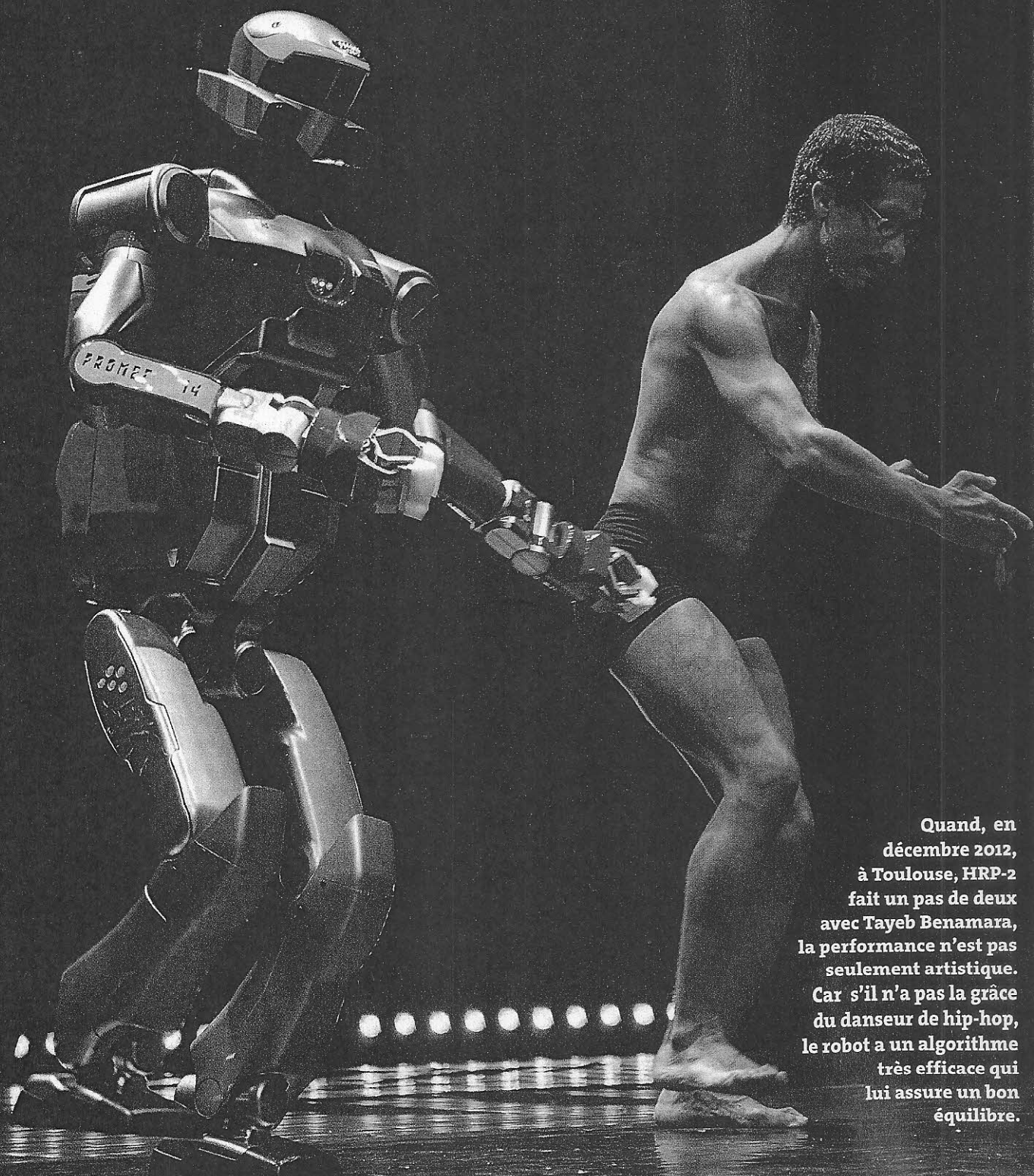


Marcher comme nous :



Quand, en décembre 2012, à Toulouse, HRP-2 fait un pas de deux avec Tayeb Benamara, la performance n'est pas seulement artistique. Car s'il n'a pas la grâce du danseur de hip-hop, le robot a un algorithme très efficace qui lui assure un bon équilibre.

un rêve de robot

PAR Gautier Cariou,
journaliste.

Grâce aux progrès de la mécanique et des algorithmes, les robots bipèdes ont acquis un meilleur équilibre et une plus grande agilité. La clé de leur succès ? Imiter la façon de marcher de l'homme.

Le 11 mars 2011, un tsunami dévaste la centrale nucléaire de Fukushima, au Japon. Des volontaires s'activent pour éteindre l'incendie, au mépris des radiations. L'idéal aurait été qu'ils soient remplacés par des robots. Dont acte.

Pour stimuler la recherche dans le domaine de la robotique humanoïde, un an après la catastrophe, l'Agence américaine pour les projets de recherche avancée de défense (Darpa) lance une compétition internationale, la Darpa Robotics Challenge (DRC). L'objectif ? Concevoir des robots capables de se déplacer dans des zones dangereuses afin qu'ils réalisent des manœuvres d'urgence. La finale est prévue les 5 et 6 juin 2015, en Californie. Les robots, jugés sur leur agilité, leur puissance, leur adaptabilité et leur autonomie, devront traverser des décombres, monter des escaliers, ouvrir des vannes, et même conduire une voiture. Sur onze robots en lice, neuf sont bipèdes.

Pour les roboticiens, la cause est entendue : la marche bipède permet de donner une mobilité sans précédent à leurs machines, à l'image de Petman et d'Atlas, deux robots aux proportions humaines conçus par Boston Dynamics, une entreprise américaine rachetée par Google en 2013. Loin des clichés de l'humanoïde maladroit aux mouvements lents et saccadés, ces deux robots marchent sur des terrains plats ou accidentés. Ils retrouvent leur équilibre lorsqu'on les pousse violemment. Le tout avec une agilité déconcertante et une gestuelle très proche de celle de l'homme.

Ce n'est pas un hasard si les roboticiens s'inspirent de l'anatomie humaine pour construire leurs machines : la pré-

sence d'un tronc, d'un bassin, de bras, de pieds et de jambes articulés leur assure une gamme de mouvements bien adaptés à des environnements humains. Chaque articulation est dotée de moteurs analogues aux muscles et de capteurs pour contrôler en permanence la position des membres. Un peu comme le ferait l'oreille interne, un instrument intégré dans le bassin, appelé « centrale inertielle », mesure le mouvement du centre de gravité à l'aide de gyroscopes et d'accéléromètres.

Gérer l'instabilité. Au niveau des pieds, des capteurs de pression rendent compte des forces de contact avec le sol. Selon les informations qu'il reçoit de ces capteurs, un ordinateur embarqué dans le robot calcule en temps réel les mouvements à produire au niveau de chaque articulation pour générer une marche efficace. Ces calculs sont exécutés par des algorithmes de commande, suites

d'instructions en langage informatique, eux-mêmes fondés sur des modèles physiques simplifiés de la marche.

Avant de mettre au point de tels algorithmes, roboticiens et biomécaniciens ont d'abord étudié les mécanismes généraux de la marche bipède chez l'homme. « Cette marche est assez paradoxale, explique Thomas Robert, du laboratoire de biomécanique et mécanique des chocs, à l'université Claude-Bernard, à Lyon. Elle est stable sur un ensemble de pas, mais instable ponctuellement. Ainsi, un marcheur qui se figerait sur un pied tomberait à coup sûr. Cette instabilité de chaque instant s'explique par un décalage entre le point de contact avec le sol, situé sous le pied d'appui, et un second point dont la position dépend de la vitesse et de la position du centre de gravité*. Pour maintenir un équilibre permanent, il faut que ces deux points restent toujours alignés sur un même axe vertical. Or, ce n'est pas le cas pendant la marche. À chaque pas, nous chutons du côté opposé à notre pied d'appui avant de nous rattraper avec l'autre pied. En définitive, la marche bipède est une succession de chutes libres contrôlées. »

La stabilité dépend donc de la position des pieds sur le sol. En 1968, Miomir Vukobratovic, un ingénieur serbe pionnier de la robotique humanoïde, définit pour la première fois les conditions de stabilité de la marche bipède [1]. Un des éléments importants, connu depuis longtemps des biomécaniciens, est le « centre de pression », un point particulier du sol dont la position >>>

L'essentiel

> EN 1968, un critère de stabilité établit que l'équilibre d'un marcheur bipède dépend de la position d'un point particulier du sol appelé « centre de pression ».

> EN 1984, WL-10RD est le premier robot bipède capable de marcher de façon dynamique et stable en respectant ce critère.

> EN 2006, un algorithme parvient pour la première fois à calculer les mouvements d'un robot en temps réel pour le faire marcher.

* **LE CENTRE DE GRAVITÉ** est un point qui se déplace comme si toute la masse du marcheur y était concentrée. Sa position dépend de la répartition des masses dans le corps.

Marcher comme nous : un rêve de robot

» dépend de la répartition des forces de contact entre le pied d'appui et le sol. Pendant la marche, ce point reste en permanence dans les limites de la surface délimitée par le pied d'appui. Or, Miomir Vukobratovic établit que plus le centre de pression se rapproche des limites de cette surface plus la probabilité de déséquilibre augmente, pour les hommes comme pour les robots. Aujourd'hui encore, c'est un concept fondamental pour obtenir des marches bipèdes stables de la part des robots.

Calculer chaque mouvement. Au début des années 1980, tous les robots marchent de façon « statique », c'est-à-dire avec le centre de gravité et le centre de pression alignés en permanence sur le même axe vertical. Cela donne une démarche extrêmement lente et saccadée. En 1984, Ichiro Kato, roboticien à l'université de Waseda, au Japon, rompt avec ce modèle de marche archaïque.

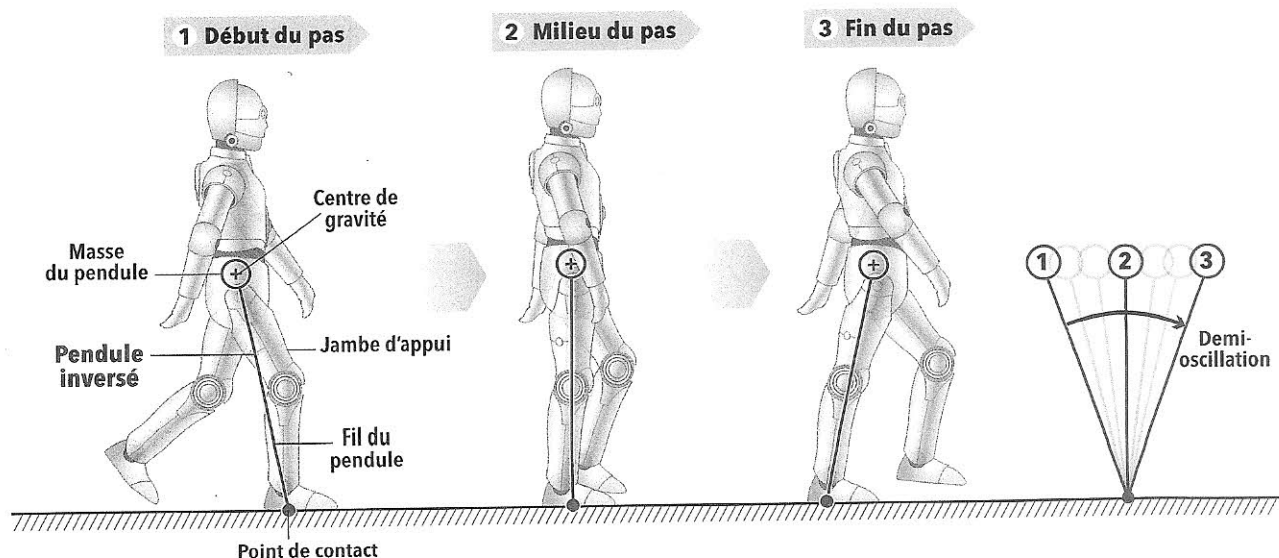
Il présente WL-10RD, le premier robot capable de se déplacer sur un sol plat en adoptant une marche dynamiquement stable [2]. Cette démarche est, à l'époque, la plus humaine jamais reproduite par une machine. WL-10RD avance à raison d'un pas toutes les 1,3 seconde, en plaçant ses pieds de façon à maintenir le centre de pression dans la surface critique.

Pour calculer le mouvement des jambes, Ichiro Kato raisonne sur un modèle complet du robot, qui prend en compte les masses de chaque membre et pas seulement la position du centre de gravité. Il en découle des équations non linéaires, trop complexes pour être traitées en temps réel par un algorithme, ni même résolues de façon exacte. Si bien que chaque mouvement des jambes doit être calculé à l'avance avant d'être rejoué dans la réalité par le robot. Pour WL-10RD, l'imprévu n'a pas sa place : la moindre irrégularité du sol mène à une perte d'équilibre.

En 2003, Shuuji Kajita, roboticien à l'Institut national des sciences et technologies industrielles avancées (AIST), au Japon, résout le problème [3]. Il propose un algorithme de commande fondé sur un modèle du robot dans lequel seule la masse totale, ramenée au centre de gravité est prise en compte [Fig. 1]. Cette simplification permet à l'algorithme de résoudre les équations liées aux mouvements des membres en temps réel et avec exactitude, tout en respectant le critère de stabilité du centre de pression [Fig. 2].

Cet algorithme a été mis au point à partir du modèle physique du « pendule inversé », déjà utilisé par les biomécaniciens pour décrire la marche humaine. Dans ce modèle, le robot est équivalent à un pendule retourné dont toute la masse est concentrée à son extrémité haute (correspondant au bassin), tandis que son extrémité basse (correspondant au pied d'appui), sans masse et de longueur variable, est en contact avec le sol. Pour prouver l'efficacité de son algorithme, Shuuji Kajita l'implante sur l'humanoïde HRP-2, né dans les laboratoires de l'AIST dans les années 2000 : il parvient à

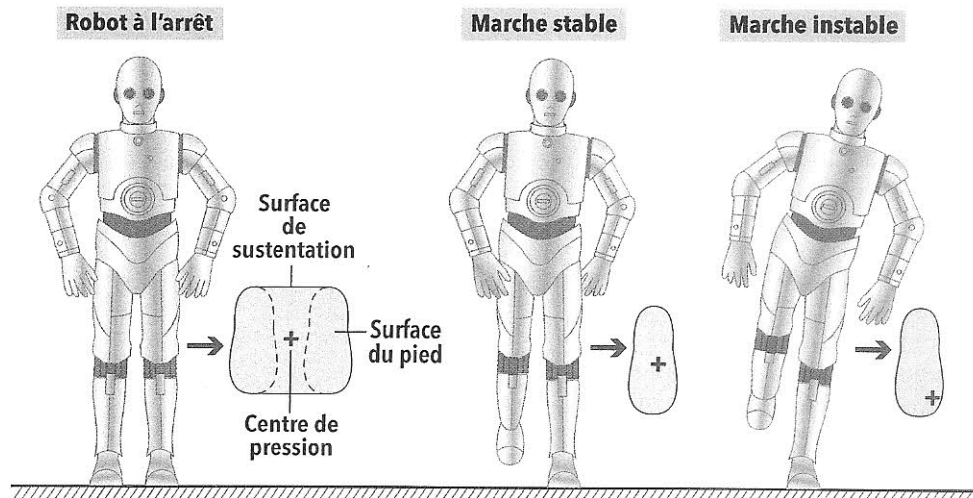
Fig.1 Le modèle humain simplifié



PENDANT LA MARCHÉ, le mouvement de la jambe d'appui peut être décrit comme celui d'un pendule inversé : la masse du pendule correspond au centre de gravité, et le fil à la jambe en contact avec le sol. Chaque pas est ainsi assimilé à une demi-oscillation du pendule. Cette modélisation simplifie les algorithmes de contrôle de la marche du robot. © INFOGRAPHIES BRUNO BOURGEOIS

Fig.2 Critère de stabilité

L'ÉQUILIBRE, pendant la marche, dépend de la position d'un point particulier appelé «centre de pression» (croix ci-contre), par rapport à la surface délimitée par les contours du ou des pied(s) d'appui, la «surface de sustentation» (en rose). Plus ce point est éloigné des bords de la surface, plus la marche est stable. Plus il s'en rapproche, plus le déséquilibre augmente.



marcher de façon dynamique et stable. Aujourd'hui encore, de nombreux roboticiens l'utilisent ou s'en inspirent pour faire marcher leur robot.

En 2006, Jerry Pratt, chercheur en robotique à l'Institute for Human and Machine Cognition, en Floride, propose un autre algorithme de commande baptisé «capture point». Ce dernier est fondé sur une version revisitée du modèle du pendule inversé dans lequel le roboticien intègre l'inertie liée aux mouvements de rotation du bassin [4]. L'inertie est la résistance naturelle qu'oppose un corps à un changement de vitesse. En prenant en compte cet effet, l'algorithme détermine les zones

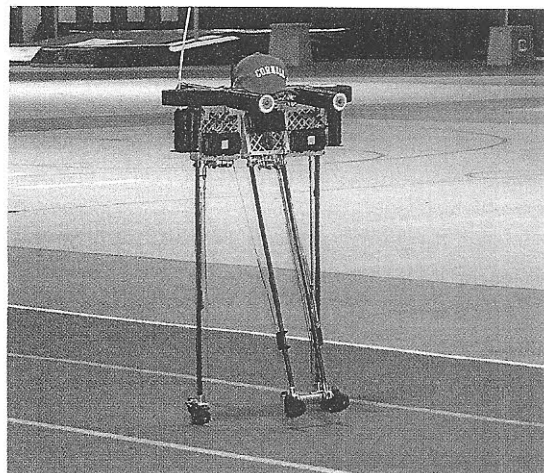
dans lesquelles un robot doit poser son pied pour s'arrêter en un seul pas. Le robot est donc contrôlé de manière à rester en permanence dans les limites de cette zone de stabilité. Il en résulte une marche dynamique et stable à chaque instant.

Anticiper d'un ou deux pas. «Toutes-fois, l'algorithme de capture point n'est valable que sur des sols plats et non glissants», souligne Pierre-Brice Wieber, roboticien à Inria, à Grenoble. Dans des travaux récents, Jerry Pratt essaie de le généraliser pour des environnements plus complexes mais ce problème n'est pas encore résolu. »

Pour augmenter la stabilité des robots, une approche dans la lignée des travaux de Shuuji Kajita, inspirée de la locomotion humaine, est d'anticiper le mouvement d'un ou deux pas. En robotique, ce contrôle particulier du mouvement a été baptisé «commande prédictive». Elle consiste à prédire une séquence de pas dans une simulation numérique et de la confronter à la réalité. En pratique, le robot exécute les mouvements prédits par la simulation puis il compare sa position et sa posture réelles, mesurées par ses capteurs internes, au résultat de la simulation. S'il constate un écart, il génère une nouvelle prédiction. Et cela toutes les millisecondes ! De cette >>>

Un maximum de kilomètres avec un minimum d'énergie

Après 186 000 enjambées et 65 kilomètres parcourus sur une piste d'athlétisme, Cornell Ranger a finalement épuisé sa batterie. Ce robot marathonien, conçu en 2011 par les chercheurs du laboratoire de biorobotique et de locomotion, à l'université de Cornell, aux États-Unis, utilise le principe de marche semi-passive pour se déplacer. Introduite par le roboticien américain Tad McGeer, dans les années 1990, cette démarche particulière est à ce jour la moins gourmande en énergie. Et pour cause, les bipèdes semi-passifs ne possèdent pas de haut du corps et n'utilisent que deux moteurs pour actionner leurs jambes, contre plus d'une vingtaine chez les humanoïdes ! D'un point de vue physique, le pied posé sur le sol évolue selon la dynamique d'un pendule inversé, tandis que l'autre jambe suit la dynamique d'un pendule simple. Mais cette marche, aussi économique soit-elle, n'est valable que sur des surfaces planes et se dérègle dès que l'on dote le robot d'un bassin, d'un tronc et de bras.



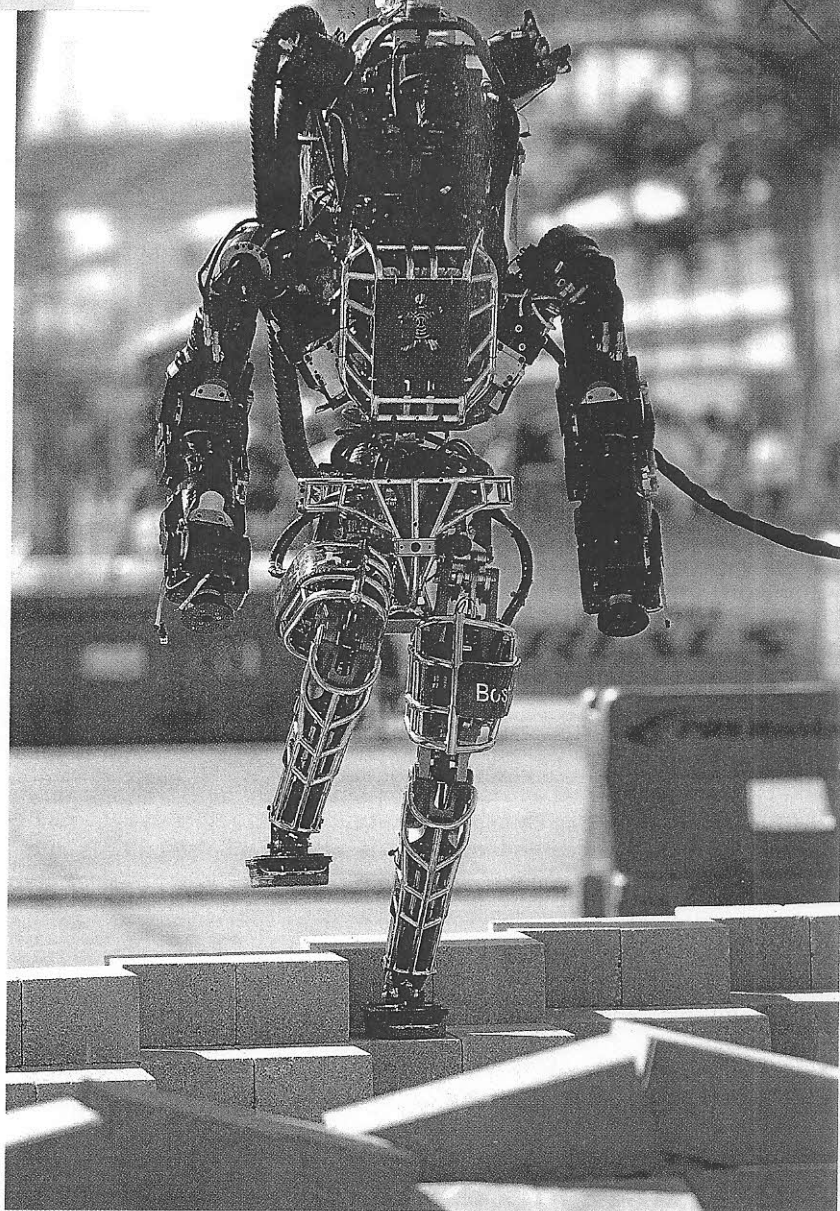
Technologie

Marcher comme nous, un rêve de robot

» façon, un robot, réajuste en permanence ses mouvements et s'adapte aux irrégularités du sol ou même à une poussée violente, à condition que ses moteurs soient suffisamment puissants (lire « Des moteurs puissants pour une démarche naturelle », ci-dessous). Cette méthode, testée avec succès sur le robot HRP-2, permet également d'intégrer des obstacles dans la simulation numérique.

Plier les genoux. Tous ces algorithmes de commande, aussi différents soient-ils, ont un point commun : ils imposent aux robots de marcher les genoux pliés. « Lorsque les jambes ou les bras d'un robot sont complètement tendus, il apparaît des aberrations mathématiques pendant que l'algorithme exécute ses calculs, explique Pierre-Brice Wieber. En effet, pour déterminer les mouvements articulaires que doit générer le robot, on utilise une matrice, un outil mathématique, qui, lorsque les jambes sont complètement tendues, devient non inversible. » Mathématiquement, cela revient à réaliser une division par zéro.

Ce problème identifié sous le terme de « singularité » est un vrai cauchemar pour les roboticiens. « Pour l'éviter,



© ANDREW INNERARITY/REUTERS

Lors du Darpa Robotics Challenge, en décembre 2013, Atlas a montré ses capacités à se déplacer sur terrain accidenté. Une compétence indispensable pour ce robot destiné à devenir secouriste.

Des moteurs puissants pour une allure naturelle

Les progrès des algorithmes n'expliquent pas à eux seuls l'agilité croissante des robots. La souplesse impressionnante des bipèdes de Boston Dynamics tels que Atlas (ci-dessus) provient aussi en grande partie de leurs moteurs hydrauliques. Alimentés par une réserve d'eau sous pression, ils confèrent aux robots une puissance telle que ceux-ci peuvent réaliser des pas de côté et des sauts, mouvements inaccessibles à la plupart des robots électriques, dont les moteurs sont trop faibles. À une exception près. En 2010, les roboticiens Junichi Urata et Yuto Nakanishi, de l'université de Tokyo, au Japon, mettent au point des moteurs électriques

cent fois plus puissants que leurs prédécesseurs, s'approchant un peu plus des performances des systèmes hydrauliques [1]. Leur technologie consiste à refroidir les moteurs à l'aide de circuits de refroidissement pour les exploiter au-delà de leur puissance nominale. Cette technologie a été utilisée avec succès sur le robot électrique Schaft, grand vainqueur des épreuves qualificatives de la Darpa Robotics Challenge, une compétition internationale de robotique organisée par l'Agence américaine pour les projets de recherche avancée de défense.

[1] J. Urata et al., IEEE/RSJ, Conf. on Intelligent Robots and Systems, 4497-4502, 2010.

nous imposons donc aux robots d'avoir toujours les genoux pliés, en exagérant parfois le trait. Toutefois, on n'est pas si éloigné de la réalité : des études biomécaniques sur l'homme ont montré que nous tendons rarement les jambes pendant la marche, ce qui garantit une certaine souplesse et nous aide à mieux contrôler nos forces.»

Depuis environ cinq ans, les roboticiens cherchent également à améliorer l'interaction des robots avec leur environnement en utilisant une commande dite « en couple ». La plupart des robots bipèdes actuels sont contrôlés par une commande en « position ». Concrètement, cela signifie que les algorithmes qui pilotent la marche utilisent des informations sur la position des membres à chaque instant, fournies par des capteurs placés au niveau de chaque articulation. Toutefois, ces capteurs ne mesurent pas les effets des perturbations externes (obstacle, poussée...) sur l'ensemble des articulations du robot. Si bien que, si le pied d'un robot rencontre une marche sur son chemin, il ne s'adapte pas du tout à cet imprévu. Au contraire, il augmentera la puissance de ses moteurs dans l'objectif d'atteindre la position théorique prévue par son algorithme. Cette obstination peut l'endommager.

Franchir les obstacles. La commande « en couple » consiste à calculer les mouvements du robot à partir des forces qui s'appliquent sur ses articulations, mesurées à l'aide de capteurs. Un roboticien peut alors mettre au point un algorithme de commande qui oblige la machine à ne plus solliciter ses articulations au-delà d'une certaine force. Résultat : lorsque le pied d'un robot rencontre un obstacle, il ne forcera pas au-delà de la limite imposée par l'algorithme. En jouant sur les nombreux degrés de liberté de ses articulations, il générera un nouveau mouvement stable et poursuivra sa marche sans casse.

« Avec une commande en couple, il est également possible d'adapter la raideur des articulations en intervenant directement dans l'algorithme de commande, précise Auke Ijspeert, de l'école polytech-



Marcher, mais aussi courir, sauter, descendre les escaliers : Schaff sait tout faire, ce qui lui a permis de se placer en tête de la compétition organisée par la Darpa, dont la finale aura lieu en juin. © NEWSCOM/ SIPA

nique fédérale de Lausanne, en Suisse. *L'algorithme en question peut en effet contrôler la force des moteurs de façon à ce qu'ils simulent le comportement d'un ressort. Cela donne des démarches plus souples, plus humaines et mieux adaptées à des terrains accidentés.* »

Les robots qui utilisent cette technologie sont encore peu nombreux car l'intégration des capteurs de force dans les articulations est difficile à mettre en œuvre. En outre, la commande en couple nécessite la mise au point d'un modèle virtuel du robot réunissant toutes ses caractéristiques dynamiques intrinsèques : la masse de chaque membre, les forces de frictions, l'élasticité des articulations, etc. L'optimisation de ces simulations constitue l'un des grands axes de recherche de la robotique bipède. Aujourd'hui, les robots les plus pro-

metteurs qui utilisent la commande en couple sont Coman, le robot électrique de l'Institut de technologie italien ou encore Toro, présenté en 2013 par l'Agence spatiale allemande. Mais le plus emblématique reste sans aucun doute Atlas, grand favori de la finale du Darpa Robotics Challenge. ■

[1] M. Vukobratovic et D. Juricic, *IEEE Trans. Biomedical Eng.* 16, 1, 1, 1969.

[2] A. Takanishi et al., *Journal of Robotic Society of Japan*, 3, 67, 1985.

[3] S. Kajita et al., *Proc. of the '03 ICRA*, 2, 1620, 2003.

[4] J. Pratt et al., *Proc. of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 200, 2006.

Pour en savoir plus

> www.bostondynamics.com Le site de Boston Dynamics, à l'origine des robots Petman et Atlas.

> www.theroboticschallenge.org Le site officiel de la compétition Darpa Robotics Challenge.