressions du visage, leur posture ou leur gestuelle. Différentes techniques, comme la programmation neurolinguistique par exemple, se sont proposé de modéliser tout cela et, moyennant une faculté de perception assez performante, le robot qui les utilisera pourra quasiment lire à livre ouvert les émotions de son interlocuteur. Elles s'ajouteront aux programmes qui, dès aujourd'hui, sont capables de détecter la joie, la tristesse, la colère, voire le sarcasme, dans la voix du locuteur. La perception d'émotions n'est donc pas ce qui différenciera longtemps l'homme du robot. Quant à l'expression d'émotions, les règles élémentaires de la politesse suffiront largement à en faire un compagnon suffisamment empathique et à

le rendre aussi sympathique qu'un bon commerçant sachant jouer au moment opportun la joie, la tristesse, l'excitation ou l'abattement pour s'accorder à son client même si son émotion personnelle est à l'opposé de ce qu'il doit exprimer pour respecter la bienséance. Le robot n'ayant pas d'émotion personnelle, il lui est encore plus facile d'exprimer celle que son interlocuteur attend. Là encore, séries télévisées et dessins animés ont déjà modélisé les comportements stéréotypés qui font qu'un personnage exprime une émotion. Il est donc aisé pour un robot, surtout s'il a une forme vaguement humanoïde, de le faire. Les animateurs de Pixar ont prouvé avec talent que même une lampe de bureau pouvait exprimer ses états d'âme par le truchement des mouvements de ses quatre articulations rotoïdes. Le robot n'aura donc pas d'émotions mais il pourra tout à fait percevoir les nôtres et simuler les siennes pour être un compagnon tout à fait fréquentable, loin des machines froides que certains auteurs se sont longtemps plu à décrire.

Comme l'explique le psychanalyste Serge Tisseron, utiliser ces techniques pour faire croire que les robots seront capables de sentiments serait malhonnête (*Le jour où mon robot m'aimera*, 2015). La reconnaissance des émotions présente avant tout l'intérêt de permettre au robot de s'adapter à l'état d'esprit de l'utilisateur. Il s'agit d'éviter qu'il agisse précisément « comme un robot », reposant imperturbablement la

même question même si son interlocuteur est en train de perdre son calme parce qu'il ne sait comment y répondre. En revanche, plus les robots identifieront les émotions et sauront y répondre de manière pertinente, plus ils interagiront avec fluidité, et plus ils seront acceptés dans notre quotidien.

Chapitre 3

Pourquoi et comment avoir un robot chez soi ?

Une fois sorti de son usine, à quoi le robot va-t-il être employé, maintenant qu'il peut faire davantage que peindre et souder des tôles ? Capable de percevoir son environnement et d'effectuer des tâches automatiquement, il peut nous assister dans nos activités quotidiennes. Si la forme humanoïde nous fascine le plus, est-elle pour autant la plus adaptée à ces nouvelles fonctions ? Plus coûteux, de tels robots seront-ils à la portée de toutes les bourses ou réservés à une population aisée ?

À quoi peut servir un robot ?

Désormais également employés en dehors des usines, les robots sont dits « de service » et peuvent se voir attribuer un nombre quasi infini d'occupations : du nettoyage des sols de la maison à l'exploration de planètes lointaines, de l'intervention en milieu hostile post-accident à la tonte du gazon, de l'assistance au geste chirurgical au transport de container, de la traite des vaches à la cueillette des tomates, de l'accompagnement des personnes handicapées au déminage...

Robot industriel ou robot de service ?

Cette typologie de la robotique est apparue assez tôt pour distinguer le mode d'interaction entre l'homme et le robot. Les robots industriels sont utilisés comme des machines-outils : ils sont installés dans une usine, à un poste et dans une zone dédiée, et exécutent, à grande cadence, des tâches répétitives sans intervention humaine. Ils sont généralement protégés par des grilles pour éviter tout accident et limiter les interactions avec les hommes. L'entrée d'un ouvrier dans leur espace de travail provoque un ralentissement, voire un arrêt, de leurs mouvements. Le robot industriel et l'homme sont exclusifs l'un de l'autre. Le premier a remplacé le second pour des tâches pénibles et répétitives. Sa précision, sa force et sa rapidité sont ses principales qualités.

Le robot de service est, quant à lui, destiné à être utilisé dans un environnement non protégé au sein duquel il peut, occasionnellement ou régulièrement, entrer en contact avec l'homme. L'homme et le robot de service cohabitent et leur interaction peut aller d'une simple anticollision (le robot aspirateur qui ne monte pas sur nos chaussons) à un dialogue utilisant le langage (le robot humanoïde qui prend soin d'une personne âgée).

Bien évidemment, pour chacune de ces applications, la forme du robot diffère. C'est du moins l'approche classique en conception robotique. Un robot aspirateur

doit mesurer moins de 10 centimètres de haut pour pouvoir passer sous les fauteuils et peser moins de 3 kilogrammes pour être transportable facilement. Quant au robot transporteur de containers, semblable à ceux qui gèrent la manutention sur le port de Sydney en Australie, il doit pouvoir porter des parallélépipèdes de 12 x 6 x 6 mètres et pesant jusqu'à 30 tonnes. Une analyse fonctionnelle de la (ou des) mission(s) à remplir permet de définir les organes dont le robot doit être doté. C'est un travail d'ingénieur passionnant de déterminer la forme adaptée et l'équipement nécessaire à l'accomplissement d'une tâche donnée.

Quand il est produit pour remplir une fonction précise, on ne se pose pas la question de l'utilité du robot. En revanche, qu'en est-il s'il est conçu indépendamment de son usage futur ? Et qui pourrait concevoir un outil sans avoir une idée *a priori* de ce qu'il veut en faire ensuite ?

Ce paradoxe a accompagné l'essor des robots humanoïdes. La fabrication de robots dotés de jambes, de bras, de mains et d'une tête a toujours fasciné les ingénieurs et les chercheurs. Pourquoi ? Certains y voient une prétention à se sentir l'égal de Dieu, d'autres un sujet d'étude très complexe et donc passionnant, les derniers un moyen de mieux comprendre le fonctionnement de l'homme. En effet, n'est-on pas certain d'avoir compris le principe de la marche humaine quand on est capable de l'implémenter

dans une mécanique dotée de jambes ? Si le robot peut ensuite marcher comme un homme, force est de constater qu'on a trouvé au moins une façon de modéliser le fonctionnement humain. Au Japon, les travaux sur la robotique humanoïde ont commencé dès les années 1980, massivement subventionnés par le gouvernement, afin de répondre à l'évolution démographique du pays. En conséquence d'un vieillissement rapide, la main-d'œuvre allait manquer sur les postes de travail, mais également pour s'occuper des personnes âgées. Le développement de la robotique humanoïde a alors été élevé au rang de cause nationale, faisant des Japonais une référence en la matière, du moins en termes de performances. Ainsi, le robot Asimo, de Honda, est capable de tâches époustouflantes (marcher, courir, sauter à cloche-pied, ouvrir le bouchon d'une bouteille). S'il n'est pour l'heure qu'un prototype hors de prix loin d'être commercialisé au grand public, il préfigure ce dont seront capables les robots humanoïdes.

Cela dit, si on comprend pour quelles raisons des ingénieurs peuvent chercher à fabriquer des robots humanoïdes, on ignore toujours dans quel but ils le font. La seule volonté de compenser les départs à la retraite et d'accompagner les personnes âgées demeure un peu vague et ne décrit absolument pas les actions que les robots devront accomplir au quotidien.

Entrons donc dans le détail pour définir la place qu'ils pourront prendre dans notre vie.

Certains des usages présentés ici sont déjà mis en œuvre, d'autres ne sont pas du tout réalisables aujourd'hui. Mais tous se fondent sur des bases techniques existantes, destinées à progresser dans les prochaines années afin d'en permettre l'accès au plus grand nombre.

Une des premières idées à s'être imposées, dès l'apparition du concept de robot de service dans les années 1980, est celle du robot-guide. Le principe est le suivant : le visiteur arrive au musée et veut voir *La Joconde*. Le robot propose au visiteur de le suivre pour l'y emmener. En chemin, le robot, qui connaît la topographie du musée, commente les œuvres devant lesquelles il passe. Grâce à sa fonction d'apprentissage, il a repéré les tableaux devant lesquels le plus grand nombre de visiteurs s'arrêtent et les signale aux personnes qu'il guide. Avec un tel logiciel, on crée un robot *mainstream* qui fait voir en priorité les pièces les plus vues. Avec une autre programmation, le robot signalera au contraire des œuvres méconnues devant lesquelles les gens s'arrêtent moins et les commentera pour les faire apprécier. On aura créé un robot un peu « élitiste ». Des prototypes de tels robots-guides ont été testés sur des périodes plus ou moins longues dans des musées et des robots d'accueil, plus simples, commencent à être en service

de façon quotidienne. Ces robots attirent la clientèle par leur simple présence, peuvent diffuser ou non des informations commerciales et distraient les enfants et leurs parents. Un opérateur téléphonique japonais a vu la fréquentation de ses boutiques augmenter de 50 %, grâce à la présence d'un robot humanoïde posté à leur entrée.

Le robot, et plus particulièrement le robot humanoïde, constitue un excellent vecteur éducatif. À la façon des ordinateurs puis des tablettes, il est un répétiteur inépuisable qui captive les enfants. Réciter sa poésie ou sa table de multiplication devant un robot sera plus amusant et surtout moins humiliant quand on ne se souvient plus combien font 7 fois 8 que de le faire devant la maîtresse ou ses petits camarades. L'éducateur humain pourra faire passer par l'intermédiaire du robot davantage d'exercices qu'il n'aurait pu en imposer lui-même à l'enfant, et ce dernier pourra lui faire répéter indéfiniment un savoir-faire, là où un interlocuteur humain aurait fini par se lasser. Des résultats très encourageants ont déjà été obtenus dans le cadre de l'éducation des enfants autistes. Ceux-ci ont des difficultés à interpréter la très grande richesse des signes paraverbaux qui accompagnent notre communication mais ils sont souvent très intéressés par tout ce qui a trait à la technologie. Un petit robot humanoïde capte leur attention et ses réactions mécaniques (le robot répond toujours de la

même façon à un stimulus donné) sont extrêmement rassurantes pour eux.

L'assistance aux personnes âgées est un enjeu qui s'impose aujourd'hui à toutes nos sociétés vieillissantes. À partir d'un certain âge, il devient difficile pour les personnes seules de vivre de façon autonome. L'entrée en maison de retraite est non seulement traumatisante mais aussi très coûteuse pour la personne, sa famille et la société en général. L'idéal serait bien sûr que les personnes âgées puissent rester chez elles en bénéficiant d'une assistance humaine 24 heures sur 24, mais la société n'en a ni les moyens financiers ni même humains. Les médecins spécialisés, les personnes âgées elles-mêmes et leur entourage reconnaissent que la robotique est une des solutions à envisager pour permettre aux personnes dépendantes de rester plus longtemps chez elles dans de bonnes conditions. Le robot ne remplacera pas l'aide humaine mais, puisqu'elle ne peut être permanente, il s'y substituera pendant ses moments de carence. Il pourra alors remplir trois fonctions principales : assurer la sécurité de la personne, veiller à ce qu'elle conserve un lien avec son entourage et l'aider dans la réalisation de tâches quotidiennes.

Pour assurer la sécurité d'une personne âgée, il pourra détecter si elle est tombée et a du mal à se relever, lui rappeler de prendre ses médicaments ou de s'hydrater quand il fait très chaud, repérer des changements

dans ses habitudes quotidiennes (mobilité réduite, sommeil plus long...). Ces anomalies seront signalées à l'entourage, voire à la société d'assurance prête à envoyer du secours en cas de besoin. Grâce à sa mobilité, le robot sera capable de bien mieux apprécier l'état de la personne avec qui il vit qu'une tablette ou un PC. Pour préserver la vie sociale de son utilisateur, il pourra lui rappeler qu'il n'a pas eu de nouvelles de ses enfants depuis longtemps ou que c'est l'anniversaire d'un de ses amis... Et évidemment, il devra être capable, à terme, de réaliser des tâches devenues difficiles : aller chercher un objet oublié dans une autre pièce, faire réchauffer des plats, ranger les objets qui traînent, remplir et vider le lave-vaisselle... Mais les personnes âgées sont formelles : le robot ne doit pas faire ce dont elles sont capables. Il devra pouvoir se rendre compte si ce qu'on lui demande est à la portée de son interlocuteur et, le cas échéant, refuser de le faire. Crée-t-on pour autant un robot désobéissant ? Non, car il aura obéi à un ordre de plus haut niveau. La deuxième loi d'Asimov n'est pas si simple à interpréter...

Évidemment, beaucoup rêvent d'un robot-compagnon de la famille, qui joue avec les enfants, les surveille et leur fait faire leurs devoirs, fait le repassage et, à l'occasion, va chercher des bières dans le réfrigérateur. Ces quelques exemples montrent bien que les usages qui viennent à l'esprit sont très divers et parfois

////////////////////////////////////

Que sont les trois lois de la robotique d'Isaac Asimov ?

Dans ses deux cycles les plus connus, *Fondation* et *Les robots*, Isaac Asimov a imaginé trois lois assurant la bonne intégration des robots dans la société, quelle que soit la manière dont ils seront ensuite programmés. La première loi est la suivante : « Le robot ne doit pas faire de mal. » La deuxième loi stipule : « Le robot doit obéir aux ordres des humains si cela ne contrevient pas à la première loi. » Enfin, la troisième précise : « Le robot doit veiller à sa propre intégrité tant que cela ne contredit pas les deux premières lois. »

Si, sur le papier, ces lois paraissent tenir debout (en dépit du fait que, dans l'état actuel des choses, leur implémentation informatique semble encore très improbable), toute l'œuvre d'Asimov démontre qu'elles débouchent sur des comportements étranges, voire dangereux pour l'homme. Au-delà du plaisir pris à lire ses livres et des éventuelles leçons qu'un roboticien peut en tirer, on peut y voir une réflexion sur le rôle des lois. Même si le robot ne les enfreint jamais (il ne peut « mécaniquement » pas désobéir à ces trois directives), il n'atteint pas un comportement social parfait. La loi ne peut pas être tenue comme seule garante de la vie en société.

////////////////////////////////////

contradictoires. Le robot doit jouer pour faire plaisir à l'enfant mais il devrait également l'aider à faire ses devoirs pour contenter ses parents. Une priorité dans les ordres qui lui sont donnés doit être définie.

Celle-ci dépendra soit de la nature de l'ordre, soit de la personne qui l'a donné. Les études menées auprès d'utilisateurs potentiels de robots domestiques témoignent également de la différenciation de la place du robot dans la famille selon les sensibilités de chacune. Pour certaines, le robot est perçu uniquement comme un outil effectuant les tâches qui lui sont explicitement assignées (« débarrasse la table », « passe l'aspirateur », « apporte-moi mon petit-déjeuner à 7 heures demain matin » ...). Pour d'autres, il doit être une présence permanente dans la maison, qui vient proposer spontanément ses services. Pour ceux-là, il doit venir à la porte quand on rentre chez soi pour nous informer de qui est à la maison, nous aider à retirer notre manteau et prendre ce que l'on porte. Cette question de la proactivité du robot divise assez clairement la population.

Si cela paraît relever de la science-fiction (les roboticiens ont encore un peu de travail avant d'arriver à proposer ce genre de service), la question de la pertinence de la proactivité d'un système automatique est déjà prégnante avec les procédés d'aide à la saisie de texte. Certains trouvent horripilant que le téléphone finisse d'écrire leurs SMS à leur place et désactivent la fonction, alors que d'autres adorent car cela permet avec un tout petit peu d'attention supplémentaire d'écrire plus vite et sans coquilles. Le même principe prévaudra pour les robots : chacun configurera leur

proactivité selon ses préférences. Cependant, il est certain qu'une grande majorité d'utilisateurs y viendra car il s'agira de l'atout majeur du robot de demain, capable de proposer le bon service au bon moment.

« Vivant » avec nous au quotidien, il nous connaîtra mieux que personne et saura anticiper nos besoins avant même que nous les exprimions. Un chercheur japonais, travaillant sur la sécurité des robots industriels, souhaitait que la machine lise dans les pensées des ouvriers qui l'entouraient. En repérant les humains qui s'approchent de son espace de travail, en observant leur trajectoire dans l'atelier, en déterminant l'orientation de leur regard, le robot doit pouvoir déduire s'ils ont ou non l'intention d'entrer dans son espace de travail et, le cas échéant, ralentir, voire arrêter, son geste. À terme, cette capacité du robot domestique à comprendre nos intentions pourrait rendre possible la situation suivante : c'est le dimanche midi, j'ai passé toute la matinée à préparer un *osso buco*. Quand j'apporte la lourde marmite sur la table, celle-ci est encombrée par les couverts des convives, le vase avec les fleurs apportées par tonton Stéphane, la corbeille de pain déjà à moitié vidée par les cousins malgré leur discussion passionnée sur leur jeu vidéo et la bouteille de vin sérieusement entamée par les deux belles-sœurs qui débattent de l'influence de l'évolution du coût de la main-d'œuvre en Chine sur la revitalisation du tissu industriel européen. Je suis

tout seul avec ma marmite de 5 kg à bout de bras, sans aucun endroit pour la poser et aucun secours humain possible. Le robot comprend la situation, voit que je veux poser ma marmite sur la table et constate qu'il n'y a pas d'espace disponible. Avant même que j'aie pu ouvrir la bouche, il commence à faire de la place. Il exécute la bonne action au bon moment sans que j'aie eu à le lui demander.

Les usages décrits ici sont probablement inspirés de livres et de films marquants ainsi que par notre mode de vie actuel. Mais il y a fort à parier que d'autres services apparaîtront, dont nous n'avons pas idée aujourd'hui, quand le plus grand nombre prendra la mesure de ce que la technologie peut nous offrir. Les spécialistes des télécommunications n'avaient pas imaginé que le SMS, qui n'était pour eux qu'un outil professionnel, prendrait une telle importance. Quand le robot Nao a été mis au point, ses concepteurs ne soupçonnaient probablement pas qu'il pourrait aider les éducateurs travaillant avec les enfants autistes. Nous tous, fabricants, chercheurs et utilisateurs, allons trouver ensemble la place et l'usage de ces futurs robots.

Faut-il être humanoïde pour être un bon robot ?

La forme à donner à un robot de service suscite toujours le débat. Si l'ingénieur conçoit une mécanique adaptée à une ou deux tâches, celle-ci n'a pas besoin d'être humanoïde. Mais s'il en imagine

une sans préjuger de l'usage qui en sera fait, alors, pour simplifier, il lui donne une forme humaine. Si une tâche peut être réalisée par un homme, elle sera également à la portée d'un robot créé à l'image de l'homme. Tous les roboticiens du monde s'étrangleront en lisant que créer une telle machine résulte d'une facilité. La forme humanoïde, par sa complexité, ses très nombreuses articulations, les contraintes qu'elle impose, les attentes qu'elle suscite, ne flatte en rien le goût de la simplicité des concepteurs de robots. En revanche, elle évite de se poser *a priori* la question de la fonction des robots ainsi créés.

Mais qu'entend-on par « humanoïde » ? S'agit-il de faire des robots ressemblant parfaitement à l'être humain ? Certains y travaillent. L'exemple le plus connu est celui du professeur japonais Hiroshi Ishiguro qui a fabriqué un robot à son image. Sur une photo où ils figurent côte à côte, il est quasiment impossible de distinguer le robot du roboticien. Cette performance technique est impressionnante (peau de plastique au grain identique à celui de la peau humaine, œil synthétique au brillant similaire à celui d'un véritable globe oculaire), mais quel en est l'objectif ? Tromper les humains ? Reproduire, comme le suggère Serge Tisseron, l'apparence de personnes disparues, à côté desquelles on voudrait continuer à vivre ? Dans notre mentalité occidentale en tout cas, cette volonté de copier l'humain paraît pour le moins étrange, à moins

qu'on ne s'intéresse aux applications très spécifiques, et très lucratives, des robots sexuels. C'est un marché qu'il ne faut pas ignorer, appelé probablement à devenir aussi important que celui des sites pornographiques sur internet.

Ce cas particulier mis à part, la forme humanoïde trouve une première justification déjà évoquée : pour partager un environnement fait pour l'homme, autant que le robot ait la même forme que lui. Inutile dès lors de modifier notre cadre de vie pour y intégrer une machine qui a la même morphologie que la nôtre. La seconde justification est celle de la simplification de la communication. En proposant une forme humanoïde et notamment une tête équipée d'yeux et d'oreilles, le fabricant affiche la couleur : on peut dialoguer avec son robot. Le mode d'interaction intuitif n'est pas le clavier ou l'écran tactile mais la parole. Tout le reste de la forme humanoïde renforce cette idée. De la même façon que, chez l'homme, une bonne partie du message transmis n'est pas exprimée verbalement (langage corporel, orientation de la tête, du regard...), le robot utilise sa forme humanoïde à l'appui de ce qu'il dit. Sa gestuelle est un vecteur puissant qui facilite l'interprétation par un être humain : accompagner une réponse négative par un mouvement de tête rendra d'abord la réponse plus compréhensible mais sans doute également plus acceptable. Il est d'ailleurs intéressant de constater que si le robot de

Hiroshi Ishiguro est trompeur sur photo, la rigidité de ses gestes dès qu'il commence à bouger rappelle instantanément qu'il s'agit d'une machine. Cet écart entre l'apparence et le comportement peut mettre l'interlocuteur très mal à l'aise.

C'est une question très importante pour les robots humanoïdes. Plus le robot ressemble à l'homme, plus on s'attend à ce qu'il se comporte comme tel. Les visiteurs qui rencontrent des robots humanoïdes cherchent tout de suite à leur parler comme à des êtres humains, leur adressent des gestes de salutation, leur tendent la main. Nos pauvres robots sont souvent perdus devant cette avalanche de signaux et ne réagissent pas aussi bien que le public le souhaiterait. C'est une des raisons pour lesquelles il importe aussi que leur apparence ne soit pas trop parfaitement humaine. En gardant un aspect de machine, malgré la douceur de leur forme, les robots humanoïdes installent une petite distance avec leur utilisateur. La voix qu'on leur donne est aussi déterminante. En dotant le robot d'une voix de synthèse très humaine (comme la voix de Scarlett Johansson dans le film *Her* de Spike Jonze), on risque de faire oublier que ce n'est qu'une machine parlante. La voix doit donc être suffisamment humaine pour être compréhensible et agréable à entendre mais suffisamment robotique pour faire comprendre que c'est un ordinateur qui engendre les réponses et non un opérateur distant

qui s'exprime à travers les haut-parleurs du robot. La quête de cet équilibre délicat entre apparence humaine (rendant l'échange plus naturel) et apparence robotique (définissant la place et le statut des machines) est au cœur de la recherche sur l'interaction entre l'homme et le robot.

Quel modèle économique ?

Longtemps, la question au centre de la recherche robotique a été : « Comment fabriquer et faire fonctionner des robots utiles à l'homme ? ». Ensuite, nous l'avons vu, elle est devenue : « Que faire avec ce robot pour qu'il soit vraiment utile ? ». Et bientôt, l'homme d'affaires se demandera : « Comment vais-je réussir à fabriquer et vendre cet objet sans perdre d'argent ? ». Pour l'instant, le prix d'un robot assez évolué pour être placé dans une famille est encore trop élevé, particulièrement quand on le compare aux services qu'il peut effectivement rendre. Avant d'envisager une commercialisation généralisée à destination du grand public, il convient de baisser les coûts de conception et de fabrication et surtout d'augmenter les services rendus. Quand l'équilibre entre les deux sera atteint, notre homme d'affaires pourra espérer avoir une réponse.

Les frais de fabrication d'un robot dépendent principalement du prix de ses composants (lui-même dépendant de la quantité fabriquée) et du coût de la

main-d'œuvre nécessaire à sa réalisation. Le prix des composants électroniques baisse indéniablement : les processeurs, les caméras, les micros, les moteurs et les batteries se diffusent dans notre quotidien et sont capables de performances dont même les ingénieurs de la Nasa ne disposaient pas il y a quelques années sur des machines hors de prix. Les choses évoluent donc dans le bon sens, d'autant plus que plus le coût baissera, plus les quantités vendues seront importantes ce qui contribuera encore à diminuer le prix. Les dernières prévisions annonçant que le marché de la robotique de service devrait atteindre 35 millions de robots vendus d'ici 2018 (voir Worldrobotics, « Executive Summary 2015 », disponible en ligne), on peut penser que cette spirale gagnante ne devrait pas tarder à tourner.

Toutefois, ce qui fait la valeur du robot n'est pas seulement son coût de fabrication mais également le service qu'il rend et à qui il le rend. Les *box* internet ou les téléphones portables suivent le même principe : le prix du matériel peut devenir négligeable comparé au prix du service, valorisé par le montant de l'abonnement. Quand nous achetons un téléphone à 1 euro, ce n'est bien entendu pas le prix de l'objet que nous payons, mais celui de l'accès à des services facturés ensuite jusqu'à plusieurs dizaines d'euros par mois. Le fabricant de téléphone est payé par le fournisseur de service grâce à la marge qu'il fait sur

l'abonnement vendu. De la même façon, un robot pourra être vendu avec un service et c'est le prix de ce service sur la durée qui permettra de supporter un éventuel prix de vente du robot délibérément inférieur à sa valeur matérielle. Des sociétés d'assurance, qui souhaiteraient que des robots puissent veiller sur leurs assurés en perte d'autonomie, imaginent volontiers ce genre de modèle économique. Le robot permet d'éviter des incidents dont l'indemnisation coûterait très cher. Les économies réalisées permettraient à l'assureur de financer tout ou partie de l'achat du robot. Un particulier pourrait souscrire un contrat de garantie qui lui assurerait l'accès à un service de réparation rapide et des mises à jour de son logiciel. Ce contrat, sur la durée, permettrait au vendeur de robot de proposer des prix plus bas à l'achat.

Enfin, si le robot est fourni avec un usage (assistance à personne âgée), il n'en reste pas moins une plateforme sur laquelle de nouvelles applications peuvent être téléchargées. Là encore, à l'instar des téléphones portables, le robot serait à l'origine d'un écosystème de sociétés, qui développeraient des applications robotiques qu'on pourrait acheter en ligne et installer sur son robot au gré des nouvelles fonctionnalités dont on souhaiterait le doter. La vente d'applications ou de l'autorisation d'en développer pourrait également constituer une source de revenus

pour le fabricant de robots, ce qui lui permettrait de réduire sa marge sur le robot lui-même.

Il est aussi possible d'imaginer, comme c'est le cas pour des services gratuits auxquels nous nous sommes habitués (moteur de recherche sur internet, radio et télévision privées...), que le robot devienne un agent fantastique (ou épouvantable selon le point de vue) au service du placement de produits et de la diffusion de publicités ciblées. Voyant que notre tube de dentifrice est presque vide, il pourrait nous recommander d'acheter le nouveau dentifrice « Zugol + BR » qui rend les dents si blanches et l'haleine si fraîche. À plus grande échelle, et de façon plus pernicieuse encore, le vendeur de robots pourrait partager toutes les données récupérées par ces machines avec des sociétés disposées à mieux nous connaître afin de nous proposer des produits de plus en plus ciblés.

La société de consommation a déjà fait preuve d'une extraordinaire inventivité afin que chacun puisse accéder aux nouvelles technologies à un coût qu'il estime raisonnable. Les modèles économiques évoqués ici ne sont pas nouveaux. Le vendeur de robots pourra s'appuyer sur ces exemples ou en inventer d'autres. Mais l'acheteur de robots, qui aura appris de ses expériences, pourrait bien être plus exigeant et plus attentif aux conséquences du modèle économique auquel il souscrita au moment de l'achat.

Chapitre 4

Les croyances

La robotique et l'intelligence artificielle nourrissent l'univers fécond de l'imagination et des idées. Certaines opinions se sont structurées et organisées en courants de pensée, qui pourraient avoir une influence sur l'acceptabilité des robots dans notre quotidien. Ce court chapitre vise à présenter les plus importants d'entre eux.

Les mouvements ultra-science

Le *transhumanisme* est un mouvement philosophique prédisant et travaillant à une amélioration de la nature de l'homme grâce aux sciences et aux évolutions technologiques.

Le terme « transhumain » semble avoir été créé et utilisé pour la première fois par le prêtre jésuite français Pierre Teilhard de Chardin (1881-1955). Le philosophe et théologien l'emploie notamment en conclusion d'un article intitulé « Du préhumain à l'ultra-humain », paru au sein de l'*Almanach des Sciences* de 1951.

Ce courant de pensée transnational englobe des mouvements très différents, mais tous aspirent au dépassement des souffrances humaines grâce aux sciences. L'homme, transcendant ainsi sa nature originelle, se mue en un être nouveau, une nouvelle espèce plus intelligente et cognitive, un « transhumain ». L'amélioration de l'espèce *via* l'utilisation des sciences disponibles et

l'orientation de la recherche à cette fin est élevée au rang d'obligation morale. Pour les transhumanistes, le progrès scientifique doit être tout entier tourné vers cet objectif. Le transhumanisme est multidisciplinaire dans la mesure où il agrège, pour parvenir à ses fins, l'ensemble des sciences et connaissances disponibles. La robotique en fait bien évidemment partie.

Le *posthumanisme* s'inscrit dans la mouvance transhumaniste, mais avec une vision plus « radicale ». D'un point de vue sémantique, il semble que les posthumanistes se situent déjà au-delà de l'humanité, tandis que les transhumanistes s'intéressent davantage à la période transitoire entre « humanité » et « post-humanité ». Si tous partagent la même vision utilitariste de la science, appelée à modifier et améliorer l'humanité, et la même croyance en l'évolution inachevée de l'homme, les posthumanistes paraissent toutefois aller plus loin. Ces derniers croient en la capacité de l'homme à se porter dans d'autres univers. Le terme univers s'apprécie dans tous les sens possibles. L'être humain pourrait à terme être aussi bien présent dans de nouveaux mondes (conquête spatiale) que sur de nouveaux supports (réseaux informatiques). Autrement dit, homme et technologie seraient invités à fusionner. Appliquée à la robotique, cette vision induit potentiellement que l'homme pourrait investir des corps mécatroniques (des robots) ou, inversement, qu'un ensemble de composants et/ou de modules

mécatroniques pourraient venir se greffer à l'homme. Le corps biologique et le « corps » mécanique ne feraient plus qu'un. En poussant encore plus loin cette pensée, il est même possible d'avancer que la technologie pourrait dépasser, remplacer et créer la vie.

L'*extropianisme* est un courant de pensée libertaire relativement récent, né aux États-Unis. Il puise lui aussi ses sources dans le transhumanisme et en partage les objectifs. Mais il apparaît toutefois comme une forme exacerbée de celui-ci, s'opposant ouvertement à toute pensée, philosophie ou religion pouvant contrarier ses fins. L'extropianisme fait expressément des « machines intelligentes » (et notamment des robots) un facteur déterminant pour l'avènement des « trans- » et « post- » humains. Les contours de cette philosophie ont été tracés par Max More au travers des « principes extropiens », qui sont au nombre de cinq :

- le progrès perpétuel : tous les aspects de l'activité humaine doivent rechercher le progrès dans le but d'améliorer l'esprit, le corps, la culture et l'environnement de l'homme ;
- le dépassement des restrictions : en conséquence du principe précédent, les « extropiens » souhaitent abolir toutes les restrictions imposées par les religions, les protectionnismes, les racismes, le sectarisme, le ségrégationnisme ou encore notamment le sexisme ;
- la suppression de la propriété : l'extropianisme prône l'abolition des lois et des règlements régissant

notamment la possession, la propriété, le droit d'auteur et les brevets ;

– la promotion de l'intelligence : l'intelligence, la créativité, l'ordre, la pensée critique et l'énergie débordante sont mis en avant. L'extropianisme se veut donc à l'opposé de l'entropie, du chaos ;

– l'avènement de machines intelligentes : l'objectif principal de l'extropianisme est de favoriser l'émergence d'une intelligence artificielle bienveillante ainsi que de tout robot ou machine qui peut imiter, copier ou dépasser l'intelligence humaine.

Le *technoprogressisme* est un courant de pensée récent. Il semble se structurer en 2014 en marge du colloque « Transvision 2014 » (premier colloque sur le transhumanisme en France). Tout en s'inscrivant dans le respect des préceptes transhumanistes, ce mouvement prend ses distances avec l'idéologie libertarienne des extropiens mais aussi certaines positions perçues comme radicales (en matière de cryogénisation, par exemple). Le technoprogressisme teinte sa vision d'une dimension sociale et éthique. Pour ses adeptes, le progrès doit être partagé entre tous et les lois sont un moyen d'y parvenir. Ils recherchent la répartition équitable des bénéfices mais aussi des risques liés aux avancées technologiques et scientifiques. Ils sont donc respectueux des systèmes démocratiques, qui servent leur vision de partage et d'éthique.

////////////////////////////////////

Qu'est-ce que la cryogénéisation ?

C'est un procédé visant à abaisser la température de tout ou partie d'un corps humain ou animal à des fins de conservation pour que celui-ci puisse dans un second temps être utilisé, soigné et/ou ranimé. À ce jour, cette technique n'est que pure science-fiction, aucun corps humain ainsi « vitrifié » ne peut être ramené à la vie. Derrière la cryogénéisation affluent des concepts chers aux transhumanistes, comme l'éradication de la mort et la vie éternelle.

////////////////////////////////////

Le *singularitarisme* est lui aussi un dérivé du transhumanisme. Les adeptes de cette mouvance croient en l'existence d'un point de singularité dans un futur relativement proche. Ce point de singularité marque la bascule du monde que nous connaissons vers un monde où le progrès et les avancées technologiques ne seraient plus le fait de l'homme mais d'une intelligence artificielle. Les tenants de cette doctrine avancent qu'il est possible et nécessaire de maîtriser et favoriser cette évolution. Appliqué à la robotique, le singularitarisme implique que les robots aient la capacité de s'autoréparer, mais également de s'auto-améliorer continuellement et sans intervention humaine.

Les mouvements anti-technologie

D'autres courants de pensée, à l'inverse, prennent leur distance avec le « tout-technologique ».

Le *néo-luddisme* est globalement défavorable au développement technologique. Il puise ses racines dans le luddisme du XIX^e siècle, un mouvement britannique qui s'était opposé au remplacement des ouvriers par des machines au début de la révolution industrielle, y voyant le risque d'une aliénation de l'homme. Dans nos sociétés modernes, la notion semble avoir évolué. Le néo-luddisme ne s'intéresse pas seulement à la machine sur le lieu de travail, mais aux développements technologiques dans notre vie en général. Aux yeux des néo-luddistes, la technologie régente et domine notre quotidien, ses avancées représentent un péril aussi bien pour l'homme que pour l'environnement. Ils doutent de sa capacité à régler certains maux de la société, à commencer par les problèmes environnementaux. En réaction, ils proposent le retour à une vie plus naturelle et plus simple. Nul doute que l'avènement d'un monde robotisé risque de ne pas être particulièrement bien accueilli par les mouvements néo-luddistes. Un robot porte en lui le germe d'un ensemble de fantasmes : la domination de l'homme par la machine, son remplacement dans nombre de métiers, l'atteinte à sa vie privée... autant de thématiques souvent abordées par les néo-luddistes.

Le *bio-conservatisme* regroupe un ensemble de courants fort divers, tant le terme « conservateur » recouvre des acceptions différentes selon la nationalité, la culture mais aussi la période de l'histoire considérées. Les positions transhumanistes apparaissent à l'opposé des valeurs des bio-conservateurs. Ainsi, le transhumanisme est favorable au génie génétique alors que le courant bio-conservateur a tendance à afficher une position contraire. Néanmoins, il serait réducteur de définir le second par sa seule opposition au premier. Les partisans du bio-conservatisme portent leurs propres valeurs et tendent à protéger le vivant dans son ensemble de l'évolution non naturelle. Ils s'inscrivent dans une vision à long terme de la préservation des ressources et des espèces.

Une approche raisonnée

Il n'existe pas que des mouvements qui prônent le retour à la nature ou au contraire qui cherchent à favoriser l'essor de la technologie pour « enfanter » un post-humain. Certains s'inquiètent des dérives et des dangers potentiels d'une véritable intelligence artificielle, sans pour autant rejeter les avancées technologiques dans leur ensemble. The Future of Life Institute (FLI) s'inscrit dans cette lignée.

Cet organisme a pour mission de « catalyser et soutenir la recherche et les initiatives visant la sauvegarde de la vie et proposant une vision optimiste de l'avenir ».

Le FLI s'interroge notamment sur les conséquences économiques, légales et éthiques liées à l'avènement d'une intelligence artificielle et de l'automatisation d'un nombre croissant de tâches.

Afin d'atteindre ses objectifs, cette organisation à but non lucratif a lancé un appel à projets. L'ensemble des 37 dossiers retenus est tourné vers le développement d'une intelligence artificielle bénéfique et fiable. À titre d'exemple, l'un d'entre eux vise à développer une intelligence artificielle capable d'expliquer ses décisions, un autre propose de travailler sur l'alignement de l'intelligence artificielle sur les valeurs humaines, etc.

En sus de subventionner des projets de recherche concrets, la FLI a mis en ligne une lettre ouverte visant à sensibiliser l'humanité aux risques d'une intelligence artificielle non contrôlée. Avec plus de 5000 signataires, cette initiative a rencontré un accueil particulièrement favorable, notamment au sein des communautés scientifiques et universitaires.

Chapitre 5

Des problèmes éthiques et sociaux

Le grand public considère souvent les robots avec une inquiétude compréhensible, que celle-ci soit due à la crainte, bien présente dans l'imaginaire commun, que les machines cherchent à supprimer l'espèce humaine ou, plus simplement, à leur influence jugée néfaste sur l'emploi. À ces a priori s'ajoutent des interrogations éthiques au sujet du pouvoir de décision grandissant de l'intelligence artificielle. Un risque non négligeable existe de voir cette inquiétude se transformer en angoisse, face à des machines qui décident pour nous, jugent du bien et du mal et, qui plus est, nous prennent notre travail.

Comme on l'a vu, malgré leur puissance de calcul et leurs capacités déductives, les robots ne seront jamais que des exécutants des ordres que nous leur donnons (voir chapitre 2). Donc en forçant le trait, si personne ne commande aux robots de conquérir la Terre et de détruire l'humanité, il n'y a aucun risque que cela arrive. En outre, ils sont toujours, et pour un moment encore, un peu perdus dans notre monde qu'ils perçoivent mal et avec lequel ils rencontrent des difficultés à interagir. En revanche, les interrogations sur leur place dans notre société, les missions que nous leur confions, les responsabilités que nous leur déléguons méritent davantage de réflexions. Doivent en effet être distinguées les questions posées spécifiquement aux

roboticiens, celles qui concernent plus généralement tous les acteurs des nouvelles technologies mais aussi celles relevant de choix de société. Sur ces sujets, les roboticiens sont assurément des acteurs et des facilitateurs mais ne doivent pas être des décideurs.

Dans ce chapitre, examinons donc les principaux *a priori* (pas nécessairement dénués de fondement) qui accompagnent l'idée des robots. Bien souvent, ils sont plus largement liés aux technologies numériques qui nous accompagnent aujourd'hui. Le robot, chargé de son imaginaire dramatique, ne fait que les révéler de façon plus visible.

Le robot et le travail

Comme expliqué précédemment, le mot *robot* lui-même est lié au travail, puisqu'il désigne à l'origine une créature fictionnelle destinée à accomplir le travail des hommes. Il s'agissait plutôt de soulager les êtres humains de la charge d'une activité pénible que de les envoyer pointer au chômage. Les premiers « vrais » robots de Joseph Engelberger travaillaient bel et bien à la chaîne pour remplacer des ouvriers sur des postes répétitifs, fastidieux, sans grand besoin d'expertise et pouvant mettre en danger la santé des personnes. Dans les années 1960, la reconversion des ouvriers ainsi « remplacés » par les robots ne posait pas trop de difficultés. L'introduction des premiers robots n'a ainsi pas correspondu dans l'histoire industrielle à une

explosion du chômage. Il n'est toutefois pas contestable, même par le roboticien le plus malhonnête intellectuellement, que les robots ont pris, prennent et prendront des postes de travail jusque-là occupés par des êtres de chair et d'os.

En période de plein-emploi, l'introduction du robot a eu peu d'effet sur le marché du travail. L'ouvrier quitte alors son poste à la chaîne pour un autre type de tâche, probablement à la chaîne aussi mais qui n'est pas encore robotisable. Cela signifie sans doute qu'elle est un peu plus compliquée et nécessite une expertise dont le robot n'est pas encore capable. Celui-ci pousserait donc les travailleurs vers des métiers de plus en plus intéressants ? C'est un des aspects potentiellement positifs de la robotisation. Mais il connaît une double limite : des métiers plus intéressants doivent être disponibles (ce qui n'est plus le cas dans les périodes de chômage important que nous traversons) et tous les ouvriers concernés doivent avoir les moyens de gagner en compétence pour accéder à ces postes plus complexes. Certes, il pourrait arriver qu'une certaine proportion de travailleurs ne puisse pas réaliser des tâches plus compliquées que celles remplies par les robots. Mais elle devrait demeurer assez réduite (au moins pour quelques années encore). La société devra s'organiser pour orienter sa population active vers des carrières où la dimension humaine primera sur l'expertise technique.

Pas de robots japonais à Fukushima

En 1986, lors de l'accident de la centrale de Tchernobyl, l'industrie nucléaire a pris conscience de son dénuement en termes d'outils d'intervention dans de telles situations de crise. En France, le Commissariat à l'énergie atomique, EDF et Areva (acteurs majeurs du nucléaire) ont mis en place un programme de recherche pour disposer de robots capables d'évoluer dans un environnement hautement radioactif. Dans le même temps, le Japon lançait son programme de recherche sur la robotique personnelle, notamment humanoïde, pour faire face au vieillissement de sa population et mettre en place une industrie robotique de service, jugée plus prioritaire. Voilà pourquoi, en 2011, lors de l'accident de Fukushima, le Japon se trouva fort dépourvu. Et le monde entier découvrit avec surprise que le pays considéré comme le leader mondial de la robotique n'avait pas de robots en mesure d'intervenir dans ses centrales nucléaires. La France proposa bien sûr ses services mais, finalement, ce sont des robots américains qui ont été envoyés sur les lieux.

Si les premiers emplois occupés par les robots n'ont pas provoqué de levée de bouclier, c'est également parce qu'il s'agissait de fonctions à forte pénibilité et à faible valeur ajoutée. En peignant des voitures, les ouvriers étaient exposés à des émanations de solvants peu appréciés de leurs alvéoles pulmonaires.

Dans certains domaines, cet aspect devient prépondérant et personne ne remettrait en cause l'utilisation de robots : l'intervention en milieu hostile (comme après un accident nucléaire de type Fukushima), le déminage, l'exploration spatiale ou sous-marine. Ces marchés de niche créent beaucoup plus d'emplois qu'ils n'en suppriment.

Avec un taux de chômage important dans les milieux ouvriers, la poursuite de la robotisation de l'industrie a-t-elle encore un sens ? Il serait tentant de répondre par la négative. Mais la mondialisation et l'important différentiel entre les salaires selon les régions du monde conduisent les pays occidentaux à privilégier une compétition sur l'intelligence, en utilisant des robots pour les tâches simples et en complexifiant celles des opérateurs, plutôt qu'une compétition sur les salaires, perdue d'avance. En robotisant les usines, on crée un besoin en personnel à plus forte valeur ajoutée pour programmer et entretenir le parc de robots. Si la France est toujours à la traîne en matière d'équipement robotique (peut-être à cause des craintes évoquées plus haut), des États comme l'Allemagne et l'Italie ont massivement investi dans le domaine. Et ce ne sont pas les pays où le taux de chômage est le plus élevé. La corrélation entre robotisation et taux de chômage n'est en fait pas celle qu'on croit. Ce n'est pas là où les robots sont les plus nombreux que le chômage est le plus élevé.

Pour autant, il ne faut pas tirer de conclusions hâtives dans l'autre sens : il est possible qu'aucun rapport de cause à effet n'existe entre les taux de robotisation et de chômage. Ce sont plus probablement deux conséquences parallèles d'une même cause : une économie plutôt dynamique permet à la fois d'investir dans la robotique et de limiter le chômage.

Une autre limitation au développement de la robotique dans les entreprises peut être la complexité de la programmation d'un robot. Si une tâche est compliquée et ne concerne pas d'énormes séries, il est parfois plus rapide et économique de conserver une main-d'œuvre humaine que d'installer un robot qu'il faut reprogrammer dès que la pièce à fabriquer change. C'est pour améliorer la capacité d'adaptation des robots industriels à des situations inédites que de nouveaux usages sont apparus. Les robots manipulateurs disposent de capteurs qui leur permettent d'intégrer les variations du travail à réaliser mais également la présence humaine. L'homme et le robot commencent à coopérer et à réaliser des tâches en commun. Le robot exécute les gestes qui demandent de la force et de la vitesse (il ramasse sur le tapis roulant le sous-ensemble venant du poste précédent) et l'homme apporte la finesse ou l'adaptabilité nécessaire pour monter un élément sur ce sous-ensemble. C'est la robotique coopérative, la « cobotique ». Quand le robot industriel collabore

aussi étroitement avec l'homme, la frontière entre robotique de service et robotique industrielle devient plus floue. Dans les champs de recherche, on constate d'ailleurs des rapprochements très nets entre des problématiques couvertes autrefois par deux communautés de chercheurs distinctes : les uns concentrés sur la vitesse et la précision du geste de leur robot, les autres sur l'interaction homme-machine. À l'usine aussi, l'homme et le robot vont être amenés à passer de plus en plus de temps ensemble.

En conclusion, il est bon de rappeler que la robotisation n'est qu'un aspect finalement assez minoritaire de l'automatisation des tâches. Le numérique et l'informatisation ont fait disparaître les poinçonneurs de tickets de métro, les sténodactylos. Ils commencent à réduire le nombre de caissières dans les grandes surfaces. Toutes ces évolutions ont certes un effet sur l'emploi de certaines catégories de personnel. On peut y voir la marque d'une société mue par l'appât du gain au détriment de l'humain, mais il faut reconnaître qu'en tant qu'usagers, nous y trouvons aussi notre compte.

Le robot, fossoyeur des relations sociales ?

Ce remplacement des relations homme-homme par des relations homme-robot ne manque pas d'inquiéter la société. Que ce soit par humanisme (l'interaction avec un être humain est plus riche que celle avec

une machine) ou pour des raisons très pratiques (la machine ne comprend pas ce que je veux, elle ne me propose pas de choix adapté à ma situation, je dois parler à un être humain !!), la perspective de ne plus communiquer qu'avec des machines n'est pas des plus réjouissantes, même pour un roboticien. Et si on se projette dans le futur, où un robot prendrait soin des personnes âgées en situation de perte d'autonomie, le point devient encore plus sensible. Si le robot est aussi efficace que nous le promettent les roboticiens, nos aînés, qui souffrent déjà souvent de solitude, pourraient ne plus avoir d'interaction qu'avec leur robot. Ils ne verraient plus la femme de ménage qui passe deux ou trois fois par semaine, l'auxiliaire de vie qui vient apporter à manger ou aider à faire la toilette, les enfants et les petits-enfants qui viennent distraire les grands-parents, puisque le robot est un coach interactionnel infatigable.

Tout d'abord, le lecteur a bien compris qu'un tel niveau de fonctionnalité n'est pas encore opérationnel. Mais il est vraisemblable que les robots finiront par l'atteindre. D'ici là, nous allons devoir apprendre à les utiliser de la bonne manière. Ils ne seront jamais que ce que nous voulons qu'ils soient. Décrire un risque potentiel, la déshumanisation des relations, c'est déjà en prendre conscience et être en mesure de l'éviter. Le robot ne porte donc pas en lui la malédiction de l'isolement social.

Il convient aussi d'envisager avec humilité l'évolution des interactions sociales des générations futures. Lorsque nos enfants jouaient des heures, seuls, sur leur console de jeux ou leur ordinateur, nous redoutions qu'ils deviennent des êtres désocialisés n'interagissant plus qu'avec leur machine. Ils ont aujourd'hui beau jeu de nous dire que, grâce aux réseaux sociaux et aux jeux en réseau, ils sont bien plus en relation avec le monde que nous, perdus dans nos livres en papier pendant des heures sans parler à personne.

Les premières expériences menées tendent à modifier notre vision de l'influence du robot sur nos relations sociales. Dans des maisons de retraite où un petit robot est utilisé dans une salle commune pour donner des informations sur le déroulement de la journée, celui-ci est devenu un sujet de conversation, au même titre qu'un animal de compagnie. Au-delà de l'agitation provoquée par la nouveauté, il pourrait également contribuer à mettre en relation les membres de la communauté. Ayant appris d'une personne qu'elle a apprécié le film de la veille à la télévision, il pourrait l'amener à entrer en contact avec un autre pensionnaire qui lui aurait dit la même chose. Une de ses tâches serait de favoriser la communication entre les gens. Dans un autre domaine, celui de l'éducation des enfants autistes, le robot a aussi eu une influence bénéfique sur les relations interhumaines. Humanoïde, il est déjà employé par les éducateurs pour

faire comprendre aux enfants les signes utilisés dans les relations interpersonnelles. Mais au-delà de cette mission première, l'attrait de l'objet technologique auprès d'eux est tel qu'ils en viennent à interagir autour du robot. Deux enfants qui jusque-là s'ignoraient se mettent à coopérer pour l'utiliser.

Il est évidemment trop tôt pour affirmer que le robot est un moyen de régler les problèmes d'isolement, mais ces exemples montrent qu'il n'est pas fatalement destiné à nous éloigner les uns des autres. Les machines peuvent nous aider à faire attention à nous et aux autres. Sur certains systèmes de navigation destinés aux véhicules, la douce voix qui nous demande de prendre la prochaine à droite ou de faire demi-tour dès que possible peut nous dire, après deux heures de route ininterrompues, qu'il est temps de faire une pause. La machine nous recommande de couper le lien homme-machine. Le robot vivant avec une personne âgée pourrait très bien lui signaler qu'elle n'a vu personne depuis trop longtemps et lui suggérer d'appeler ses enfants ou ses petits-enfants. C'est également une lecture possible de la fin du film *Her*. Le protagoniste, amoureux d'une intelligence artificielle, finit par passer tout son temps à lui parler. Après quelque temps, l'intelligence en question lui déclare qu'elle le quitte parce que les humains ne l'intéressent plus et qu'elle a rencontré d'autres intelligences artificielles bien plus passionnantes.

Du point de vue du roboticien, la lecture au premier degré de cette fin est assez décevante car il est incompréhensible qu'une machine programmée pour faire plaisir à son utilisateur prenne seule la décision de désobéir à son ordre unique en « quittant » son patron. Une lecture différente de ce dénouement, peut-être extravagante mais plus satisfaisante pour l'homme de l'art, consisterait à dire que l'intelligence artificielle, jugeant excessif l'attachement de l'homme à son endroit, l'oblige à un sevrage en mimant une rupture. Si le robot est capable de maîtriser le risque d'une relation homme-robot trop exclusive, cela soulève un autre type de question, à l'origine de bien des films de science-fiction : le robot peut-il faire du mal à l'homme (le « quitter ») pour son bien (maintenir ses relations avec le genre humain) ?

Le robot et l'éthique

Avec les notions de bien et de mal, nous abordons le domaine délicat de l'éthique, qui a beaucoup agité ces dernières années la communauté robotique et impose de savoir éviter de nombreux écueils. L'un des risques est de qualifier d'éthique tous les aspects pouvant poser des problèmes non techniques. Le début de ce chapitre avait ainsi notamment pour objectif de traiter séparément les sujets sociaux, afin de ne pas les confondre avec des problématiques éthiques. Toutefois, l'erreur majeure est sans doute

d'attendre que le robot fasse des choix éthiques dont l'homme lui-même n'est pas capable. C'est bien sûr de l'éthique du roboticien dont il faut parler et pas de celle du robot.

Quand le public vient à la rencontre d'un roboticien avec la certitude de le mettre dans l'embarras en évoquant des sujets « éthiques », c'est en général, peu ou prou, toujours le même cas qui est soumis. Une voiture robotisée, sans conducteur donc, se retrouve dans une situation d'urgence et n'a le choix qu'entre deux solutions : écraser un petit garçon qui roule sur le bord du trottoir avec son vélo ou renverser une dame âgée qui a traversé sans faire attention juste devant la voiture. Question « éthique » : qui le robot doit-il éviter, la dame âgée ou le petit garçon ? Certes, cette version dégradée du célèbre problème du trolleybus (voir encadré) apparaît bien délicate. Mais est-ce le robot qui décide ? Non, comme expliqué plus haut, il ne décide rien, il applique des règles qu'un programmeur lui a inculquées. Alors demandons à ce dernier ce qu'il choisit : la personne âgée ou le petit garçon ? La question se pose à un être humain, et non à une machine. Comment trancher ? Que ferait un excellent conducteur confronté à une telle alternative ? Quoi qu'il fasse, on le lui reprochera certainement. D'où la tentation de nous délester des questions insolubles (pour éviter de qualifier la présente question d'« éthique ») sur des machines, quitte

à leur reprocher ensuite (à elles ou à leur concepteur) des décisions que nous ne pourrions nous-mêmes sans doute jamais prendre.

D'un point de vue technique, comment traiter une situation semblable ? Il est envisageable que, pour prendre sa décision, le robot cherche à optimiser les critères qui lui ont été donnés. Ceux-ci doivent être les plus objectifs possibles. Par exemple, par ordre de priorité décroissante : éviter les piétons, minimiser les blessures sur les occupants de la voiture, endommager le moins possible l'environnement, sauvegarder le véhicule. En codant cet ordre de priorité, le concepteur du système de pilotage affiche ses valeurs : les victimes extérieures à la voiture sont plus importantes que ses occupants, qui passent avant les dégâts matériels collatéraux, qui l'emportent sur la voiture elle-même. C'est à peu près ce que les lois d'Asimov voulaient exprimer. Mais un constructeur automobile pourrait très bien estimer qu'il est avant tout responsable des passagers de son véhicule, et non des individus à l'extérieur. Il donnerait alors la priorité à la minimisation des dégâts pour les premiers. Si ces règles de priorité sont diffusées par le fabricant du système de pilotage, le propriétaire devra assumer les choix effectués par le véhicule. D'une certaine manière, la « décision » du robot sera beaucoup plus « maîtrisée » que celle d'un conducteur humain et de son inconscient. Reste à savoir si les constructeurs souhaiteront

Le dilemme du trolleybus

Cette petite fable, décrite par Philippa Foot en 1967 et analysée entre autres par Judith Jarvis Thomson en 1976, permet de réfléchir à la qualification de nos actions comme relevant du bien ou du mal. Un groupe d'une dizaine d'ouvriers travaillent sur une voie de trolleybus. Un trolleybus arrive à pleine vitesse, les ouvriers ne l'ont pas vu et vont sans doute périr. Par chance, vous avez l'occasion d'activer un aiguillage qui peut envoyer le trolley sur une voie désaffectée. Malheureusement, un ouvrier s'y trouve également et il n'existe aucun moyen de le prévenir. Vous n'hésitez probablement pas trop et activez l'aiguillage. L'accident ne fait qu'une victime au lieu de dix. Vous avez fait ce qui vous semblait le mieux. Mais imaginons une scène légèrement différente. Cette fois, il n'y a plus d'aiguillage mais vous êtes sur un pont, avec un autre passant, et vous voyez que le trolley qui passe en contrebas est sur le point d'écraser les dix ouvriers. Faisant le même raisonnement qu'avec l'aiguillage, selon lequel il vaut mieux un mort que dix, vous assommez le passant à côté de vous et le jetez sur la voie. Le trolley, ralenti par le choc, s'arrête à temps, avant d'écraser les dix ouvriers. De la même façon qu'avec l'aiguillage, vous avez sauvé dix vies en en sacrifiant une. Et pourtant, vous vous sentirez sans doute bien plus coupable, et la justice sera assez probablement de cet avis également...

afficher leurs critères de décision, qui révéleront leur propre positionnement « éthique » : un fabricant osera-t-il dire à un conducteur qu'il protège plus les piétons inconnus que lui qui lui a acheté sa voiture ?

Pour finir sur les aspects techniques de cette question, il est probable que la voiture autonome adaptera toujours sa vitesse aux conditions de circulation et conservera ainsi la capacité de freiner à temps pour ne pas se retrouver dans la situation décrite ci-dessus.

Sans aller jusqu'à ces cas extrêmes, des situations beaucoup plus quotidiennes conduisent à nous poser la question de la place à accorder aux robots dans notre vie. À l'occasion de l'étude des scénarios d'assistance aux personnes âgées, dans le cadre du projet « Romeo2 », nous avons envisagé les risques dont les fonctions du robot pouvaient être porteuses, en termes de choix de vie notamment. Parmi les tâches communément attribuées au robot domestique, figurent celles qui consistent à aller chercher des objets : un verre d'eau dans la cuisine, un médicament dans la salle de bains, la télécommande de la télévision sur le meuble de l'entrée... Si les personnes âgées attendent ce type de service en raison de leurs difficultés à marcher, elles ne veulent pas que les robots les privent des activités dont elles sont encore capables. Dans le film des studios Disney, *WALL-E*, l'humanité, chassée de la terre, vit dans un vaisseau spatial où les robots s'occupent de tout. Les êtres

humains, gros et mous, n'effectuent plus aucun effort physique. Les personnes âgées savent que ce genre de comportement accélérerait la perte de leurs capacités physiques. C'est pour cette raison que des recherches sont menées dans le domaine dit de « la prise de perspective ». Quand une requête est faite au robot, celui-ci vérifie avant d'y accéder que l'homme n'est pas le mieux placé pour effectuer lui-même la tâche demandée.

Dans son environnement quotidien, le robot peut être amené à entrer accidentellement en contact avec des objets ou la personne qu'il doit aider. Il est indispensable de pouvoir assurer qu'il ne constituera pas une menace physique (fût-elle involontaire) pour son environnement. Par sa maladresse, il peut causer des dégâts supérieurs aux bénéfiques qu'il pourrait apporter. Ce constat est à l'origine d'innombrables sujets de recherche, portant par exemple sur la gestion de l'équilibre dynamique (permettant au robot marcheur de replacer ses points d'appui quand il est bousculé) ou encore la surveillance de ses efforts articulaires. Dans ce dernier exemple, on cherche à rendre le robot conscient des efforts que chacune de ses articulations doit exercer pour réaliser la tâche qui lui a été confiée. Par exemple, pour soulever une bouteille d'un litre au bout de son bras d'un kilogramme et d'un mètre de long, il sait qu'il aura besoin d'un couple de 10 newtons-mètres, ce qui correspond

à un courant de 1 ampère dans son moteur. S'il a besoin de davantage de courant, il en déduira qu'il exerce un effort plus important que prévu et pourra l'interpréter comme le signe d'une perturbation extérieure, empêchant son bras de se lever normalement. Suspectant une collision, il pourra arrêter son geste et vérifier ce qui le gêne. Il sera ainsi doté d'une espèce de conscience physique, lui permettant d'évaluer si son geste est bien ou mal exécuté (ce qui est beaucoup plus facile à implémenter qu'une conscience morale capable de juger si les conséquences de ce geste sont bonnes ou mauvaises).

Données personnelles.

Un robot discret peut-il être utile ?

Dans les scénarios d'assistance à la personne, les sociétés d'assurance imaginent utiliser le robot comme un moyen de vérifier à distance si l'assuré est en difficulté. Elles pourraient momentanément prendre le contrôle du robot à distance afin d'effectuer une vérification (et ainsi lever le doute) et, le cas échéant, lui faire réaliser un geste simple que ses propres programmes n'auraient pas déclenché (fermer le gaz, ouvrir une fenêtre pour aérer...). Si cette fonction de téléprésence a un intérêt évident, elle suscite également de nombreuses inquiétudes. Que se passerait-il si une personne mal intentionnée piratait un robot et en prenait le contrôle ? Elle pourrait alors avoir accès à

un nombre important d'informations (l'endroit où je cache mon argent liquide et mes bijoux, par exemple), faire ouvrir la porte par le robot à des cambrioleurs qui, sachant le propriétaire absent et où chercher, feraient très tranquillement main basse sur les objets convoités. La protection contre le piratage du robot et l'exploitation abusive des informations qu'il aurait récupérées est donc essentielle. La tâche n'est pas facile, mais elle n'est pas nouvelle. Nos ordinateurs personnels sont déjà soumis à des attaques de virus et autres pirates. Même si les logiciels de protection ont toujours un temps de retard sur les agresseurs, ils progressent à grande vitesse et les fabricants de robots devront absolument bénéficier des dernières innovations. Quant à l'exploitation des données personnelles par des entreprises marchandes, nous y sommes déjà confrontés. Évidemment, nos smartphones et nos ordinateurs nous suivent de moins près que des robots mais ils en savent déjà assez pour que nous prenions nos précautions : ne donner qu'un minimum d'informations, ne pas accepter de cookies espions, refuser (quand nous y pensons) toute exploitation commerciale de nos données... Le grand public a désormais pris conscience de l'importance des données personnelles. S'ils veulent être acceptés dans les foyers du plus grand nombre, les robots à venir devront être en mesure d'apporter des réponses pertinentes à ces questions.

La solution la plus tentante serait de s'assurer que le robot ne transmette aucune information nous concernant en dehors de son réseau local, qu'il ne les conserve que dans sa mémoire propre (du moins, hors situation d'urgence). Cette mesure, qu'on peut juger très conservatrice, a le mérite d'être simple à mettre en œuvre. Si le robot a accès sur son réseau à des ressources de stockage et de calcul, il peut éviter de saturer son disque dur et traiter toutes les données collectées, développant ainsi son apprentissage. Il apprendrait cependant moins vite que s'il pouvait partager son expérience avec celle de tous les autres robots. Comme déjà vu plus haut, c'est désormais la quantité d'informations traitée qui fait germer l'intelligence. Plus le robot aura accès à de l'information, plus il saura s'adapter à de nouvelles situations. Et plus il sera renfermé sur lui-même, moins il sera efficace. Un compromis délicat est donc à trouver entre partage et protection des données pour obtenir un robot discret mais utile. Mais, là encore, la question de l'exploitation des données personnelles n'est pas un problème nouveau posé par la robotique domestique, qui l'exacerbe simplement en le rendant plus concret.

Les robots nous manipulent !

La gestion des émotions des robots humanoïdes soulève probablement des questions plus inédites. Comme expliqué plus haut, il est possible d'apprendre à un robot à reconnaître les émotions de son interlocuteur. Cela lui permet de ne pas réagir « comme un robot », c'est-à-dire sans s'adapter à l'état de l'homme qui lui fait face. Cependant, cette façon de jouer sur les émotions pourrait se rapprocher d'une forme de manipulation. Un programmeur doté de quelques connaissances en psychologie, et ils seront de plus en plus nombreux à y être formés, pourra jouer sur l'état émotionnel d'une personne pour la convaincre de prendre ses médicaments, de ne pas boire un verre de plus ou d'aller se coucher quand il est très tard. Le risque existe mais il dépend de l'homme ; un robot est manipulateur si son programmeur l'est. L'éthique du second se reflète dans le comportement du premier.

Il devient encore plus facile de manipuler l'utilisateur quand le robot est à même d'exprimer des émotions. D'où la remarque de Serge Tisseron, déjà évoquée : en donnant l'impression que le robot a des émotions (puisqu'il en exprime), son programmeur trompe l'interlocuteur et peut encourager la création d'un lien affectif disproportionné entre l'homme et la machine. Mais le psychiatre-psychanalyste reconnaît dans le même temps que l'homme n'a pas besoin que son robot soit doté d'une forme humanoïde

et d'une capacité d'exprimer les émotions pour s'y attacher outre mesure. Il cite notamment l'exemple de démineurs s'attachant tellement à leur robot (une petite base mobile propulsée par des chenilles) qu'ils pourraient hésiter à les envoyer en mission. Si cette tendance existe, pourquoi l'exacerber encore un peu plus en donnant au robot la capacité de singer l'homme ? Ne faudrait-il pas, au contraire, lui laisser un comportement très « robotique », impassible à ce qui survient dans son environnement. Cette attitude est bien illustrée par le robot du film *Terminator*, de James Cameron, où la machine interprétée par Arnold Schwarzenegger, absolument imperméable aux plaisanteries, les ressert avec un sérieux imperturbable. Mais ce comportement a un inconvénient : l'utilisateur risque de ne pas se rendre compte que le robot a compris la situation. Si vous racontez une plaisanterie à votre machine, ce n'est probablement pas pour la faire rire mais pour qu'elle s'en souvienne et la redise à bon escient plus tard. Toutefois si, ayant entendu votre histoire, le robot répond simplement : « d'accord » ou « c'est fini là ? », vous douterez qu'il ait bien compris que ce que vous venez de lui dire est à ranger dans la catégorie « Histoires drôles à ressortir ». En revanche, s'il fait entendre un éclat de rire et se met à applaudir, vous savez immédiatement qu'il a compris. L'être humain attend un certain comportement en réponse au sien, surtout si la forme en face de lui est humanoïde.

Comment éviter ce paradoxe qui conduit le robot à simuler des comportements humains, et donc à entretenir le malentendu sur sa nature profonde, précisément dans le but de rendre plus intuitive l'interaction avec l'homme ? C'est assez difficile. Il ne suffit pas de lui conserver une forme résolument mécanique, éloignée de celle d'un humain. Il devrait en outre avoir son propre système de signaux pour montrer qu'il a compris. Par exemple, un chien remue la queue quand il est content, nous savons l'interpréter même si ce n'est pas notre façon d'exprimer notre joie. Nous avons également appris que, quand un ordinateur remplace le curseur de la souris par un sablier qui tourne, cela signifie qu'il « réfléchit » et que nous devons attendre un peu l'affichage de la solution. En cette période des débuts de la robotique, est-il envisageable d'apprendre à des utilisateurs, *a priori* inquiets quant à leur capacité à utiliser une machine aussi complexe, que les oreilles du robot deviennent rouges lorsqu'il a perçu qu'on était de bonne humeur et vertes s'il a repéré notre tristesse ? Ce serait prendre le risque d'un rejet du robot en général. Les roboticiens devraient plutôt inventer une gestuelle propre au robot, mais intuitivement compréhensible par le plus grand nombre, à l'instar de l'image du sablier tournant. Aucun être humain ne fait tourner un sablier quand il réfléchit, mais tous comprennent cette animation. En attendant l'apparition d'un langage corporel robotique pertinent,

les machines peuvent continuer sans grand risque à mimer les codes de l'être humain. En effet, pour les années à venir, nos robots seront si loin des capacités humaines que leurs petits gestes ou expressions anthropomorphes ne sauraient tromper l'utilisateur. Il est permis de penser qu'après quelques années de cohabitation, ayant mieux intégré leur capacité à percevoir leur environnement, nous n'aurons plus besoin de signes « humains » pour nous confirmer qu'ils ont bien compris. Aujourd'hui, les curseurs d'ordinateur ne se changent plus en sabliers mais en petites bulles qui tournent ou toute autre animation, que nous savons interpréter sans peine. De la même façon, nous nous adapterons aux signes spécifiques des robots lorsque nous les connaissons mieux.

Chapitre 6

Robots et droit

Face à la diffusion croissante des robots dans notre société, le monde du droit est en effervescence. Colloques et tables rondes se succèdent pour discuter de l'utilité ou non de repenser notre système juridique. De son côté, le législateur demeure peu porté sur la prospective juridique, ayant souvent tendance à n'appréhender qu'après coup les phénomènes de société. C'est ainsi qu'a été traité le cas des drones ou des véhicules autonomes. Il n'existe donc à ce jour aucune législation spécifique visant à encadrer globalement les robots. Cela ne signifie pas pour autant qu'il existe un vide juridique béant.

État des lieux, droit commun et responsabilité des robots

Que se passe-t-il si un robot est à l'origine d'un dommage, s'il heurte un véhicule, bouscule une personne ou prend une « initiative » malheureuse ? Dépourvu de personnalité juridique et n'étant pas partie à un contrat, il est certain qu'il ne peut être tenu responsable.

En l'état du droit positif, cette situation relève du régime de responsabilité du fait des produits défectueux. Ce système souple et protecteur de l'utilisateur n'est peut-être pas des plus favorables à l'essor de la robotique. Ce régime de responsabilité est un système

purement légal, codifié aux articles 1386-1 et suivants du Code civil. Grossièrement, il vise à engager la responsabilité du producteur de robots dès lors que ces derniers, ayant causé un dommage, n'offrent pas « la sécurité à laquelle on peut légitimement s'attendre » (art. 1386-4). Ce critère de la « sécurité légitime » offre une grande flexibilité et s'adapte à toutes les futures technologies mais il est, dans le même temps, cause d'une certaine imprévisibilité pour les fabricants.

D'importants progrès ont été accomplis ces dernières années en robotique, mais ces avancées sont toujours en deçà de ce qu'imagine l'utilisateur non averti. Les robots sont des produits suscitant une attente importante, sur lesquels le grand public projette souvent des fantasmes, en décalage avec l'état de la robotique actuelle. Sauf à produire une docte et indigeste documentation accompagnée d'une formation, il est à se demander si la « sécurité légitime » est un critère opportun à retenir.

Dans le cadre de l'actuel régime juridique, on ne s'intéresse nullement à la faute commise par le producteur, celui-ci étant considéré responsable de plein droit. Sauf exception, même si le robot est développé et fabriqué en conformité avec l'ensemble des normes, lois et règlements applicables, la responsabilité du producteur peut être engagée. Ce système semble légitime pour des industries matures mais peut apparaître sévère

pour une activité en devenir, gérant des problématiques jusqu'ici inconnues, tout en travaillant sur des produits et des technologies d'une rare complexité. La spécificité des robots, notamment leur polyvalence et leur capacité d'apprentissage, semble ne pas être prise en compte. Un robot apprenant de son maître et doté d'une autonomie décisionnelle qui commet un dommage doit-il nécessairement engager la responsabilité du producteur ?

À l'avenir des robots spécialisés existeront certainement. Nombre d'entre eux seront très polyvalents et pourront être utilisés pour un nombre infini de tâches, uniquement limité par l'imagination de leur maître, leur résistance mécanique et le cadre juridique qui leur sera appliqué. Dans ce contexte, comment le producteur peut-il être responsable d'usages que lui-même peut ne pas imaginer ? Avait-on envisagé que les drones allaient un jour nous livrer notre courrier ?

Par peur du risque, les producteurs auront-ils tendance à limiter les fonctions et/ou les capacités de leurs robots ? Ce système pourrait-il engendrer une inégalité entre grands groupes, ayant la capacité financière d'assumer ce type de responsabilité, et petits producteurs qui ne pourraient s'y exposer ? Autant de questions que pose la responsabilité du fait des produits défectueux. Un difficile équilibre est donc à trouver entre la protection des intérêts légitimes de

l'utilisateur et ceux du producteur, tout en prenant en compte la singularité des robots.

Le droit applicable actuel tente de couvrir une autre source de litige possible. Le cas d'un robot qui par exemple, aux yeux de son maître, ne remplirait pas correctement sa tâche. Pour ce type de cas, il existe des garanties légales, qui visent à protéger l'acheteur des défauts de la « chose ». Elles lui permettent de se retourner contre le vendeur en cas de vices cachés ou de vente non conforme.

En cas de vice caché, l'acheteur peut alors restituer le robot et en demander remboursement ou alors le conserver et obtenir une réduction du prix. Un robot aspirateur qui ne peut retenir la poussière, un robot d'accueil ne souhaitant pas la bienvenue à un invité, etc. entrent parfaitement dans le champ d'application de cette garantie.

Au regard de la complexité technologique même d'un robot (due au grand nombre de ses composants mécatroniques et logiciels, à son autonomie et à ses interactions avec son environnement), il y a de fortes chances que les acheteurs aient souvent recours à ce type d'action. Une multiplication des procédures pourrait finir par avoir une influence sur le développement de l'industrie robotique, et plus particulièrement sur les robots à grande polyvalence. En effet, le vendeur étant « tenu de la garantie à raison des défauts cachés de la chose vendue qui la rendent

impropre à l'usage auquel on la destine » (art. 1641 du Code civil), le risque qu'il prend augmente en proportion de la diversité des tâches que le robot peut accomplir. *Quid* d'un robot dont la vocation est d'être aussi polyvalent qu'un humain ? Une tâche improprement exécutée par rapport à l'ensemble des services potentiellement rendus le rend-il « impropre à l'usage auquel on le destine » ? Et comment cette notion de vice caché peut-elle trouver à s'appliquer en ce qui concerne la gestion des émotions, dont les robots seront prochainement capables ? Une réaction non attendue, une expression d'émotion jugée inadéquate peuvent-elles être considérées comme un défaut caché du robot, le rendant ainsi impropre à l'usage auquel on le destine ?

Là encore, le risque ne va-t-il pas conduire le professionnel à ne développer que des produits spécialisés ou aux fonctionnalités bridées ? L'utilisateur devrait alors posséder un robot par tâche : un robot aspirateur, un robot d'accueil, un robot de surveillance, etc., plutôt qu'un outil unique accomplissant un nombre quasi illimité de fonctions.

Par ailleurs, la robotique émotionnelle est destinée à faciliter les échanges et les interactions homme-machine mais elle a pour corollaire d'« humaniser » artificiellement le robot. À terme, un robot « imitant » si parfaitement l'homme peut-il se voir appliquer la notion de vice caché ?

La seconde importante garantie légale existante est celle de conformité. Elle s'apprécie au regard des promesses du vendeur professionnel ou de la documentation associée au produit. Un robot commandé en blanc et livré en bleu entre dans le champ de cette garantie. En schématisant, en cas de défaut de conformité, l'acheteur peut choisir entre la réparation et le remplacement du bien qu'il a acquis. Là aussi, il est légitime de se poser la question de l'applicabilité de cette garantie aux robots. À l'exception de quelques cas objectifs (absence d'une fonctionnalité, d'un accessoire...), il est possible qu'elle perde en efficacité à l'avenir. À titre d'exemple, nous pourrions imaginer qu'un robot ne soit pas fourni avec un ensemble de fonctionnalités pré-installées ou téléchargeables mais avec un système d'intelligence artificielle gagnant en compétence par apprentissage. À la manière d'un enfant qui apprend en grandissant, il gagnerait en capacité grâce à ses interactions avec l'utilisateur et le monde extérieur. Dans ce cas, la garantie de conformité n'aurait qu'un champ d'application restreint, limité à la seule mécanique, à l'apparence physique du robot et à sa capacité d'apprentissage. Pour les mêmes raisons que les vices cachés, la garantie de conformité ne semble pas être particulièrement appropriée à la robotique émotionnelle. Un propos décalé, un trait d'humour tombant à plat pourrait-il rendre notre robot non conforme ?

Même bousculé, notre corpus juridique dispose globalement aujourd'hui de la flexibilité suffisante pour encadrer les tout premiers pas de la robotique. Mais demain, lorsque les robots posséderont une complète capacité d'apprentissage, une véritable autonomie, une polyvalence et une possibilité d'interaction accrues, une refonte de nos règles sera sans doute nécessaire. Les cas des drones et des voitures autonomes, possédant déjà un cadre juridique spécifique, montrent les prémices de cette évolution, préférable au simple plaquage de règles préexistantes, pensées pour un autre monde. Il est vraisemblable qu'au fur et à mesure des avancées technologiques, d'autres régimes particuliers seront mis en place.

Vers l'apparition de régimes robotiques spécifiques : l'exemple des drones...

Les drones sont les premiers biens évoluant dans l'espace public et jouissant d'une autonomie (pourtant très limitée) à avoir fait l'objet d'un encadrement juridique spécifique. Leur connectivité, leur capacité d'interaction et, à terme, leur autonomie pourraient conduire à les qualifier de robots volants ou de robots aériens. Ainsi, la Commission nationale de l'informatique et des libertés (Cnil) indiquait déjà en 2012 que : « Ces engins sont pilotés à distance, voire dans certains cas effectuent de manière autonome ou robotisée tout ou partie des actions de vol. »

La France a été l'un des premiers pays à fixer un cadre réglementaire aux drones. Deux arrêtés de 2012 définissent les droits et obligations régissant leur usage. L'un détermine les conditions d'insertion d'un drone dans l'espace aérien tandis que l'autre traite de la conception, des conditions et des capacités requises pour utiliser ce type d'appareil. Leur démocratisation et l'évolution des pratiques ont poussé à l'adoption d'une réglementation spécifique, preuve qu'il est parfois nécessaire d'aménager les dispositions de droit commun.

Ce cadre juridique sera sans doute encore amené à évoluer afin de continuer à favoriser l'éclosion contrôlée d'un secteur industriel mais aussi de prendre en considération les nouveaux usages (contrôle des voies ferrées, inspection des cultures, vérification des normes d'urbanisme, visite à distance de bâtiments...). La rencontre de l'aéronautique et de la robotique offre de magnifiques perspectives en matière de sécurité, de prévention des risques, de gestion des ressources mais aussi d'échanges et de transport. Des drones « court, long ou moyen » courrier pourraient à terme transporter des hommes et/ou des marchandises, à l'instar des avions. Autonome, le drone devrait respecter son plan de vol, éviter les obstacles et prendre la meilleure route possible dans le respect des contraintes réglementaires imposées.

... et des voitures-robots

Il est un autre secteur en passe d'être complètement bouleversé par l'irruption soudaine de la robotique, celui de l'industrie automobile. Depuis fort longtemps, voitures et camions y sont conçus en collaborant généreusement avec des robots industriels. Mais ce qui change aujourd'hui, ce n'est pas tant la robotisation de l'outil industriel que celle des véhicules eux-mêmes. Cette évolution actuelle s'accompagne de nombreuses questions, notamment en termes de responsabilité, d'aménagement urbain mais aussi de maîtrise des données personnelles. Les voitures autonomes, déjà évoquées plus haut pour les questions éthiques que pose leur capacité de décision de plus en plus importante, devront trouver également leur place dans un cadre juridique spécifique.

À l'occasion du salon de Detroit en janvier 2015, Chris Urmson, chargé du projet des véhicules autonomes chez Google, déclare que l'objectif est d'avoir des voitures sans chauffeur disponibles sur le marché d'ici cinq ans. Même en envisageant un peu de retard, ces véhicules robotisés sont donc sur le point de faire partie de notre quotidien, de transformer nos habitudes et de bousculer les *business models* en place.

Certains prototypes sont déjà en phase de test. Il en va ainsi de la mini-voiture anglaise Lutz Pathfinder élaborée par RDM, des camions autonomes Freightliner Inspiration de l'Allemand Daimler ou encore de

la C4 Picasso revisitée de PSA. De nombreux États américains ont déjà anticipé l'arrivée de ces véhicules et adopté une législation spécifique, à commencer par le Nevada, pionnier en la matière depuis 2011. D'ici fin 2016, ils devraient être probablement rejoints par une quinzaine d'autres États ayant déjà enclenché un processus de révision législatif.

En France, le gouvernement a dévoilé le projet « Nouvelle France industrielle », qui vise à réindustrialiser le pays et prévoit l'arrivée des véhicules à pilotage automatique d'ici 2020. Dans ce cadre, une loi « relative à la transition énergétique pour la croissance verte » a été promulguée le 17 août 2015. Celle-ci indique que « le gouvernement est autorisé à prendre par ordonnance toute mesure [...] afin de permettre la circulation sur la voie publique de véhicules à délégation partielle ou totale de conduite [...] à des fins expérimentales ».

Cette loi ouvre la voie aux voitures intelligentes. Ces véhicules nous obligent, dès maintenant, à nous interroger sur un ensemble de problématiques qui valent également pour la plupart des robots. En voici quelques exemples, partiellement évoqués au chapitre précédent sous leurs aspects éthiques, mais qui ont également des implications juridiques.

Que se passe-t-il en cas de piratage ou d'infection par un virus ? Si ce risque existe également sur nos ordinateurs, il prend une dimension supplémentaire avec

les robots et particulièrement les voitures robotisées, notamment du fait de l'importance des dommages pouvant être causés. Sur le modèle de l'assurance responsabilité civile ou du passage au contrôle technique, le propriétaire pourrait être astreint à souscrire un abonnement à un logiciel anti-piratage permettant de mettre le véhicule à niveau contre les dernières menaces connues, ce qui ferait émerger de nouveaux métiers et tout un écosystème de services (détection des vulnérabilités, prévention des risques, traçage...).

Plus la voiture-robot gagnera en autonomie décisionnelle, plus son logiciel devra arbitrer des situations complexes. Une solution est de faire confiance aux choix programmés par le concepteur de l'intelligence artificielle mais une autre serait de dire que l'homme doit toujours maîtriser son véhicule et être capable d'en reprendre le contrôle. La confirmation vocale, gestuelle ou manuelle d'une action (dépassement, changement de voie) avant que le véhicule l'exécute peut être une des pistes possibles. La confirmation de l'action par le conducteur évacue en partie un problème éthique majeur. Ce n'est plus au concepteur de faire des choix (heurter une personne ou un véhicule plutôt qu'un autre) mais au conducteur.

Qui sera responsable en cas d'accident ? Si le véhicule est totalement robotisé, il est certain que cela ne peut être le conducteur (par définition, il n'y en a pas). Sa responsabilité pourrait toutefois être engagée en cas

de faute (si le véhicule a été modifié, si une mise à jour n'a pas été effectuée...).

Dans le cas où le véhicule autonome conserve la présence d'un conducteur, l'un des moyens de responsabiliser ce dernier pourrait donc être de lui faire confirmer les actions du véhicule. Aujourd'hui, l'ABS fait de son mieux pour éviter une perte de contrôle du véhicule mais ne peut, sauf erreur de conception, être tenu responsable si une collision a lieu. Si le véhicule autonome propose de dépasser au moment où une autre voiture arrive par l'arrière mais que le conducteur confirme l'action, alors c'est ce dernier qui endosse la responsabilité de l'accident. Cette responsabilisation par confirmation préalable peut bien évidemment être étendue à l'ensemble des objets robotisés.

La responsabilité potentielle du conducteur ne devrait cependant pas exonérer les autres acteurs, notamment en cas de défectuosité du véhicule. Faut-il alors se tourner vers le concepteur des capteurs, celui de la partie mécanique ou celui de la « technologie d'autonomie », pour reprendre la terminologie de la loi du Nevada ? Les premières lois américaines en la matière semblent considérer que la responsabilité doit échoir au concepteur de la « technologie d'autonomie », sauf si le dommage résulte clairement d'un défaut de la partie mécanique ou électronique du véhicule.

Surgit alors une autre problématique juridique. Les algorithmes de décision implémentés dans le calculateur pilotant la voiture relèveront-ils de règles fixées par le législateur ou dépendront-ils uniquement des choix du concepteur ? D'un côté, une intervention législative reviendrait à codifier et à figer la morale. De l'autre, comme cela a été évoqué plus tôt, le développeur et/ou le concepteur auraient seuls le soin de faire des choix, en fonction de leurs propres valeurs.

Une importante notice d'utilisation détaillant les choix préprogrammés serait nécessaire mais sans doute insuffisante pour éclairer le profane. Il serait raisonnable que la voiture, quand elle en a le temps, explique les choix qu'elle va faire et en demande à l'utilisateur la validation préalable. Le mieux serait que le conducteur contribue *a priori* à la prise de décision par l'apprentissage de l'intelligence artificielle et le paramétrage du calculateur.

Le jour où les systèmes de pilotage automatique seront plus sûrs que les conducteurs humains, il sera opportun de s'interroger sur le maintien de l'autorisation de circuler des véhicules « classiques ». Dès aujourd'hui, dans le transport aérien, force est de constater que la très grande majorité des accidents est due à des erreurs humaines, et non à un défaut du pilotage automatique. Du fait des risques supplémentaires qu'ils feraient prendre à la société, les conducteurs, qui souhaiteraient continuer à piloter eux-mêmes leur

voiture, pourraient être obligés de payer une assurance plus onéreuse ou de ne circuler que sur certains axes (routes spécialement sécurisées, non prioritaires, avec des limitations de vitesse abaissées...).

Un véhicule robotisé libère du temps pour l'homme : ses passagers pourraient consommer une multitude de nouveaux services (musique, film, leçon en ligne...), qui représentent un gisement de données commerciales inestimable. Comme dans le cas du robot domestique, le respect de la vie privée et la confidentialité des données collectées devraient être assurés. Le traitement et l'exploitation des données nominatives constituent à coup sûr un des grands enjeux juridico-commerciaux que la robotique devra relever.

Continuité de service et indépendance nationale comptent également parmi les questions centrales. Lorsque le système de pilotage automatique des voitures jouera un rôle primordial dans la mobilité des biens et des personnes, sa mise en défaut prendra des dimensions systémiques. Si les serveurs de données sur lesquels il repose venaient à s'arrêter ou si la société à l'origine de sa conception ou de sa commercialisation décidait d'interrompre son fonctionnement, des populations entières et de larges pans de l'économie s'en trouveraient affectés. Pour l'éviter, un système de sauvegarde et d'accès documenté aux sources des logiciels pourrait être imposé aux concepteurs.

Parallèlement, un organisme indépendant chargé de la protection et de la gestion de ces sources pourrait être créé afin d'assurer une continuité de service.

Hier les drones, aujourd'hui les véhicules autonomes... Tous ont, du fait de leurs particularités et des usages envisagés, poussé notre système juridique à s'adapter. Mais une nouvelle norme doit-elle être adoptée pour chaque nouveau produit robotique, au risque de faire rapidement ressembler notre législation à un *patchwork* de réglementations techniques ? Ne serait-il pas opportun d'embrasser la robotique dans son ensemble et d'en proposer une approche globale afin d'éviter de remettre l'ouvrage sur le métier législatif à chaque apparition d'un nouveau robot ?

Un modèle juridique global reste à inventer

Il semble en effet essentiel d'appréhender la robotique en ce qu'elle a de singulier (interactivité, apprentissage, polyvalence et autonomie). L'enjeu est de préserver le caractère universel de la loi tout en favorisant l'éclosion d'un monde robotisé dans un espace juridiquement sécurisé. On l'a vu, l'une des principales questions posées est celle de la détermination de la responsabilité en cas de dommages causés par un robot. Avant d'envisager un régime de responsabilité spécifique, il peut être intéressant d'évoquer les possibilités que pourrait aujourd'hui offrir le Code civil. Celui-ci prévoit ainsi un régime de responsabilité du fait des animaux.

Rapprocher robots et animaux peut sembler assez étrange : qu'ont de commun avec des machines des êtres vivants et sensibles, aux comportements non programmés ? La comparaison n'est toutefois pas dénuée de fondement d'un point de vue juridique. Schématiquement, le régime de responsabilité du fait des animaux stipule que l'homme est responsable de plein droit des dommages commis par l'animal dont il a la garde ou la propriété. Le « maître » d'un robot pourrait lui aussi être considéré comme responsable des dommages causés par le robot qu'il a « sous sa garde ». Ce système instaure une présomption de responsabilité à l'encontre du gardien. Si votre chien mord un passant, même sans avoir commis de faute, vous aurez à en répondre. De la même manière, si votre robot bouscule quelqu'un, vous serez également présumé responsable.

Ce système est cependant imparfait dans le cas des robots car il n'envisage pas une éventuelle responsabilité du concepteur. Si c'est un *bug* qui provoque le mauvais comportement de la machine, c'est bien le créateur du logiciel qui devrait être responsable.

La responsabilité du fait d'autrui est un autre système proposé par le Code civil. Elle couvre les cas où un individu est déclaré responsable des actes dommageables commis par un tiers : c'est notamment le cas des parents du fait de leur enfant et des maîtres du fait de leurs domestiques. Pourquoi pas du fait

d'un robot ? Mais là encore, la transposition semble impossible, puisqu'elle exclut la possibilité d'une faute du producteur. De plus, dans le premier cas, les concepts d'« autorité parentale », de « père » et de « mère » ne pourraient être appliqués. Dans le second cas, si les notions de maître et de subordination sont séduisantes, le système reviendrait à considérer qu'une faute peut être commise par le robot. Or s'il peut causer un dommage, il est beaucoup plus spécieux de penser qu'il puisse commettre une faute, à moins de lui reconnaître une personnalité juridique, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

Reste alors le régime de responsabilité du fait des choses. Il ne s'applique que de façon résiduelle par rapport au régime de responsabilité du fait des produits défectueux, déjà évoqué. Schématiquement, dans ce système, si un dommage est causé, le responsable présumé est le gardien du robot. La responsabilité du producteur peut être mise en jeu toutes les fois qu'il existe un vice de fabrication par exemple. Le propriétaire, dans l'hypothèse où il est différent du gardien, peut voir sa responsabilité engagée s'il n'a pas correctement entretenu le robot, s'il n'a pas procédé aux mises à jour nécessaires ou, pourquoi pas, si l'apprentissage fourni au robot est à l'origine du dommage.

Il est intéressant de noter que la responsabilité du fait des choses peut appréhender certaines caractéristiques propres des robots comme leur polyvalence, leur capacité d'apprentissage et d'interaction. En revanche, l'autonomie décisionnelle semble davantage poser problème. Si le robot agit de façon autonome, qui est son gardien ? Le concepteur de son intelligence artificielle ? Le propriétaire qui a réalisé son apprentissage ?

Face à la difficulté de trouver un système « clés en main » au sein des dispositifs existants, ne serait-il pas préférable d'en concevoir un « sur mesure », qui envisagerait les robots dans toutes leurs dimensions potentielles (capacité d'apprentissage, autonomie décisionnelle...) ? Mettre en place une responsabilité en cascade, instituer un système d'assurance ou encore reconnaître une personnalité juridique aux robots sont des pistes innovantes à explorer.

En quoi consiste la responsabilité en cascade ? Il s'agit d'une construction juridique selon laquelle certaines catégories de personnes sont responsables de certains actes avant certaines autres. Comment pourrait-elle être appliquée au secteur de la robotique ? Le premier responsable en cas de dommages causés par un robot pourrait être l'utilisateur (le gardien) et/ou le propriétaire, « maître » de la machine qui agit sous ses ordres, sa direction, son contrôle et qui apprend de lui. Le producteur ne doit pas pour autant

être exonéré de toute responsabilité. Une erreur de programmation ou un vice de fabrication doivent nécessairement lui incomber.

Ce dispositif permettrait de rééquilibrer la responsabilité du producteur en tenant compte des spécificités du robot. Mais il ne s'agirait que d'un simple correctif, et non d'un système conçu pour coller au plus près de la réalité robotique. L'intelligence artificielle et l'autonomie décisionnelle du robot n'y sont ainsi pas prises en considération.

Des robots assurés

Une autre piste s'intéresse à l'adoption d'une approche « assurantielle », qui pourrait se décliner en deux niveaux. D'abord, au moment de l'acte d'achat, une assurance destinée à couvrir certains risques liés aux robots pourrait être proposée. Celle-ci reste à imaginer plus finement mais la très classique assurance en responsabilité civile (dite « au tiers ») couvrirait tous les dommages corporels et matériels causés à des tiers par des robots, lorsque le propriétaire n'est pas responsable. Elle ne pourrait donc couvrir l'assuré en cas d'acte volontaire ou lorsque sa responsabilité pénale serait engagée. Une assurance plus complète pourrait aussi être envisagée. Cette assurance dite « tous risques » garantirait, en plus de ce qui précède, des cas qui sont normalement exclus de la couverture classique de l'assurance au

tiers : les dommages corporels causés par les robots aux humains ainsi que les dommages causés au robot lui-même pourraient entrer dans son champ.

Un second niveau d'assurance viserait à couvrir les risques systémiques (liquidation de la société assurant le service, piratage...). Dans ce cadre, à l'instar de ce qui se fait en cas de catastrophes naturelles ou de procédure collective (pour garantir le versement des salaires), un fonds pourrait être créé. Il pourrait être alimenté, entre autres, par les producteurs et les acheteurs au moment de la vente et/ou ultérieurement par souscription régulière. Les charges et les risques éventuels seraient ainsi répartis sur la collectivité.

Mais cette approche assurantielle peut susciter quelques interrogations éthiques à son tour. S'il est compréhensible que la collectivité assume de façon solidaire des dégâts résultant d'une catastrophe naturelle qui *a priori* ne sont pas la conséquence d'une faute humaine, est-il normal qu'elle assume les dommages d'une machine créée, programmée et utilisée par des hommes ? Ne serait-ce pas une façon, dans certains cas, de soulager les acteurs de la chaîne robotique de leur responsabilité et de laisser entendre qu'aucun être humain n'est plus responsable des agissements des robots ? Cependant, c'est également un moyen d'indemniser au plus vite les victimes, en attendant qu'une enquête évalue si les dommages sont le résultat d'un mauvais fonctionnement du

robot, de sa mauvaise programmation ou de sa mauvaise utilisation.

Les robots, personnes morales ?

Une autre approche, totalement novatrice, consisterait à attribuer une personnalité juridique aux robots. À l'origine, le Code civil ne reconnaissait pas de personnalité juridique aux entreprises ou aux associations. La création de la notion de « personne morale », dotée de droits mais aussi d'obligations, fut une importante avancée. Elle permet qu'une société puisse être citée en justice, disposer d'un patrimoine ou encore indemniser les victimes des dommages causés par son activité.

Aujourd'hui, cette construction juridique est parfaitement entrée dans les mœurs. Cette acceptation vient notamment du fait que, contrairement aux robots, la personne morale est une entité particulièrement éloignée de l'homme. C'est une entité qui, pour exister, a besoin de manière directe ou indirecte d'un homme ou d'une communauté d'hommes. Mais il n'est cependant pas certain que cette acceptabilité soit la même pour les robots, auxquels il est malaisé de reconnaître les mêmes droits qu'aux hommes. On pourrait toutefois arguer que les sociétés jouissent d'une personnalité juridique sans être considérées pour autant comme les égales de l'homme ou que cela ne retire quelque chose à ce dernier. Au demeurant, on peut simplement envisager une personnalité

juridique diminuée avec des droits plus restreints, excluant notamment la capacité d'ester en justice (c'est-à-dire d'exercer un recours devant le tribunal). La personnalité juridique des robots n'est jamais qu'une fiction, une construction du droit qui ne vise nullement à les mettre sur le même plan que les hommes ou même que les animaux. En Nouvelle-Zélande, un fleuve (le Whanganui) s'est vu reconnaître certains droits et un statut juridique particulier.

Alors, doit-on sauter le pas ? Un nombre croissant de grands noms du droit des nouvelles technologies, à l'instar d'Alain Bensoussan, avocat à la cour d'appel de Paris, y est favorable. La personnalité juridique agit comme un concentrateur de responsabilité. Elle permet, en tenant compte des spécificités des robots, de surmonter certaines difficultés notamment en matière de responsabilité et d'indemnisation des victimes.

Chaque robot se verrait alors attribuer une identification et un patrimoine propre. Celui-ci pourrait être constitué par le (ou les) propriétaire(s) du robot au moment de l'achat et/ou par versements successifs. La victime pourrait être aisément indemnisée même s'il est à craindre que dans certains cas le patrimoine capitalisé ne suffise pas à couvrir le dommage.

Une intelligence artificielle responsable ?

Une approche voisine mais alternative de la précédente consisterait à accorder une personnalité juridique non plus au robot dans son ensemble mais à son intelligence artificielle (IA). Cela présuppose que l'IA puisse migrer d'un « corps » robotique à un autre. Certaines sociétés travaillent au développement de systèmes d'exploitation ou d'intelligence artificielle qui pourraient s'adapter à de nombreux robots. La partie physique ne serait qu'un véhicule, un contenant, destiné à recevoir pour un temps donné un système logique.

Quand la mécanique du robot commencera à vieillir, il sera possible de transférer tout ce qu'il aura appris dans un corps plus récent. Les qualités et les éventuels défauts acquis par apprentissage seront également transmis. La personnalité juridique serait liée à cette IA, et non plus au corps du robot. Cette approche permettrait d'appréhender le cas du développement annoncé des assistants vocaux mais aussi celui des « essaims de robots », ces ensembles de machines agissant et réagissant de concert en vue de la réalisation d'un même objectif, et animés par une intelligence artificielle unique. Il semblerait justifié ici de reconnaître la personnalité juridique non à chaque objet mécatronique mais à l'IA qui les lie. Distinguer juridiquement l'aspect physique et logique du robot offrirait en outre un autre avantage en matière de

responsabilité, chaque partie pouvant être soumise à un régime différent (classique pour la première, plus innovante pour la seconde, par exemple).

La trinité responsable en robotique, la solution ?

Si nous devons faire la synthèse de tous les régimes possibles, nous trouverions trois acteurs en présence : le(s) producteur(s) de la partie physique du robot, l'utilisateur et le concepteur de l'intelligence artificielle. Sans instaurer une solidarité juridique entre eux, chacun devrait éventuellement supporter une part de responsabilité selon les circonstances dans lesquelles est survenu le dommage.

Puisque d'un côté, l'IA est à l'origine de l'autonomie décisionnelle, de la polyvalence et d'une partie des capacités d'interaction du robot et que, de l'autre, l'utilisateur peut être impliqué dans son apprentissage, une approche différenciée pourrait être opportune. Le producteur à l'origine de l'aspect physique et de la mécatronique du robot resterait responsable en cas de défectuosité liée par exemple à la fabrication d'un capteur, d'une batterie, etc. Le rôle de l'utilisateur du robot apparaît comme évident et ne nécessite pas d'amples développements : il doit être responsable des ordres donnés au robot mais aussi des briques de connaissances qu'il a pu lui apprendre et qui pourraient être à l'origine de certains propos ou actions. Les choses sont toutefois plus complexes

pour ce qui relève de l'IA, qu'aucune loi n'encadre aujourd'hui spécifiquement. Tout est à construire. On pourrait ainsi imaginer, à l'instar de ce qui se pratique pour les médicaments, qu'il soit obligatoire qu'une intelligence artificielle subisse une période de tests et d'observations avant d'être introduite sur le marché.

Devant la complexité des systèmes d'IA actuellement en développement, l'auto-adaptation des algorithmes reposant sur le *deep learning* et le nombre quasi infini de situations auxquelles un robot pourra être confronté, il est permis de douter de la capacité du développeur de l'IA à s'engager sur le fonctionnement adéquat de son système en toutes circonstances. Mais, s'il semble difficile de reprocher au concepteur d'avoir oublié un cas particulier d'utilisation susceptible de prendre l'IA en défaut, on pourra, en revanche, lui faire grief de ne pas l'avoir assez testée.

En outre, tout logiciel devrait être capable de retracer le processus de décision qui l'aura conduit à déclencher une action. La loi pourrait imposer une sorte de boîte noire logique analysable *a posteriori*, voire une transparence *a priori* des processus décisionnels implémentés afin de vérifier le respect de certains grands principes (par exemple, celui de neutralité de traitement selon lequel le logiciel ne doit pas prendre en compte des critères religieux, politiques ou de couleur de peau pour faire ses choix). La possibilité d'accéder, de modifier, de maintenir mais aussi de

détruire de l'IA devrait aussi être envisagée. Cette approche qui tend à considérer l'IA comme un bien immatériel différent des logiciels existants pourrait peut-être permettre d'appréhender la spécificité des robots. Bien que novatrice, elle ne nécessiterait pas une refonte complète de notre corpus juridique.

Conclusion

Au terme de ces quelques chapitres, nous espérons que le lecteur comprend mieux ce que sont les robots, les risques mais aussi les promesses dont ils sont porteurs pour l'avenir. Devant nous s'étend un ensemble d'applications et d'usages potentiels. La robotique se trouve aujourd'hui dans la position de l'informatique au cours des années 1980 : la démocratisation s'amorçait mais seuls quelques passionnés arrivaient déjà à se servir des micro-ordinateurs. Les applications imaginées étaient le traitement de texte, le tableur et quelques jeux. Le mail, internet, les réseaux sociaux, les jeux multijoueurs... rien de tout cela n'était même imaginé par ces premiers *geeks*. Nous en sommes probablement à ce stade en ce qui concerne les robots personnels. Grâce aux œuvres de fiction, il est possible d'avoir une idée de ce que doit être leur futur, mais celui-ci pourra être très différent de ce que nous imaginons. Il est en revanche indispensable que la société se prépare à leur arrivée pour leur donner la place qu'elle souhaite.

Devant la complexité des systèmes robotiques, et en particulier devant les capacités vertigineuses d'apprentissage de l'intelligence artificielle, un premier réflexe pourrait être la peur. Pour ne pas reproduire des « erreurs » du passé, une solution de facilité serait d'appliquer le principe de précaution : on ne sait pas comment les robots vont évoluer, il est préférable d'arrêter d'en fabriquer pour éviter des catastrophes. Cette solution est toujours envisageable, même si elle apparaît, bien sûr, plutôt contraire à la démarche scientifique qui a du mal à se satisfaire d'une phrase commençant par « on ne sait pas ». Des cyniques ajouteront que si nous ne fabriquons pas de robots, d'autres, moins scrupuleux, le feront à notre place, nous les vendront et que nous finirons par alimenter leur économie. Il est certain que la peur est rarement bonne conseillère. Mieux vaut observer une approche critique, curieuse et ouverte plutôt que s'enfermer dans ses craintes.

Chaque risque identifié doit pousser à imaginer une solution, mettant chacun de nous – fabricants, vendeurs, acheteurs et utilisateurs de robots – devant nos responsabilités. Nous devons tous maîtriser les robots. Les utilisateurs doivent comprendre comment ils fonctionnent et le système éducatif doit s'en assurer. Les constructeurs doivent faire en sorte qu'ils soient compréhensibles et contrôlables et les juristes contribuer à élaborer un monde sécurisé aux règles claires.

Les robots arrivent après une révolution majeure, celle d'internet, qui a bouleversé la société pour son plus grand bonheur en général mais avec quelques désagréments collatéraux : les virus, le piratage informatique, les escroqueries, l'exploitation des données personnelles, la diffusion d'informations fausses, les *bugs* qui font « tout planter » ... Nous l'avons vu, les robots sont porteurs des mêmes risques, mais avec des conséquences exacerbées en raison notamment de leur capacité d'interaction décuplée. Toutefois, nos outils actuels permettent déjà de nous en protéger. Des anti-virus sont à notre disposition, nous commençons à refuser des logiciels espions qui, sous couvert de nous aider, transmettent nos moindres faits et gestes à des vendeurs peu scrupuleux, la Cnil veille au bon usage de nos données personnelles, nos enfants se mettent à vérifier les informations qu'ils récupèrent sur internet... La technologie progresse à grande vitesse mais les méthodes pour la contrôler aussi. La simulation, les tests, les certifications seront, nous l'espérons, des étapes obligatoires pour la mise sur le marché des systèmes complexes que sont les robots.

Le fait qu'un robot soit empreint des valeurs de l'homme qui l'a fabriqué, programmé ou éduqué, pourrait être perçu comme inquiétant. L'homme n'étant pas toujours un modèle de vertu, tous les robots pourraient ne pas être parfaitement recommandables. Espérer programmer dans les replis du

cerveau robotique des notions de bien et de mal lui permettant de filtrer ce que ses programmeurs lui demandent de faire semble impossible... et serait même humiliant pour l'homme qui, depuis des milliers d'années, essaye désespérément de définir bien et mal, aboutissant à des conclusions très fluctuantes selon les époques et les sociétés considérées. Et si un philosophe y parvenait un jour, il lui faudrait encore très longtemps pour l'expliquer à son robot. Mais nous sommes convaincus que cela ne doit pas arriver et n'arrivera pas. L'homme doit rester responsable de ses actes, c'est ce qui le distingue de toutes les autres créatures, vivantes et artificielles.

Bibliographie et sitothèque

- ▶ **Isaac Asimov,**
« Nous les robots », *Le grand livre des robots*, vol. 1, Paris, Omnibus, 2014 [1^{re} éd. américaine : 1982].
- ▶ **Alain Bensoussan,**
« La personnalité-robot : un nouveau droit », <http://www.alain-bensoussan.com/personnalite-robot-nouveau-droit/2015/02/19>
- ▶ **Georges Bernanos,**
La France contre les robots, Bègles, Le Castor astral, 2015 [1^{re} éd. : 1944].
- ▶ **Emmanuel Grimaud et Denis Vidal,**
« Aux frontières de l'humain. Pour une anthropologie comparée des créatures artificielles », *Gradhiva*, n° 15, 2012, p. 4-25.
- ▶ **Bill Joy,**
« Why the Future Doesn't Need Us », *Wired*, avril 2000.
- ▶ **Judith Jarvis Thomson,**
« Killing, Letting Die, and the Trolley Problem », *The Monist*, vol. 59, n° 2, 1976, p. 204-217.
- ▶ **Serge Tisseron,**
Le jour où mon robot m'aimera. Vers l'empathie artificielle, Paris, Albin Michel, 2015.
- ▶ **État du Nevada, Department of Motor Vehicles,**
<http://www.dmvnv.com/autonomous.htm>
- ▶ **Nouvelle France industrielle :
34 plans de reconquête,**
<http://www.economie.gouv.fr/presentation-nouvelle-france-industrielle>
- ▶ **Extropy Institute,**
<http://www.extropy.org>

- ▶ **The Future of Life Institute,**
<http://futureoflife.org>
- ▶ **Singularity University,**
<http://singularityu.org>
- ▶ **Technoprog,**
une association française transhumaniste,
<http://transhumanistes.com>
- ▶ **World Transhumanist Association**
(Association transhumaniste mondiale),
<http://www.transhumanism.org/index.php/WTA/more/147>

* * *

- ▶ **Code civil,**
disponible sur legifrance.gouv.fr
- ▶ **Arrêté du 11 avril 2012,**
relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord, disponible sur legifrance.gouv.fr
- ▶ **Arrêté du 11 avril 2012,**
relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent, disponible sur legifrance.gouv.fr
- ▶ **Loi du 17 août 2015,**
relative à la transition énergétique pour la croissance verte, disponible sur legifrance.gouv.fr

Collection Doc' en poche

SÉRIE « ENTREZ DANS L'ACTU »

- 1.** Parlons nucléaire en 30 questions (2^e édition septembre 2015)
de Paul Reuss
- 2.** Parlons impôts en 30 questions (2^e édition mars 2013)
de Jean-Marie Monnier
- 3.** Parlons immigration en 30 questions (2^e édition mars 2016)
de François Héran
- 4.** France 2012, les données clés du débat présidentiel
des rédacteurs de la Documentation française
- 5.** Le président de la République en 30 questions
d'Isabelle Flahault et Philippe Tronquoy
- 6.** Parlons sécurité en 30 questions
d'Éric Heimann
- 7.** Parlons mondialisation en 30 questions
d'Eddy Fougier
- 8.** Parlons école en 30 questions
de Georges Felouzis
- 9.** L'Assemblée nationale en 30 questions
de Bernard Accoyer
- 10.** Parlons Europe en 30 questions (2^e édition octobre 2014)
de David Siritzky
- 13.** Parlons dette en 30 questions
de Jean-Marie Monnier
- 14.** Parlons jeunesse en 30 questions
d'Olivier Galland
- 21.** Parlons justice en 30 questions
d'Agnès Martinel et Romain Victor
- 22.** France 2014, les données clés
des rédacteurs de la Documentation française
- 25.** Parlons gaz de schiste en 30 questions
de Pierre-René Bauquis
- 26.** Parlons banque en 30 questions
de Jézabel Coupey-Soubeyran et Christophe Nijdam
- 30.** France 2015, les données clés
des rédacteurs de la Documentation française

- 35.** Parlons prison en 30 questions
de Sarah Dindo
- 40.** Parlons climat en 30 questions
de Christophe Cassou et Valérie Masson-Delmotte
- 42.** France 2016, les données clés
des rédacteurs de la Documentation française

SÉRIE « PLACE AU DÉBAT »

- 11.** Retraites : quelle nouvelle réforme ?
d'Antoine Rémond
- 12.** La France, bonne élève du développement durable ?
de Robin Degron
- 15.** L'industrie française décroche-t-elle ?
de Pierre-Noël Giraud et Thierry Weil
- 16.** Tous en classes moyennes ?
de Serge Bosc
- 23.** Crise ou changement de modèle ?
d'Élie Cohen
- 24.** Réinventer la famille ?
de Stéphanie Gargoulaud et Bénédicte Vassallo
- 27.** Parents-enfants : vers une nouvelle filiation ?
de Claire Neirinck, Martine Gross
- 28.** Vers la fin des librairies ?
de Vincent Chabault
- 31.** Des pays toujours émergents ?
de Pierre Salama
- 32.** La santé pour tous ?
de Dominique Polton
- 38.** Faut-il suivre le modèle allemand ?
de Christophe Blot, Odile Chagny et Sabine Le Bayon
- 39.** Politique culturelle, fin de partie ou nouvelle saison ?
de Françoise Benhamou
- 43.** Revenir au service public ?
de Gilles Jeannot et Olivier Coutard
- 44.** Une justice toujours spécialisée pour les mineurs ?
de Dominique Youf
- 48.** Faut-il attendre la croissance ?
de Florence Jany-Catrice et Dominique Méda
- 50.** La mort est-elle un droit ?
de Véronique Fournier
- 51.** Le robot est-il l'avenir de l'homme ?
de Rodolphe Gelin et Olivier Guilhem

SÉRIE « REGARD D'EXPERT »

- 18.** Les politiques de l'éducation en France
d'Antoine Prost et Lydie Heurdiere
- 19.** La face cachée de Harvard
de Stéphanie Grousset-Charrière
- 20.** La criminalité en France
de Christophe Souleze
- 29.** La guerre au xx^e siècle
*de Stéphane Audoin-Rouzeau, Raphaëlle Branche,
Anne Duménil, Pierre Grosser, Sylvie Thénault*
- 33.** Quelle politique pour la culture? Florilège des débats
sous la direction de Philippe Poirrier
- 34.** Une jeunesse différente?
sous la direction d'Olivier Galland et Bernard Roudet
- 36.** La République territoriale
de Pierre Sadran
- 37.** Les monothéismes d'hier à aujourd'hui
*de Régine Azria, Dominique Borne, Pascal Buresi, Sonia Fellous,
Anna Van den Kerchove*
- 41.** Environnement et inégalités sociales
sous la direction de Floran Augagneur et Jeanne Fagnani
- 45.** Les grands textes internationaux des droits de l'homme
de Emmanuel Decaux et Noémie Bienvenu
- 46.** Regards sur les États-Unis
de Cynthia Ghorra-Gobin, Guillaume Poirret, Jacques Portes, Marie-Jeanne Rossignol
- 47.** Les politiques de la culture en France
de Philippe Poirrier