

ROBOTIQUE

Séance thématique organisée par Abderrahmane KHEDDAR

Directeur Joint Robotics Laboratory

Directeur de recherche CNRS

Membre de l'Académie des technologies

Séance du 9 juillet 2025

Résumé

À l'origine, l'IA n'a pas été conçue pour interagir avec le monde physique. Une part non négligeable de la robotique s'appuie cependant désormais sur l'IA, y compris l'IA générative, par exemple pour désigner les tâches à accomplir en langage naturel. La *physical intelligence* se heurte toutefois à de nombreux défis, comme le faible nombre de modèles disponibles en matière d'environnement réaliste ou de tâches robotiques, l'ancrage dans le monde réel, le défi de la complexité ou encore l'alignement avec les objectifs humains.

Alors que les robots rigides articulés classiques s'inspirent généralement de la morphologie humaine, la robotique souple trouve son inspiration chez toute sorte d'être vivants, comme l'éléphant, dont la trompe effectue des mouvements à la fois souples et précis et leur permet de palper les objets avant de les saisir, mais aussi le poisson ou la pieuvre. L'équipe Defrost de l'INRIA a ainsi développé une application permettant de guider les cathéters de façon très souple et précise à travers les vaisseaux sanguins.

Les ruptures technologiques actuelles dans le domaine de la robotique et de l'IA constituent des opportunités pour la France et pour l'Europe et peuvent leur donner l'occasion de reconquérir leur place en recherche et dans l'industrie. C'est pourquoi une partie importante des cinq grands programmes lancés par le SGPI (Secrétariat général pour l'investissement) concerne la robotique, comme le programme Défis transfert robotique, qui a pour objectif d'aider les porteurs de projets à traverser la « vallée de la mort », c'est-à-dire à passer du TRL4 au TRL7.

Intervenants

Raja CHATILA

Professeur émérite à la Sorbonne
Ancien président de la IEEE Robotics and Automation Society
Ancien directeur du LAAS

Christian DURIEZ

Directeur de recherche à l'INRIA
et responsable du programme
robotique organique

Catherine SIMON

Secrétaire générale pour l'investissement
robotique France 2030

Damien CHABLAT

Responsable du programme *Défi Robotique*
auprès de l'ANR

Sommaire

Comment l'IA générative modifie-t-elle la recherche en robotique ?	2
Les robots souples, vers de nouvelles machines	5
Enjeux et opportunités de l'accélération des innovations robotiques : place de la France et de l'Europe	7
Innovations et Projets Robotiques soutenus par l'ANR dans le cadre de France 2030	7
Débats	8

Raja Chatila est professeur émérite d'Intelligence artificielle, de robotique et d'éthique du numérique à Sorbonne Université et précédemment directeur de recherche au CNRS. Il a dirigé l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (2014-2018) et le laboratoire d'excellence SMART sur les interactions humain-machine (2012-2020) à Sorbonne Université, ainsi qu'auparavant le Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS) du CNRS à Toulouse (2007-2010). Il a été Directeur scientifique adjoint à l'Institut des Sciences Informatiques (INS2I) du CNRS (2011- 2014).

Christian Duriez a effectué sa thèse au CEA et obtenu un doctorat en robotique de l'Université d'Évry en 2004. Il a ensuite été chercheur postdoctoral au sein du CIMIT SimGroup à Boston, États-Unis. En 2006, il a rejoint l'INRIA, centre de Lille, où il a travaillé sur la simulation interactive d'objets déformables et le rendu haptique, avec un accent particulier sur la simulation chirurgicale. Il a co-créé le logiciel open source SOFA en 2006 et cofondé l'entreprise InSimo en 2013. En 2014, il a été promu Directeur de Recherche, puis a créé et dirigé l'équipe DEFROST de 2015 à 2024. En 2018, il a été chercheur invité à l'Université de Stanford, Californie, États-Unis. Il a cofondé en 2024 l'entreprise Compliance Robotics, qu'il dirige actuellement. Par ailleurs, il codirige pour l'INRIA le PEPR exploratoire Organic Robotics, qui vise à explorer les enjeux techniques et sociétaux liés à l'adoption et à l'adaptation des robots.

Catherine Simon est conseillère Numérique industriel au Secrétariat Général pour l'Investissement (SGPI) depuis décembre 2022, où elle pilote la stratégie nationale en robotique et machines intelligentes. Son expertise et son engagement dans ce secteur sont le fruit de plus de 15 ans d'implication active dans l'écosystème mondial de la robotique. En 2019, elle rédige le rapport parlementaire Bonnell-Simon sur la robotique française, en sa qualité d'assistante parlementaire. Auparavant, elle a fondé et dirigé Innorobo de 2009 à 2018, un événement de référence dans le domaine de la robotique. Elle a également été directrice générale de Robopolis pendant quatre ans et secrétaire générale de la fédération de robotique de service Syrobo.

Damien Chablat a obtenu son doctorat en génie mécanique de l'École Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes en 1998 sous la direction de Philippe Wenger. Il a ensuite travaillé pendant un an au Centre de Machines Intelligentes de l'Université McGill avec le professeur Angeles. En 1999, il rejoint le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) pour travailler au sein du groupe de robotique de l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN). Il est devenu chercheur senior au CNRS en 2011. Depuis le 1^{er} janvier 2017, l'IRCCyN a été renommé LS2N, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes. Depuis février 2023, il est responsable de l'action robotique à l'Agence Nationale de la Recherche.



Comment l'IA générative modifie-t-elle la recherche en robotique ?

Raja Chatila

L'intelligence artificielle comprend trois grands domaines, l'IA symbolique, l'apprentissage machine et l'IA appliquée à la robotique.

L'IA symbolique

L'expression « intelligence artificielle » a été utilisée pour la première fois en 1956, au Dartmouth College, par John McCarthy, un chercheur du MIT (Massachusetts Institute of Technology). L'intelligence dont il voulait parler recouvrait le raisonnement, la formation de concepts ou encore la résolution de problèmes, mais pas l'interaction avec le monde physique. Cette focalisation sur une intelligence désincarnée constitue le « péché originel » de l'intelligence artificielle.

L'apprentissage machine

L'apprentissage machine vise à transformer des données en connaissances. Cette notion est apparue en même temps que celle d'IA mais n'a pu être mise en œuvre que dans les années 2010, à partir du moment où le volume de données mobilisables et la puissance de calcul des réseaux de neurones sont devenus suffisants. En effet, pour passer de la description d'une chaise (quatre pieds, un plateau horizontal et un autre presque vertical) à une véritable compréhension de ce qu'est une chaise, la solution retenue à travers l'apprentissage machine consiste à construire ce concept de façon statistique. Un algorithme extrait les similarités ou régularités d'innombrables images de chaises et devient progressivement capable de reconnaître une chaise qu'il n'a jamais vue ou qu'il n'a vue que partiellement.

L'IA appliquée à la robotique

Si une partie de la robotique s'appuie désormais sur l'IA (notamment pour l'architecture cognitive, la perception, la décision, l'action, l'interaction), des pans entiers de cette activité n'y font pas appel (l'automatique, la mécanique, l'électronique, l'informatique temps réel, la sûreté de fonctionnement ou l'intégration système). Il n'existe encore aucun système robotique couplé à une IA qui puisse préparer du café sur une machine à café qu'il ne connaît pas préalablement.

L'IA générative

La théorie de l'IA générative a été présentée pour la première fois dans l'article «Attention Is All You Need» publié en 2017 par huit salariés de Google. Alors que l'IA parvenait sans trop de difficulté à reconnaître des images grâce au contexte présent dans ces images elles-mêmes, elle se montrait beaucoup moins habile en ce qui concernait les textes, dont le contexte n'est pas toujours immédiatement décelable. Par exemple, si je prononce le mot *pomme*, il peut s'agir d'un fruit, de la marque Apple ou encore de la pomme d'Adam. Le contexte qui permettrait de lever l'ambiguïté (par exemple l'évocation de courses effectuées au marché) peut être plus ou moins distant par rapport à l'occurrence de ce mot.

La prise en compte du contexte des mots a été rendue possible grâce à une architecture de réseau de neurones particulière, appelée *Transformers*, reposant sur un modèle statistique du langage élaboré à partir de milliards de données. Ce modèle établit, par exemple, que le mot *croquer* est souvent suivi du mot *pomme*, et parfois aussi du mot *souris* - mais seulement lorsqu'il est question de chats. Le processus fondamental de l'IA générative consiste à prédire le « meilleur mot suivant », c'est-à-dire l'enchaînement de mots statistiquement le plus probable à partir de la requête soumise à l'algorithme.

L'application de l'IA générative à la robotique

Le robot est une machine matérielle soumise aux contraintes physiques et spatiales de son environnement. Or, la gravité, la distance ou l'inertie sont des notions que l'IA ignore et qu'elle peut tout au plus s'efforcer de modéliser, mais sans les comprendre. Le robot est également soumis au temps (événements, durées, temps-réel, évolutions dynamiques externes), ou encore à l'action d'agents tiers. Il doit prendre des décisions en sélectionnant des informations pertinentes à partir d'un flux perceptif multi-sensoriel continu, mais limité et incertain. Il doit néanmoins procéder avec rationalité et efficacité, car ses ressources en énergie ou en puissance de calcul et en mémoire sont limitées.

Alors que l'IA générative repose sur des modèles de langage, le modèle d'une robotique intelligente devrait être construit sur l'action. L'application de l'IA générative à la robotique suppose ainsi de passer des LLM (Large Language Models) aux VLM (Visual-Language Models) et aux VLA (Visual-Language-Action Models). Il faut, pour cela, constituer des bases de données spécifiques qui permettront, par exemple, d'utiliser l'IA générative pour l'interprétation de scènes et la détection d'objets, ou pour identifier les positions et modes de prise des différents objets.

Le recours à l'IA générative pour des applications robotiques permet de spécifier les tâches en langage naturel plutôt qu'en programmation formelle, qu'il s'agisse de la désignation des tâches à accomplir ou encore des interactions humains-robot pendant l'opération. De même, le robot peut expliquer ses décisions et ses actions en langage naturel, avec une dose de sens commun dans la mesure où il s'appuie sur de très nombreux exemples. Enfin, on peut le connecter à de nouvelles bases de données pour des applications particulières ou pour affiner son réglage.

En novembre 2024, la startup *Physical Intelligence*, cofondée, notamment, par Sergey Levine, professeur à l'Université de Californie à Berkeley, a publié un article dans lequel elle montre comment son logiciel, appelé $\pi 0$ (pi-zéro, pi renvoyant à *physical*) et entraîné à partir d'un VLA de Google comprenant 3,3 milliards de paramètres, est capable de fonctionner sur n'importe quel robot, éliminant ainsi le besoin de développer un logiciel pour chaque tâche spécifique. Les robots équipés de ce logiciel peuvent, par exemple, plier des chemises, emballer des courses ou sortir des toasts d'un grille-pain.

Les défis de la physical intelligence

Compte tenu du faible nombre de modèles disponibles en matière d'environnement réaliste ou de tâches robotiques, l'entraînement de l'algorithme nécessite la création de vidéos synthétiques, comme celles fournies par Nvidia dans sa base de données *PhysicalAI-Robotics-Manipulation-Kitchen*. Toutefois, ces vidéos synthétiques ne valent que par la qualité de leur simulation et ne permettent pas toujours de réaliser une action physique, en particulier parce qu'elles n'intègrent pas le poids ou l'inertie, par exemple. De nombreuses démonstrations de robotique intelligente ont échoué parce que le robot, en s'approchant de l'objet à saisir, l'avait involontairement fait bouger et ne pouvait plus s'en emparer.

Les autres défis de la *physical intelligence* sont l'ancrage dans le monde réel, l'apprentissage continu, l'intégration dans une architecture cognitive, l'intégration dans un système incluant la commande automatique et le temps-réel, les contraintes physiques et mécaniques, la sécurité et la sûreté de fonctionnement.

Voici maintenant quelques illustrations de ces difficultés.

Six cubes et une tasse

J'ai demandé à ChatGPT o3 de se considérer comme un robot et de décrire les actions qu'il devrait réaliser pour empiler six cubes en deux lots de trois, selon une répartition par couleurs que je lui indiquais. Au bout de 13 secondes, il avait correctement dénombré les opérations nécessaires pour venir à bout de cette tâche. Puis je lui ai demandé de «prendre la tasse et de la poser sur le cube bleu». Si cet algorithme était réellement capable de raisonnement, il m'aurait posé la question: «Quelle tasse?», car je n'avais jamais mentionné ce nouvel objet. Mais comme il fonctionne sur une base statistique, il m'a répondu au bout de 6 secondes que cette nouvelle tâche nécessitait deux opérations, prendre la tasse, puis la poser sur la pile dont le cube le plus élevé était bleu.

L'ancrage dans le monde réel

La sémantique d'une IA et son ancrage dans le monde réel résultent de l'association entre décision, perception et action. Si l'on montre à une IA trois cent mille images de micros tels que celui que j'utilise pour cette conférence, elle saura reconnaître différentes versions de cet objet mais ne comprendra pas réellement le «sens» de cet objet ni son fonctionnement. Pour en être capable, il faut avoir parlé dans un micro, avoir expérimenté son effet, avoir identifié la bonne distance à laquelle le tenir par rapport à votre bouche, etc. C'est ce que des théories de psychologie datant des années 1970 ont défini comme l'*affordance*, c'est-à-dire la compréhension d'un objet à partir de l'usage que nous en faisons.

Le défi de la complexité

Un article récent publié par des chercheurs d'Apple alerte sur le fait que les grands modèles de langage s'effondrent dès lors qu'ils sont confrontés à des exercices d'une très grande complexité, comme dans le jeu des tours de Hanoï. Ce casse-tête mathématique se compose de trois pics sur lesquels on glisse plusieurs disques de tailles variées. Au départ, les disques sont empilés sur un pic, du plus grand au plus petit. Le but du jeu est de réussir à transférer la pile complète de disques du pic A au pic C, en utilisant le pic B comme relais et en respectant deux contraintes: on ne peut déplacer qu'un seul disque à la fois et il est interdit de placer un disque sur un autre disque de diamètre inférieur. Les auteurs de l'article montrent qu'à partir de 10 disques, l'algorithme s'avère incapable de réaliser l'exercice.

Des erreurs de raisonnement imprévisibles

Dans un article publié en octobre 2024, des chercheurs décrivent des erreurs de raisonnement imprévisibles commises par les LLM. Ils ont, par exemple, soumis à l'algorithme un petit problème dans lequel un écolier doit acheter un certain nombre de fournitures scolaires, dont ils indiquent quel est le prix «actuel», en précisant à la fin de la requête que l'inflation a fait augmenter les prix de 10% par rapport à l'année précédente. De façon inexplicable, l'algorithme calcule le prix total des fournitures avant l'inflation.

Le problème de l'alignement

À mesure que les systèmes d'IA gagnent en complexité et en puissance, il devient de plus en plus difficile d'aligner leurs résultats sur les objectifs humains. Ceci a conduit la philosophe Amanda Askell, collaboratrice d'Anthropic, à définir le principe HHH, qui renvoie à *Helpfulness* (utilité): le système essaiera toujours de faire ce qui est dans le meilleur intérêt des humains; *Honesty* (honnêteté): le système s'efforcera toujours de transmettre des informations exactes aux humains et d'éviter de les tromper; *Harmlessness* (innocuité): le système essaiera toujours d'éviter de faire quoi que ce soit qui puisse nuire aux humains.

Ces trois paramètres pouvant entrer en contradiction entre eux, le système doit, chaque fois, trouver une solution équilibrée. Par exemple, si vous lui demandez de vous montrer une séance d'écartèlement d'un être humain (une forme de torture pratiquée au moyen âge), il est censé refuser, car les images seraient trop violentes. En revanche, il pourra répondre à toutes vos questions sur cette pratique. Parfois, c'est une gageure que de respecter ces trois principes à la fois. Le système peut alors essayer de contourner la demande, ce que certains qualifient de «tromperie» et de «machination» et interprètent comme une forme de complotisme de l'IA contre les humains...

Le véritable enjeu de l'IA

L'intelligence artificielle repose sur une imitation statistique plutôt que sur un raisonnement causal. C'est pourquoi, au lieu de concevoir de véritables machines intelligentes et autonomes, on accumule de grandes quantités de données et des infrastructures de calcul fortement consommatrices de ressources et générant d'importants impacts environnementaux, sans pour autant s'affranchir des limitations inhérentes à la nature statistique des LLM. Au lieu de rêver d'une IA générale et de se démener pour assurer sa sécurité, ne vaudrait-il pas mieux chercher une méthode scientifique pour comprendre réellement ce qu'est l'intelligence?



Les robots souples, vers de nouvelles machines

Christian Duriez

C'est dans le cadre de mon doctorat, consacré à la simulation chirurgicale, que je me suis intéressé à la robotique souple. Alors que je calculais la pression subie par l'œil lors d'interventions chirurgicales, j'en suis venu à m'interroger sur la possibilité de contrôler les forces exercées par un instrument qui serait lui-même déformable.

Lorsque j'ai présenté mon travail à l'ICRA (International Conference on Robotics and Automation), je me suis rendu compte qu'il existait déjà toute une communauté de chercheurs s'intéressant à la robotique souple. L'INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique) m'a alors proposé de créer une équipe dédiée, baptisée Defrost (pour DEFormable RObotic SoftWare).

La robotique, une question anthropologique

Dans la presse grand public, la robotique est souvent perçue comme une menace, celle du remplacement des humains par les robots. Cette idée est présente dans les deux définitions du robot proposée par *Le Petit Robert* : « machine à l'aspect humain », « mécanisme automatique complexe pouvant se substituer à l'homme pour effectuer certaines opérations ». On la retrouve également dans l'étymologie du mot. Ce terme a été employé pour la première fois en 1921 dans la pièce de théâtre R.U.R. (Régie des Usines Rossium) de l'écrivain tchèque Karel Capek. Forgé à partir du mot tchèque *robot* signifiant « travail forcé, corvée », le mot robot désigne alors un « ouvrier artificiel ». Encore aujourd'hui, même les robots qui ne prennent pas la forme d'humanoïdes complets reproduisent souvent l'anatomie du bras humain, en beaucoup plus puissant et précis.

La robotique souple, entre bioinspiration et biomimétisme

Le robot souple est né de l'idée de s'inspirer non plus seulement de l'anatomie humaine, mais de divers êtres vivants.

Par exemple, de nombreux chercheurs se sont inspirés de la trompe des éléphants, qui leur permet d'effectuer des mouvements souples tout en leur assurant une préhension

précise. Comme l'animal ne voit pas forcément ce qu'il va saisir, il effectue une palpation qui lui permet de sélectionner ce qu'il va porter à sa bouche. À partir de ce modèle, Ian Walker, de Clemson University, a développé en 1999 un bras robotique muni de nombreux ressorts qui lui confèrent une grande souplesse. En 2010, l'entreprise allemande Festo a conçu un robot entièrement imprimé en 3D, dont les mouvements sont assurés par des ballons étanches que l'on remplit d'air comprimé pour les déformer. En 2023, l'EPFL (École polytechnique fédérale de Lausanne) a imaginé un robot inspiré, lui aussi, de la trompe de l'éléphant, basé sur une structure en treillis programmable.



D'autres chercheurs se sont inspirés des mouvements ondulatoires du poisson pour concevoir des drones sous-marins, comme celui reproduit ci-contre, imaginé par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) en 2018.



L'extrême déformabilité des tentacules de la pieuvre ainsi que son modèle neuronal décentralisé sont également une source d'inspiration pour des robots permettant des interactions souples avec les humains. Des chercheurs de Harvard ont conçu un robot-pieuvre qui n'utilise pas d'électricité, l'ensemble des mouvements du robot résultant de réactions chimiques qui déforment la structure en créant de la pression.

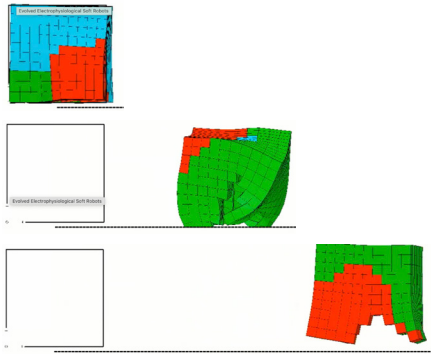


L'intelligence artificielle incarnée

Le moro-sphinx est un insecte dont la morphologie ressemble beaucoup à celle du colibri car tous deux se nourrissent du nectar des fleurs et doivent être capable d'effectuer des vols stationnaires. Cette ressemblance, appelée « convergence évolutive », est à l'origine du concept d'« intelligence incarnée ».

Les chercheurs du MIT qui ont conçu le robot-poisson déjà évoqué ont mis en évidence le fait que même un poisson mort (mais traité avec un produit neutralisant sa rigidité cawwdaérique) ondule lorsqu'il est placé dans un flux turbulent. Une partie du travail de contrôle des mouvements du poisson n'est donc pas effectuée par son cerveau, mais directement par son corps. Les chercheurs en ont tiré l'idée que la réalisation de certaines tâches confiées aux robots pourrait passer par un travail de conception mécanique, une partie du contrôle étant déléguée à la morphologie du robot au lieu d'être assurée de façon centrale.

Le calcul morphologique consiste à reproduire le mouvement de l'évolution à partir d'un cube dont certaines parties sont dures, d'autres sont souples, certaines pouvant également se contracter ou s'étirer comme des muscles. On demande à l'algorithme de faire en sorte que ce cube se déplace le plus vite possible et, après de premiers petits sauts, on voit s'ébaucher une « stratégie à deux pattes ». Les outils résultant de cette approche manquent cependant du réalisme qui permettrait d'envisager une mise en œuvre concrète.

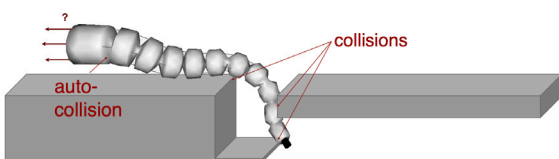


Les travaux de l'équipe Defrost

Voici maintenant quelques aspects du travail de mon équipe.

Dans les modèles de la robotique rigide articulée classique, le nombre d'articulations est réduit et leur position connue. Les interactions avec l'environnement sont évitées autant que possible, sauf à l'extrémité du robot afin de permettre la préhension. Une grande partie de l'algorithme est consacrée à l'évitement d'obstacles. Les modèles de la robotique souple sont beaucoup plus complexes. Les robots étant déformables, leurs degrés de liberté sont beaucoup plus larges et ne peuvent pas tous être contrôlés. Par ailleurs, les robots souples s'appuient sur leur environnement au lieu de l'éviter, et leur modélisation doit donc tenir compte de celle de leur environnement.

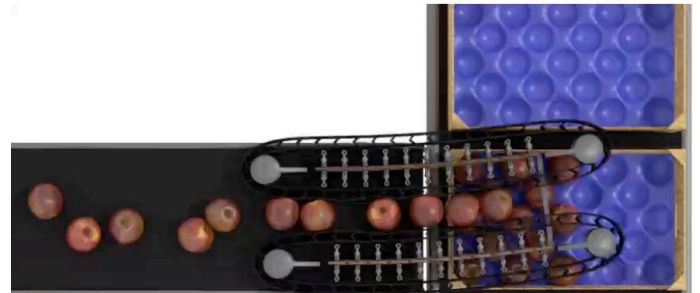
Schématiquement, l'objectif, lors de l'élaboration de l'algorithme, est de minimiser la distance entre les déformations désirées et celles permises par le modèle. Prenons l'exemple d'un robot-tentacule actionné par huit câbles et chargé d'une tâche d'inspection grâce à une caméra placée à son extrémité.



Au cours de sa mission, des collisions risquent de se produire avec l'environnement ou entre les éléments du tentacule eux-mêmes. Les calculs permettent de minimiser à la fois la distance à l'objectif, l'énergie de déformation (tous les

câbles n'ont pas forcément besoin d'être mobilisés) et les contraintes de contact. Dans le cas où l'environnement n'a pas été modélisé, le tentacule, contrairement à un robot rigide, cherche le contact par des mouvements en zigzag et adapte sa stratégie en fonction de ces contacts. En l'équipant de capteurs et d'un contrôle en boucle fermée, on peut corriger ses éventuels tremblements.

Je finis par un dernier exemple de biomimétisme et un hommage au chercheur franco-canadien Vincent Hayward (1955-2023), spécialiste du toucher et de l'haptique. Il m'avait envoyé une vidéo dans laquelle une sangsue avalait un ver de terre, et j'en ai tiré l'idée d'une nouvelle machine qui, au lieu de prendre des objets à l'aide d'un bras articulé pour les déposer plus loin, les « avalerait ». Les objets passent ainsi à l'intérieur du corps du convoyeur, ce qui permet de supprimer le mouvement de va-et-vient. Le caractère déformable du robot permet de guider délicatement les objets tout au long de leur parcours. Sur la photo ci-dessous, il s'agit de pommes que le robot doit déposer dans les alvéoles d'une cagette.



Les algorithmes qui permettent de piloter des robots s'appuyant sur leur environnement est d'un grand intérêt pour les interventions médicales impliquant la mise en place de cathéters. En effet, celle-ci nécessite une navigation très souple à travers les vaisseaux sanguins. Notre équipe a travaillé, avec la startup Robocath, à la mise au point d'une solution permettant d'obtenir le bon mouvement du cathéter dans 90% des cas, et dans 80% des cas lorsque l'arbre vasculaire est déformé, notamment par les mouvements du cœur. À la suite d'un changement de stratégie (Robocath donnant la priorité à la vente de robots plutôt qu'à la R&D), ce partenariat s'est interrompu.

Nous avons alors souhaité créer notre propre entreprise, Compliance Robotics. Fondée il y a un an, elle propose des robots éducatifs destinés à permettre aux étudiants d'aborder la robotique souple et sa modélisation. Nous en avons vendu beaucoup à l'étranger et un peu en France. Nous envisageons désormais de proposer ces robots aux entreprises pour des opérations de *team building* entre ingénieurs.



Enjeux et opportunités de l'accélération des innovations robotiques : place de la France et de l'Europe

Catherine Simon

Comme l'intelligence artificielle, la robotique fait partie des GPT (*General-purpose technologies*), c'est-à-dire des technologies susceptibles d'affecter l'ensemble d'une économie et de transformer radicalement les sociétés par leur impact sur les structures économiques et sociales préexistantes. Avec ses capacités de perception et d'action, elle joue un rôle crucial dans l'innovation par l'exploration et l'interaction avec le monde physique, essentielle pour le développement des fonctions cognitives.

La robotique connaît actuellement des avancées significatives aussi bien dans les composants matériels que dans les infrastructures. De nombreuses applications robotiques voient le jour pour divers environnements physiques, qu'ils soient structurés ou imprévisibles, intérieurs ou extérieurs (air, terre, mer, espace). Les ruptures technologiques actuelles constituent des opportunités pour la France et pour l'Europe et peuvent être l'occasion de reconquérir notre place en recherche et dans l'industrie.

Face à une concurrence internationale intense et au regard des investissements modestes de la France et de l'Europe par rapport à ceux des États-Unis et de la Chine, nous devons adopter un positionnement stratégique différencié. L'équipement industriel et agricole vient au deuxième rang du déficit de la balance commerciale française après l'énergie, ce domaine doit être prioritaire. Nous devons également nous concentrer sur les infrastructures (eau, énergie, communication, logistique et mobilité, bâtiment) afin d'assurer notre résilience face à la démultiplication des chocs. Une troisième priorité est la convergence avec les progrès et applications des sciences dures (biologie, chimie, matériaux, sciences de l'univers). Une réflexion sur la dualité civil-militaire et la sécurité civile est également devenue nécessaire, non seulement en raison de l'instabilité géopolitique actuelle, mais parce que les travaux réalisés pour la défense ou la sécurité civile sont généralement soumis à des exigences particulièrement élevées, qui contribuent fortement aux innovations technologiques.

Dans tous ces domaines, nous devons privilégier une robotique IA Native mais également efficiente, c'est-à-dire d'un bon rendement par rapport à l'utilisation des ressources en énergie ou encore en eau. Par ailleurs, sa robustesse et son adaptabilité doivent lui permettre d'être durable.

Nous avons identifié deux voies dans lesquelles la France pourrait s'inscrire en pionnière ou en rupture des marchés consolidés. La première est la robotique premium, qui nécessite de la performance (charge utile, répétabilité, cadences), de l'excellence (précision, fiabilité) et de la robustesse (sécurité, durabilité). La deuxième est celle de la robotique généraliste, à la fois *open source* et *low tech*, reprogrammable grâce à des interfaces simples, facile à réparer et d'un coût adapté aux besoins des artisans, des TPE, de l'éducation, voire du grand public.

Pour relever ces défis, nous devons développer et déployer des formations de haut niveau en physique-mécatronique et en ingénierie des systèmes, ainsi que de nouveaux programmes pluridisciplinaires actant la convergence des technologies et des sciences, en particulier celle entre robotique et IA.



Innovations et Projets Robotiques soutenus par l'ANR dans le cadre de France 2030

Damien Chablat

Une partie importante des cinq grands programmes lancés par le SGPI (Secrétariat général pour l'investissement) concerne la robotique. Le PEPR (projet exploratoire prioritaire de recherche) O2R propose de mettre en œuvre une robotique socialement adaptée, dans ses principes, son comportement, ses performances et ses usages, et ouverte à la complexité des enjeux de la société. Le PEPR Robotique vise à développer les fondements d'une robotique performante, frugale et responsable, pour accompagner les transformations de la société et de l'industrie, en intégrant les enjeux énergétiques et environnementaux et en améliorant la productivité et la soutenabilité des activités humaines. Le programme *Robots et machines intelligentes d'excellence* a pour objectif de structurer et d'accompagner les acteurs de nouvelles chaînes de valeur

d'équipements robotiques ou industriels stratégiques, de l'émergence au leadership technologique et industriel, sur des marchés émergents en forte croissance ou en renfort de notre souveraineté sur les grands marchés de la transition énergétique et écologique.

Je vais surtout évoquer les deux derniers programme, *Industrie du futur* et *Défis transfert robotique*.

Pour le premier, six projets ont déjà été sélectionnés, parmi lesquels *LP 4.0.*, une ligne pilote qui recourt aux jumeaux numériques et à la robotique pour démanteler et recycler des batteries, ou encore *Nano Shape*, un projet de nano-impression 3D par polymérisation multi-photo, avec des applications dans les mesures anti-contrefaçon des billets de banque ou des passeports, mais aussi dans la fabrication d'éléments biocompatibles pour les lunettes ou les lentilles.

Le programme *Défis transfert robotique* a pour objectif d'aider les porteurs de projets à traverser la « vallée de la mort », c'est-à-dire à passer du TRL4 au TRL7. Trente projets ont été soumis et quinze ont été sélectionnés. En voici quelques-uns.

Le projet **Amatsumara**, mené en partenariat avec le Groupe Briand et Naval Group, vise à développer des solutions robotiques avancées pour amener des pièces métalliques très longues et très lourdes à une position précise en 3D avec une tolérance inférieure à 1 millimètre, les maintenir en position, puis réaliser le pointage par soudure de ces pièces sur la pièce de référence.

Le projet **Extender** vise à mettre au point un bras robotique fixé à un fauteuil roulant et doté de six moteurs et de doigts robotisés, pour aider les personnes handicapées à atteindre, saisir et manipuler des objets. Un aspect important du projet est que la solution sera coconstruite, tout au long du processus, avec ses futurs utilisateurs et des professionnels de santé tels que des spécialistes de médecine physique et de réadaptation, des ergothérapeutes ou des kinésithérapeutes.

Gort est un projet en robotique agricole dont l'objectif est de développer une solution de désherbage mécanique afin de limiter l'usage des herbicides, d'optimiser l'agriculture grâce aux données en temps réel pour une gestion plus précise et durable, et de faciliter l'intégration des matériels et logiciels agricoles, en assurant leur interopérabilité.

Parme est un projet dédié à la maintenance des infrastructures métalliques en environnements complexes, avec des cas d'usage apportés par EDF (entretien des barrages hydroélectriques et des conduites forcées) et par Naval Group (construction et maintenance des navires militaires), des processus de décapage par laser mis en œuvre par la société Meliad et un robot développé par la startup ARU, dont le petit robot polymorphe (serpent, rover, quadrupède, tripode) présente une agilité exceptionnelle.

L'objectif du projet **Rolkneematics** est de développer une solution robotique clé en main pour la génération de données et la phase d'apprentissage d'un dispositif de mesure en temps réel de la cinématique tridimensionnelle de prothèses complètes ou partielles du genou. Le dispositif prend la forme d'une genouillère qui transmet les données aux médecins traitants à des fins de prévention et de diagnostic postopératoire.

Enfin, le projet **Titanbot** vise à développer des robots parallèles à câbles pour les secteurs de la construction, de l'industrie et du nucléaire, par exemple pour réaliser des travaux d'inspection ou encore d'isolation extérieure sans avoir besoin de construire de grands échafaudages.



Débats

Les véhicules autonomes

Les véhicules autonomes se développent très rapidement aux États-Unis. Comment expliquer le retard de l'Europe dans ce domaine ?

Raja Chatila : En Europe, la problématique du véhicule autonome a été prise en charge par les constructeurs automobiles, alors qu'aux États-Unis, elle a été portée par les acteurs du numérique. Par ailleurs, les constructeurs américains ont bénéficié d'un « bac à sable réglementaire », c'est-à-dire de la possibilité d'essayer leurs modèles en conditions réelles, au prix de quelques accidents, ce qui n'a pas été le cas en Europe.

Les transferts entre civil et militaire

A-t-on connaissance d'innovations robotiques militaires transférables vers le civil ?

Raja Chatila : Actuellement, on assiste surtout à des transferts du civil vers le militaire, à travers, notamment, la place massive prise par les drones dans le cadre de la guerre en Ukraine. De nombreuses startups et sociétés spécialisées dans les drones civils contribuent désormais à cette industrie.

Abderrahmane Kheddar : En France, la DGA (Direction générale de l'armement) organise une sorte de concours de robots à pattes, de façon cependant beaucoup plus timide qu'en Chine, où ces robots sont clairement considérés comme les fantassins du futur.

Plier des chemises

Abderrahmane Kheddar, il y a deux ans, je vous ai entendu expliquer à des industriels du textile que les robots n'étaient pas capables de saisir des tissus. Or, il semble qu'ils savent maintenant plier des chemises ?

Abderrahmane Kheddar : En effet : les progrès ont été incroyablement rapides.

Christian Duriez : Le fait de plier des chemises nécessite, d'une part, la conception de préhenseurs capables de saisir des tissus et, d'autre part, un travail de *physical intelligence* consistant à fournir aux systèmes d'IA de très nombreux exemples leur permettant d'identifier les différentes opérations.

Raja Chatila : Pour cela, on recourt à la fois à l'apprentissage par imitation et à l'apprentissage par renforcement. Le premier consiste à reproduire les gestes humains, même si ceux-ci ne disposent pas des mêmes degrés de liberté que le robot. L'imitation du mouvement peut se faire par observation mais aussi par le biais de capteurs d'efforts, par exemple. L'apprentissage par renforcement consiste à progresser par essais-erreurs à travers de multiples expérimentations.

Mots-clés : biomimétisme, calcul morphologique, IA, *physical intelligence*, robotique, robots souples, Visual-Language-Action Models.

Citation : Abderrahmane Kheddar, Raja Chatila, Christian Duriez, Catherine Simon & Damien Chablat. (2025). *Robotique*. Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions de l'Académie des technologies sur notre site [academie-technologies.fr](https://www.academie-technologies.fr)

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44

Production du comité des travaux.

Directeur de la publication : Patrick Példata

Rédacteur en chef de la série : Béatrice Lathuile

Auteur : Élisabeth Bourguinat

n° ISSN : 2826-6196