



HAL
open science

L'action

Mehdi Khamassi, Elisabeth Pacherie

► **To cite this version:**

Mehdi Khamassi, Elisabeth Pacherie. L'action. Collins, T., Andler, D. and Tallon-Baudry, C. La cognition : du neurone à la société, Gallimard, 2018. hal-02324111v2

HAL Id: hal-02324111

<https://hal.science/hal-02324111v2>

Submitted on 13 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Chapitre VII

L'ACTION

Mehdi Khamassi, Élisabeth Pacherie

L'action constitue un sujet de plus en plus étudié dans les sciences cognitives, car il s'agit d'un phénomène complexe qui se situe au croisement de plusieurs domaines de la psychologie, notamment motivation, raisonnement, mémoire et perception. Loin de se réduire à la physiologie de la motricité, l'action met ainsi en jeu de multiples processus cognitifs tels que délibération, décision, planification, programmation des mouvements, suivi et contrôle de leur exécution.

L'objectif de ce chapitre est de rapprocher les points de vue de différentes disciplines comme la psychologie, la philosophie, les neurosciences, la modélisation ou encore la robotique sur les distinctions que l'on peut faire entre les différents types d'action que peuvent effectuer les êtres humains. En effet, de nombreuses recherches utilisant différentes méthodes et différents paradigmes scientifiques ont convergé sur le constat que toutes nos actions n'ont pas les mêmes propriétés comportementales, ne requièrent pas les mêmes mécanismes de déclenchement et de contrôle, et n'impliquent pas les mêmes circuits dans le cerveau. Le chapitre présente certaines des connaissances bien établies sur ce sujet. Il aborde également les pathologies de l'action et les éclairages que les différents troubles de la représentation et du contrôle de l'action peuvent apporter sur le fonctionnement du système à l'état non pathologique. Le chapitre présente également certains grands défis à relever à l'heure actuelle, tels que la compréhension des mécanismes qui permettent l'action conjointe dans un contexte social. Enfin, une présentation d'application de connaissances fondamentales sur l'action dans le domaine de la robotique vise à illustrer à la fois comment on peut développer des applications technologiques telles que des robots autonomes dans le choix de leurs actions et comment tester sur robot les théories de l'action peut aider à mieux comprendre voire reformuler ces théories. D'une manière générale, le chapitre se veut une illustration de la manière dont les connaissances sur l'action ont pu grandement avancer grâce à la confrontation et au croisement des points de vue de différentes disciplines.

I. DIFFERENTS TYPES D'ACTION

Nos actions peuvent prendre des formes très diverses. On peut par exemple considérer les actions routinières que nous effectuons tous les jours dans notre environnement familier (par exemple, s'habiller, préparer du café, aller de chez soi à son lieu de travail, etc.), dont l'exécution et le déroulement sont contrôlés automatiquement, « sans y réfléchir » (autrement dit, sans estimation ou représentation explicite de la manière dont nous nous y prenons ou des conséquences de l'action). À l'opposé du spectre se situent les actions que nous entreprenons

après délibération. La délibération peut porter sur les fins, autrement dit sur le choix du but à poursuivre (par exemple, prendre des vacances ou travailler à sa thèse, devenir chercheur ou devenir pilote de ligne) et implique que l'on compare les raisons que l'on peut avoir de poursuivre tel but plutôt que tel autre. La délibération peut aussi porter sur les moyens, autrement dit, sur la meilleure manière de procéder pour parvenir au but que l'on s'est fixé, et implique alors la comparaison de différentes actions candidates selon les conséquences estimées auxquelles elles conduisent relativement au but que nous nous sommes fixé. Certains buts peuvent être réalisés au moyen d'actions simples ou atomiques. Si mon but est d'allumer la lumière, il suffit normalement que j'appuie sur l'interrupteur. La réalisation d'autres buts suppose en revanche des séquences complexes d'actions. La délibération peut ainsi requérir la comparaison de séquences d'action (et non pas seulement d'actions atomiques), comme par exemple décider de faire un master de sciences cognitives (Action A) pour ensuite poursuivre sur une thèse (Action B) et ainsi plus tard pouvoir candidater au concours du CNRS (Action C) dans le but de devenir chercheur. Construire de façon prospective une séquence d'actions requiert un « modèle interne » de notre environnement : pouvoir estimer que l'action A amènera très probablement à un nouvel état dans lequel l'action B peut être déclenchée, etc. Estimer les conséquences à long terme de nos actions avant de décider de les effectuer requiert du temps de calcul, et est souvent associé à de longs temps de réflexion. Enfin, on peut distinguer entre agir seul et agir conjointement avec autrui. Certaines actions sont difficiles ou impossibles à réaliser seul. Il faut être deux pour danser le tango et mieux vaut s'y mettre à plusieurs pour déménager un piano. Agir ensemble suppose que l'on partage un but commun et les connaissances nécessaires à la réalisation de ce but commun. Agir ensemble suppose aussi que l'on coordonne ses plans et ses actions avec ceux de ses partenaires pour réaliser ce but commun.

Y a-t-il quelque chose de commun à toutes ces formes d'actions ? Qu'est-ce qui les distingue ? Ces différents types d'actions impliquent-ils différents processus cognitifs ? Différents mécanismes cérébraux ? Comment peut-on reconnaître expérimentalement le type d'action effectué par un sujet à un moment donné ? Quels protocoles expérimentaux peut-on imaginer pour arriver à les distinguer ? Enfin, certaines pathologies affectent-elles spécifiquement certains types d'actions ou certaines formes de contrôle de l'action ? Voici un ensemble de questions que nous aborderons dans ce chapitre.

II. L'ORGANISATION DE L'ACTION

1. Un mouvement n'est pas toujours une action

Avant de caractériser différents types d'action, il est important de considérer la distinction fondamentale entre une action et un simple mouvement. L'occurrence d'un mouvement ne suffit pas en soi à constituer une action. Il y a une différence entre le fait que mon bras se lève et le fait que je lève le bras. Mon bras peut se lever parce qu'un puissant aimant attire la montre en acier fixée à mon poignet ou encore le mouvement de mon bras peut être dû à un spasme musculaire. En pareil cas, on ne dira pas que j'ai accompli une action : certes mon bras se lève,

mais je ne lève pas le bras. Que faut-il de plus pour que le mouvement de mon bras corresponde à une action ? Ou, pour renverser la perspective, on peut se demander avec le philosophe Ludwig Wittgenstein (1889-1951), ce qui reste lorsque je soustrais le fait que mon bras se lève du fait que je lève le bras. Une réponse classique proposée en philosophie par les théories causales de l'action consiste à dire que ce qui reste est plutôt que c'est une intention de lever le bras ou, à tout le moins, un type particulier d'antécédent psychologique jouant un rôle causal dans le déclenchement du mouvement. Dans les deux exemples qui précèdent, ce sont l'aimant et le spasme musculaire qui sont responsables du mouvement et non une quelconque intention de ma part.

Ce critère de distinction peut aussi être utilisé dans des cas plus complexes, comme l'illustre l'exemple suivant. En avançant ses bras vers l'avant pour prévenir une chute, une personne (appelons-la Thérèse) peut se retrouver à exécuter le même mouvement que lorsqu'elle s'apprête à faire un saut périlleux pendant ses cours de gymnastique. Dans le deuxième cas, le mouvement peut être considéré comme une action, puisque l'intention qu'avait Thérèse de faire un saut périlleux a joué un rôle dans la programmation et le déclenchement de ce comportement. Par contre, dans le premier cas, le mouvement n'est pas une action, car il ne fait pas suite à un événement mental de ce type. Plutôt qu'un mouvement volontaire et donc une action, on peut considérer qu'il s'agit d'un mouvement réflexe, dû au déclenchement d'un réflexe de stabilisation de la posture en réponse à une sensation de déséquilibre.

S'il est parfaitement clair qu'un mouvement ne constitue pas une action lorsque sa cause est externe (aimant) ou interne mais non mentale (spasme musculaire), la distinction devient plus difficile à faire lorsque le mouvement est la conséquence de processus mentaux. Quels types d'événements et de processus mentaux doivent être en jeu et quels rôles doivent-ils jouer dans la production des mouvements pour que l'on puisse parler d'action ?

2. Deux formes d'action

a. Déclencheurs endogènes vs. exogènes

Les neurobiologistes font depuis longtemps la distinction entre choix d'action déclenché de manière endogène, à partir d'une intention, et choix d'action déclenché de manière exogène, par exemple par un stimulus extérieur. Le premier repose sur une anticipation des effets de l'action, alors que le deuxième est vu comme ancré plus fortement dans des associations stimulus-réponse. On considère également que le premier peut s'observer chez des sujets humains lorsque ceux-ci agissent délibérément de façon à satisfaire un effet désiré sur l'environnement. On parle alors d'action volontaire ou intentionnelle. À l'inverse, le deuxième se produit dans des situations où les sujets réagissent à des événements extérieurs et essaient de s'adapter aux contraintes de l'environnement. On parle dans ce cas plutôt de réponse ou de réaction.

La distinction ne doit pas être prise pour absolue car les actions intentionnelles semblent toujours nécessiter, pendant leur planification ou leur exécution, au moins un certain degré de guidage par des stimuli externes pour pouvoir s'appliquer à l'environnement. De façon symétrique, les actions fondées sur des stimuli semblent également systématiquement requérir un certain degré de guidage par les intentions, ou tout au moins ne peuvent se déclencher que

dans certains états intentionnels particuliers, nous le reverrons plus loin. En cela on distingue ces dernières des réflexes, pour le déclenchement desquels le stimulus externe est à la fois nécessaire et suffisant.

De façon intéressante, les actions du premier type sont plus lentes dans leur exécution car l'estimation préalable des effets possibles de l'action prend du temps, ce qui peut donc constituer une des indications mesurables du type d'action en jeu. Une autre différence notable concerne les circuits cérébraux en jeu dans le contrôle de ces deux types d'action. Le neurophysiologiste et médecin Gary Goldberg a en effet observé que les parties médiales du cortex préfrontal, et en particulier du cortex prémoteur, s'activent lorsque la tâche est réalisée par des actions endogènes, tandis que les parties latérales du cortex prémoteur sont impliquées lorsque le comportement des sujets dépend ou résulte principalement d'une réponse aux stimuli externes. Cela nous donne une première idée des mécanismes cérébraux et propriétés comportementales qui peuvent être liés à différents types d'action. Mais avant d'approfondir l'analyse de ces mécanismes, regardons si cette distinction entre types d'action concorde avec les distinctions faites en psychologie expérimentale.

b. Comportement orienté vers un but vs. habituel

Les psychologues distinguent en effet de leur côté les comportements orientés vers un but (dont la programmation est considérée comme manipulant une représentation mentale explicite du but à atteindre) des comportements habituels (pour lesquels une représentation d'un stimulus externe suffit à déclencher l'action). Les premiers seraient guidés par des associations apprises entre une action et sa conséquence, après avoir vérifié que la conséquence anticipée de l'action correspond bien au but souhaité. Les seconds seraient guidés par des associations apprises entre un stimulus et une réponse comportementale. Cette distinction repose sur l'observation expérimentale de deux types de réponses comportementales obtenues (initialement chez le rat, et plus tard aussi caractérisées chez les humains) après un test de dévaluation de la récompense. Dans ce type de test, proposé par le psychologue Anthony Dickinson (1985) à l'université de Cambridge, un rat est initialement entraîné à appuyer sur un levier pour obtenir de la nourriture. Après entraînement, on dévalue pour le rat la nourriture, soit en rendant le rat malade après en avoir mangé, soit en lui donnant une quantité très grande de sorte qu'il atteigne la satiété. On présente alors à nouveau le levier au rat. On constate que si le rat n'est que modérément entraîné, il arrête rapidement de presser le levier. L'interprétation est que le rat se représente mentalement la conséquence de l'action « presser le levier » dans ce contexte (*i. e.* obtention de nourriture), or le rat ne souhaite pas (plus) de nourriture, donc il n'effectue pas cette action. À l'inverse, après un surentraînement, même si la nourriture est dévaluée, le rat continue d'appuyer de nombreuses fois sur le levier. On dit qu'il a développé une habitude comportementale dans ce contexte de sorte que la simple présentation du stimulus (ici l'apparition du levier) provoque la représentation mentale d'une valeur implicite de récompense attendue, et ainsi déclenche la réponse comportementale d'appui. Cette distinction a aussi été observée plus récemment chez les humains.

Le psychologue Bernard W. Balleine et le neurobiologiste John P. O'Doherty (2010), ont en effet transposé le test de dévaluation chez l'humain en leur présentant une série d'essais où les sujets devaient appuyer sur un bouton en réponse à la présentation d'une image sur un écran (stimulus) de façon à obtenir une récompense (apparition à l'écran de l'image d'une friandise

que le sujet pourrait consommer à la fin de l'expérience). Les essais pouvaient impliquer deux types de friandises (appelons-les A et B). Après une première phase d'expérience, les sujets étaient soumis à une procédure de dévaluation d'un des deux types de friandises : on leur demandait, par exemple, de manger des friandises de type A jusqu'à ce que ce type de nourriture ne leur paraisse plus plaisant (sentiment d'écœurement). On testait ensuite leur nombre d'appuis en réponse aux stimuli associés à A et B. Comme dans la version de l'expérience chez le rat présentée au paragraphe précédent, les sujets arrêtaient d'appuyer en réponse au stimulus prédicteur de A, mais pas en réponse du stimulus prédicteur de B. De façon particulièrement intéressante, si les sujets étaient entraînés à faire la tâche pendant trois jours au lieu d'un seul avant la procédure de dévaluation, alors ils continuaient d'appuyer « habituellement » sur les boutons, que le stimulus soit prédicteur de A ou de B.

Les psychologues considèrent que ces deux types de comportements semblent distinctement liés à différents types de mémoires : l'association action-conséquence s'appuierait sur la mémoire déclarative ou explicite, qui stocke des informations factuelles et des expériences antérieures. L'association stimulus-réponse s'appuierait sur la mémoire procédurale (ou implicite), qui encode et stocke les habiletés motrices. Ces deux types de mémoire feraient intervenir différentes zones du cerveau, puisqu'on peut léser l'hippocampe, le cortex préfrontal médian ou le striatum dorsomédian et n'altérer que les comportements dirigés vers un but (mais pas les comportements habituels), tandis qu'on peut léser le striatum dorsolatéral et n'altérer que les comportements habituels (mais pas les comportements dirigés vers un but).

c. Coordination des différents systèmes

On voit en tout cas dans ces différents exemples qu'un même comportement, une même série de mouvements effectués par un agent peuvent refléter le résultat de décisions d'actions différentes, ayant pu reposer sur l'apprentissage d'associations différentes entre éléments de l'environnement. Le cerveau est capable de coordonner ces différents apprentissages liés à différents systèmes de mémoire de façon à ce qu'il n'y ait (la plupart du temps) pas de conflit entre les propositions d'action faites conjointement par ces systèmes. L'état actuel des connaissances sur ce sujet en neurosciences computationnelles (*i. e.* le domaine des neurosciences qui cherche à formaliser mathématiquement les possibles calculs mis en œuvre par le cerveau) suggère qu'un mécanisme de compétition entre systèmes permet de résoudre les situations de conflit en fonction du degré d'apprentissage (en début d'apprentissage, le système déclaratif semble prendre le dessus dans le guidage des actions des sujets), de la familiarité de l'environnement (dans un environnement familier, le système procédural a tendance à prendre le contrôle des actions), et des événements possiblement aversifs. Lorsque par exemple une action habituelle se retrouve tout à coup associée à une conséquence négative, le cortex préfrontal inhibe l'exécution de cette action pour permettre une adaptation comportementale, sans pour autant que l'association stimulus-réponse disparaisse. On se rend en effet compte chez le rat que si on lèse le cortex préfrontal après cette adaptation, l'inhibition est levée et le comportement habituel précédent réapparaît. Nous verrons plus loin que les mécanismes de gestion de conflit, que l'on considère comme relevant d'un processus de contrôle cognitif, peuvent également faire coopérer ces différents systèmes

3. Les habitudes comportementales sont-elles des actions ?

Néanmoins, différentes disciplines ou approches ne s'accordent pas forcément sur le fait de considérer ou non les comportements automatiques habituels (appelés aussi routiniers) comme des actions en tant que telles. En philosophie de l'action, notamment, cette question fait débat. De nombreux philosophes mettent en avant l'existence d'un lien étroit entre action et intention et entre intentions et raisons d'agir. En 1980, le philosophe Donald H. Davidson (1917-2003) a ainsi proposé d'identifier une intention à un complexe de croyances et de désirs qui constituent à la fois les causes et les raisons de l'action. Selon cette approche, mon geste d'appuyer sur l'interrupteur constitue une action parce que ce geste était causé et motivé par mon désir d'éclairer la pièce et ma croyance que cet interrupteur contrôlait la lumière. D'autres analyses philosophiques, sans identifier les intentions à des complexes de désirs et de croyances, comme le fait Davidson, défendent néanmoins l'existence d'un lien essentiel entre actions, intentions et raisons d'agir et soutiennent qu'un comportement ne peut être considéré comme une action que s'il peut être décrit comme intentionnel, c'est-à-dire motivé par les croyances et désirs de l'agent. Enfin, d'autres philosophes, comme John Searle (1932-) en 1983 ou Alfred Mele (1951-) en 1992, opèrent une distinction entre deux formes d'intentions : les intentions distales ou préalables formées en amont de l'action et en lien avec les raisons d'agir du sujet et les intentions proximales ou intentions en action accompagnant immédiatement l'action et jouant un rôle plus direct dans son déclenchement et dans le contrôle de son déroulement.

L'exemple du test de dévaluation chez le rat ou chez l'humain montre que la présentation d'un stimulus habituel peut déclencher automatiquement une réponse amenant à une récompense même lorsque le sujet ne souhaite pas cette récompense parce que celle-ci a été dévaluée. Dans ces exemples, le but du comportement semble être déconnecté des désirs et raisons d'agir de l'agent. Ses croyances sur les conséquences de ce comportement ne semblent pas jouer de rôle dans le déclenchement de l'action. Si l'on accepte une analyse philosophique de l'action qui affirme l'existence d'un lien essentiel entre actions et intentions et entre intentions et raisons d'agir, on pourra difficilement classer ces comportements comme des actions. En revanche, si on distingue entre intentions distales et intentions proximales, on pourra soutenir que, même si ces comportements ne sont pas le produit d'intentions distales, ils font intervenir des intentions proximales et peuvent dans cette mesure être considérés comme des actions.

En outre, les psychologues considèrent que, même si l'exécution d'un comportement habituel a été automatisée de façon à être indépendante des représentations explicites du but ou des associations action-conséquence, le comportement a néanmoins été associé par apprentissage à un contexte motivationnel de recherche d'un but précis (la nourriture ou les friandises dans le cas des tests de dévaluation). Ainsi, même si nous déroulons automatiquement, sans représentation explicite du but, la série de gestes constituant certains comportements habituels comme préparer le café le matin ou prendre sa douche, cette vision suggère que ces comportements sont néanmoins déclenchés dans un contexte lié à un but précis (nous ne prenons pas notre douche à chaque fois que nous entrons dans la salle de bain, ni ne faisons du café à chaque fois que nous entrons dans la cuisine) et qu'ils pourraient donc être considérés comme des actions. Cette vision suggère également que nos actions ne sont pas toutes déclenchées de façon consciente ni de manière endogène.

Le débat semble pouvoir être en partie tranché en considérant que différents types d'actions peuvent impliquer différents niveaux de spécification et de représentation des buts et mettre en œuvre différents niveaux de contrôle cognitif.

4. Les représentations de l'action

La préparation de l'action passe par une spécification progressive des buts de l'action et des moyens à mettre en œuvre pour réaliser ces buts. Elle implique ainsi des niveaux de plus en plus fins de représentation de l'action.

Les représentations de l'action partagent deux propriétés essentielles, qui les distinguent d'autres types de représentation telles que les représentations perceptives. Les représentations de l'action sont des représentations *prospectives* : elles représentent des événements à venir plutôt que des événements déjà réalisés. Ce sont également des représentations *téléologiques* : les événements qu'elles représentent sont des actions à venir et les effets qu'elles sont destinées à produire, autrement dit le but qu'elles visent. Ainsi que le soulignait en 2006 le neurophysiologiste Marc Jeannerod (1935-2011), ces deux propriétés sont communes non seulement aux représentations de l'action qui sont impliquées dans la production de l'action, mais aussi aux représentations qui sont activées lorsque l'on observe quelqu'un d'autre agir ou lorsque l'on imagine ou simule mentalement une action (voir plus loin la section sur les neurones miroirs). Les représentations de l'action qui sont formées lorsque l'on se prépare à agir plutôt que lorsqu'on observe ou imagine simplement une action ont, en outre, la propriété d'être *efficientes* au sens où elles contribuent causalement à la réalisation des états futurs qu'elles représentent. Si toutes les représentations de l'action ne sont pas des intentions, celles qui sont non seulement prospectives et téléologiques mais aussi efficaces peuvent être considérées comme des intentions. Il faut toutefois distinguer plusieurs types ou niveaux d'intention en fonction à la fois de leur contenu plus ou moins abstrait ou concret, des sources de ce contenu, des processus qui interviennent dans la formation de ces intentions et de leur rôle dans la production de l'action. Le modèle DPM proposé par Élisabeth Pacherie (2008) distingue trois niveaux principaux d'intentions : les intentions distales, les intentions proximales et les intentions motrices.

a. Les intentions distales

Les *intentions distales* renvoient au niveau le plus abstrait de représentation de l'action à accomplir. Elles concernent des actions d'origine endogène qui ont un but à long terme, un but complexe ou encore un but abstrait. Je peux par exemple avoir l'intention de rendre visite à un collègue à Lyon le mois prochain. Il s'agit d'un but à long terme, dont la réalisation demandera la planification de toute une série d'étapes : consulter les horaires de train, acheter mon billet, me rendre à la gare le jour dit, monter dans le train, etc. Chacune de ces étapes pourra à son tour comporter des sous-étapes. Toutefois, la distalité d'une intention n'est pas forcément liée à l'éloignement de son but dans le temps. Un but peut être complexe sans être éloigné dans le temps. L'intention de boire un café que je forme devant mon ordinateur sera une intention distale si je n'ai pas une tasse de café sur mon bureau. Je vais devoir me lever, aller dans la cuisine, allumer la machine à café, sortir une tasse, préparer le café, etc., avant de pouvoir boire

mon café. À chacune de ces étapes correspondra une intention plus locale. Enfin, une intention peut être distale si son but est abstrait, même si sa réalisation ne suppose pas une séquence complexe d'étapes. Supposons que Thérèse fasse partie de plusieurs comités où l'on doit voter pour ou contre une motion. Lors des réunions de ces comités, elle peut, après avoir entendu les arguments des uns et des autres, former l'intention de voter pour la motion proposée, mais les procédures de vote peuvent être différentes d'un comité à l'autre : dans le premier on vote à main levée, dans le second en inscrivant son choix sur un bulletin de vote, dans le troisième en utilisant un boîtier électronique. Dans ces différents comités, la réalisation de son intention de voter passera par la formation d'une intention plus locale correspondant à l'action spécifique de lever la main, d'écrire un nom sur un bulletin ou d'appuyer sur le bouton d'un boîtier.

Les intentions distales sont ainsi des représentations conceptuelles de haut niveau des actions et de leurs buts. Ce sont des représentations conscientes qui résultent souvent de processus explicites de délibération (voter pour ou contre la motion) ou qui, même si elles sont formées sans délibération, sont sensibles à des considérations rationnelles. Par exemple, ayant formé spontanément l'intention de boire un café, je me dirige vers la cuisine et là, voyant l'heure, peux me demander s'il est bien raisonnable de boire encore un café à six heures du soir et décider finalement que non et renoncer à mon intention. Les intentions distales, une fois formées, ont aussi pour fonction d'enclencher un processus de planification, notamment lorsque leur but est complexe et nouveau, ou bien lorsqu'il s'agit de buts pour lesquels on dispose déjà d'un plan d'action (préparer un café), de récupérer en mémoire ce plan. Une intention distale peut ainsi être à la fois le résultat d'un processus de délibération sur les fins (que faire ?) et le point de départ de processus de délibération sur les moyens (comment s'y prendre ?). C'est ainsi au niveau des intentions distales que se situe le lien le plus étroit entre intentions, croyances et désirs, puisque croyances et désirs contraignent ces processus de délibération. Un agent serait irrationnel s'il formait l'intention de poursuivre un but qu'il n'aurait aucune raison de vouloir poursuivre, comme il serait irrationnel s'il formait un plan d'action en contradiction avec ce qu'il croit possible de faire.

b. Les intentions proximales

Aux intentions proximales correspondent des représentations plus fines et plus immédiates de l'action qu'on se propose de réaliser. Une intention proximale spécifie l'action proposée en l'ancrant dans la situation présente et en sélectionnant des programmes moteurs adaptés à cette situation. Si, par exemple, je veux boire un verre d'eau, dans un contexte donné la réalisation de cette intention passera par la formation de l'intention proximale de saisir cette bouteille à ma droite et de verser de l'eau dans le verre qui est devant moi, dans un autre contexte l'intention proximale formée sera d'attraper ce verre sur cette étagère, de le placer sous ce robinet et d'ouvrir l'eau froide. Au niveau des intentions proximales, les représentations de l'action sont ainsi spécifiées plus précisément par l'intégration d'informations perceptives sur la situation qui vont constituer autant de contraintes sur le choix du programme moteur à mettre en œuvre.

c. Les intentions motrices

Enfin, au niveau des intentions motrices, les représentations de l'action deviennent des représentations sensori-motrices détaillées des mouvements dans l'espace et des cibles de ces

mouvements. Les principales caractéristiques de ces représentations, telles que les a analysées Marc Jeannerod, sont les suivantes. Premièrement, ce sont ce qu'il a appelé des représentations pragmatiques qui n'encodent que les attributs ou propriétés des objets (localisation, taille, forme, orientation, texture) qui sont nécessaires à la spécification des mouvements et qui les encodent directement en termes de commandes motrices spécifiant les mouvements du bras de la main et des doigts adaptés à sa géométrie. Deuxièmement, ces représentations des mouvements à effectuer reflètent les règles cinématiques et dynamiques qui gouvernent le fonctionnement du système moteur. Par exemple, les mouvements des membres sont programmés de manière à éviter ou minimiser les positions pénibles ou inconfortables et les torsions extrêmes des articulations. Troisièmement, les représentations motrices ont, comme les autres représentations de l'action, un caractère téléologique et prospectif. Elles ne représentent pas juste des mouvements mais des mouvements finalisés, où le but de l'action détermine l'organisation globale du mouvement. Souvent, un objet donné offre non pas une seule mais plusieurs possibilités d'action, même si certaines sont plus saillantes que d'autres. Par exemple, le mode de saisie sélectionné pour un objet est fonction non seulement de ses caractéristiques géométriques mais aussi de l'usage que l'on veut en faire. On ne saisira pas une paire de ciseaux de la même manière selon que l'on veut s'en servir pour couper quelque chose ou la donner à son voisin.

d. Interactions entre les trois niveaux d'intention

À chaque niveau d'intention s'exercent ainsi des contraintes spécifiques. Les intentions distales intègrent des contraintes de rationalité : en principe, elles doivent être en cohérence avec nos croyances et nos désirs. Les intentions proximales intègrent des contraintes situationnelles et doivent spécifier le but visé d'une manière qui soit cohérente avec le contexte immédiat de l'action. Les intentions motrices intègrent les contraintes liées aux propriétés spatiales et géométriques des objets qui sont la cible de l'action et les contraintes liées à notre corps et notre organisation motrice.

En outre, ces trois niveaux d'intentions forment une cascade intentionnelle, chaque niveau exerçant des contraintes sur le niveau suivant. Ainsi, la représentation de l'action au niveau proximal doit intégrer à la fois les contraintes spécifiées par la représentation du but au niveau distal et des contraintes situationnelles. Il peut cependant y avoir une flexibilité temporelle importante dans la spécification de l'action et le partage des tâches entre intentions distales et intentions proximales. Au niveau distal, il est possible de se contenter de spécifier le but général de l'action mais on peut aussi planifier à l'avance de manière relativement précise quand, où et comment ce but sera implémenté et ainsi anticiper considérablement la forme que prendra l'intention proximale. On réduit ainsi le travail de spécification dévolu à l'intention proximale. Le psychologue Peter Gollwitzer (1950-) a mis en évidence, en 1999, des différences importantes dans le taux de réalisation des buts selon que l'intention distale encode seulement le but général de l'action (intention concernant le but) ou spécifie également comment ce but sera mis en œuvre et la situation dans lequel il le sera (intention d'implémentation). En formant à l'avance une intention d'implémentation nous augmentons largement nos chances de réaliser le but que nous nous sommes fixé. Par exemple, mon intention de prendre chaque jour les médicaments prescrits par le médecin aura plus de chance d'être réalisée si je forme à l'avance l'intention plus précise d'avaler mes comprimés le matin immédiatement après avoir entendu

le bulletin météo à la radio. Selon Gollwitzer, l'efficacité des intentions d'implémentation s'explique par le fait que leur formation déclenche deux séries de processus. Tout d'abord, lorsque nous formons une intention d'implémentation, les représentations mentales d'éléments situationnels pertinents (par exemple, le bulletin météo à la radio) sont fortement activées et deviennent plus accessibles de sorte que ces éléments situationnels sont facilement détectés lorsqu'ils se produisent, limitant les risques d'oubli. Deuxièmement, les intentions d'implémentation créent aussi une association entre ces éléments situationnels et un comportement, rendant le déclenchement de l'action plus immédiat et efficace. D'une certaine manière, former à l'avance une intention d'implémentation revient ainsi à se dispenser de la nécessité de former des intentions proximales endogènes, remplacées par des intentions induites par des stimuli.

Enfin, il importe de souligner que parler d'une cascade intentionnelle ne veut pas dire que les trois niveaux de cette cascade intentionnelle doivent nécessairement être présents pour que l'on puisse parler d'action. Pour qu'un mouvement puisse être considéré comme une action, il faut minimalement qu'il soit contrôlé par une intention motrice, mais une action n'implique pas nécessairement la présence des deux autres niveaux d'intentions. Lorsque je joue machinalement avec mon stylo en réfléchissant à un problème, je n'ai sans doute ni intention distale, ni intention proximale de manipuler le stylo. Il arrive aussi souvent que des intentions proximales soient formées directement en réponse à une situation perçue, sans l'intervention d'intentions distales : par exemple, je vois une boîte de chocolats sur la table et je forme l'intention proximale d'en prendre un, joignant le geste à l'intention. Les intentions proximales peuvent ainsi avoir soit une source endogène, ce qui est le cas lorsque qu'elles font suite à une intention distale, soit une source exogène, lorsqu'elles sont formées en réponse à une sollicitation environnementale.

5. Le contrôle de l'action

Le rôle des intentions ne se limite pas à spécifier progressivement l'action à accomplir jusqu'à ce que cette spécification soit suffisamment précise pour en permettre le déclenchement. Les intentions jouent aussi un rôle dans le guidage et le contrôle de l'action tout au long de son déroulement. Ce contrôle peut s'exercer à différents niveaux et à différentes échelles temporelles. Le contrôle moteur de l'action opère le plus souvent de manière automatique et à une échelle de temps très fine. Par exemple, plusieurs expériences ont montré que, dans une tâche où les sujets doivent pointer rapidement avec le doigt vers une cible qui s'allume, ils peuvent le faire avec précision, même dans des essais où la cible se déplace soudainement de plusieurs degrés après le début du mouvement et où les sujets doivent ajuster leur trajectoire. Ils peuvent aussi pointer correctement alors même qu'ils n'ont pas du tout conscience du déplacement de cible ou de leurs propres corrections de trajectoire. Les chercheurs lyonnais Yves Rossetti et Laure Pisella (Pisella *et al.*, 2000 ; 2006) ont en outre montré que lorsque l'on donnait pour instruction à un groupe de sujets d'interrompre leur mouvement si la cible changeait de place, nombre d'entre eux corrigeaient néanmoins leur trajectoire en direction de la nouvelle position de la cible et exprimaient à la fin de l'essai leur frustration de n'avoir pu s'en empêcher. Ces résultats mettent en évidence l'activation par

défaut d'un système très rapide de correction des mouvements induits par les stimuli, un « pilote automatique », qui échappe au contrôle volontaire.

Dans une autre série d'études menée par Marc Jeannerod et ses collègues, les participants avaient pour tâche de tracer avec un stylet une ligne sur une tablette digitale en direction d'une cible visuelle. Les participants ne voyaient pas directement leur main mais avaient devant eux un écran d'ordinateur où apparaissaient la cible et une ligne correspondant à la ligne tracée par leur stylet. Dans certains essais, un biais directionnel était introduit, la ligne apparaissant sur l'écran étant déviée vers la droite ou vers la gauche par rapport à leur trajectoire réelle. Les résultats de cette expérience ont mis en évidence que tant que le biais restait relativement petit ($< 7^\circ$ d'angle), les sujets corrigeaient automatiquement leur trajectoire pour atteindre la cible, sans avoir conscience ni de la déviation, ni de leur correction. En revanche, lorsque la déviation dépassait ce seuil, les sujets commençaient à prendre conscience de l'anomalie et adoptaient des stratégies conscientes de compensation. Ce changement de stratégie peut être considéré comme correspondant au passage d'une forme de correction motrice automatique opérée au niveau des intentions motrices à une forme de correction situationnelle consciente mettant en jeu les intentions proximales et s'appuyant sur la perception consciente des effets de l'action.

Enfin, l'accomplissement d'une action peut aussi se heurter à des obstacles plus importants qui nécessitent une révision des plans. Supposons que je parte rendre visite à mon collègue lyonnais et qu'en arrivant à la gare je découvre que mon train pour Lyon a été annulé. Je dois alors reconsidérer mes plans, et la manière dont je les révisé doit prendre en compte les raisons qui motivaient mon intention d'aller à Lyon, ainsi que mes croyances sur les options alternatives possibles et sur leurs conséquences éventuelles pour d'autres plans que j'avais. Ce processus de révision opère ainsi à un niveau de contrôle rationnel de l'action. Si mon collègue a d'autres obligations demain et ne peut pas décaler notre rendez-vous plus tard dans la journée, il ne sert à rien que je prenne un autre train qui me ferait arriver trop tard. Si nous pouvons nous voir plus tard dans la journée mais que je doive passer la nuit à Lyon, est-ce compatible avec mes obligations du lendemain ?

L'idée que le contrôle et l'apprentissage moteurs reposent sur des modèles internes de l'agent et de l'environnement externe est au cœur des théories du contrôle de l'action développées ces deux dernières décennies. Cette approche a d'abord été développée par des ingénieurs qui ont proposé des théories computationnelles incorporant l'idée de stratégies de contrôle fondées sur des modèles internes et ont appliqué ces théories dans le domaine de la robotique et du contrôle adaptatif. Il est rapidement apparu que des stratégies similaires sont utilisées dans le contrôle moteur humain.

Ces théories distinguent deux types de modèles internes. Les modèles inverses ont pour rôle de calculer les commandes motrices à exécuter pour passer d'un état actuel à un état désiré. On les appelle modèles inverses parce que leur rôle est de remonter des effets désirés aux causes pouvant les produire. Comme pour beaucoup de problèmes inverses dans différents domaines scientifiques, il existe rarement une solution unique. Les modèles prédictifs ont quant à eux pour fonction de calculer à l'avance et ainsi de prédire les conséquences sensorielles de l'exécution de ces commandes motrices. Le contrôle de l'action dépend alors d'un couplage de ces deux types de modèles par une série de comparateurs, autrement dit des mécanismes qui

comparent deux types de signaux et utilisent le résultat de cette comparaison pour différents types de régulation.

[Figure 1]

Figure 1. Un système de contrôle de l'action basé sur des modèles internes (voir texte pour détails).
Source : image adaptée de Frith, Blakemore et Wolpert, « Abnormalities in the awareness and control of action », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 355, 2000, p. 1771-1788.

La Figure 1 illustre la manière dont ces éléments sont sensés être organisés. Lorsqu'un modèle inverse calcule une commande motrice, une copie de cette commande (la copie d'efférence) est envoyée au modèle prédictif qui en calcule les effets. Un premier type de comparateur a pour rôle de comparer les effets prédits de cette commande avec ses effets désirés. S'ils diffèrent, un signal d'erreur est envoyé au système inverse. Ce mécanisme a une triple utilité. Il permet tout d'abord d'effectuer par anticipation des ajustements et corrections des commandes motrices sans avoir à attendre un feedback sensoriel qui peut être bruité ou retardé et ainsi de maintenir une performance motrice correcte et fluide. Le signal d'erreur renvoyé au système inverse permet aussi d'affiner le calcul des commandes motrices et le choix entre différentes options. Enfin, cette boucle interne entre modèle inverse et modèle prédictif peut être utilisée pour imaginer et simuler mentalement des actions sans les exécuter. Un second type de mécanisme comparateur compare ensuite les conséquences prédites de l'action avec ses conséquences effectives une fois que le feedback sensoriel est disponible. Le résultat de cette comparaison peut être utilisé pour mettre à jour les modèles prédictifs et améliorer la correction et la précision de ses prédictions futures. Cette comparaison sert également à distinguer, parmi les signaux sensoriels reçus, entre ceux qui sont l'effet de l'action (réafférences) et d'autres signaux qui résultent d'événements indépendants (exafférences). Enfin, les signaux d'erreur émanant d'un troisième type de comparaison entre le feedback sensoriel et les effets désirés peuvent être utilisés pour réviser et mettre à jour les modèles inverses et améliorer la performance future. Ce type de comparaison est ainsi important pour l'apprentissage moteur.

Si cette manière de conceptualiser le contrôle de l'action s'est avérée très fructueuse, ce type d'approche a initialement été utilisé essentiellement pour modéliser le contrôle de l'action au niveau sensori-moteur. L'existence d'une hiérarchie de niveaux de représentations et de contrôle de l'action donne toutefois à penser qu'il existe également une hiérarchie de modèles internes inverses et prédictifs qui spécifient l'action à exécuter et ses effets prédits à différents niveaux de granularité. En particulier, lorsque les signaux d'erreurs produits à un niveau donné ne peuvent être réduits par un ajustement fait à l'intérieur de ce niveau, ces signaux seraient propagés au niveau suivant de la hiérarchie.

6. Le contrôle cognitif de l'action

Maintenant que nous avons vu comment le contrôle de l'exécution de l'action peut être mis en œuvre au niveau sensori-moteur, nous pouvons mieux aborder comment, en amont et à un plus haut niveau, la sélection de l'action en fonction des intentions peut être contrôlée sur le plan cognitif.

La théorie du contrôle cognitif formulée en neurosciences stipule que des processus d'auto-supervision et d'évaluation du comportement, de la performance et de l'environnement sont en permanence en œuvre, permettant de détecter des changements éventuels de l'état de l'interaction entre le sujet et le monde pour pouvoir interrompre l'exécution de routines devenues inefficaces, ou de considérer au contraire que la situation justifie la mise en place d'une routine comportementale, ou encore de moduler le déclenchement, l'exécution et le caractère endogène/exogène souhaité de l'action (par exemple, une modulation en fonction de la valeur relative d'actions alternatives ou encore une modulation pour rendre l'action en cours d'exécution plus ou moins insensibles aux stimuli distracteurs extérieurs). Des chercheurs comme Tim Shallice, psychologue au University College London, ou Étienne Koechlin, neurobiologiste à l'École normale supérieure, ont souligné le rôle de différentes parties du cortex préfrontal dans différents niveaux de supervision et de contrôle de la tâche.

Le modèle en cascade d'Étienne Koechlin stipule par exemple que, plus la tâche en cours requiert d'information pour le contrôle de l'action, plus des parties de plus en plus antérieures du cortex préfrontal vont être impliquées. Ce phénomène peut être illustré par l'exemple suivant : si Thérèse est chez elle et que le téléphone sonne, une action de décrochage du téléphone va être déclenchée sur un mode quasi automatique de type stimulus-réponse, n'impliquant pas des zones du cortex préfrontal plus antérieures que le cortex pré-moteur. Si maintenant Thérèse est chez un ami, donc dans un contexte différent, l'activation du cortex dorsolatéral postérieur va être nécessaire pour permettre d'interrompre l'automatisme du décrochage en fonction du contexte. Mais si jamais l'ami dit qu'il va prendre une douche et qu'il demande à Thérèse de décrocher au cas où le téléphone sonne (il s'agit ici d'un épisode dans le contexte), alors le cortex dorsolatéral antérieur de Thérèse va être nécessaire pour dépasser le blocage de l'action de décrochage lié au contexte. Enfin, dans des situations un peu plus complexes où Thérèse doit mettre en suspens la séquence d'actions qu'elle est en train de faire pour atteindre un premier but (elle est par exemple en train de réviser chez son ami en vue d'un partiel), le temps d'exécuter une autre séquence menant au but secondaire consistant à répondre à toute personne appelant, pour après avoir raccroché se remettre là où elle en était dans ses révisions (situation d'embranchement entre séquences d'actions menant à des buts différents), alors le cortex fronto-polaire sera impliqué.

Il est à noter que les processus de supervision de l'action peuvent parfois être conscients et parfois pas. Ceci suggère que des mécanismes cérébraux différents puissent être en jeu, ou que différents niveaux de réverbération des informations liées à la supervision de l'action puissent avoir lieu entre différentes parties du cerveau au sein de ce que Stanislas Dehaene au Collège de France appelle le *global workspace* (cf. chap. XII « Conscience »). Un exemple d'expérience effectuée chez l'humain pour illustrer la distinction entre supervisions consciente et non-consciente consiste à faire taper des sujets sur un clavier et à parfois changer l'affichage à l'écran du résultat de leurs actions. Sans changement du résultat de leurs actions, les sujets sont capables de se rendre compte la plupart du temps lorsqu'ils font des erreurs, et sont également

capables de dire avec une certaine confiance lorsqu'ils ont tapé sans faire d'erreur. À l'inverse, s'ils tapent sur une mauvaise touche mais que l'affichage à l'écran corrige automatiquement l'erreur, ou si les sujets tapent sans erreur mais que l'affichage ajoute automatiquement une faute d'orthographe, alors les sujets diront (après avoir vérifié sur l'écran) qu'ils n'ont pas fait d'erreur dans le premier cas et qu'ils ont mal tapé sur le clavier dans le deuxième cas, comme s'ils s'attribuaient la causalité de ces événements. Pourtant, leur temps de réponse ralentit dans le premier cas, comme si un mécanisme de supervision inconscient avait détecté l'erreur bien que la supervision au niveau conscient nie cette erreur.

La théorie du contrôle cognitif suggère donc que l'action peut être supervisée et contrôlée à différents niveaux, reposant sur différents types d'information intégrée à chaque niveau, différents mécanismes de contrôle, et différents degrés de conscience. Par les activations de différentes parties du cortex préfrontal identifiées dans des situations impliquant différents degrés de contrôle cognitif, ce champ de recherche nous donne de précieuses indications sur la répartition des mécanismes de contrôle cognitif dans différentes parties du cerveau. Néanmoins, pour comprendre plus finement les mécanismes précis permettant la coordination de ces différents niveaux de contrôle, et pouvoir expliquer quand et pourquoi tel ou tel niveau de contrôle sera en œuvre et pas un autre, une étape de modélisation mathématique (correspondant donc à un travail de neurosciences computationnelles) est nécessaire et est actuellement en plein essor dans ce domaine. Ces recherches étant en cours, nous sommes encore loin de pouvoir comprendre tous les mécanismes impliqués. En attendant, on peut déjà regarder du côté des pathologies ou des troubles de l'action, pour chercher des indices de mécanismes précis qui seraient affectés dans telle et telle situation.

Quelques pathologies de l'action

Différents types d'atteintes cérébrales peuvent affecter différents aspects de la préparation ou du contrôle de l'action. L'étude des patients cérébro-lésés présentant ces différents troubles a fait avancer notre compréhension des niveaux d'organisation de l'action et des réseaux cérébraux impliqués.

L'ataxie optique et l'agnosie visuelle

Les patients souffrant d'ataxie optique ont des difficultés à atteindre et saisir correctement des objets qu'ils voient et identifient pourtant clairement. Leurs mouvements sont maladroits et ne sont pas adaptés à la forme, la position et l'orientation de l'objet. Ces patients ne sont plus capables d'opérer les transformations visuomotrices qui guident immédiatement nos mouvements dirigés vers des objets. Le déficit cardinal associé à l'ataxie optique est une atteinte de la voie visuelle dorsale allant du cortex occipital au cortex pariétal et notamment du cortex pariétal supérieur et de la jonction pariéto-occipitale. À l'inverse, dans l'agnosie visuelle, associée à une atteinte de la voie visuelle ventrale qui va du cortex occipital au cortex temporal, on observe une dissociation inverse avec une incapacité à reconnaître visuellement des objets familiers et à identifier des formes simples, bien que les capacités visuomotrices permettant d'atteindre et de saisir des objets avec précision soient préservées. Cette double dissociation a amené les psychologues David Milner et Melvyn Goodale à distinguer, en 1995,

deux systèmes séparés de vision : un système de vision et d'identification consciente dépendant du traitement de l'information effectuée par la voie ventrale et un système de vision pour l'action reposant sur le traitement de l'information opéré de manière relativement indépendante par la voie dorsale. Les progrès de notre compréhension des voies visuelles ont toutefois contribué à remettre en doute l'idée d'une séparation anatomique et fonctionnelle stricte des voies dorsale et ventrale. Des travaux récents ont notamment mis en évidence l'existence de deux sous-voies dorsales : une voie dorso-dorsale qui serait principalement impliquée dans les transformations visuomotrices rapides et une voie ventro-dorsale largement connectée à la voie ventrale et échangeant des informations avec elle.

L'apraxie idéo-motrice

Chez les patients souffrant d'apraxie idéo-motrice, la capacité à atteindre et saisir des objets peut être préservée mais la capacité à manipuler des outils d'une manière adaptée à leur usage est perturbée, de même que la capacité à mimer l'utilisation d'un outil en son absence ou à reconnaître si quelqu'un d'autre manipule correctement ou non un outil. Cette pathologie met en évidence le fait que nos interactions avec des objets ne dépendent pas uniquement de leurs propriétés spatiales et géométriques ; elles dépendent également de leur usage. Par exemple, des outils comme un stylo ou une pipette ont des propriétés géométriques très semblables mais des fonctions très différentes et la manière dont nous les saisissons et les manipulons dépend de leur fonction. Pour les manipuler correctement, il faut ainsi connaître leur fonction et disposer de représentations internes des schémas d'actions associés à cette fonction. L'apraxie idéo-motrice est associée à des atteintes de la voie ventro-dorsale dans l'hémisphère gauche impliquant notamment le lobule pariétal inférieur et le sillon intrapariétal, ce qui suggère que ces régions seraient impliquées dans le stockage de schémas d'utilisation d'objets.

Le syndrome de la main anarchique

Les patients présentant ce syndrome accomplissent avec leur main anarchique des actions finalisées, dirigées vers des objets et bien exécutées, mais sans le vouloir et sans pouvoir inhiber ces actions. Les actions de la main anarchique sont sous la dépendance des sollicitations de l'environnement. La main peut, par exemple, embarrasser le patient en allant piocher de la nourriture dans l'assiette du voisin, exécuter des actions opposées à celles que le patient exécute avec l'autre main, comme fermer un livre dont il tourne les pages avec l'autre main, ou ouvrir un placard que la personne n'avait pas l'intention d'ouvrir. Les patients décrivent souvent leur main comme ayant une volonté propre. Il s'agit ainsi non d'un trouble de la représentation de l'action, puisque les actions sont bien exécutées, mais d'un trouble du contrôle de l'action. Dans sa forme chronique, ce trouble est associé à une lésion de l'aire motrice supplémentaire dans l'hémisphère contra-latéral au membre concerné. L'aire motrice supplémentaire jouerait un rôle important dans la sélection des actions en bloquant notamment l'exécution d'actions induites par l'environnement lorsqu'elles sont en conflit avec les actions voulues par l'agent. Une atteinte unilatérale de l'aire motrice supplémentaire rendrait ainsi impossible l'inhibition des actions du membre contra-latéral à la lésion.

Le syndrome d'utilisation

Ce syndrome, décrit en 1983 par François Lhermitte (1921-1998), manifeste une forme plus extrême de dépendance des actions aux sollicitations de l'environnement. Cette dépendance n'est pas limitée aux actions d'une main, comme dans le syndrome de la main anarchique, mais s'étend à l'ensemble des actions. Par exemple, un patient devant lequel on place un verre et une carafe d'eau, se versera un verre d'eau et le boira, recommençant jusqu'à vider la carafe, même s'il reconnaît ne pas avoir soif. Ou bien encore, si l'on place devant lui une paire de lunettes, il mettra les lunettes, puis si on lui en présente une seconde paire, les mettra à leur tour par-dessus la première paire. S'il entre dans une chambre, la vue d'un lit l'incitera à se déshabiller et se coucher, même s'il ne s'agit pas de sa chambre et même s'il n'est pas l'heure de se coucher. À l'inverse toutefois des patients souffrant du syndrome de la main anarchique, le patient n'exprime aucune surprise, ne se plaint pas d'agir contre sa volonté et ne cherche pas à inhiber ses actions. En l'absence de sollicitations de l'environnement ou de commandes verbales, le patient reste passif et apathique et n'agit pas de manière autonome sur la base d'intentions endogènes. Le syndrome d'utilisation est associé à des atteintes bilatérales des aires frontales médianes et des voies fronto-striatales impliquées dans la formation d'intentions endogènes et le contrôle endogène de l'action. Ces patients semblent ainsi avoir perdu la capacité à former des intentions endogènes.

III. LES NEURONES MIROIRS ET LA RECONNAISSANCE DE L'ACTION

Les neurones miroirs ont été découverts par Giacomo Rizzolatti (1937-), neurobiologiste de l'université de Parme, dans une région du cortex prémoteur (appelée l'aire F5) chez le singe macaque. Cette zone contient des neurones qui sont actifs juste avant et pendant que l'animal exécute une action particulière, par exemple pincer un objet avec ses doigts, ou saisir un objet avec l'ensemble de la main. Parmi cet ensemble de neurones, un sous-ensemble constitue ce qu'on appelle les « neurones miroirs » qui répondent aussi bien quand l'animal exécute une action particulière que quand il observe cette action être effectuée par un autre agent. De façon particulièrement intéressante, ces neurones ne répondent pas en lien avec l'exécution ou la perception d'une séquence motrice particulière (par exemple, le fait de refermer la main) mais bien avec l'action liée à un but particulier (refermer la main sur un objet afin de le saisir). En effet, un même neurone miroir répondant pour l'action de saisir un objet s'activera aussi dans le cas où l'animal voit l'objet être saisi par l'intermédiaire d'un outil (par exemple, une pince), même si la pince est inversée de sorte que l'expérimentateur doit presser la pince pour l'ouvrir, et doit relâcher la pression (donc ouvrir les doigts de la main) pour que la pince se referme sur l'objet (donc même lorsque l'acte moteur est inversé pour effectuer l'action).

La découverte des neurones miroirs vient joliment illustrer les théories sensori-motrices de la perception, notamment l'idée que percevoir les actions effectuées par autrui implique la simulation mentale de ces actions. Du point de vue du substrat neural, cela suggère que la perception des actions d'autrui passe par l'activation des zones cérébrales impliquées dans la génération du programme moteur dédié à l'exécution de ces mêmes actions. Cette idée implique

que chaque primitive motrice, *i. e.* le programme moteur correspondant à chaque action que l'agent a appris à réaliser, a une représentation neurale spécifique, et que ces mêmes primitives peuvent être reconnues et activées lorsque l'on observe le comportement de nos congénères.

Cette découverte est considérée comme un des résultats majeurs de ces vingt dernières années en neurosciences cognitives. Elle a ouvert la voie à une meilleure identification des mécanismes cérébraux permettant la compréhension de l'action, de l'intention et du but d'autrui dans un contexte social. Elle a également ouvert la voie au développement de nombreux modèles computationnels visant à permettre à un robot d'apprendre par imitation, en s'appuyant sur la reconnaissance des actions effectuées par autrui grâce à des neurones miroirs artificiels simulés ou simplement en reprenant le principe computationnel.

Néanmoins, si la découverte des neurones miroirs a inspiré un nombre important de travaux en neurosciences cognitives et en robotique et contribué à la compréhension des mécanismes impliqués dans la perception d'autrui, les neurones miroirs ont aussi été vite surinterprétés. Ils ont notamment alimenté des spéculations sur les bases neurales de la cognition sociale et de la théorie de l'esprit (cf. chap. XIII « Émotions »). La théorie de l'esprit renvoie à la faculté de se représenter les états mentaux des autres et à adopter la perspective d'autrui. Comme le soulignent certains critiques, en particulier les philosophes et neuroscientifiques Pierre Jacob et Marc Jeannerod (2005), la réponse des neurones miroirs peut au mieux être vue comme un processus cognitif social au sens faible, et la simulation mentale motrice n'est ni suffisante ni nécessaire pour la compréhension des actions d'autrui.

Leur premier argument tient au fait que même si les neurones miroirs d'un singe répondent lors de la perception d'un congénère en train de saisir un fruit, il n'y a pas forcément d'intention de communication entre les deux individus, et ceux-ci ne sont donc pas nécessairement impliqués dans un processus social de communication.

Leur deuxième argument contre la simulation mentale comme mécanisme à la base de la compréhension d'autrui repose sur la distinction entre intentions motrices et intentions préalables. En effet, les philosophes ont depuis longtemps distingué les actions basiques et intentions motrices (par exemple, appuyer sur un interrupteur avec son doigt) des actions non basiques et intentions préalables (par exemple, allumer la lumière). Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, la simulation mentale des mouvements d'un autre agent peut être suffisante pour comprendre ses intentions motrices, mais pas ses intentions préalables, ses intentions sociales, ou encore ses intentions communicatives. Dans l'exemple considéré, l'intention préalable d'exécuter l'action non basique d'allumer la lumière peut mener à former l'intention motrice d'effectuer l'action basique d'appuyer sur l'interrupteur. Selon Jacob et Jeannerod (2005), voir un agent appuyer sur l'interrupteur avec son index droit cause automatiquement une représentation motrice chez l'observateur qui correspond à la même représentation motrice guidant l'exécution de l'action chez l'agent observé. Néanmoins cela n'est pas suffisant pour comprendre l'intention préalable de l'agent observé. Un autre exemple implique Dr Jekyll et Mr Hyde : lorsque le premier ouvre le corps d'un patient avec un scalpel pour l'opérer et lorsque le second ouvre le corps d'une victime avec un scalpel pour la blesser, le geste moteur perçu est le même, mais l'intention préalable est différente.

On pourrait toutefois objecter à Jacob et Jeannerod que le fait que certains neurones miroirs répondent moins pour le geste moteur (refermer sa main sur un objet pour le saisir, dans

l'exemple pris plus haut) que pour l'action liée à un but (saisir un objet, même si cela implique de desserrer ses doigts sur une pince inversée) suggère que les neurones miroirs puissent bel et bien contribuer à la formation de représentations d'intentions préalables. Jacob et Jeannerod ont néanmoins raison de souligner que les neurones miroirs restent un phénomène cognitif social faible dans le sens où l'activité de ces neurones n'inclut rien sur les représentations concernant l'intention sociale ou communicationnelle de l'agent effectuant l'action, qui sont des informations cruciales à l'action conjointe, comme nous le verrons dans la dernière partie du chapitre.

[Figure 2]

Figure 2. Exemple de figures géométriques utilisées dans le film de Heider et Simmel (1944) montrant du mouvement apparent et toute une narration sur les actions et interactions d'agents. Ici le grand triangle, le petit triangle et le disque sont trois agents qui peuvent ouvrir la porte de la maison, se pourchasser, se menacer, fuir, etc.

Le dernier argument porté par Jacob et Jeannerod (2005) est que la simulation mentale du geste moteur n'est même pas nécessaire pour comprendre les actions perçues, et qu'une part significative de la cognition sociale humaine repose sur un système social perceptuel dont les bases neurales ont des propriétés perceptuelles mais non motrices. Un très bon exemple est celui des expériences des psychologues Fritz Heider (1896-1988) et Marianne Simmel (1923-2010), illustrées à la Figure 2, au cours desquelles des sujets observent des figures géométriques sans aucun aspect humain ou animal (simplement des ronds, des triangles) bouger et interagir de façon à raconter une histoire (cf. chap. XIII « Émotions »). Les adultes observant ces figures géométriques attribuent systématiquement des émotions et des intentions sociales à ces stimuli en mouvement, décrivant leurs intentions par des verbes comme « chasser », « attaquer », « caresser » ou « réconforter ». Il a également été montré que des enfants de 3-4 ans répondent comme les adultes face à ces stimuli. Enfin dans une tâche similaire, des enfants de 12 mois pouvaient attribuer des buts à un triangle et un carré perçus respectivement comme « aidant » ou « faisant obstacle » à un rond montant le long d'une pente, puis émettre a posteriori des préférences claires pour le triangle par rapport au carré. Dans ces exemples, il est évident que la perception d'intentions sociales chez des formes géométriques ne repose pas sur une simulation motrice, puisqu'il semble difficile de simuler mentalement les mouvements d'un triangle. Il existerait donc des mécanismes permettant la compréhension des intentions d'autrui qui ne font pas appel à la simulation mentale des propriétés motrices des actions.

IV. UN DEFI : AGIR ENSEMBLE

L'espèce humaine se caractérise par son extrême socialité et par la capacité qu'ont les agents humains à coopérer et agir ensemble. La plupart des grandes réalisations humaines sont le produit de cette capacité. Dans la vie quotidienne, nombre de nos actions sont aussi des actions conjointes ou collectives : nous nous serrons la main, nous poussons ensemble une voiture en panne, nous jouons au football, nous chantons en chœur. On parle d'actions conjointes quand deux individus ou plus coordonnent leurs activités pour atteindre un but et plutôt d'actions collectives lorsqu'un grand nombre d'agents sont impliqués. Les sciences cognitives se sont longtemps concentrées sur les mécanismes et processus impliqués dans l'action individuelle, mais depuis quelques années, l'action conjointe ou collective fait l'objet d'un intérêt croissant dans un large spectre de disciplines cognitives allant de la philosophie et de la psychologie aux neurosciences sociales et à la robotique.

Une action conjointe n'est pas simplement une collection d'actions individuelles (cf. chap. III « De l'individu au collectif »). Il ne suffit pas que deux personnes marchent en même temps dans la rue pour qu'elles marchent ensemble. Intuitivement, elles ne marchent ensemble que si elles partagent le but ou l'intention de marcher ensemble. Mais qu'est-ce exactement que partager un but ou une intention ? Comment caractériser précisément cette intentionnalité partagée qui est au fondement de notre vie sociale ? Comment pouvons-nous partager des buts, des intentions et des croyances étant donné que nos esprits et nos cerveaux ne sont pas littéralement joints ? Comment pouvons-nous agir de manière coordonnée alors que nos corps sont séparés et que chacun ne peut mouvoir et contrôler que son propre corps ? En quoi les processus cognitifs, perceptifs et moteurs qui sous-tendent l'action conjointe se distinguent-ils des processus qui sous-tendent l'action individuelle ?

La question de l'agir ensemble pose ainsi à la fois des défis conceptuels et des défis empiriques. Les analyses proposées dans la littérature philosophique récente ont mis en évidence certaines des propriétés distinctives des intentions partagées tandis que des travaux empiriques ont mis en lumière certains processus et mécanismes impliqués dans la coordination entre agents. Toutefois, il nous manque encore beaucoup de pièces de ce puzzle comme il nous manque encore un cadre théorique intégratif nous permettant de comprendre comment ces pièces s'assemblent.

1. Analyse philosophique de l'action conjointe

Les analyses philosophiques de l'action conjointe ont eu tendance à se concentrer sur les conditions requises pour que l'on puisse parler d'intentions partagées et sur les processus susceptibles d'être impliqués dans leur formation et dans la planification de haut niveau. Les philosophes s'accordent généralement pour penser que ce qui distingue les actions conjointes des actions individuelles est la présence d'intentions partagées qui sont essentielles pour comprendre la coordination entre agents. Ce consensus apparent cache toutefois de profonds désaccords sur ce qui caractérise une intention partagée et la distingue d'une intention individuelle et sur la nature plus ou moins radicale de cette différence. Les intentions partagées

se distinguent-elles des intentions individuelles par leur contenu, par les attitudes qu'elles mettent en jeu, les modes de raisonnement impliqués dans leur formation ou encore par la forme particulière de normativité qu'elles impliquent ? Doit-on suivre Margaret Gilbert (2014) qui soutient que les intentions partagées font nécessairement intervenir des engagements conjoints des participants, créant ainsi entre eux un réseau mutuel d'obligations, ou estimer avec Michael Bratman (2014) que ce qui les caractérise est l'interdépendance qu'elles impliquent entre les intentions individuelles des différents agents et l'imbrication du contenu de ces intentions individuelles ? Les différentes analyses proposées sont-elles incompatibles ou plutôt complémentaires, illustrant les différentes formes que peut prendre une intention partagée ?

Le succès d'une action conjointe dépend de la coordination efficace des intentions et plans d'action des agents. Il ne suffit pas que les agents aient un but commun, ils doivent aussi coordonner leurs propres plans d'action avec ceux de leurs partenaires pour avoir un plan conjoint cohérent. Selon l'analyse très influente de Bratman, ces contraintes contribuent à définir ce qu'est une intention partagée. Pour que l'on puisse dire que Jérôme et Anne ont l'intention partagée de préparer le dîner ensemble, il ne suffit pas que chacun ait cette intention, il faut encore que chacun ait l'intention que les intentions de l'autre contribuent à la réalisation de cette activité conjointe et donc que Jérôme ait l'intention que ses intentions et sous-plans respectifs concernant la préparation du dîner concordent et s'harmonisent avec ceux d'Anne et vice-versa. S'ils veulent préparer un dîner ensemble mais que chacun tient à s'occuper du dessert et non du reste, ils n'ont pas encore d'intention partagée. La formation d'une intention partagée suppose donc une réceptivité de chacun aux plans et intentions de l'autre en vue de leur harmonisation et de leur subordination cohérente au plan d'ensemble de l'action conjointe. Ceci serait rendu possible par des processus de coordination de haut niveau impliquant la communication des intentions, la négociation des plans, la délibération et le raisonnement collectifs.

Ce type d'approche philosophique rencontre toutefois deux limites importantes. D'une part, les intentions partagées ainsi conçues apparaissent très coûteuses en ressources cognitives. Leur formation demande des capacités représentationnelles, conceptuelles et communicationnelles avancées et met en jeu des processus de raisonnements sophistiqués. Toutes nos actions conjointes impliquent-elles nécessairement de tels processus ? Le fait que de jeunes enfants et, dans certains cas, des membres d'autres espèces animales soient capables d'agir ensemble peut nous amener à en douter. D'autre part, le succès des actions conjointes ne dépend pas seulement de la coordination préalable des intentions, il suppose aussi souvent une coordination fine des actions des agents pendant l'exécution de l'action.

2. Analyse psychologique de l'action conjointe

À la différence des analyses philosophiques, les travaux des psychologues se sont plutôt penchés sur les processus qui permettent aux individus d'aligner leurs représentations cognitives, perceptives et motrices et ainsi de se coordonner de manière précise et flexible en cours d'action. Comme l'ont proposé Günther Knoblich, Stephen Butterfill et Natalie Sebanz dans leur revue de ces travaux (Knoblich *et al.*, 2011), les processus qui ont été étudiés peuvent

se ranger en deux grandes catégories : les processus de coordination émergents et les processus de coordination intentionnels ou dirigés vers un but.

Dans la coordination émergente, des comportements coordonnés apparaissent du fait de mécanismes de couplage automatique entre perception et action qui conduisent les agents à agir de manière similaire. En d'autres termes, la perception des actions de l'autre peut induire un couplage entre les actions de deux agents en interaction. En outre, ces processus de couplage peuvent être activés indépendamment de l'existence de buts ou d'intentions partagés.

Parmi ces processus, les processus d'entraînement moteur ont été largement étudiés (Schmidt *et al.*, 2011). Par exemple, deux personnes assises sur des fauteuils à bascule auront tendance à synchroniser spontanément leur balancement ou deux personnes qui marchent côte à côte à synchroniser spontanément leur marche. De la même manière, deux personnes en conversation auront tendance à synchroniser leur débit verbal, gestes et postures (comme par exemple le fait de croiser les bras conjointement sans s'en rendre compte). La perception d'affordances communes constitue un second mécanisme de coordination émergente. L'arrivée d'un bus à l'arrêt de bus ou la présence d'un abri alors qu'il se met à pleuvoir peuvent induire les mêmes comportements chez plusieurs agents qui perçoivent les possibilités d'actions qui leur sont liées (monter dans le bus, s'abriter de la pluie). La mise en correspondance automatique entre perception en action, liée au fait que l'observation d'une action active une représentation correspondante dans le répertoire d'actions de l'observateur (cf. *supra*, section II), peut aussi induire des tendances à l'action similaires chez les agents concernés. Ceci a parfois des effets cocasses, comme lorsque deux personnes cherchant à se croiser dans un couloir étroit s'écartent toutes les deux dans la même direction et oscillent ensemble de droite à gauche jusqu'à ce que l'une d'entre elles rompe finalement cette symétrie des mouvements. L'activation chez l'observateur d'une représentation d'action similaire à l'action observée peut en outre lui permettre d'engager ses propres modèles prédictifs de l'action et ainsi d'anticiper ce que l'autre va faire. Même si l'activation de tels processus ne dépend pas spécifiquement de l'existence d'un but partagé par les agents, il ne fait guère de doute que la coordination émergente facilite l'action conjointe en induisant des comportements similaires et mutuellement prédictibles.

Dans la coordination intentionnelle ou dirigée vers un but, les agents planifient leurs propres actions en fonction du but visé par l'action conjointe et aussi, au moins en partie, en fonction des actions de leurs partenaires. Les représentations partagées de la tâche à accomplir jouent ainsi un rôle important dans la coordination entre agents. En spécifiant à l'avance le rôle respectif de chaque agent, elles permettent à chacun d'anticiper ce que vont faire ses partenaires et facilitent ainsi la coordination interpersonnelle pendant le déroulement de l'action. Des études empiriques ont mis en évidence l'influence de ces représentations partagées sur le traitement de l'information perceptive, et sur le suivi et le contrôle de l'action pendant l'interaction. Par exemple, les sujets ont tendance à prédire les conséquences sensorielles non seulement de leurs propres actions mais aussi de celles de leurs partenaires et à surveiller et détecter non seulement leurs propres erreurs mais aussi celles des autres. En outre, cette tendance est activée de manière quasi automatique et s'observe même lorsqu'il est plus efficace d'ignorer ce que fait l'autre.

On a ainsi pu mettre en évidence une version sociale de l'effet Simon. Dans une tâche où un sujet doit répondre en appuyant sur le bouton droit lorsqu'un stimulus vert apparaît à l'écran et sur le bouton gauche lorsqu'il s'agit d'un stimulus rouge, le temps de réaction des sujets est plus lent et ses réponses plus souvent incorrectes lorsque le stimulus apparaît dans la partie de l'écran opposée à la réponse (par exemple, stimulus vert apparaissant dans la moitié gauche de l'écran et auquel le sujet doit répondre en appuyant sur le bouton droit). Cet effet, qui est lié à un conflit dans la sélection de réponses, est appelé « effet Simon », du nom de son découvreur. L'effet disparaît lorsque la tâche du sujet est simplement d'appuyer sur le bouton droit quand un stimulus vert apparaît et de ne rien faire sinon. Natalie Sebanz et ses collègues (Sebanz *et al.*, 2005) ont montré que l'effet réapparaît dans une version sociale de la tâche dans laquelle l'un des participants est chargé d'appuyer sur le bouton droit en présence d'un stimulus vert et l'autre sur le bouton gauche en présence d'un stimulus gauche. Il semble ainsi que les participants représentent non seulement l'action dont ils ont la charge, mais aussi l'action dont leur partenaire a la charge, ce qui recrée un conflit de sélection, appelé « effet Simon social ».

L'existence d'un but partagé peut aussi induire une forme de co-représentation perceptive, les agents prenant en compte la perspective de leur partenaire, ce qu'il peut ou non percevoir et ce à quoi il est attentif. Une étude réalisée par Susan Brennan et ses collègues (Brennan *et al.*, 2007) a ainsi montré dans une tâche conjointe de recherche visuelle où les participants devaient détecter le plus rapidement possible si un « O » était présent ou non sur un écran d'ordinateur rempli de « Q », que ceux-ci étaient capables de diviser entre eux l'espace de recherche en prenant en compte la direction du regard de leur partenaire, leur performance étant ainsi bien meilleure que dans une version individuelle de la tâche.

Si les travaux qui viennent d'être évoqués nous donnent une idée de la richesse et de la diversité des processus impliqués dans la réalisation d'actions conjointes, nous sommes encore loin d'une compréhension à la fois globale et précise de tous les processus qui y contribuent. Premièrement, nous comprenons encore mal la nature des synergies entre les processus émergents et les processus intentionnels de coordination que font intervenir la plupart des actions conjointes. Deuxièmement, nous n'avons pas encore une vision claire des étapes par lesquelles les jeunes enfants apprennent à agir ensemble avec des adultes ou avec d'autres enfants et de la nature des liens entre le développement de la capacité à agir ensemble et le développement de capacités cognitives comme le langage et la communication ou la théorie de l'esprit, même si plusieurs pistes sont explorées. Les psychologues Gergely Csibra et György Gergely de la Central European University à Budapest ont ainsi proposé que les mécanismes cognitifs qui permettent la transmission des connaissances culturelles via la communication entre individus forment un système de « pédagogie naturelle », représentant une adaptation évolutionnaire qui serait spécifique à l'espèce humaine. Troisièmement, notre compréhension des bases neurales de l'intentionnalité partagée reste à ce jour limitée. Enfin, le débat sur l'origine phylogénétique de cette capacité à agir ensemble demeure très ouvert, comme l'est la question de savoir en quoi cette capacité serait distinctive de notre espèce. Par exemple, notre plus grande propension à agir ensemble que d'autres espèces de primates tient-elle essentiellement à ce que nous sommes plus motivés à coopérer ou bien plutôt à ce que nous avons les aptitudes cognitives à l'intentionnalité partagée qui leur font défaut ?

V. UNE APPLICATION ROBOTIQUE : LA MARCHE

Comme souligné précédemment dans ce chapitre, les recherches en robotique peuvent parfois s'inspirer de découvertes en psychologie et en neurosciences pour les appliquer à l'amélioration des capacités d'apprentissage ou d'action des robots. Dans l'exemple des neurones miroirs, les applications visent le plus souvent à permettre à des robots d'apprendre par imitation, en observant les actions effectuées par autrui (par exemple, un sujet humain ou un autre robot).

Les applications robotiques des théories liées à l'action ou à l'apprentissage vont bien sûr bien au-delà des seuls neurones miroirs. Certains travaux robotiques cherchent à imiter la façon dont le cerveau coordonne différents niveaux d'action (planifier une séquence de déplacements jusqu'à une zone but tout en évitant les obstacles rencontrés en chemin), différents niveaux d'apprentissage (apprendre les conséquences dans l'environnement des actions du robot ; apprendre des associations stimulus-réponse permettant d'atteindre un but), ou différents niveaux de contrôle (mémoriser que certains lieux familiers peuvent permettre l'exécution d'actions routinières ; superviser en permanence sa propre performance pour décider quand interrompre des routines devenues inefficaces).

Les recherches en robotique cognitive ne visent néanmoins pas seulement à mettre en application des idées venues d'autres disciplines des sciences cognitives mais aussi à servir de plateforme de test d'hypothèses biologiques ou psychologiques. En effet, un certain nombre de chercheurs en robotique se servent du robot comme modèle d'un certain type de comportement, ou d'un certain mécanisme cérébral pour vérifier que ce comportement ou ce mécanisme peuvent fonctionner comme on le suppose lorsqu'ils sont simulés sur un robot. La robotique peut en effet aider à illustrer les limites de certains modèles ou de certaines théories (lorsque le modèle issu de la biologie ne fonctionne pas sans aménagement ou modification sur le robot), et en même temps ces travaux peuvent donner naissance à de nouvelles hypothèses lorsqu'une solution inédite est trouvée sur le robot.

Nous allons dans cette partie illustrer ce double caractère applicatif et générateur de nouvelles hypothèses par l'exemple de la marche bipède. La marche bipède est un bel exemple d'action rythmique complexe, dont les mécanismes ne sont pas encore parfaitement compris, mais pour laquelle les échanges entre neurosciences et robotique de ces dernières années ont enrichi notre vision des choses.

1. La marche bipède en robotique

Contrairement aux mammifères quadrupèdes qui marchent quelques heures après leur naissance, les bébés humains mettent en moyenne plus de douze mois à apprendre à marcher, après un long processus d'essai-erreur, de nombreux échecs et chutes, et différentes phases intermédiaires de locomotion comme ramper et marcher à quatre pattes. Et encore ! Même après avoir commencé à être capables de marcher, nous marchons gauchement encore de longs mois, déstabilisés par la moindre inclinaison du sol, la présence d'aspérités, de renforcements ou

d'obstacles de quelques centimètres. Qui n'a pas déjà vu « la machine s'emballer » quand un enfant de 2 ans se met à accélérer ses pas jusqu'à perdre la synchronisation entre ses jambes puis l'équilibre et tomber ? Comment se fait-il alors qu'à l'âge adulte nous soyons parfaitement capables de marcher à différentes vitesses, en avant comme en arrière, sur différents types de sol, de monter ou descendre des escaliers sans réfléchir, en tenant des objets en équilibre dans nos mains tout en parlant à un autre individu ? Comment notre cerveau réussit-il à organiser cette action aussi complexe et à gérer toutes les perturbations possibles ? Fait-il une succession de calculs très rapides (par exemple, toutes les 10 millisecondes) pour constamment analyser le mouvement, l'environnement, la présence éventuelle d'obstacles et corriger en conséquence la commande à envoyer à nos muscles ? Après de nombreux essais dans ce sens, certains roboticiens ont compris qu'il était très coûteux en énergie et très peu efficace de s'y prendre ainsi. En effet, les premiers travaux en robotique ont abordé la marche comme un problème de contrôle fondé sur un formalisme de mécanique du solide, pour lequel il fallait à chaque instant connaître la position et la vitesse de chaque articulation des jambes et du bassin pour ensuite déduire la vitesse angulaire à appliquer à chacune de ces articulations pour que le robot fasse un pas et ainsi atteigne une position désirée. Si aucun événement inattendu ne se produit dans l'environnement et qu'on a un bon modèle du corps et des moteurs du robot, on peut parfaitement faire marcher un robot d'un point à un autre avec cette méthode. On peut même faire des calculs très précis de l'énergie qui sera dépensée par cette action. Bien que les calculs lourds nécessaires à ce genre de méthode génèrent de longs temps de réflexion du robot avant d'agir, des améliorations récentes permettent d'accélérer le processus de contrôle par des modèles prédictifs, en maintenant une prédiction calculée à partir d'un modèle sur les futurs déplacements du robot sur un horizon de taille variable. On retrouve ici l'idée que le contrôle de certaines des actions peut être amélioré par anticipation des conséquences de l'action, comme nous l'avons discuté plus haut.

Néanmoins, de nombreuses tentatives pour faire marcher un robot bipède ont rencontré des difficultés dès lors que le sol présentait un petit obstacle non prévu à l'avance (comme quand le robot doit marcher sur un câble électrique), ou une petite marche de moins d'un centimètre pour laquelle il ne faut ni déclencher une action de monter d'escalier, ni continuer à marcher comme sur un sol plat. Dans de tels cas, la chute du robot est parfois inévitable et tout le comportement intelligent et complexe qui était programmé pour la suite ne sera jamais exhibé par le robot. Pourtant, ce type de situations semble facilement gérable dans le cas de la marche chez l'humain (au moins chez l'adulte).

Ces approches présentent un autre défaut : le type de marche qu'elles produisent sur le robot ne paraît souvent pas « naturelle » pour un observateur humain. Le robot marche les jambes pliées pour avoir le centre de gravité bas et stable, le buste complètement droit et rigide, et les bras immobiles ne faisant pas de mouvement de balancier comme on peut l'observer chez l'humain. Si ce dernier défaut paraît à première vue superficiel, il témoigne d'une omission plus profonde : celle de la contribution de l'ensemble du corps au mouvement et à l'équilibre pendant la marche.

D'autres travaux en robotique ont révolutionné la manière d'envisager la marche sur un robot. Il s'agit des travaux sur ce qu'on appelle les marcheurs passifs dynamiques. Sans ordinateur ni capteur, une simple paire de « jambes » métalliques reliées entre elles, avec

chacune une jointure en guise de genou, peut produire une marche rythmique d'apparence naturelle lorsqu'elle est posée sur un plan incliné¹. Ce type de marche peut continuer quasiment sans fin lorsque ce type de « robot » est posé sur un tapis roulant. Ce qui est en tout cas remarquable, c'est que cette marche est « auto-organisée » : elle émerge de l'interaction mécanique de chacune des parties métalliques du « robot » avec le plan incliné et la force de la gravité. Cela illustre joliment comment le corps peut contribuer à l'action, et plus généralement à la cognition.

2. Neurosciences de la marche bipède

Du côté des neurosciences, de nombreux travaux ont cherché à comprendre les mécanismes neuraux permettant le contrôle de la marche, mais également les principes comportementaux permettant de décrire la marche chez l'humain. Une question fondamentale a par exemple été de savoir quelle partie du corps sert de cadre de référence mobile pour contrôler la marche. La question est d'autant plus importante qu'elle implique des enjeux de stabilité du corps. La marche humaine est-elle organisée de façon à stabiliser les pieds lors du contact sur le sol ? Ou bien à stabiliser le centre de gravité du corps, le tronc ou encore la tête ?

Bien que tout le corps humain soit en mouvement pendant la marche et que cela engendre des mouvements rythmiques des jambes, des bras et du tronc, en alignant les trajectoires par rapport à la tête on se rend compte que la hauteur des yeux reste globalement stable pendant la marche. De plus, il est maintenant bien établi que la tête et le regard anticipent les changements de direction du corps pendant la marche. Ceci suggère que c'est bien la tête qui sert de cadre de référence mobile pour le contrôle spatial des mouvements du corps pendant la marche.

Lorsque des sujets humains marchent vers un but, par exemple pour atteindre ou passer une porte, il existe une forte variabilité des placements des pieds, mais la trajectoire globale du corps est stéréotypée et stable. Ceci rappelle d'une autre façon la conclusion que la marche ne doit pas être seulement considérée au niveau des pas à effectuer mais plutôt au niveau de la trajectoire d'ensemble du corps. Ces observations rendent peu vraisemblable l'hypothèse que le cerveau planifie la trajectoire du corps pendant la marche comme une succession de pas. Cela suggère au contraire qu'un principe plus global de contrôle de la trajectoire est en jeu pendant la marche, comme c'est également le cas pendant d'autres types de mouvements orientés vers un but comme les mouvements de la main. Ce principe d'une programmation globale du mouvement est illustré par un exemple dans la Figure 3. Il s'agit de ce qu'on appelle en anglais le *minimum jerk*, ou son équivalent le *maximum smoothness*, et qui revient à minimiser la dérivée de l'accélération pour minimiser les à-coups et maximiser la « douceur » de la trajectoire. De façon cohérente avec ce principe, l'équipe d'Alain Berthoz au Collège de France a observé qu'il y avait une forte corrélation entre la courbure de la trajectoire amorcée par les sujets et la vitesse de marche pendant ces trajectoires (Hicheur, Pham, Arechavaleta, Laumond et Berthoz, 2007).

¹. Des vidéos de ces robots sont accessibles sur Internet en cherchant avec les mots clés « Passive Dynamic Walker ».

[Figure 3]

Figure 3. Phrase écrites lorsque le stylo était tenu dans a) la main droite, b) la main gauche, c) la bouche (entre les dents), d) pliure du coude droit. Malgré cette différence de réalisation musculaire, la forme globale reste très similaire.

Enfin, une autre caractéristique importante de la marche humaine est qu'elle implique un balancement rythmique du corps d'une jambe sur l'autre de façon à susciter une série de petits déséquilibres qui sont rétablis par le pas suivant. Lorsque la marche devient rapide, ou lors de la course, le corps en vient à ne plus avoir de contact avec le sol pendant de petits intervalles répétés. La marche bipède semble ainsi fournir un bel exemple validant la proposition théorique du neuroscientifique Scott Kelso (1947-) que les comportements complexes des êtres vivants constituent un système dynamique en interaction avec l'environnement. Néanmoins, il est important ici de comprendre comment des déséquilibres répétés peuvent garantir une stabilité de la tête et du regard pendant la marche et de déterminer si ces mécanismes sont les mêmes que ceux mis en jeu pendant la course.

3. Modèles computationnels de la marche bipède

Pour comprendre les mécanismes précis impliqués dans le contrôle de la marche, la simulation numérique de modèles computationnels (ou modèles mathématiques) peut être d'une grande utilité. Manoj Srinivasan et Andy Ruina de Cornell University ont simulé en 2006 un modèle bipède minimal dans lequel l'unique degré de liberté de chaque jambe était une sorte de ressort permettant à la jambe de s'allonger et de se rétracter. Ils ont utilisé une méthode d'optimisation numérique pour trouver des allures de mouvement qui minimisent le coût énergétique du modèle. Ils ont trouvé plusieurs régimes de fonctionnement, en fonction de la vitesse de marche et de la longueur des pas souhaités. À faible vitesse, le modèle produit une marche rythmique classique dite de type « pendule inversé ». À vitesse intermédiaire, le modèle produit une course impulsive par rebondissement à chaque pas. Enfin, à vitesse élevée, le modèle retrouve une locomotion rythmique pendulaire qui inclut la marche et la course comme cas extrêmes, selon les autres paramètres du modèle. Bien que ce modèle soit très simple et qu'il puisse générer une infinité d'allures intermédiaires entre ces exemples, ce travail suggère qu'un simple principe de minimisation d'énergie peut pousser des agents bipèdes à privilégier la marche et la course comme choix de modes de locomotion bipède.

Enfin, mentionnons que des tests sur robot de modèles mathématiques tels que celui décrit précédemment permettent de modéliser la marche de façon plus globale, en rendant compte de l'interaction entre différents niveaux de contrôle du mouvement. On peut par exemple contrôler un robot par un modèle neuro-mimétique, sous forme de réseau de neurones, dans lequel les niveaux inférieurs contrôlent les interactions entre les muscles et la moelle épinière, qui fonctionnent rythmiquement de façon autonome, et un niveau supérieur (par exemple, cortical) n'intervient que de manière ponctuelle, pour adapter la trajectoire au mouvement souhaité ou permettre un apprentissage lié à une tâche donnée. Les niveaux inférieurs du contrôle

locomoteur sont en effet très souvent modélisés sous forme de petit réseau de neurones, appelé *central pattern generator*, parfois traduit en français par réseau locomoteur spinal, permettant de générer une activité rythmique sans feedback sensoriel. Après avoir été activé par le cortex, ce type de réseau représentant un groupe de neurones situés dans la moelle épinière, peut entretenir seul une activité locomotrice par alternance entre augmentation et diminution d'activité entre les sous-éléments qui le constituent et par retour périodique à l'état de départ. Dans ce cas, le programme informatique qui contrôle le robot considère que l'activation d'au moins un cycle périodique du *central pattern generator* est une action qui peut être déclenchée alternativement avec des actions plus « discrètes » (*i. e.* non périodiques) telles que lever le bras du robot, tourner la tête, etc.

Combiner ce type de contrôle rythmique bas niveau avec un niveau supérieur peut permettre par exemple à un robot d'apprendre par imitation certains mouvements de marche réalisés par l'humain. Cela permet en tout cas de proposer des hypothèses concrètes et formelles sur la manière dont différents niveaux peuvent interagir au sein d'une architecture neurale reliant différentes boucles sensori-motrices. Du chemin reste encore à parcourir pour tester expérimentalement certaines hypothèses émanant des modèles et valider, réfuter ou réviser ces modèles en fonction des résultats.

Cet exemple de la marche bipède, une action d'apparence simple, montre à quel point il est compliqué d'expliquer et de modéliser l'action. L'étude de la marche bipède est en tout cas un bel exemple de recherches interdisciplinaires, mêlant des travaux de différents domaines des sciences cognitives – la robotique, les neurosciences, les sciences du mouvement –, et convergeant pour décrire et expliquer les contraintes, processus et substrats neuraux de ce comportement typiquement humain.

VI. CONCLUSION

En conclusion, nous avons vu dans ce chapitre que bien que les différentes disciplines n'emploient pas la même terminologie ni les mêmes méthodes pour caractériser l'action, toutes convergent vers l'idée que l'action peut prendre de multiples formes. Nous avons vu que la dichotomie entre action intentionnelle (déclenchée de manière endogène, et fondée sur l'anticipation de ses conséquences de l'environnement) et action déclenchée de façon exogène par un stimulus externe (indépendamment des conséquences attendues) constitue une distinction forte et commune entre disciplines. Nous avons vu également que différents niveaux de représentation de l'action, de contrôle de son déclenchement et de contrôle de son exécution pouvaient impliquer différents réseaux cérébraux et être différemment affectés selon les lésions, les pathologies ou les troubles de l'action en jeu. Nous avons vu en outre que certaines aires cérébrales étaient autant activées pendant l'exécution de l'action que pendant sa simulation mentale ou pendant la perception de la même action exécutée par autrui (cas des neurones miroirs). Ces découvertes constituent une des bases sur lesquelles les recherches actuelles tentent de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans l'action conjointe, et le fait de partager des buts et des intentions dans un contexte social. Enfin, nous avons illustré les

interactions avec la recherche en robotique, notamment dans le cadre de la marche bipède, pour montrer comment les solutions issues de l'ingénierie peuvent inspirer, parfois guider, les recherches en neurosciences ou en psychologie. L'action nous semble au final un très bel exemple de fonction cognitive dont la compréhension ces dernières années a été accélérée par les échanges interdisciplinaires au sein des sciences cognitives.

POUR ALLER PLUS LOIN

- BERTHOZ, Alain, *Le Sens du mouvement*, Paris, Odile Jacob, 1997.
- BINKOFSKI, F., BUXBAUM, L. J., « Two action systems in the human brain », *Brain and Language*, 127 (2), 2013, p. 222-229.
- DAVIDSON, D., *Essays on Actions and Events*, Oxford, Oxford University Press, 1980.
- GILBERT, M., *Joint Commitment. How We Make the Social World*, Oxford, Oxford University Press, 2014.
- JEANNEROD, Marc, *Motor Cognition*, Oxford, Oxford University Press, 2006.
- KHAMASSI, Mehdi, DONCIEUX, Stéphane, « Nouvelles approches en robotique cognitive », *Intellectica*, vol. 2016/1, n° 65, 2016, p. 7-25.
- PACHERIE, Élisabeth, « Action », in FRANKISH, K., RAMSEY, W. (éd.), *The Cambridge Handbook of Cognitive Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 2012, p. 92-111.
- RIZZOLATTI, G., FADIGA, L., GALLESE, V., FOGASSI, L., « Premotor cortex and the recognition of motor actions », *Cognitive Brain Research*, 3 (2), 1996, p. 131-141.

Figure 1. Un système de contrôle de l'action basé sur des modèles internes (voir texte pour détails).
 Source : image adaptée de Frith, Blakemore et Wolpert, "Abnormalities in the awareness and control of action",
 Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, 355, 2000, p. 1771-1788.

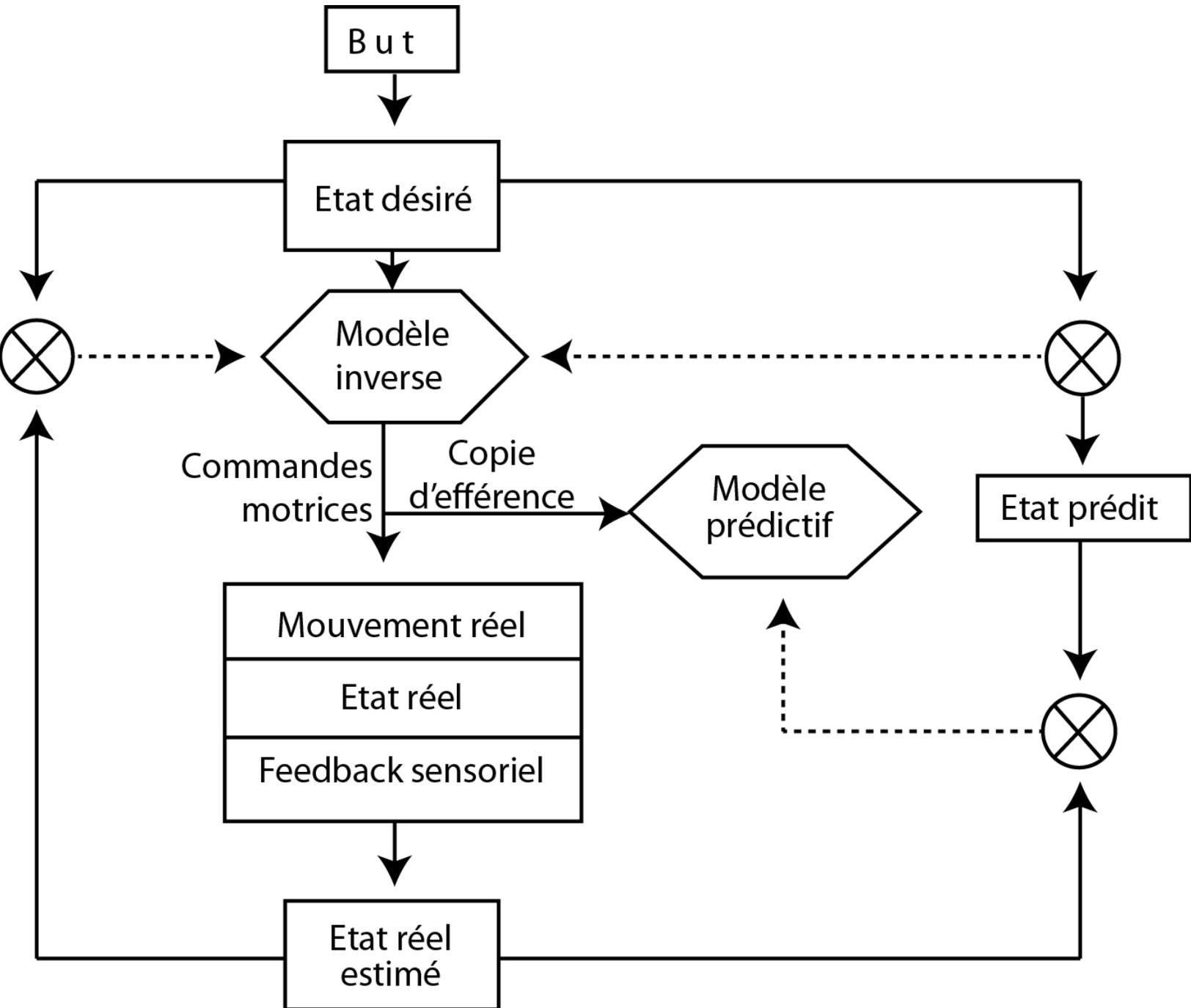


Figure 2. Exemple de figures géométriques utilisées dans le film de Heider et Simmel (1944) montrant du mouvement apparent et toute une narration sur les actions et interactions d'agents. Ici le grand triangle, le petit triangle et le disque sont trois agents qui peuvent ouvrir la porte de la maison, se pourchasser, se menacer, fuir, etc.

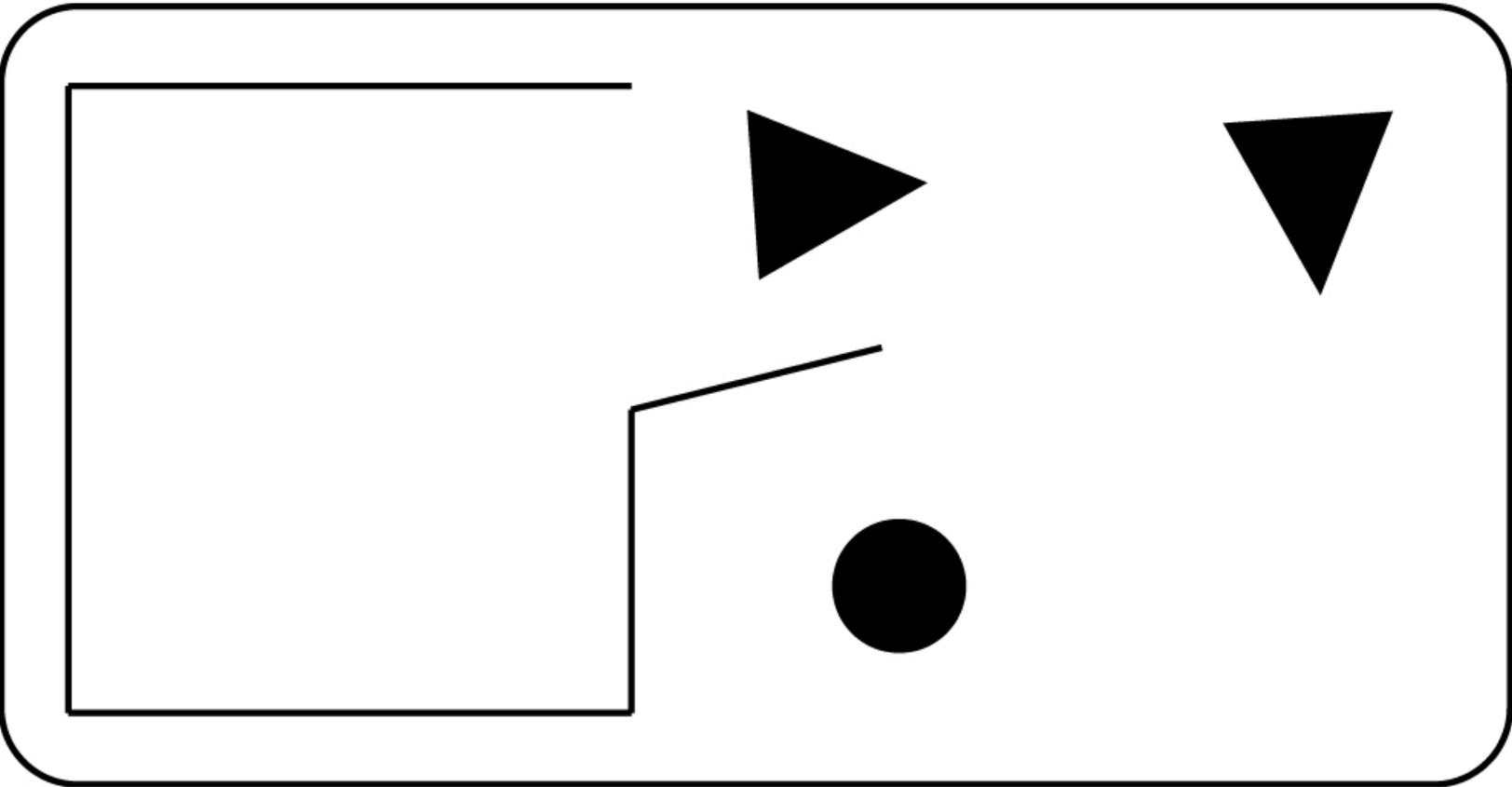


Figure 3. Phrases écrites lorsque le stylo était tenu dans a) la main droite, b) la main gauche, c) la bouche (entre les dents), d) pliure du coude droit. Malgré cette différence de réalisation musculaire, la forme globale reste très similaire.

a) Léon a erré à Noël.

b) Léon a erré à Noël

c) Léon a erré à Noël.

d) Léon a erré à Noël