

LE CORPS COMME VARIABLE EXPÉRIMENTALE

Traditionnellement, les robots, et avant eux les automates, ont toujours eu trois fonctions. Ce sont des machines utiles, capables d'effectuer des tâches répétitives ou dangereuses de manière parfois plus précise ou plus efficace que ne pourraient le faire des hommes dans les mêmes conditions. Ce sont aussi des machines divertissantes, fascinantes et parfois troublantes ou même vexantes du fait de leur ressemblance avec les hommes et les animaux. Enfin, ce sont potentiellement de bons modèles pour comprendre l'homme. Historiquement, ces trois fonctions ont toujours entretenu des liens étroits et entremêlés (Baudrillard, 1978 ; Kaplan, 2005). Dès la première moitié du XVIII^e siècle, Jacques de Vaucanson, tour à tour montreur de foire, ingénieur au service du roi ou scientifique à la recherche des secrets de la vie, propose de construire des « anatomies mouvantes » reproduisant les fonctions vitales de l'être humain (respiration, digestion, circulation sanguine) en utilisant les matériaux les plus innovants de son époque. Il est difficile de distinguer, dans sa production, ce qui relève strictement de la démarche du scientifique et ce qui relève de la recherche de l'ingénieur (Chapuis, Droz, 1949). Plus proche de nous, dans les années 1940, Grey Walter, chercheur en neurophysiologie, reconnu pour son travail sur l'électroencéphalogramme et pour les nombreux progrès que lui et son équipe y apportèrent, était convaincu que de développer de nouveaux systèmes de visualisation et d'analyse était sans doute nécessaire mais non suffisant pour comprendre le cerveau en action. Il construisait des petits robots mobiles pour montrer que, au-delà de l'organisation cérébrale, ce sont aussi les caractéristiques anatomiques et physiques du corps qui déterminent le comportement

(Walter, 1967 ; Cordeschi, 2002). Aujourd'hui les expériences « robotiques » s'invitent dans de nombreux domaines, depuis les neurosciences (Edelman, 2007) jusqu'à la psychologie du développement (Revel, Nadel, 2007) ou même la linguistique (Kaplan, 2001 ; Steels *et al.*, 2002).

Mais que peut-on apprendre véritablement en travaillant avec des robots ? Les expériences robotiques peuvent parfois donner l'impression de n'être que théâtralisation, renouant avec des modes de présentation de la science en public qui remontent au XVIII^e siècle : des mises en scène de la science sans véritable enjeu épistémologique. Nous voudrions montrer que l'enjeu de ces expériences dépasse la simple communication scientifique, et que le travail de modélisation avec les robots permet de dégager des concepts nouveaux, difficilement abordables par d'autres méthodes.

Que ce soit dans l'imagerie populaire ou dans la pratique scientifique, le robot a toujours deux caractéristiques complémentaires : il a un corps et il est animé. Son corps le rattache aux autres machines, et en particulier aux outils, qui agissent dans le monde physique, son animation le rapproche du vivant. L'histoire de la robotique se caractérise par une succession de redéfinitions des frontières entre corps et processus d'animation. Alternant entre démarches holistiques et dualistes, les roboticiens ont selon les époques développé des approches radicalement différentes pour concevoir des machines capables de se comporter et d'évoluer dans le monde physique. À chaque démarche d'ingénierie correspond de manière directe une certaine conception du rôle du corps pour la cognition. Pour cette raison, la robotique peut être comprise non seulement comme le savoir-faire technologique qui sous-tend la construction et le comportement de corps animés, mais comme une science de l'inscription corporelle.

1. *Le corps séparé*

Le Joueur de flûte de Jacques de Vaucanson pouvait exécuter jusqu'à douze airs différents. Contrairement à la plupart des machines du début du XVIII^e siècle qui sont encore, dans leur conception, essentiellement holistiques, cet automate introduit une forme de séparation entre une mécanique corporelle et un procédé d'animation programmable. Perfectionnant le même genre de mécanisme, *L'Écrivain* de Pierre et Henri-Louis Jaquet-Droz est équipé de quarante cames qui contrôlent le mouvement de sa plume. Le même

corps peut ainsi effectuer différentes séquences selon les positions du système de cames. Progressivement, les dispositifs mécaniques permettant la programmation se multiplient : métiers à tisser, cartes perforées, cylindres de cire. Les procédés d'animation se développent sous la forme de modules toujours plus indépendants du corps mécanique de l'automate (Chapuis, Droz, 1949).

Au milieu du XX^e siècle, avec l'arrivée de l'ordinateur numérique, le divorce entre le corps physique et le procédé d'animation est consommé. L'automate, que l'on nomme dorénavant robot, se conçoit comme un corps physique doté de senseurs et d'actuateurs contrôlés par un programme informatique, description abstraite, « informationnelle » de son comportement. Il est alors facile de faire « exécuter » successivement de nombreux programmes différents sur le même corps robotique.

Deux disciplines complémentaires voient le jour. D'un côté, les chercheurs en intelligence artificielle s'attellent à imaginer des algorithmes permettant à la machine de classer, de prédire, de décider. De l'autre, les roboticiens développent de nouveaux senseurs et de nouveaux actionneurs élargissant ainsi le « monde » dans lequel les robots évoluent.

Immanquablement, les deux disciplines divergent. De nombreux chercheurs en intelligence artificielle en particulier ne considèrent plus l'incarnation comme une composante essentielle de leur recherche. Ils préfèrent concentrer leur effort sur la modélisation de comportements cognitifs humains complexes, élaborent des modèles de l'intelligence humaine adaptés au diagnostic médical, à la preuve de théorèmes mathématiques ou aux jeux de société. Ces algorithmes viennent soutenir une vision de l'intelligence humaine comme étant avant tout un système de manipulation de symboles (Haugeland, 1985). La psychologie cognitive s'empare de cette hypothèse soutenant que ce type de processus de traitement de l'information rend mieux compte des mécanismes de l'intelligence que ne font les théories comportementalistes très influentes outre-Atlantique. Les hypothèses cognitivistes et computationalistes, stipulant que la pensée est réductible à un ensemble de calculs symboliques, s'imposent (Fodor, 1987). Le corps, quant à lui, est oublié, irrémédiablement séparé des mécanismes de l'intelligence.

Symétriquement, alors qu'un domaine de recherche entier explore l'intelligence sans corps, un autre s'attelle à développer des corps sans intelligence. Les premiers robots industriels sont installés dans des environnements prédictibles, contrôlés à l'extrême. Sur les

chaînes de montages, ils exécutent des mouvements calibrés. Dans les ateliers, ils réalisent des manipulations standardisées avec précision. Malheureusement, dès qu'il s'agit de faire évoluer les machines dans des environnements non contraints, non connus à l'avance ou changeants, le comportement des robots semble impossible à programmer.

Entre les années 1950 et la fin des années 1980, le schisme qui sépare les concepteurs de « corps » et les chercheurs en « intelligence » a des conséquences directes sur les performances des machines produites. Les algorithmes d'intelligence artificielle conçus pour manipuler des symboles définis *a priori* et non ambigus se révèlent fortement inadaptés à la complexité et l'imprévisibilité du monde réel. À titre d'illustration, considérons le problème qui consiste à essayer de faire marcher un robot quadrupède à partir d'un algorithme d'intelligence artificielle classique. Il ne s'agit plus de manipuler des symboles abstraits, mais un corps complexe qui, selon les configurations, peut rapidement se trouver en position de déséquilibre, notamment si, comme pour la plupart des robots, il est constitué de membres rigides dont le programme doit contrôler la position. Le revêtement du sol, les degrés de friction sous les pattes influencent directement les mouvements de la machine. Pour fonctionner, il est nécessaire que le système soit équipé d'un modèle précis du corps du robot et aussi de l'environnement dans lequel il évolue. C'est, dans bien des cas, quasiment impossible. Vu sous cet angle, marcher à quatre pattes peut se révéler être un problème plus difficile que démontrer des théorèmes mathématiques.

2. *Le corps retrouvé*

Pour sortir de cette impasse, une nouvelle école de pensée voit alors le jour à la fin des années 1980, autour de chercheurs comme Rodney Brooks, Luc Steels et Rolf Pfeifer. L'intelligence artificielle incarnée (*embodied artificial intelligence*) rejette l'approche symbolique et désincarnée de l'intelligence artificielle « classique » en postulant qu'il ne peut y avoir d'intelligence sans corps et sans environnement (Pfeifer, Scheier, 1999). Rodney Brooks ajoute que le corps et l'environnement ne sont pas modélisables et que la recherche doit donc renoncer à construire des modèles de la réalité extérieure pour se concentrer sur l'interaction directe avec l'environnement : « Le monde est le meilleur modèle de lui-même » (Brooks, 1999 ; Steels, Brooks, 1995).

Ce changement de perspective annonce un renouveau des expériences robotiques et un retour à des méthodes de conception et d'expérimentation qui caractérisaient la robotique d'avant l'ordinateur numérique. Les « tortues » cybernétiques de Grey Walter construites en 1948 sont alors prises comme exemple de ce que doit être une bonne conception intégrant de manière fine la conception de la machine physique aux comportements souhaités. Ces robots entièrement analogiques étaient capables de comportements complexes, sans pour autant utiliser de « représentations » internes (Guy Walter, 1949). Leur conception tenait compte du fait qu'il s'agissait de machines physiques, soumises à la gravité ou aux frictions, qui produisent leur simulation sensorielle par leur propre mouvement. La nature et la disposition de leur système sensoriel leur permettaient de résoudre des « tâches » complexes comme retrouver leur station de recharge, sans qu'il soit nécessaire pour autant de faire appel à un quelconque « raisonnement ».

Inspirés par les théories de von Uexkull (1965), les chercheurs définissent désormais les comportements de leur robot en tenant compte de leur *Umwelt*, du fait que le corps le fait appartenir à certaines niches écologiques dans lesquelles certains stimuli sont significatifs et d'autres pas. Ils s'appuient aussi sur le renouveau d'un courant philosophique fondamentalement non dualiste qui, dans la tradition de Merleau-Ponty, conçoit la cognition comme étant incarnée et située dans le monde (Merleau-Ponty, 1942 ; Varela *et al.*, 1993).

Pour tenter de convaincre les cognitivistes qui ne voient en l'intelligence qu'une forme sophistiquée de traitement de l'information, les chercheurs en intelligence artificielle incarnée tentent de définir le type de traitement « computationnel » morphologique (*morphological computation*) réalisé par le corps lui-même (Pfeifer, Bongard, 2007). Pour résoudre un problème comme la marche quadrupède, plutôt que de construire un système de contrôle plus sophistiqué, il est plus efficace de construire un corps doté des dynamiques physiques adaptées. Si l'on remplace les membres rigides et les moteurs puissants du robot par un système équipé de ressorts inspirés de la dichotomie muscle-tendon que l'on retrouve chez les animaux quadrupèdes, il suffit alors d'un système de contrôle simplissime produisant juste un mouvement périodique de chaque patte pour obtenir une marche élégante et adaptée. Une fois posé sur le sol, le robot se stabilise après quelques pas dans un rythme de marche correspondant à ses dynamiques naturelles. La vitesse de marche correspondante n'est pas arbitraire et il est d'ail-

leurs difficile pour le robot de sortir de ce qui constitue « un bassin d'attraction » de ce système dynamique. Seule une perturbation suffisamment importante peut permettre au robot de quitter ce rythme naturel pour retomber ensuite vers un autre « attracteur » correspondant par exemple à un comportement de « trot » (Pfeifer, Bongard, 2007).

Ainsi, en rupture avec la division héritée du partage en disciplines de l'après-guerre, l'intelligence artificielle incarnée réaffirme l'importance du corps en illustrant son rôle pour la construction de comportements complexes : conception corporelle et procédés d'animation doivent être envisagés comme formant un tout cohérent.

3. *Le corps comme variable expérimentale*

Au début des années 1990, les expériences de la nouvelle intelligence artificielle se concentrent essentiellement sur la modélisation de comportements d'insectes, exemples stratégiquement éloignés des programmes d'intelligence artificielle classique qui jouent aux échecs. Mais, dans les années qui suivent, certains chercheurs tentent d'étendre cette même approche pour construire des robots capables d'apprendre comme le font les jeunes enfants. L'idée n'est pas nouvelle, puisqu'elle était exprimée par Alan Turing dans ce qui a été un des articles fondateurs de l'intelligence artificielle (Turing, 1950), mais la perspective « sensori-motrice » développée par l'intelligence artificielle incarnée lui donne une dimension inédite. Comment, en effet, une machine pourrait-elle développer par elle-même des compétences sensori-motrices pour interagir avec son environnement ? Par quels mécanismes pourrait-elle s'engager dans une trajectoire développementale ouverte comme celles qui caractérisent le développement de l'enfant ? En quelques mois à peine, un enfant apprend à contrôler son corps, à manipuler des objets, à échanger avec ses proches pour devenir un être autonome capable d'interactions complexes, tant physiques que sociales. De jour en jour, il acquiert des savoir-faire de plus en plus complexes tant sur le plan perceptif que dans ses possibilités d'interaction. Dans quelle mesure une machine pourrait-elle faire la même chose ?

En posant ces questions, les chercheurs en robotique « développementale » ou « épigénétique » (Lungarella *et al.*, 2004 ; Kaplan, Oudeyer, 2006) remettent partiellement en cause les bases initiales de l'intelligence artificielle incarnée et introduisent une rupture

méthodologique. L'importance du corps est toujours affirmée, puisqu'il s'agit de développer des compétences sensori-motrices intimement liées à une morphologie et un environnement donnés. Mais, tout en gardant une approche holistique, il semble de nouveau nécessaire d'identifier, au sein du système robotique, un processus indépendant de tout corps, de toute niche écologique et de toute tâche particulière. En effet, par définition, un mécanisme qui puisse permettre de pousser à apprendre toujours de nouvelles compétences ne peut être spécifique à certains types de comportements, de milieu ou même de corps. Il doit être général et abstrait, indépendant du corps.

Ainsi, à peine retrouvé, le corps se trouve de nouveau divisé. Mais la séparation n'est plus celle héritée des cartes perforées et de l'ordinateur numérique qui distinguait le matériel du logiciel. Dans ce nouveau dualisme méthodologique, il s'agit de séparer une *enveloppe corporelle* potentiellement variable correspondant à un espace sensori-moteur donné et un *noyau d'entraînement*, ensemble de processus généraux et stables capables de contrôler n'importe quelle interface corporelle. En distinguant ainsi un processus d'incarnation général et des espaces corporels particuliers, les développements les plus récents de la robotique épigénétique conduisent à reconsidérer le corps sous un autre angle. Contrairement aux corps physiques stables et lourds, entièrement ancrés dans le réel, les enveloppes corporelles, quant à elles, sont potentiellement des espaces variables et changeants. Contrairement aux programmes d'animation toujours différents de la robotique et de l'automatique, nous considérons maintenant un noyau stable, toujours identique, agissant comme un moteur pour le développement. Ce n'est plus le corps qui reste et les programmes qui changent. C'est exactement l'inverse : le programme reste et le corps change.

Plusieurs types de noyaux d'entraînement peuvent être envisagés. Certains conduiront à des développements ouverts, d'autres pas. Imaginons une salle de contrôle comprenant un ensemble d'appareils de mesure et un ensemble de boutons. Sur aucun de ces appareils ne figure d'étiquette. Imaginons maintenant un opérateur essayant, malgré l'absence d'étiquette, de comprendre comment fonctionne le système qu'il a en face de lui. Une stratégie possible consiste à appuyer sur des boutons au hasard et à observer le type de signaux mesurés sur les appareils de mesure. Peut-être n'y a-t-il aucune relation prédictible entre les actions entreprises et les résultats obtenus. Peut-être seuls certains boutons ont-ils un effet ? Pour l'opérateur, une meilleure stratégie consiste donc à évaluer

dans quelles configurations il progresse dans sa compréhension des effets de ses actions et d'explorer plus particulièrement les actions correspondantes.

Il est possible de construire un algorithme qui effectue précisément cette exploration. Étant donné un ensemble de signaux d'entrées et de sortie, l'algorithme peut tenter de construire un modèle prédictif des effets des signaux de sortie sur les signaux d'entrée. Plutôt que d'essayer des combinaisons au hasard, l'algorithme évalue les situations où il progresse le plus dans ses prédictions et choisit les signaux de sorties de façon à optimiser son propre progrès (Oudeyer *et al.*, 2007). En suivant ce principe, l'algorithme évite à la fois les zones imprédictibles ou, au contraire, trop facilement prédictibles de l'espace qu'il explore de façon à se concentrer sur les actions les plus susceptibles de le faire progresser dans ses prédictions. Nous pouvons appeler ces zones des « niches de progrès ». Un tel algorithme permet ainsi une exploration organisée d'un espace inconnu, en commençant par les aspects les plus simples à prédire pour progressivement s'attacher aux zones les plus difficiles à modéliser. Le terme *noyau* est ici approprié à plusieurs titres pour décrire le comportement de cet algorithme. Il s'agit d'un processus central, stable, protégé par rapport aux espaces corporels périphériques. C'est également l'origine et le point de départ des comportements observés.

Revenons à notre exemple de la marche quadrupède et considérons une expérience dans laquelle c'est maintenant cet algorithme qui contrôle le mouvement des différents moteurs. Pour chaque moteur, il fixe la période, la phase et l'amplitude d'un signal périodique. Le système de prédiction tente de prédire les effets de ces différents jeux de paramètres sur la manière dont l'image captée par une caméra placée sur la tête du robot est modifiée, ce qui reflète indirectement le mouvement de son buste. À chaque itération, l'algorithme produit la valeur du prochain jeu de paramètres à essayer de façon à maximiser la réduction de l'erreur en prédiction.

Lorsque l'on débute une expérience de ce genre, différents jeux de paramètres sont explorés pendant les premières minutes. Le robot agite ses pattes de manière désordonnée. La majeure partie de ses mouvements a un effet très facilement prédictible : le robot ne bouge quasiment pas. Le robot, malgré son agitation, reste immobile. L'erreur en prédiction reste minimale : ces situations ne sont pas « intéressantes » pour l'algorithme. Par hasard, au bout d'une dizaine de minutes un mouvement amène en général le robot à effectuer un léger déplacement. Une certaine combinaison de para-

mètres a pour résultat un léger recul. Cette situation nouvelle conduit d'abord à une augmentation de l'erreur en prédiction puis, au fur et à mesure que le robot a de nouvelles occasions d'effectuer des mouvements similaires, cette erreur commence à baisser : le système a découvert une « niche de progrès ».

Le robot va ensuite explorer les différentes manières de reculer. Au cours de cette exploration, il est probable qu'il découvrira que certaines légères modifications de paramètres conduisent à effectuer ce qu'un observateur extérieur appellerait des mouvements de rotation : un nouvel ensemble de « niches de progrès » que le robot pourra exploiter quand les compétences liées à la marche en arrière auront été, pour l'essentiel, maîtrisées.

Il faut en général plus de trois heures pour que l'algorithme découvre plusieurs ensembles de paramètres permettant au robot de marcher en avant, en arrière, latéralement ou de tourner sur lui-même. À aucun moment, le robot n'a comme objectif d'apprendre à marcher. Guidé par la maximisation de la réduction de l'erreur en prédiction, le robot développe pourtant des compétences versatiles pour la locomotion. C'est d'ailleurs le caractère non spécifique de l'architecture qui permet cette versatilité. Un robot motivé pour se rapprocher d'un objet n'aurait par exemple sans doute pas appris à reculer ou à tourner sur lui-même.

Le fait que la marche en arrière se soit révélée dans cette trajectoire plus facile à découvrir que les autres n'était pas facile à prévoir. Étant donné la structure physique de ce robot et le type de sol sur lequel il était placé, les mouvements de recul ont été la première niche découverte. Pour savoir si cette niche constitue un « attracteur » récurrent pour ce type de trajectoire, il faut mettre en place un programme d'expériences systématiques en faisant éventuellement varier la morphologie du robot. Il devient donc possible d'étudier les conséquences développementales d'un changement corporel. Une jambe plus longue ou un dos plus souple peut changer de manière importante les niches de progrès et donc les trajectoires explorées par le noyau. Du point de vue méthodologique, il s'agit de faire du corps une variable expérimentale dont on peut étudier les effets *toutes choses égales par ailleurs*.

Ces expériences robotiques ouvrent naturellement la voie à des questionnements expérimentaux en neuroscience : « Peut-on identifier les circuits neuraux pouvant constituer l'équivalent d'un noyau ? » (Kaplan, Oudeyer, 2007 *a*), en psychologie du développement : « Peut-on réinterpréter les séquences développementales des jeunes enfants comme une succession de niches de progrès ? »

(Kaplan, Oudeyer, 2007 *b*), ou en linguistique : « Peut-on repositionner le débat entre inné et acquis dans l'apprentissage de la langue en considérant le rôle du corps dans ce processus ? » (Kaplan *et al.*, 2008).

4. *Le corps variable*

Paradoxalement, la robotique, si souvent associée aux comportements saccadés de corps rigides et fixes, propose aujourd'hui un cadre théorique et expérimental pour étudier l'influence du corps : elle permet de penser le corps comme une variable. Outre son intérêt méthodologique, cette approche ouvre la voie à une nouvelle conception du corps, fluide et en continuelle redéfinition. Penser le corps comme une variable expérimentale nous permet de penser la variabilité du corps.

Plus qu'une technologie des corps animés, la robotique apparaît alors comme science et pratique de l'incarnation. En dégageant le concept de noyau stable et générique, origine de la motricité et de l'exploration, et le concept d'enveloppes corporelles changeantes, elle offre un cadre explicatif nouveau pour reconsidérer les questions du développement, de l'inné et de l'acquis. En effet, qu'est-ce que le développement si ce n'est une séquence d'incarnations successives : non seulement un corps en perpétuel changement, mais aussi des espaces corporels qui se succèdent les uns aux autres ? Chaque nouvelle compétence acquise change l'espace à explorer. La marche en est à nouveau un exemple illustratif. Une fois maîtrisée, elle permet à l'enfant l'accès à un nouvel espace de recherche.

Penser le corps variable, c'est aussi penser une notion de corps étendu capable d'incorporer les objets qui l'entourent sous la forme d'agencements transitoires. Dans cette perspective, outils, instruments de musique et véhicules sont autant d'enveloppes corporelles à explorer, sans différence fondamentale avec leur pendant biologique (Clark, 2004).

Enfin, en pensant le corps variable, ne pourrait-on pas considérer le raisonnement symbolique et la pensée abstraite comme autant de formes d'extensions corporelles ? Si, comme le suggèrent Lakoff et Nunez, il y a une correspondance directe entre la manipulation sensori-motrice et les raisonnements mathématiques les plus abstraits (Lakoff, Nunez, 2001), nous pouvons naturellement considérer que même les processus mentaux les plus « intérieurs » peuvent être pertinemment interprétés comme des enveloppes corpo-

relles à explorer. L'usage de la langue elle-même ne pourrait-il pas être interprété comme une incarnation corporelle particulière (Oudeyer, Kaplan, 2006) ?

Comme ce fut toujours le cas historiquement, la robotique soulève plus que jamais des questions philosophiques importantes et introduit une méthodologie expérimentale pour les explorer. Elle nous permet de nous penser par différence. En étudiant le développement de robots dotés d'espaces corporels très différents des nôtres, elle permet de penser le rôle du corps dans notre propre développement. Ainsi, les robots ne sont pas tant des modèles que des expériences de pensée appareillée pour tenter de représenter des séparations impossibles, comme celle du corps et des processus d'animation ou, plus récemment, celle d'un noyau stable et d'enveloppes corporelles fluides.

Frédéric KAPLAN,
École polytechnique fédérale de Lausanne.
frederic.kaplan@epfl.ch

Pierre-Yves OUDEYER,
Inria Futur, France.
pierre-yves.oudeyer@inria.fr

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baudrillard J. (1978), *Le système des objets*, Paris, Gallimard, « tel », 2^e éd., 2001.
- Brooks R. (1999), *Cambrian Intelligence : The Early History of the New AI*, Cambridge (Mass.), The MIT Press.
- Chapuis A., Droz E. (1949), *Les automates, figures artificielles d'hommes et d'animaux*, Neuchâtel, Éd. du Griffon.
- Clark A. (2004), *Natural-Born Cyborgs : Minds, Technologies, and the Future of Human Intelligence*, Oxford, Oxford University Press.
- Cordeschi R. (2002), *The Discovery of the Artificial. Behavior, Mind and Machines, before and beyond Cybernetics*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Edelman J. (2007), « Learning in and from brain-based devices », *Science*, vol. 318, p. 1103-1105.
- Fodor J. (1987), *Psychosemantics : The Problem of Meaning in the Philosophy of the Mind*, Cambridge (Mass.), The MIT Press.
- Grey Walter W. (1953), *The Living Brain*, London, Penguin, 2^e éd., 1967.
- Haugeland J. (1985), *Artificial Intelligence : The Very Idea*, Cambridge (Mass.), The MIT Press.
- Kaplan F. (2001), *La naissance d'une langue chez les robots*, Paris, Hermès.
- Kaplan F. (2005), *Les machines apprivoisées : comprendre les robots de loisir*, Paris, Vuibert.
- Kaplan F., Oudeyer P.-Y. (2006), « Trends in epigenetic robotics : Atlas 2006 », in F. Kaplan, P.-Y. Oudeyer, A. Revel, P. Gaussier, J. Nadel, L. Berthouze, H. Kozima, C. Prince, C. Balkenius, *Proceedings of the Revue philosophique*, n° 3/2008, p. 287 à p. 298

- Sixth International Workshop on Epigenetic Robotics : Modeling Cognitive Development in Robotic Systems*, LUCS 128.
- Kaplan F., Oudeyer P.-Y. (2007 a), « Un robot motivé pour apprendre : le rôle des motivations intrinsèques dans le développement sensori-moteur », *Enfance*, vol. 59, n° 1, p. 46-58.
- Kaplan F., Oudeyer P.-Y. (2007 b), « In search of the neural circuits of intrinsic motivation », *Frontiers in Neuroscience*, vol. 1, n° 1, p. 225-236.
- Kaplan F., Oudeyer P.-Y., Bergen B. (2008), *Computational Models in the Debate over Language Learnability, Infant and Child Development*, vol. 17, n° 1, p. 55-80.
- Lakoff G., Nunez R. (2001). *Where Mathematics comes from : How the Embodied Mind brings Mathematics into Being*, New York, Basic Books.
- Lungarella M., Metta G., Pfeifer R., Sandini G. (2004), « Developmental robotics : A survey », *Connection Science*, vol. 15, n° 4, p. 151-190.
- Merleau-Ponty M. (1942), *La structure du comportement*, Paris, PUF, 8^e éd., 1977.
- Oudeyer P.-Y., Kaplan F. (2006), « Discovering communication », *Connection Science*, vol. 18, n° 2, p. 189-206.
- Oudeyer P.-Y., Kaplan F., Hafner V. (2007), « Intrinsic motivation systems for autonomous mental development », *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 11, n° 1, p. 265-286.
- Pfeifer R., Scheier C. (1999), *Understanding Intelligence*, Cambridge (Mass.), The MIT Press.
- Pfeifer R., Bongard J. (2007), *How the Body shapes the Way we think : A New View of Intelligence*, Cambridge (Mass.), The MIT Press.
- Revel A., Nadel J. (dir.) (2007), *L'enfant, le robot et l'ordinateur*, dossier d'*Enfance*, vol. 59, n° 1.
- Steels L., Brooks R. (1995), *Building Situated Embodied Agents*, New Haven, Lawrence Erlbaum.
- Steels L., Kaplan F., McIntyre A., Van Looveren J. (2002), « Crucial factors in the origins of word-meaning », in A. Wray (ed.), *The Transition to Language*, Oxford, Oxford University Press, p. 252-271.
- Turing A. (1950), « Computing machinery and intelligence », *Mind*, vol. 59, p. 433-460.
- Uexkull J. von (1965), *Mondes animaux et monde humain*, Paris, Denoël.
- Varela F., Thompson E., Rosch E. (1993), *L'inscription corporelle de l'esprit : sciences cognitives et expérience humaine*, Paris, Le Seuil.