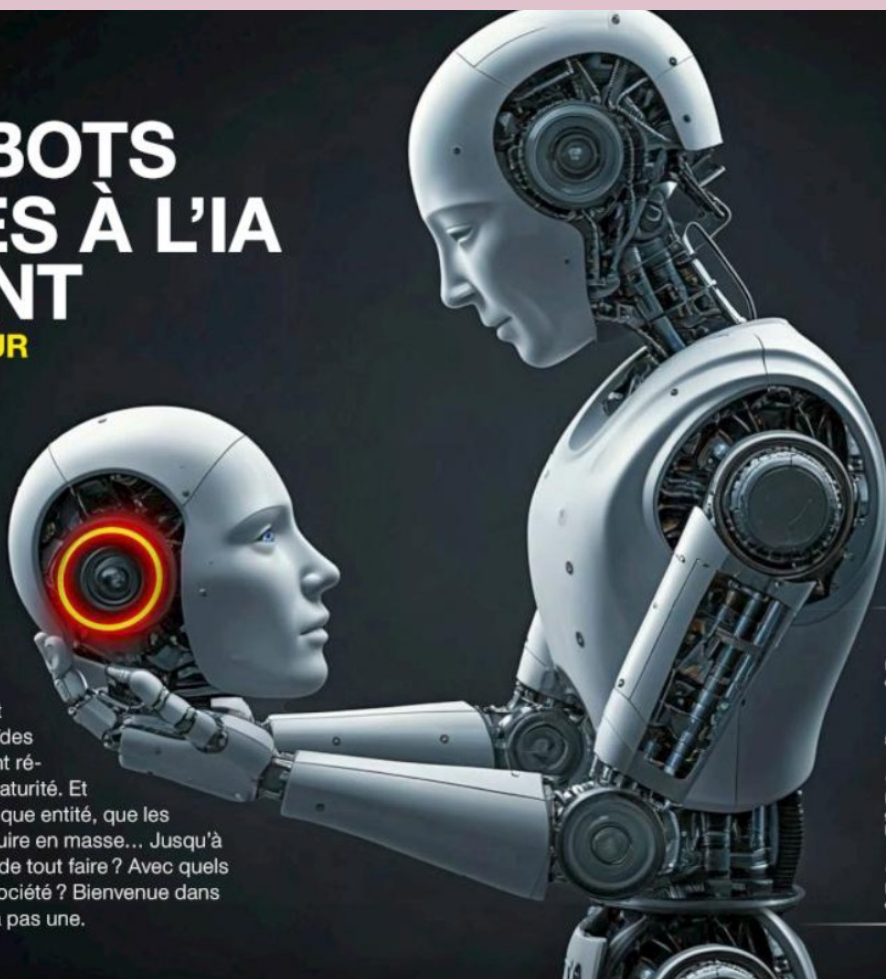


LES ROBOTS BOOSTÉS À L'IA ARRIVENT

QUELS IMPACTS SUR NOTRE MONDE ?

PAR HUGO LEROUX

Les premiers marchent, sautent et manipulent si bien les objets qu'ils commencent à travailler. Les secondes écoutent, comprennent, puis expriment des réponses qui ne cessent de nous étonner... C'est peu dire que les robots humanoïdes et les intelligences artificielles ont récemment acquis une nouvelle maturité. Et voilà qu'ils fusionnent en une unique entité, que les géants de la tech espèrent produire en masse... Jusqu'à l'avènement d'un robot capable de tout faire ? Avec quels impacts sur la planète et notre société ? Bienvenue dans la science-fiction... qui n'en sera pas une.



74
Une révolution de leurs capacités

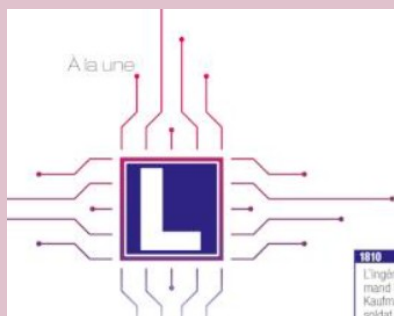
78
5 robots déjà parmi nous

82
Et les nouvelles IA gagnent les robots humanoïdes

86
L'avènement des robots est-il vraiment possible ?

MARS | 2025

À la une



La course a été lancée par Optimus en août 2021, lors de la grande messe annuelle de Tesla, l'AI Day. Ce robot humanoïde de l'entreprise d'Elon Musk a vite été rejoint par les champions d'une dizaine d'autres compagnies américaines, comme Apptek et Agility Robotics. Dans le même temps, les investissements ont crevé le plafond : l'entreprise Figure, soutenue par Microsoft et OpenAI (créatrice de ChatGPT), a levé la somme record de 675 millions de dollars. Et la compétition est devenue internationale, la Chine aspirant à produire en masse des robots à forme humaine dès 2025 – plusieurs sociétés du pays, telles Unitree, Fourier Intelligence ou UBTech Robotics, ont déjà leurs prototypes. Bref, on ne peut plus le nier : la nouvelle génération de robots humanoïdes est arrivée.

Le point commun entre tous ces modèles ? Leurs fabricants les mettent en scène dans des vidéos promotionnelles ultra-léchées, où on les observe plier du linge, déplacer des caisses dans des entrepôts, attraper des balles de tennis, marcher en forêt ou dialoguer avec des humains... À tel point que l'on pourrait craindre une bulle marketing – un phénomène courant dans la tech. "En 2013, le robot Schaft, vainqueur des essais du Darpa

Robotics Challenge, le plus grand concours de robotique au monde, avait impressionné tous les experts par l'étendue de ses capacités. Pourtant Google, après l'avoir racheté, n'a jamais pu lui trouver d'application commerciale", rappelle d'emblée Nicolas Perrin-Gilbert, roboticien et chercheur en apprentissage automatique au CNRS.

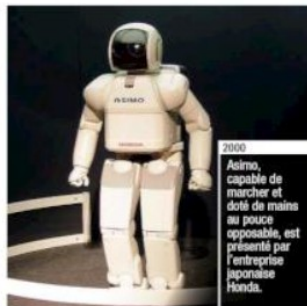
NOUVELLE DONNEE

Où, sauf que certaines avancées récentes changent complètement la donne par rapport à l'ancienne génération d'humanoïdes. "D'abord, on dispose de moteurs électriques légers et performants enfin capables de remplacer les encombrants systèmes hydrauliques, résume Serena Ivaldi, directrice de recherche en robotique à l'Inria et organisatrice de la conférence internationale Humanoid. Ensuite, nous vivons actuellement un boom de l'IA – notamment l'IA générative, comme ChatGPT –, qui permet aux robots de pouvoir

interpréter des ordres exprimés en langage naturel." Ajoutons à cela la démocratisation des techniques d'apprentissage automatique, qui permettent d'octroyer de plus en plus facilement aux robots des facultés telles que la manipulation

1810

L'ingénieur allemand Friedrich Kauffmann crée un soldat mécanique équipé d'une trompette. Actionné par une manivelle, il est considéré comme le tout premier robot humanoïde.



2000

Asimo, capable de marcher et doté de mains au pose opposable, est présenté par l'entreprise japonaise Honda.

2006

La société française Aldebaran Robotics introduit Nao, un petit robot autonome et programmable à des fins de recherche et d'éducation, qui devient très populaire.



2015

Hanson Robotics présente Sophia, un robot doté d'une apparence réaliste et de capacités conversationnelles rudimentaires.



2013

Le puissant Atlas, capable d'évoluer sur terrain accidenté, est révélé par l'entreprise américaine Boston Dynamics.



2022
Tests dévoile Optimus, lançant la nouvelle vague de robots humanoïdes.

résume Nicolas Perrin-Gilbert. D'où les investissements massifs, qui visent à précipiter cette révolution. Il faut dire qu'à l'heure où la démographie mondiale se tasse, au point que le seuil de renouvellement de la population n'est plus assuré dans la majorité des pays occidentaux et asiatiques, la robotique peut être perçue comme un moyen de parer aux pénuries de main-d'œuvre... C'est notamment le cas en Chine. Le pays perdra en effet 109 millions d'habitants d'ici à 2050, avec un vieillissement prononcé de la pyramide des âges.

SUBMERSION EN COURS

La submersion robotique y est d'ailleurs bien entamée : selon l'étude annuelle de la Fédération internationale de la robotique, publiée en septembre dernier, le monde compte 4,2 millions de robots industriels, en croissance de 10 % sur un an. Les pays asiatiques →

sont pionniers : la Chine en possède à elle seule près de la moitié, tandis que la Corée du Sud compte déjà 1 robot pour 10 travailleurs.

Or il n'est question, dans cette étude, que de robots "moches" et spécialisés : bras robotisés, serveurs sur roues, aspirateurs, tondeuses domestiques... Soit l'antithèse des fantasmagoriques humanoïdes censés incarner l'étape d'après, celle des robots à tout faire. "Leur forme humaine leur permet théoriquement de s'insérer dans les environnements conçus pour l'homme : là où il faut grimper des échelles, attraper des objets en hauteur, enjamber des obstacles, marcher en terrain accidenté... mais aussi effectuer des manipulations biomimétiques : saisir de grandes boîtes, se pencher pour ramasser des objets au sol...", prévient Serena Ivaldi. Une polyvalence qui s'avère particulièrement cruciale lorsque les robots évolueront dans des situations imprévisibles, ou devront accomplir des tâches pour lesquelles ils n'ont pas été conçus.

RÔLE DE L'IMAGINAIRE

Voilà pour la vision idéale, "bien renforcée par l'imaginaire des films de SF, qui fait que nous projetons inconsciemment ces qualités sur les robots que nous voyons dans les vidéos promotionnelles", pré-

UNE RÉVOLUTION

L'interaction devient fluide

La société Figure a "connecté" son robot à ChatGPT. Résultat ? Ces nouveaux modèles de langage confèrent aux humanoïdes une ébauche de "bon sens" qui leur permet d'interpréter les demandes des humains.

La dextérité s'affine

Dans une vidéo publiée fin 2024 par les Américains de Physical Intelligence, une pince robotique est filmée pliant du linge. C'est un exploit : les objets mous sont extrêmement difficiles à manipuler.

La marche bipède n'est plus un défi

Grâce aux nouveaux moteurs et à l'IA, les robots apprennent aujourd'hui à marcher via des méthodes automatisées efficaces.

500

C'est, en milliards de dollars, la somme qui sera investie d'ici à 2029 dans les infrastructures américaines dédiées à l'IA.

DE LEURS CAPACITÉS

Les moteurs sont plus efficaces

Les roboticiens peuvent aujourd'hui compter sur des moteurs électriques légers et performants. C'est grâce à cette technologie que le robot H1 de la compagnie chinoise Unitree a réalisé un saut en 2023.

560 KG

C'est la masse maximale que peut soulever le robot Hercule d'Amazon.

Des Français inquiets de l'IA

Une majorité de salariés redoutent les effets de l'IA sur leur emploi.

■ Inquiets
■ Pas inquiets

32%

68%

La Corée du Sud est le 1^{er} État de la robotique

Nombre de robots / 10 000 salariés



4 281 585

C'est, en millions, le nombre de robots industriels déployés dans le monde en 2023.

vient Nicolas Perrin-Gilbert. Sauf que les robots sont encore loin de pouvoir improviser. Il n'y avait qu'à arpenter les couloirs de la conférence "Humanoids 2024" à Nancy, en novembre dernier : les robots bipèdes n'y évoluaient jamais librement, télécommandés de près par leur opérateur humain. Les chutes étaient régulières, et les interactions

via la parole ou la reconnaissance de gestes laborieuses. Autre signe révélateur : dans la vidéo de Tesla montrant son robot servant des cocktails et jouant à des jeux, ce dernier était en fait totalement téléguidé !

Ces limitations n'interdisent pas de premières applications, assure Jean Baptiste Moutet, directeur de recherche à l'Inria et spécialiste

de l'apprentissage machine : "Les robots évoluent d'abord dans un environnement très contrôlé, sur sol plat et pour des tâches simples, comme soulever de petites charges. À partir de là, ils s'améliorent peu à peu." Terrain d'essai tout désigné : le secteur de la logistique et de la fabrication industrielles, souvent en pénurie de main-d'œuvre en rais-

son des conditions de travail difficiles. Optimus est déjà en test dans les usines de Tesla ; Digit, d'Agility Robotics, chez Amazon ; d'Appollo, d'Apptronik, chez Mercedes-Benz. Leur prix ? "Le revenu annuel médian pour un travailleur dans un entrepôt est d'environ 44 000 \$. Il n'est donc pas surprenant que de nombreuses entreprises travaillant sur des humanoïdes visent un coût inférieur à 50 000 \$", analyse Fabrice Norvils, ingénieur chez Valso et auteur d'un récent rapport sur les robots humanoïdes au travail. Elon Musk, jamais avare de prédictions choc, annonce même Optimus pour 20 000 \$ à terme, quand Unitree parle de 16 000 \$...

À L'ÉPREUVE DES TESTS

Reste à voir si le prix pourra être tenu. "Les prix ne pourront baisser ou les capacités doubler tous les deux ans, comme avec les ordinateurs et téléphones, car un robot, c'est de la mécanique avec des pièces qui s'usent. Il faut plutôt le comparer à une voiture, dont les prix et les performances n'évoluent plus si vite, avec des coûts importants en maintenance", note Jean-Baptiste Moutet. "Il y a aussi de sérieuses limitations liées à la fiabilité, même en usine", confiait un ingénieur de Pal Robotics à la conférence Humanoids.

Ainsi, difficile d'éliminer totalement les risques de chute de robots sur des opérateurs bien humains... Et l'autonomie de ces machines gourmandes en énergie – en général 2 heures sur batterie – n'en font pas encore les travailleurs infatigables espérés ! Qu'à cela ne tienne : les tests en usine trancheront. En attendant, voici ceux que vous pourriez un jour croiser à la machine à café...

Terrain d'essai tout désigné : le secteur de la logistique et de la fabrication industrielles, souvent en pénurie de main-d'œuvre en raison des conditions de travail difficiles

5 ROBOTS DÉJÀ PARMI NOUS

Perfectionnés et agiles, ou basiques et fonctionnels, tournés vers l'interaction ou le service... S&V a sélectionné cinq profils de robots humanoïdes caractéristiques des divers usages qui pourraient leur être conférés à l'avenir.

G1, LE BON MARCHÉ

Spécialiste mondial des robots quadrupèdes, la firme Unitree incarne la montée en puissance de la robotique chinoise. Capable de concevoir et construire ses propres moteurs électriques, elle a dévoilé en 2023 son premier humanoïde baptisé H1, rapidement salué pour sa marche fluide, son record de vitesse (3,3 m/s) et sa capacité à réaliser des sauts périlleux. Son successeur G1, révélé cet été, s'avère plus petit mais agile : il est capable de se relever seul, de récupérer son équilibre lorsqu'on le pousse, ou de se plier sur lui-même pour être rangé. La firme semble pour l'instant vendre uniquement le "corps", sur lequel les clients pourront programmer les fonctions qu'ils souhaitent, pour un prix de base record de 16 000 \$. Mais l'annonce est à prendre avec des pincettes – comme celles de ses concurrents –, car le fabricant ne précise pas quelles fonctionnalités exactes couvre ce montant plancher. Pendant ce temps, d'autres firmes chinoises pourraient créer la surprise : pas moins de 27 robots humanoïdes, fabriqués par différentes entreprises, ont été présentés en août 2024 à la Conférence mondiale des robots de Pékin.

G1 (UNITREE)

Taille / poids : 130 cm / 35 kg
Charge maximale : 2-3 kg
Vitesse : 2 m/s
Main : 3 doigts pour 7° de liberté (3° sur le pouce, 2° sur les autres doigts)
Perception : Lidar 3D et caméra de profondeur 360°
Autonomie : environ 2 h
Population : non connue
Date de commercialisation : déjà commercialisée



MIROKAI (ENCHANTED TOOLS)

Taille / poids : 1,26 m / 26 kg
Charge maximale : 3 kg
Vitesse : 2 m/s
Main : 4 doigts avec 2 articulations sur chacun (6° de liberté)
Perception : 2 caméras RGBD, 12 caméras infrarouges, 12 caméras (8 x 8 px), 6 capteurs ultrasons
Autonomie : environ 2 h
Population : 500 robots d'ici à la fin 2025 (objectif)
Date de commercialisation : 2025

MIROKAI, L'AIDE-SOIGNANT

Techniquement, ce Mirokai made in France est un "semi-humanoïde" puisqu'il est monté sur une unique roue sphérique. Ce choix stratégique le dispense des complications techniques et des risques de chute liés à la marche bipède. Son concepteur n'est autre que Jérôme Monceaux, le père des célèbres petits robots Pepper et Nao, qui se sont écoulés à 40 000 exemplaires dans le monde. Dans leur lignée, Mirokai se destine à l'accueil et au service, d'abord dans des établissements hospitaliers et bientôt dans l'hôtellerie, où son aspect inspiré du jeu vidéo

et des mangas doit rassurer voire divertir les utilisateurs. "Dans ces lieux, la roue ne constitue pas non plus une limitation puisqu'ils sont adaptés aux normes PMRF", ajoute l'ingénieur. Actuellement en test dans plusieurs établissements de l'AP-HP, les premières missions de Mirokai consistent à accompagner des enfants malades en salle d'IRM – que les soignants doivent éviter pour des raisons de radioprotection – et à transporter des chariots ou des plateaux dans les couloirs. "Notre robot est pensé pour aider les soignants et non les remplacer", clame Jérôme Monceaux.

Une forme humaine à bien doser

C'est la théorie de la "vallée de l'étrange" : plus un robot androïde ressemble à un humain, plus ses imperfections nous paraissent monstrueuses. Quelles formes sommes-nous alors prêts à accepter ? En 2023, des chercheurs du CNRS ont creusé cette question : ils ont soumis plusieurs designs de robots (avec différents nombres de jambes, sur roues, aux mains variées...) à des humains pour en mesurer le degré d'acceptation ou d'hostilité. Résultat : lorsque le robot nous ressemble trop, nous établissons envers lui un rapport de domination qui nous pousse à des comportements méprisants ou abusifs ! "C'est pourquoi il vaut mieux concevoir des robots qui partagent le moins de caractéristiques physiques avec les humains. Donc, si possible, pas humanoïdes", conclut Tatjana Nazir, coautrice de l'étude.



DIGIT, LE LOGISTICIEN

Avec ses jambes d'autruche aux genoux inversés et ses crochets en guise de mains, Digit ne cherche pas à vendre du rêve. Il est pourtant à ce jour le seul robot humanoïde à avoir été acheté par plusieurs grosses entreprises ! Son fabricant, Agility Robotics, l'a en effet conçu dans un but précis : travailler dans la logistique, un secteur en plein boom face à l'essor de l'e-commerce, et qui peine à recruter en raison des horaires de travail de nuit, des tâches répétitives et des faibles niveaux de rémunération. Basé sur des algorithmes anciens mais éprouvés, Digit ne semble pour l'instant effectuer qu'une seule tâche : attraper des bacs en plastique circulant sur des tapis roulants pour les placer sur des étagères. D'après les vidéos dévoilées par Agility, il semble aussi capable de comprendre et d'exécuter les instructions qui lui sont données à l'oral quant à l'endroit où il doit ranger tel ou tel objet. Et cela semble suffire pour ses premiers clients-testeurs, les géants de la logistique Amazon, GXO ou Schaeffler, qui rêvent d'automatiser leurs entrepôts à 100%. Si ce premier cas d'application pratique se révèle concluant, les versions ultérieures pourraient devenir bien plus polyvalentes...

DIGIT (AGILITY ROBOTICS)	
Taille / poids	1,72 m / 42 kg
Charge maximale	18 kg
Vitesse	n.c.
Main : pinces	
Perception : 7 caméras	
Autonomie : 1 h de recharge pour 4 h de travail (objectif : 1 h pour 10 h)	
Population : quelques centaines à date	
Date de commercialisation : déjà commercialisé	



ATLAS 001, L'OUVRIER

Boston Dynamics a longtemps fait figure de leader mondial de la robotique humanoïde, en témoignant les exploits en parcs d'obstacles et aux sauts périlleux arrière de son imposant robot Atlas... ancienne version. Car la firme américaine, rachetée par Hyundai, vient tout juste de dévoiler son successeur :

ATLAS 001 (BOSTON DYNAMICS)	
Taille / poids	n.c.
Charge maximale	n.c.
Vitesse	n.c.
Main : 3 doigts à 2 articulations chacun (6° de liberté)	
Perception : 6 caméras	
Autonomie : environ 2 h	
Population : 1 (estimation)	
Date de commercialisation : n.c.	

Atlas 001. Celui-ci a troqué le (lourd) système hydraulique pour un système électrique plus moderne, compact et léger. Et s'il n'effectue pas encore d'acrobaties, il s'avère très agile, toutes ses articulations pouvant pivoter à 360°. Autre atout : selon une vidéo récente, le robot semble capable de se lever tout seul depuis la position allongée, ce que très peu de ses concurrents semblent en mesure de réaliser. La firme n'a pas encore dévoilé de date de commercialisation, mais elle devrait bientôt le tester dans les usines de son nouveau propriétaire coréen. Ses mains grossières semblent d'ailleurs conçues avant tout pour la manipulation d'objets lourds et imposants... pour l'instant.

FIGURE 02, L'INFLUENCEUR

Avec cet androïde, Figure vise le même créneau que Tesla avec Optimus : créer un robot "généraliste" ultime. Elle partage aussi la même stratégie : miser en particulier sur l'IA – parmi ses financeurs figurent OpenAI, firme mère de ChatGPT, Nvidia et Microsoft – et stimuler l'imaginaire à grands coups de vidéos marketing virales, dont le degré de mise en scène est difficile à mesurer. L'accent est particulièrement mis sur la dextérité du robot et son utilité : on l'a ainsi aperçu ranger de la vaisselle ou actionner une machine à café. Dévoilée en août 2024, sa nouvelle version Figure 02 disposerait de trois fois plus de capacités de calcul pour l'IA embarquée, ainsi que d'une autonomie supérieure, jusqu'à 5 h. Sa dernière vidéo, tournée dans une usine de BMW, annonce qu'il peut réaliser une même opération – dans cet exemple, placer des pièces en tôle sur une machine – jusqu'à 1 000 fois par jour. Reste à voir si ses performances tiendront sur la durée pour remplacer des ouvriers humains... et battre Optimus qui, lui, peut s'entraîner directement dans les usines de fabrication des voitures électriques Tesla.

FIGURE 02 (FIGURE)	
Taille / poids	1,70 m / 70 kg
Charge maximale	20 kg
Vitesse	1,2 m/s
Main : de forme humaine (5 doigts), dotée de 16° de liberté	
Perception : 6 caméras RVB embarquées	
Autonomie : batterie personnalisée de 2,25 kWh pour une autonomie annoncée de 5 h	
Population : 7 à date (estimation)	
Date de commercialisation : déjà commercialisé	



ET LES NOUVELLES IA GAGNÈRENT LES ROBOTS HUMANOÏDES...

Incontournable dans la robotique, l'IA fait de l'ombre aux anciennes méthodes de programmation. Fera-t-elle émerger des robots polyvalents, capables d'apprendre n'importe quelle tâche ?

Depuis le début des années 2000, la puissance de calcul ainsi que la disponibilité des données sur internet ont été multipliées par 15 à 20. Ici se trouve le potentiel à venir de la robotique. Cette phrase de Francesco Nori, directeur de la robotique chez DeepMind, le laboratoire d'intelligence artificielle de Google, a été prononcée le 22 novembre 2024 à Nancy, lors de la conférence "Humanoids 2024",

qui réunissait la crème des chercheurs du domaine. Et elle résume le rêve de nombre d'entre eux : que les progrès récents de l'IA ouvrent la voie à des robots "à usage général", des machines capables d'accomplir n'importe quelle tâche à partir de simples instructions orales – bref, le robot fantasmé par les auteurs de science-fiction. Ce qui est sûr, c'est que l'IA telle qu'on la définit actuellement – l'apprentissage automatique de tâches

à partir de grands jeux de données – démocratise de nombreuses capacités robotiques, allant de la marche bipède à la manipulation d'objets, en passant par l'interaction verbale. "De plus en plus de roboticiens l'utilisent, au détriment de l'approche historique de la robotique, qui consiste à optimiser des trajectoires à partir d'une modélisation du robot et du monde extérieur définie manuellement", explique Nicolas Perrin-Gilbert,

spécialiste en apprentissage automatique au CNRS. L'IA, censée généraliser à partir d'une masse brute de données d'apprentissage, s'avère plus adaptable puisqu'elle ne nécessite pas cette programmation exhaustive.

SYSTÈME DE RÉCOMPENSE

Un cas de figure parlant est la démarche des robots. "Elle est de plus en plus souvent mise au point grâce à l'apprentissage par renforcement", explique Nicolas Mansard, chercheur au CNRS. Cette approche par essai-erreur consiste à laisser le système robotique procéder à des mouvements aléatoires en lui donnant une "récompense" lorsqu'il génère des comportements attendus – par exemple quand il met un pied devant l'autre sans tomber. "Ceci jusqu'à ce que le robot construise lui-même un système de commande qui fonctionne", décrit le spécialiste.

La stratégie a longtemps semblé utopique, car elle nécessitait d'accumuler des centaines de milliers d'essais sur de "vrais" robots... Sauf que cet entraînement peut désormais s'effectuer dans des environnements virtuels, comme si les robots évoluaient dans des jeux vidéo ultra-réalistes ! "Grâce à l'avènement récent de super-calculateurs basés sur des processeurs graphiques ultra-performants (GPU), on peut simuler, en quelques jours de calcul, des millions d'années de mouvements de robotique, que l'on transpose ensuite dans le robot physique", explique Jean-Baptiste Mouret, directeur de recherche à l'Institut national de recherche en sciences et technologies de la numérik (Inria).

Grâce à cette approche, des chercheurs de l'École polytechnique de Zurich (ETH Zurich), en Suisse, ont obtenu une agilité impressionnante chez des robots quadrupèdes, "ceci pour une fraction du budget de Boston Dynamics", précise Nicolas Perrin-Gilbert. Pour la bipédie, par nature plus complexe, le défi s'annonçait plus important : comme un simulateur représente imparfaitement notre monde, certains systèmes de commande obtenus virtuellement échouaient une fois transposés dans la réalité. Mais ce *reality gap* semble en passe d'être franchi grâce à la multiplication de simulations introduisant de l'aléatoire – variété de terrains, de formes de pied, etc. "On parvient depuis peu à égaler les performances d'anciennes méthodes expertes", résume Nicolas Mansard. Malheureusement, cet apprentissage par renforcement n'est pas adapté à toutes les tâches. Pour une raison simple : "En matière de

marche, il est assez facile d'établir un gradient des performances, sous la forme d'un code qui dit 'ce robot-là qui avance à 6 m/s sans tomber est meilleur que celui-ci qui va à 5 m/s', et donc de générer un système de récompense, schématisé Jean-Baptiste Mouret. Mais qu'est-ce que c'est, bien faire la cuisine ? Cela nécessite de prévoir beaucoup trop de cas particuliers, comme vérifier si, après avoir cassé les œufs, le robot garde bien les coquilles de côté, puis les met à la poubelle, etc. On retombe sur la complexité d'une programmation explicite tâche par tâche, qui est potentiellement infinie."

APPRENTISSAGE PAR IMITATION

En matière de manipulation d'objets, les chercheurs se sont tournés vers une alternative : l'apprentissage par imitation. Cette méthode consiste à téléguider un robot tout en enregistrant les mouvements réalisés, par exemple en vidéo, avant de lui demander de refaire la même chose tout seul. "Dans ce cas, plus besoin de programmer une fonction pour dire ce qui est bien ou pas ; il suffit d'accumuler assez d'exemples pour que le robot puisse généraliser", explique le chercheur. L'approche bénéficie là aussi à plein régime des progrès récents sur le traitement et la reconnaissance automatique d'images.

La start-up Physical Intelligence a ainsi publié, fin 2024, une vidéo dans laquelle son bras robotique vide un lave-linge et l'un des vêtements – une poussette tant le comportement des objets mous s'avère difficile à appréhender par d'autres méthodes ! "La société a accumulé 10 000 heures de données pour différentes tâches de manipulation, chacune nécessitant entre

10 et 100 démonstrations par des opérateurs humains", révèle Jean-Baptiste Mouret. Elle n'est pas la seule : d'autres géants du secteur, comme Tesla et des laboratoires de recherche, se sont, quant à eux, lancés dans la construction de gigantesques bases de données de démonstration.

MODÈLES DE LANGAGE

Reste alors à doter d'un "esprit", d'un sens commun, ces robots habiles... C'est le rôle qu'entendent jouer les grands modèles de langage type ChatGPT, Mistral AI, Claude ou Llama, dont les progrès sont aussi époustouflants que leur avènement est récent. Fusionnés aux programmes de vision automatique – qui excellent déjà dans les voitures autonomes –, ils donnent lieu à des modèles de langage-vision-action (VLM) permettant aux machines d'analyser les ordres formulés en langage naturel, et d'effectuer des analyses rapides de leur environnement pour y répondre.

La fusion de toutes ces capacités permettra-t-elle la mise au point de robots véritablement polyvalents ? "La démarche actuelle des entreprises comme Tesla consiste à enseigner une liste d'actions de plus en plus étendue à leurs robots, et de rendre ces dernières activables par des commandes en langage naturel. Cette méthode nécessite toutefois un apprentissage préalable des tâches, ce qui ne permet pas de produire des robots très adaptables", observe Jean-Baptiste Mouret. En résumé, le robot qui apprend par lui-même n'est pas encore né... "Le grand défi de la robotique serait de connecter des instructions très générales à des actions non prédéterminées ou pré-apprises !" appuie le spécialiste.

Les "modèles de fondation", sur lesquels les acteurs du domaine travaillent d'arrache-pied, pourraient répondre à cette demande. Comparables à de véritables cerveaux destinés aux machines, ces projets visent à entraîner un seul et unique programme sur l'ensemble des données disponibles (textes, vidéos, enregistrements de gestes robotiques, simulations, etc.), avec l'espoir, in fine, que le robot apprenne tout seul une diversité de tâches et

généralise ces savoirs tous azimuts. Ce qui nécessite d'élargir encore les sources de données, via entre autres l'analyse directe des gestes effectués dans les vidéos disponibles sur des plateformes comme YouTube ou collectées à partir de lunettes de réalité augmentée.

ERREURS ET HALLUCINATIONS

"Réaliser un grand nombre de données sera une condition nécessaire mais non suffisante pour obtenir

des machines à tout faire", prévient cependant Xavier Alameda-Pineda, chercheur à l'Inria. D'autres obstacles donnent en effet du fil à retordre aux développeurs, comme les fameuses "hallucinations" de l'IA générative, que l'on n'est toujours pas capable de détecter. "Les modèles sont incapables de dire 'je ne sais pas'", explique le scientifique. Que ChatGPT invente de toutes pièces certaines réponses, cela nuit à sa fiabilité mais ne

cause pas tellement de dégâts : en revanche, si un robot de 50 kg se met à faire n'importe quoi, les conséquences peuvent être bien plus dommageables."

PROCESSUS DE DÉCISION INCONNU

Le fonctionnement en "boîte noire" des programmes d'apprentissage automatique, qui ne permet pas d'expliquer leur processus de décision, est un autre facteur à prendre en compte : qui porte la responsabi-

lité si un robot commet une action aux conséquences funestes ? Ce problème juridique très concret s'avère déjà limitant en ce qui concerne l'essor des voitures autonomes.

Selon certains chercheurs, ces zones d'ombre pourraient s'éclaircir assez rapidement. "Le nombre d'erreurs et d'hallucinations des IA génératives a nettement baissé, non pas à cause de technologies disruptives, mais grâce à l'amélioration progressive de ces outils, mieux entraînés et mieux utilisés", estime Christophe Cerisara, spécialiste des modèles de langage à l'Inria. Ces progrès seront-ils suffisants pour gagner notre confiance et laisser les robots déambuler, travailler, habiter parmi nous ? La question se posera peut-être plus vite que prévu.

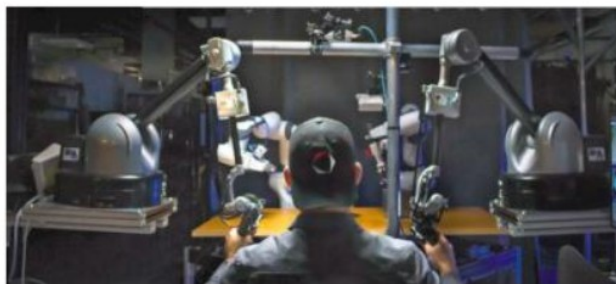
Trois nouvelles méthodes pour entraîner les robots

✓ Les plonger dans un monde numérique pour qu'ils s'exercent

Dans cet environnement virtuel développé par la société américaine Nvidia, des centaines de robots s'exercent à la marche ! Les développeurs peuvent modifier les conditions qu'ils rencontrent : du sable ou du bitume, sur terrain plat ou accidenté, etc.

> Les guider pour leur apprendre des gestes

Sur cette image, un opérateur de Toyota pilote des bras robotiques pour réaliser une tâche précise. En analysant et en enregistrant tous les mouvements effectués, le robot pourra ensuite répéter la tâche seul.



Les abreuver de données pour qu'ils apprennent tout

Internet fourmille de vidéos : en analysant ces milliers d'heures, les robots peuvent apprendre un nombre incalculable de tâches différentes. Si cette méthode est encore balbutiante, elle pourrait mener au robot généraliste, capable de tout faire, ou presque.

Et des robots émotionnels, alors ?

Des humanoïdes capables non seulement de comprendre nos émotions, mais aussi de réagir comme nous, voilà le grand fantasme de la science-fiction. Sauf que, malgré les progrès réalisés récemment en matière d'intelligence robotique, cette perspective semble encore lointaine. "Cela impliquerait d'abord de recueillir d'immenses quantités de vidéos montrant des humains en train d'interagir entre eux, analyse Xavier Alameda-Pineda, spécialiste du sujet à l'Inria. Ensuite, il faudrait pouvoir 'étiqueter' chacune de ces interactions, en stipulant lesquelles traduisent telle ou telle émotion. Or ce travail est à la fois très délicat – concernant les questions de respect de la vie privée, par exemple – et très dépendant des contextes culturels." Bref, le robot meilleur ami de l'humain n'est pas pour tout de suite.

À la une

Et si la débauche de métaux et d'énergie nécessaire au développement des robots était rédhibitoire dans un monde aux ressources limitées ? C'est la question que se posent un nombre de plus en plus important de chercheurs.

L'AVÈNEMENT DES ROBOTS EST-IL VRAIMENT POSSIBLE ?

elon Musk l'assure : 1 milliard de robots humanoïdes envahiront le monde d'ici vingt ans. Pour Brett Adcock, le fondateur de Figure, chacun posséderait un robot au même titre qu'une voiture ou un téléphone. Fidèles à leurs habitudes, les patrons de la tech ne lésinent pas sur les prophéties marketing. Sauf qu'un nombre croissant de chercheurs n'y croient pas. Pour une raison simple : "La production massive de robots n'est pas compatible avec les limites planétaires", tacle Adrien Escande, chercheur à l'Inria. L'énergie phénoménale

dépensée pour entraîner l'intelligence artificielle, tout d'abord, est pointée du doigt. "Chaque entraînement de réseau de neurones artificiels et chaque requête sur ChatGPT ont un coût environnemental caché", rappelle Jean-Pierre Gazeau, chercheur au CNRS.

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime ainsi que toute interaction avec un programme de type ChatGPT consommerait à l'avenir dix fois plus d'électricité qu'une recherche Google classique, même en prenant en compte le progrès technique. Elle prévoit aussi que les besoins énergétiques des data

centers, tirés par l'IA et les cryptomonnaies, atteindront ceux d'un pays comme le Japon d'ici à 2026, soit plus de 1000 TWh – contre 460 TWh en 2022. Sans compter le refroidissement des serveurs de calcul. Le chercheur américain Shaolei Ren a de son côté calculé que la consommation d'eau pour une simple requête par ChatGPT, comme un mail de 100 mots, équivaut à une bouteille d'eau pleine.

"MÉTAUX CRITIQUES"

Certes, cette situation serait transitoire : "C'est une question d'années avant de pouvoir embarquer

les calculs d'IA dans des puces spécialisées au sein des robots", estime Jean-Baptiste Mouret, de l'Inria. Mais cela entraîne la question de la production des puces... et de toute la mécanique embarquée dans un robot ! Car un humanoïde tel qu'Optimus Gen 2, de Tesla, embarque pas moins de 40 petits moteurs électriques, des dizaines de capteurs de force, caméras et calculateurs, sans oublier une batterie de 2,3 kWh – environ 20 fois moins que celle d'un téléphone.

Or la fabrication de ces composants requiert les mêmes métaux que celle de nos smartphones, voi-

tures électriques et autres technologies d'avenir. "En plus d'avoir un impact environnemental colossal à l'extraction, l'approvisionnement de nombre d'entre eux s'annonce compliqué pour des raisons géopolitiques, de calendrier pour ouvrir de nouvelles mines ou, tout simplement, de disponibilité sur Terre", rappelle Adrien Escande.

En 2023, l'UE a défini une liste de ces "métaux critiques", définis comme essentiels pour les technologies modernes et les industries stratégiques, mais dont l'approvisionnement comporte des risques. On y retrouve le lithium et le cobalt,

indispensables aux batteries ; les terres rares, utilisées dans les moteurs électriques et les écrans ; le cuivre des câbles électriques.

COURSE À L'EXTRACTION

D'après l'AIE, la demande pour les trois métaux critiques essentiels (cuivre, nickel, lithium) devrait augmenter de 1,5 à 8 fois d'ici à 2040 en raison de l'objectif zéro émission fixé par de nombreux pays à l'horizon 2050. L'humanité devrait ainsi extraire autant de métaux dans les 30 prochaines années que tout ce qu'elle a déterré jusqu'à présent ! Ceci dans un

Des chercheurs de l'Académie chinoise des sciences ajustent un robot humanoïde de la "famille Q" dans un laboratoire à Pékin.

Les humanoïdes pourraient travailler...



À... dans les usines

Atlas chez Hyundai, Optimus chez Tesla, Figure chez BMW (ci-dessus, Figure 02). Tous ces robots sont actuellement en phase de test dans des usines, notamment automobiles. Ils pourraient y remplacer les ouvriers pour effectuer certaines tâches répétitives et potentiellement dangereuses.

contexte de risques géopolitiques liés à la concentration de l'extraction dans certains pays: la Chine extrait 70% des terres rares mondiales, qui servent notamment aux aimants des moteurs électriques; l'Australie préleve plus de la moitié du lithium mondial, qui est utilisé dans les batteries des robots; le Congo produit 60% du cobalt, que l'on retrouve notamment dans les batteries lithium-ion.

PRIORISER LES USAGES

À l'aune de toutes ces contraintes, certains chercheurs explorent une voie plus durable: l'écoconception de robots. Sébastien Briot, du Laboratoire des sciences du numérique

de Nantes, a par exemple développé en 2018 un bras robotique recourant à un matériau biosourcé, le bois, pour remplacer des pièces métalliques. Las, les gains environnementaux, calculés via une "analyse de cycle de vie" (ACV), sont mitigés: "Selon les indicateurs, l'impact est réduit d'environ 25% par rapport à la version tout-métallique", résume le chercheur. Principale raison: "Le bois ne permet pas de se passer des articulations, qui restent motorisées, ni de l'électronique."

La question de l'utilité des robots humanoïdes doit donc être explorée: "Dans un contexte de limitation des ressources, on pourrait avoir à prioriser les usages. Vaut-il mieux



<... dans les entrepôts

Amazon et d'autres géants de la logistique testent déjà dans leurs entrepôts des robots humanoïdes - tel Digit (ci-contre à l'arrière-plan) - pour effectuer certaines tâches de manutention et de préparation de commandes.

<... derrière les guichets

Comme le pressing Enchanté Tools, l'entreprise qui a créé Mirokaï, les robots humanoïdes équipés d'intelligence artificielle pourraient remplacer les employés pour l'accueil et le service à la clientèle (ci-contre dans un Henna Hotel, au Japon).

38 000

C'est le nombre de robots humanoïdes qui seront déployés dans le monde en 2030, principalement pour un usage industriel, selon le cabinet d'analyse britannique Omdia. Par comparaison, l'IA, à elle seule, pourrait rendre obsolète 92 millions d'emplois d'ici à 2030, selon le FMI.



des voitures électriques ou des robots humanoïdes? Et pour quels usages ces derniers apporteront-ils une vraie plus-value?", s'interroge Sébastien Briot. Cantonner les robots à quelques usages raisonnés, comme la transition agricole, pourrait constituer une solution: "Si l'on veut se passer de produits phytosanitaires, cela implique plus de main-d'œuvre ou de travail mécanique pour désherber. Or peu de personnes seront prêtes au dur labeur dans les champs", suppose le roboticien.

Autre domaine prometteur, la robotique médicale. Serena Ivaldi, chercheuse à l'Inria, rêve d'envoyer ses robots sur Mars: "L'exploration spatiale est le domaine par excel-

lence où envoyer des humains s'avère très risqué et coûteux, avec un intérêt scientifique très limité", pointe-t-elle.

TROP DE TECHNO-OPTIMISME?

Reste que même dans ce futur moins ambitieux, le robot humanoïde ne convainc pas tout le monde: "Je ne suis pas certain que cette forme ait plus d'intérêt que des robots plus simples et plus spécialisés", avance Adrien Escande. Un discours assurément trouble-fête dans le techno-optimisme ambiant... "Biberoisés à la SF et naturellement fascinés par la technologie, peu de roboticiens et d'entrepreneurs sont prêts à se poser ces questions", déplore-t-il. Heureusement, d'autres le feront.

