HAL
open science

Simplexité et Robotique

Jean-Paul Laumond

To cite this version:

Jean-Paul Laumond. Simplexité et Robotique. Complexité-Simplexité, 2014, 9782722603301. hal-01376226

HAL Id: hal-01376226

https://hal.science/hal-01376226v1

Submitted on 4 Oct 2016

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.

J.P. Laumond,
Simplexité et Robotique : vers un génie de l'action encorporée.
in Simplexité et Complexité, J.L. Petit, A. Berthoz Eds, Les Collections du Collège de France, Paris, 2014.

Robotique et simplexité : vers un génie de l'action encorporée.

Jean-Paul Laumond

Des machines qui bougent

La robotique traite du rapport que peut entretenir avec le monde physique une machine qui bouge et dont les mouvements sont commandés par un ordinateur. On attend du robot qu'il exécute les tâches pour lesquelles il est dévolu : prélever une tumeur, peindre le châssis d'une voiture, explorer la planète Mars, nettoyer le sol d'un appartement… Dans le cas de l'ablation d'une tumeur, les mouvements du robot chirurgical sont directement contrôlés par le chirurgien sur la base d'informations visuelles transmises par des endoscopes et reconstruites au travers de systèmes de réalité virtuelle. Les trajectoires d'un robot de peinture sur les chaines de montage d'une voiture sont programmées à l'avance, puis répétées à l'envi dans un environnement très structuré et sans aléa. Le robot d'exploration planétaire qui progresse vers un but doit pouvoir contourner « par lui-même » le rocher qui se trouve sur son passage sans recourir à une trajectoire corrective qui lui serait envoyée par une station terrestre, et dont la simple transmission prendrait une vingtaine de minutes. Le succès actuel des robots aspirateurs tient au fait qu'ils se débrouillent « tout seuls » pour explorer et nettoyer un appartement sans qu'il soit besoin de spécifier leur trajectoire au préalable. Ces quatre exemples illustrent une gradation dans l'autonomie de la machine et le rapport qu'elle entretient avec son environnement. D'une absence totale (et souhaitable) d'autonomie pour le robot chirurgical, on passe à la programmation des mouvements des robots industriels, généralisation numérique des systèmes de programmation mécaniques qui ont fait le succès des métiers Jacquard, puis à une forme plus évoluée d'adaptation qui permet au robot explorateur de contourner un obstacle, jusqu'à la capacité que démontre le robot aspirateur en effectuant correctement sa tâche en l'absence de toute intervention.

Dans un futur proche, il sera possible de demander à un robot personnel (« personnel » dans le sens anglo-saxon du « personal computer ») d'aller chercher un objet en réponse

à une requête du type « va chercher un verre » exprimée en langage parlé. Des expériences de ce type sont d'ores et déjà réalisées en laboratoire sur des robots humnoïdes[1] . En terme de communication, elles ne sont pas très spectaculaires : on sait acquise la capacité d'une machine à analyser le langage oral. En revanche, ce qui est nouveau, c'est la capacité du robot à se débrouiller « tout seul » : ses capteurs lui permettent de localiser l'objet dans l'environnement (voire de le rechercher), de détecter les obstacles à contourner ; ses moteurs lui permettent de l'atteindre, de le prendre et de l'amener à destination. Cette simple action est constituée d'une séquence de mouvements plus ou moins complexes suivant le contexte. L'autonomie du robot se mesure à la variété des situations qu'il peut traiter.

Le roboticien invente donc des machines qui bougent et qui agissent. Comment faire au mieux ? La question est naturelle, elle définit bien le métier.

Bouger pour faire

Changeons quelques mots. Les « êtres vivants » eux aussi bougent et agissent. Le physiologiste cherche à en comprendre les propriétés. Comment l'évolution a-t-elle fait « au mieux » ? Laissons de côté le caractère contestable de la question ainsi posée qui postule la présence d'un « grand roboticien », et ne retenons que le parallèle : le roboticien conçoit des machines qui bougent et font, le physiologiste tente de comprendre le vivant qui lui aussi bouge et fait.

En physiologiste, Alain Berthoz ouvre un chantier sur le statut possible d'une « théorie de la simplexité ». Elle reposerait sur un ensemble de principes fondamentaux qui rendraient compte de l'inventaire de procédés « simplexes » qu'il a tirés de l'observation des rapports *a priori* complexes[2] qu'entretiennent les êtres vivants avec le monde réel. Il était assez naturel d'inviter le roboticien à participer au chantier, avec son expérience et ses outils. Il reste à établir les bases d'un possible dialogue. Les mathématiques, et particulièrement la géométrie, sont là pour ça.

---

[1] E. Yoshida, A. Mallet, F. Lamiraux, O. Kanoun, O. Stasse, M. Poirier, P.F. Dominey, J.P. Laumond, K. Yokoi, *"Give me the purple ball" - he said to HRP-2 N.14*, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2007.

[2] Ou souvent qualifiés comme tels parce que non encore compris.

Partons du sens qu'il faut donner au « rapport » qu'entretient le robot ou l'être vivant avec le monde physique. Henri Poincaré en a posé les termes dans une triangulation de trois espaces[3] : l'espace physique, l'espace sensoriel et l'espace moteur. Les espaces sensoriel et moteur sont les espaces propres du robot et de l'être vivant. L'espace sensoriel leur permet d'évaluer leur état dans le monde physique et de répondre, par exemple, à la question « où suis-je ? ». L'espace moteur est celui de l'action, celui qui change la forme du corps (un danseur parlerait de posture) et le met en mouvement. C'est de cette transformation et des propriétés de la relation de contact entre le corps et le monde physique que nait notre « rapport» au monde. Cette transformation est l'essence même de la géométrie[4].

La mise en mouvement du corps a deux fonctions principales : se déplacer et manipuler.

Changez la forme de votre corps en mettant un pied devant l'autre, recommencez, et vous avancez sous l'effet des forces de frottement qu'exercent vos pieds sur le sol. Ces mêmes forces de frottement permettent à la barque de dériver sous l'effet d'un courant, ou à l'oiseau de planer sans transformer la forme de son corps (ce qui ne veut pas dire que l'espace moteur de l'oiseau n'est pas sollicité ; au contraire, l'immobilité posturale de l'oiseau dans l'air est assurée au prix de la production de forces de contre-réactions s'exerçant sur les ailes). Qu'il soit actif (la marche) ou passif (le vol plané) le déplacement est le mouvement qui transporte la totalité de notre corps d'un lieu à un autre. Six paramètres suffisent à le caractériser : trois paramètres de position et trois paramètres d'orientation. Un déplacement est la composition d'une rotation et d'une translation. La rotation qualifie la partie du déplacement qui fait varier les paramètres d'orientation, elle se mesure par une valeur finie d'angle, en degrés, pas plus de 360. La translation[5] celle qui fait varier les paramètres de position, elle se mesure en mètres,

---

[3] H. Poincaré, « L'espace et la géométrie », *Revue de métaphysique et de morale*, 1895, vol. III, p. 631-646.
[4] Avec l'automatique, les ingénieurs développent la triangulation : l'espace géométrique devient « l'espace d'état du système » ; l'espace sensoriel et l'espace moteur réunissent respectivement les variables « observables » et « commandables ». Les « fonctions de transfert » de l'automaticien sont les « fonctions sensori-motrices » du physiologiste. La vertu soupçonnée de la pluridisciplinarité chère à nos politiques de recherche provient la plupart du temps d'un Babel de termes, qui nous fait perdre la langue d'origine que sont les mathématiques.
[5] On retrouve ce mot pour qualifier le déplacement des cendres d'un défunt ou un changement de juridiction.

avec des valeurs potentiellement non bornées ; c'est la translation qui nous donne une idée de l'infini.

Le déplacement, dans sa composante translationnelle, est la première fonction du mouvement : il est l'apanage de l'animal comparé au végétal[6]. Le déplacement est un principe vital : c'est par un déplacement que le mâle rejoint la femelle ; c'est par un déplacement que l'entremetteuse abeille féconde la plante condamnée à l'immobilité. C'est par un déplacement que le robot nettoie le sol de votre appartement ou rejoint la station qui lui permet de recharger ses batteries.

La deuxième fonction du mouvement est la manipulation. En un lieu donné, le robot, l'homme ou l'animal effectue une tâche : il manie un outil ou cueille un fruit, il assemble des pièces mécaniques, ou dirige un concerto. Par la relation de contact, le monde extérieur se transforme : les objets inertes se déplacent, les fruits sont mangés, le produit manufacturier prend forme ; plus subtilement la baguette du chef se déplace dans l'espace dans un mouvement qui fait sens pour les violons de l'orchestre (la transformation du corps agit ici à des fins de communication comme c'est le cas des danses nuptiales ; on peut parler ici de « manipulation » du corps).

Hommage à la roue et à la translation

Commençons par le déplacement, ce couplage entre le monde infini des translations (que le mathématicien représente par ces extraordinaires abstractions que sont les lignes droites) et le monde fini des rotations qui circulent sur un cercle, structure plus familière à notre entendement.

Bien avant le roboticien, l'ingénieur s'est posé la question du déplacement. Quel engin de transport substituer à l'homme pour transporter une charge ? La difficulté résulte dans la composante translationnelle du transport : il s'agit de déplacer une charge sur plusieurs *mètres*. L'idée de génie a été l'invention d'une *forme*, la roue, cet engin d'une

[6] Apanage qui peut être contesté car on pourra toujours trouver dans la nature des algues se laissant astucieusement porter par des courants marins pour couvrir toujours plus de territoire ; mais convenons simplement qu'un chêne et qu'un roseau croissent pour capter la lumière ou bougent sous l'effet du vent, mais ne se déplacent pas.

extrême simplicité qui transforme une rotation en translation : un yoyo qui *tourne* dans le vide à l'extrémité de sa ficelle se *déplace* dès lors qu'il est mis en *contact* avec le sol ; c'est de ce « rapport » qu'entretient le yoyo avec le monde physique que nait la translation. Il suit un principe élémentaire qui mérite d'être examiné plus avant.

La transformation d'une rotation en translation, des radians en mètres, par mise en contact de deux entités peut-elle être considérée comme un principe « simplexe » ?

La réponse à première vue est négative si l'on considère que les procédés simplexes sont des procédés naturels, moteurs de l'évolution. En effet la nature n'a pas inventé la roue[7] ! La roue est bel et bien une invention humaine. Il reste que l'on doit y regarder de plus près. La figure 1 nous y aide. Si l'on rapporte les mouvements de marche d'un homme à un point fixe de son corps (la tête, par exemple, mais pas par hasard[8]), les cycles de marches engendrent des mouvements de rotations des pieds par rapport à ce point fixe. Et la mise en contact des pieds sur le sol transforme ces mouvements de rotations en mouvement de translation de la tête, et du corps dans son ensemble. Exactement de la même manière que le yoyo se déplace sur le sol. Le corps est translaté dans l'espace physique alors même que seules les articulations de ses membres sont en action ; des variations d'angles du squelette nait la translation dans l'espace physique. La translation n'existe pas en soi. Elle est abstraction : on ne marche pas un *kilomètre*, c'est notre fémur qui réalise 476 *tours*[9] : la métrique de la marche *ressentie* est celle des cycles, pas celle de la translation. La translation établit seulement un lien *commode*[10] entre espace moteur et espace physique : elle dit notre rapport au monde.

---

[7] En tout cas dans le monde animal qui nous est familier.
[8] Alain Berthoz, *Le sens du mouvement*, Odile Jacob, 1997.
[9] Le calcul part d'une longueur de pas de 70 cm pour une longueur de jambe de 70 cm. Un bio-mécanicien serait certainement plus précis.
[10] Henri Poincaré, *op. cit.*

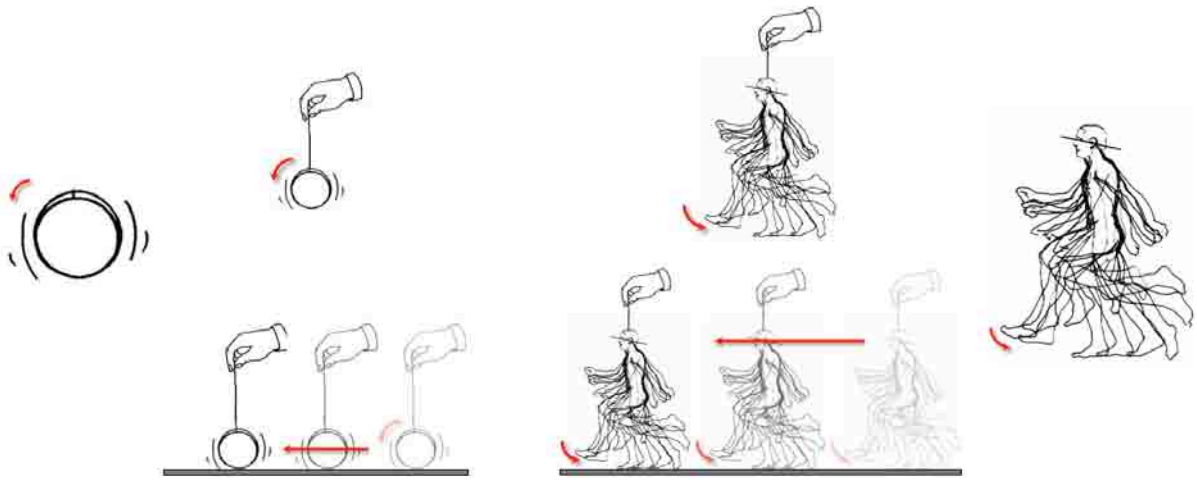

Figure 1 : L'homme-yoyo[11].

[11]Le montage a été réalisé à partir de l'image de droite avec l'aimable autorisation d'Alain Berthoz.

Le procédé de déplacement qui consiste à recourir à des mouvements de rotations peut prétendre au statut de procédé simplexe : il se retrouve dans nombre de systèmes locomoteurs dont le vivant s'est pourvu[12] ; il a été magnifié par l'ingénieur avec l'invention de la roue, puis de l'hélice[13].

Mouvement, calcul, hasard et complexité

Venons-en à des modèles plus contemporains que le roboticien a introduit pour qualifier la complexité d'un mouvement. Ils se référent aux modèles classiques de complexité algorithmique. Ils peuvent constituer un tribut à une théorie de la simplexité.

L'autonomie d'un robot passe par sa capacité à calculer automatiquement les mouvements à effectuer pour réaliser une tâche donnée (peindre une voiture, aller chercher un objet). Il s'agit pour le roboticien de mettre au point des méthodes de calcul (des algorithmes) pour que le robot puisse atteindre un but fixé sans qu'un opérateur spécifie dans tous ses détails le mouvement à effectuer[14]. Le problème est celui du « déménageur de piano ». Il se pose dans l'espace physique : comment déménager le piano ? Premier principe de « simplexification » : trouver le bon espace de représentation ; poser le problème dans l'espace des configurations[15] plutôt que dans l'espace physique. Dans l'espace physique le problème fait intervenir le mouvement de corps. Dans l'espace des configurations, il s'agit de déplacer un point. Les obstacles de l'espace physique se transforment en obstacles dans l'espace moteur. Au final, le problème est beaucoup plus simple : dit de manière imagée, le changement d'espace réduit le piano en une balle de ping-pong ; il est difficile pour des déménageurs de décider si un piano peut être acheminé par une cage d'escalier ; il est facile de résoudre la question s'il s'agit d'une balle de ping-pong !

---

[12] Les courants aériens ou marins peuvent être exploités par l'intermédiaire de voiles et d'ailes ; se laisser porter par un courant est une solution « simplexe » pour un organisme qui cherche à dépenser le moins d'énergie possible ; nul besoin de moteurs ; d'ailleurs les plantes, à défaut de pouvoir se déplacer elles-mêmes, utilisent ce moyen de locomotion pour déplacer leurs semences. Ce mode de locomotion a néanmoins ses limites : elle est temporairement utilisé par l'oiseau et l'ingénieur a complété les voiles des bateaux de rames et plus tard de moteurs à hélice, très utiles en l'absence de vent.

[13] L'hélice généralise la relation de contact de la roue avec le sol, à la relation de contact avec un fluide (l'eau ou l'air). Elle devient système de « propulsion ».

[14] Jean-Paul Laumond, La robotique : une récidive d'Héphaïstos, Fayard, Collège de France, 2012.

[15] L'espace des configurations d'un véhicule est l'espace de ses positions et orientations (trois paramètres sur une surface). Pour un robot humanoïde, il s'agit de l'espace moteur (une trentaine de paramètres habituellement).

Ainsi posé, le problème du déménageur de piano est *décidable*, c'est à dire qu'il existe un algorithme qui donne une solution s'il en existe une, ou informe avec exactitude de la non-existence d'une solution dans le cas contraire. La preuve est établie dans les années quatre-vingt par réduction à la décidabilité de l'algèbre élémentaire[16]. En revanche la résolution du problème est *complexe* : le nombre d'opérations élémentaires pour trouver une solution varie comme une fonction exponentielle en la dimension de l'espace des configurations, un comportement qui rend l'approche rédhibitoire en pratique. Pragmatique, le roboticien relaxe alors la contrainte de *complétude* : il accepte que l'algorithme ne prouve pas la non-existence d'une solution, à partir du moment où, quand il donne une solution, celle-ci est correcte. L'intuition a consisté à introduire une part d'aléa dans les algorithmes de recherche[17]. « Cherchez au hasard et vous finirez bien par trouver », tel est le principe qui est à l'origine du succès de toute une ingénierie sur les algorithmes probabilistes, succès récent, car contemporain des progrès technologiques en matière de puissance de calcul.

Il est clair que la contrainte de complétude issue de la théorie de la complexité est une contrainte forte que le vivant ne considère pas. Prenons un exemple simple : nous sommes parfois dans l'ambigüité de savoir s'il est possible d'effectuer un créneau avec notre voiture, alors même qu'il existe une méthode de calcul exacte et complète qui permettrait de décider. L'existence de cette méthode ne nous est d'aucun secours. Nous ne saurons jamais, après avoir renoncé, s'il n'était pas possible de nous garer sur telle place de parking. Notre procédure de prise de décision n'est pas complète alors que le problème est décidable. On peut donc déduire un deuxième principe possible de « simplexification » que nous mettons en œuvre : relaxer la complétude ; nous ne cherchons pas à « résoudre » le problème.

Au final, ce principe est très relatif en ce qu'il se réfère à la théorie de la « complexité algorithmique » ; l'exemple démontre plutôt les limitations de théories trop « simples » de la complexité pour rendre compte de nos comportements : le vivant ne se réduit pas à

---

[16] J. T. Schwartz et M. Sharir, « On the "piano movers" problem. II. General techniques for computing topological properties of real algebraic manifolds », *Advances in Applied Mathematics*, 1983, vol. 4, nº 1, p. 298-351.
[17] S. LaValle, *Planning Algorithms*, Cambridge University Press, 2006.

une machine de Turing, comme le soupçonnait déjà la reine Christine de Suède dans ses débats avec René Descartes.

Forme, fonction et minimalisme

La roue est une *forme* simplexe dédiée au déplacement. De manière générale, la forme est au centre du rapport qu'entretient la machine et le monde physique. La forme est géométrie. Le concepteur d'un outil ou d'une machine est avant tout un concepteur de formes : il cherche à traduire au mieux les lois de la physique en termes géométriques. L'ingénieur des ponts et chaussées dessine le virage d'une autoroute à partir d'arcs de clothoïdes[18] pour avoir la garantie que son parcours pourra être réalisé à vitesse constante, sans secousse pour les passagers, c'est à dire avec une variation continue de la force centrifuge. Dans ce contexte, la clothoïde est une courbe de maximum confort. Cousines des clothoïdes, les spirales logarithmiques sont utilisées pour définir le profil des cames de sécurité utilisées par les montagnards[19] : ce profil garantit un frottement maximum entre les parois d'une faille et la came, ceci quelle que soit la largeur de la faille (Figure 2). Tout un pan de la robotique manufacturière repose sur des travaux de recherche en géométrie algorithmique pour concevoir les machines les plus « astucieuses » et les procédés les plus « minimalistes » qui permettent de manipuler facilement des pièces mécaniques[20]. Le roboticien est aussi un designer.

[18] Les clothoïdes sont des courbes en forme de spirales, qui ont la propriété caractéristique que leur courbure est inversement proportionnelle à leur abscisse curviligne.
[19] Alberto Rodriguez and Matthew T. Mason, *Grasp Invariance*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 31, No. 2, February, 2012, pp. 237-249.
[20] Matthew T. Mason, *Mechanics of Robotic Manipulation*, MIT Press, 2001.

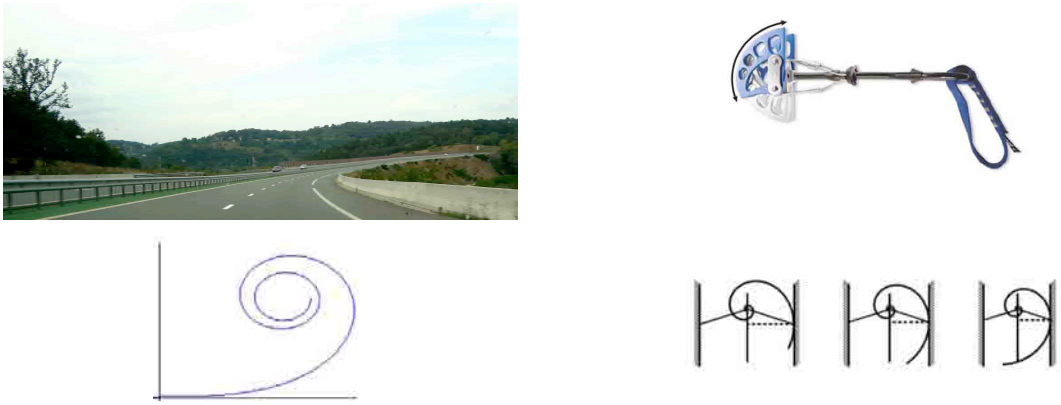

Figure 2 : La forme du virage suit celle d'une clothoïde. La forme de la came de sureté celle une spirale logarithmique (Image extraite de [19] avec l'aimable autorisation des auteurs).

L'analyse des corrélations entre la forme géométrique d'un objet et les forces de contact qui s'y exercent est également au centre des modèles physiologiques du sens du toucher[21]. Les mêmes modèles, les mêmes géométries sont utilisés par l'ingénieur et par le physiologiste. Une théorie de la simplexité devra rendre compte de ces modèles. Nombre de procédés auquel l'ingénieur et le vivant recourent pour résoudre un problème ou réaliser une fonction, trouvent leur origine dans le rapport de forme que l'outil, la machine, le robot et l'animal entretiennent avec le monde physique.

Prenons un exemple dans le domaine de la préhension. Très récemment, des chercheurs de l'université de Cornell[22] ont mis au point un système très simple constitué d'une poche contenant des granules ; au contact d'un objet la poche se déforme et épouse la forme de l'objet ; le vide est alors fait à l'intérieur de la poche qui se rigidifie et l'objet est saisi. L'invention est astucieuse. La comparaison doit être faite avec la main anthropomorphe du DLR[23] (agence spatiale allemande) qui permet beaucoup plus de dextérité mais dont le contrôle demande beaucoup plus de calculs (Figure 3). La saisie d'un objet est résolue soit par la forme même de la machine qui ne nécessite aucun contrôle élaboré (le cas de la main de l'université de Cornell), soit par le contrôle coordonné de toutes les phalanges d'une main (le cas de la main du DLR). Dans le premier cas, la saisie est assurée par la forme de l'organe qui épouse naturellement la forme de l'objet ; nul besoin de « calcul » au sens classique du terme. Une nouvelle expression a été introduite : celle de *calcul morphologique*[24]. La main anthropomorphe semble a priori très éloignée d'une solution simplexe : plus d'une vingtaine de degrés de liberté pour saisir un objet, c'est beaucoup trop ! En fait la main anthropomorphe est redondante. Si procédé simplexe il y a dans son cas, il doit être recherché dans la coordination motrice, c'est à dire, non plus au niveau de la forme, mais au niveau du traitement de l'information. Nous y reviendrons plus bas. En revanche, notons que

---

[21] G. Robles-De-La-Torre and V. Hayward, *Force Can Overcome Object Geometry In The Perception Of Shape Through Active Touch*, Nature, Vol. 412, 2001, pp. 445-448.
[22] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. Zakin, H. Lipson and H. Jaeger, *Universal robotic gripper based on the jamming of granular material*, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 107, No. 44, 2010.
[23] M. Grebenstein, M. Chalon, W. Friedl, S. Haddadin, T. Wimböck, G. Hirzinger and R. Siegwart, *The Hand of the DLR Hand Arm System: Designed for Interaction,* International Journal of Robotics Research, Vol. 31, No. 13, 2012.
[24] R. Pfeifer and Josh Bongard, *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence*, MIT Press, 2006

l'apparition chez les primates du pouce opposable aux quatre doigts de la main a trait à la conception d'une forme qui a grandement « simplexifié » la préhension.

Figure 3 : A gauche la main du DLR, à droite celle de l'université de Cornell[25] : quelle est la plus simplexe ?

[25] Images reproduites avec l'aimable autorisation de Markus Grebenstein du DLR et John Amend, Cornell University respectivement.

L'étude du rapport entre forme et fonction est aujourd'hui au centre de recherches pluridisciplinaires sur la conception de nouveaux robots inspirés du vivant. On peut concevoir un organe préhenseur inspiré de la pince d'un crabe ou de la main de l'homme : la « simplexité » de la solution est relative à la généralité de la fonction désirée. Il n'y a pas de forme « simplexe » en soi. La forme d'un système (sa conception matérielle) doit être considérée étroitement associée à son contrôle.

Redondance et sous-actionnement.

Abordons la deuxième fonction de mouvement : la manipulation. Une tâche de manipulation prend son sens dans l'espace physique : il s'agit par exemple de prendre un objet. Considérons comme fil conducteur de nos développements la tâche saisie d'un objet par un système anthropomorphe, que ce soit un homme ou un robot humanoïde (Figure 4).

Un système anthropomorphe est un système à la fois *redondant* et *sous-actionné*. Précisons.

Le squelette humain est un ensemble composé de quelques dizaines d'os articulés entre eux. Donner une valeur d'angle aux différentes articulations revient à définir une posture du squelette : il est debout, assis, en position de courir, de prendre, etc. Avec tous ces angles, on retrouve la notion d'espace des configurations évoqué plus haut. Pour animer son squelette, le corps humain dispose de plusieurs centaines de muscles. Ils constituent l'espace moteur. La situation des robots humanoïdes actuels est plus simple : à chaque articulation est associé un moteur. L'espace des configurations et l'espace moteur se confondent. Pour saisir une balle posée sur une table, l'homme et le robot humanoïde doivent approcher leur main de la balle. D'un point de vue géométrique, cette tâche est de dimension trois : en effet, trois paramètres sont nécessaires pour situer la balle dans l'espace. Le robot dispose d'une trentaine de moteurs, l'homme de plusieurs centaines de muscles. C'est trop. Il y a un grand écart entre la dimension de la tâche et la dimension de l'espace moteur. Cet écart autorise une infinité de façons de réaliser l'objectif : on peut utiliser la main droite ou la main gauche,

on peut se gratter la tête d'une main et saisir la balle de l'autre. Un système est redondant dès lors que son espace moteur a une dimension supérieure à la dimension de la tâche à effectuer. La notion de redondance est liée à la notion d'action.

Un système anthropomorphe est aussi sous-actionné. Cette caractéristique a trait au déplacement du système dans son environnement. Les paramètres angulaires précédemment évoqués sur le squelette disent la posture du squelette, ils ne disent pas la position du squelette dans son environnement. Aucun muscle, aucun moteur n'est en charge de faire varier directement les paramètres de placement. On se déplace « indirectement », nous l'avons vu, en faisant varier les paramètres internes de posture. C'est dans ce sens que le système est dit *sous-actionné*.

Si toutes les variables angulaires d'un squelette sont connues, il est aisé de déduire la position de la main gauche dans l'espace : elle est unique. La réciproque est fausse. Si vous connaissez la position de la main gauche dans l'espace, il y a une infinité de variables angulaires du squelette qui donnent la même position de main (le squelette est redondant). Elles vont correspondre à une infinité de postures, dont certaines peuvent être irréalistes. Il faut donc des *procédés* pour faire la sélection. On parle de problème inverse. Comment s'y prendre ? Les mathématiques appliquées, en particulier l'algèbre linéaire et l'optimisation numérique, offrent au roboticien des solutions formelles et efficaces au problème d'inversion[26].

La redondance d'un système permet la réalisation simultanée de plusieurs tâches : on peut prendre un objet d'une main tout en se grattant la tête de l'autre. Plus subtilement, elle permet de définir un style, une manière, de réaliser l'action en imposant des contraintes additionnelles à la tâche. Lorsque notre main s'approche d'un objet à saisir, elle prend, *par anticipation*, une forme particulière adaptée à l'objet. Loin de complexifier l'action, ces contraintes additionnelles la « simplexifient » en ce sens qu'elles réduisent la dimension de l'espace final de sélection, c'est à dire la part de décision à prendre. Le contrôle moteur s'en trouve grandement simplifié ; on le sait

[26] Y. Nakamura, *Advanced Robotics : Redundancy and Optimization*, Boston, Addison-Wesley Longman Publishing Co, 1991.

depuis les travaux de Bernstein sur les synergies motrices[27]. Une seule commande motrice permet la coordination de plusieurs muscles ou moteurs couplés.

Une fois ces contraintes additionnelles exprimées, il peut rester une infinité de possibilités de mouvement ; elle requiert l'application d'un procédé de sélection. Parmi toutes les postures possibles, il s'agira de sélectionner par exemple celle qui est la plus confortable, c'est-à-dire celle qui correspond au moindre effort, l'effort étant exprimé, dans l'espace moteur, comme la somme de toutes les forces exercées sur les moteurs ou sur les muscles. La sélection répond alors à un principe d'optimalité. La recherche des lois sous-jacentes est un domaine très actif des neurosciences computationnelles. Si le principe d'optimalité comme procédé de sélection est défendu[28] et controversé[29] en neurosciences, il s'avère extrêmement efficace en pratique pour le roboticien.

Le cadre général de l'algèbre linéaire permet d'exprimer à la fois les contraintes de couplage moteur et les procédés de sélection du mouvement pour réaliser une action.

Le cadre s'applique aux systèmes redondants, mais ne rend pas compte du sous-actionnement. Il permet de saisir une balle à la condition de ne pas marcher. Nous avons récemment levé la restriction grâce à une astuce de modélisation[30] : le système locomoteur sous-actionné est représenté sous la forme d'un bras manipulateur virtuel constitué d'empreintes de pas qui peuvent se plier comme un accordéon ; nous ajoutons ainsi artificiellement de la redondance au système et la méthode générale peut s'appliquer. C'est une illustration du principe de « détour » énoncé par A. Berthoz : l'ajout de variables additionnelles, loin de complexifier le problème, permet au contraire de la résoudre. La méthode permet de coordonner les 30 moteurs du robot HRP2 pour qu'il ramasse une balle située à ses pieds (Figure 4). Pour ce faire, le robot doit reculer ; aucun programme spécifique à la locomotion ne l'a précisé ; les quelques pas que le robot effectue en arrière pour dégager la balle font partie intégrante de la tâche de saisie, et d'elle seule. Le corps tout entier y a contribué.

---

[27] N. Bernstein, *The Coordination and regulation of movements*, Oxford, Pergamon Press, 1967.
[28] E. Todorov, M.I. Jordan, *Optimal feedback control as a theory of motor coordination*, Nature Neuroscience, 2002, vol. 5, p. 1226–1235
[29] K. Friston, *What Is Optimal about Motor Control*? Neuron, 2011, vol. 72 (3), p. 488-498.
[30] O. Kanoun, J.-P. Laumond et E. Yoshida, *Planning foot placements for a humanoid robot : a problem of inverse kinematics* , The International Journal of Robotics Research, 2011, vol. 30, nº 4, p. 476-485.

Figure 4 : Le corps tout entier participe à l'action de saisie (© LAAS-CNRS).

Vers un génie de l'action encorporée

Ne pas dissocier conception matérielle, traitement de l'information et contrôle (comme c'est souvent le cas en robotique), s'interroger sur la décomposition fonctionnelle des systèmes complexes[31], s'affranchir de l'automate combinatoire qui modélise la plupart du temps les architectures logicielles et qui est souvent considéré comme la mesure de la complexité d'un système, ne pas considérer le traitement de l'information comme seule source de réponse au défi de la complexité, explorer les possibles géométries rendant compte de la triangulation des espaces sensoriel, physique et moteur dans le but de la réalisation d'actions, promouvoir un *génie de l'action encorporée*, voilà une possible contribution du roboticien au chantier ouvert par le concept de simplexité.

[31] Il semble naturel de considérer une « fonction » locomotrice et une « fonction » de saisie ; pourtant la figure 4 nous montre une situation où il est impossible de faire la part des deux « fonctions ».