SCIENCE&VIE

SCIENCE&VIE

N° 1213
OCTOBRE 2018

LES SCIENTIFIQUES S'Y PRÉPARENT

CHANGER LE CLIMAT

LES DEUX GRANDS PROJETS POUR REFROIDIR LA TERRE

"RACES HUMAINES"

Ça existe, ou pas ?

DENNY

L'enfant miraculeux de la Préhistoire

MONDADORI FRANCE
D : 6,90 € - BEL : 4,80 € - ESP : 4,90 € - GR : 4,90 € - DOM S : 4,90 € - DOM A : 6,90 € ITA : 4,90 € - LUX : 4,80 € - PORT CONT : 4,90 €
CAN : 6,75 $ CAN - MAR : 50 DH - TOM S : 750 CFP - TOM A : 1 400 CFP - CH : 8,50 FS - TUN : 9 DTU
M 02578 - 1213 - F: 4,50 € - RD

Conquête spatiale
Pilule
Denny
Robots
Trouble de la fertilité
Arbres
Matière noire
Changer le climat
Voiture hybride
Sommeil
Races

N° 1213 - Octobre 2018
SCIENCE&VIE

Robots
L'union fait leur nouvelle force

On appelle ça "l'intelligence en essaim". Plutôt que de viser l'hyper performance d'une seule machine, cette robotique en plein essor mise sur plein de petites unités rudimentaires travaillant ensemble pour accomplir des tâches complexes. Un complet renversement de tendance qui s'inspire des insectes sociaux ou de l'évolution de l'ADN… Et ça marche, a pu constater **Pierre-Yves Bocquet.**

Repères

Né en 1989, le concept d'"intelligence en essaim" se définit comme la capacité pour des robots non-intelligents à adopter un comportement collectif intelligent.

PHOTOMONTAGE Y. SAMUEL D'APRÈS GETTY - SHUTTERSTOCK

LES ESSAIMS DE ROBOTS

Dans le règne animal, c'est l'un des premiers signes d'intelligence. Pour la première fois, un groupe de robots est parvenu à planifier de manière collective l'ordre de ses actions.

Cet essaim se compose d'une vingtaine de petits robots munis de roues, devant se rendre dans trois endroits distincts à la suite. Sauf qu'ils ne savent pas où se situent ces points. Et ils ne sauront s'ils ont effectué la bonne séquence qu'après leur passage seulement. Pour capitaliser leurs expériences, une partie des robots est programmée pour former une chaîne, un fil d'Ariane

C'est une machine très primitive dotée d'une puissance de calcul rachitique : quelques mégahertz de fréquence d'horloge à peine, associés à quelques dizaines de kilo-octets de mémoire et à un algorithme de contrôle dépassant rarement la centaine de lignes de code. *"On est plus proche du Minitel que d'un smartphone !"*, euphémise un chercheur. Et pourtant, cette machine parvient à s'acquitter de missions difficiles aussi bien – voire mieux – que les robots les plus complexes !

Le secret de ce tour de force ? Le nombre. La machine n'est pas seule mais s'entoure de dizaines de ses semblables qui font corps avec elle. Un troupeau. Une nuée. Un essaim, pour reprendre le terme consacré.

Nous le savons, des robots, qui seront capables d'effectuer de façon autonome les tâches les plus complexes, vont bientôt envahir notre quotidien. Humanoïdes, avions, voitures… des machines le plus souvent hypersophistiquées et dotées d'une intelligence artificielle supérieure. Mais à côté de ces cracks du calcul, la robotique s'apprête à accoucher d'un tout nouveau type de machine… à l'exact opposé. Une intelligence artificielle non plus solitairement supérieure, mais tirant sa force de l'union collective.

DES SUPER-ORGANISMES COMPLEXES

Il aura fallu près de vingt ans pour que ce fantasme commence à se concrétiser. Née au tout début des années 1990 d'une convergence entre la robotique, la biologie, l'éthologie et l'intelligence artificielle, cette nouvelle discipline est longtemps restée cantonnée à la théorie et aux simulations virtuelles sur ordinateur. Mais aujourd'hui, la donne change ! La robotique en essaim est devenue depuis peu l'une des branches les plus dynamiques et prometteuses de la robotique. *"Cette discipline connaît un regain d'intérêt grâce à la baisse du prix des composants. Ce qui facilite le passage à l'expérimentation réelle, avec des essaims d'un millier de robots, voire plus. Ce que l'on ne pouvait pas envisager il y a encore 5 ans"*, s'enthousiasme Sabine Hauert, professeur assistante à l'université de Bristol et spécialiste des nanorobots biomédicaux.

M.BIRATTARI

L'approche, radicalement différente de celle de la robotique traditionnelle, était posée dès le départ : utiliser des éléments individuellement basiques, peu chers, faciles à programmer, et miser sur le nombre pour faire émerger des comportements complexes. *"Le but est d'imiter le monde animal dans lequel des êtres individuellement dotés de faibles performances cognitives peuvent collectivement réaliser des choses extraordinaires"*, explique Rodolphe Charrier, chercheur au Laboratoire d'informatique, de traitement de l'information et des systèmes (Litis). On pense évidemment aux fourmis, championnes pour sélectionner le meilleur itinéraire à emprunter pour rapporter de la nourriture jusqu'à leur nid ; aux termites, ingénieuses bâtisseuses de superstructures ; ou encore aux étourneaux et aux poissons qui s'associent pour former des super-organismes aux mouvements coordonnés destinés à perturber les prédateurs.

La particularité de l'intelligence de telles populations : elle n'est pas centralisée, mais distribuée dans chacun de ses agents, dont le comportement autonome est régi par des lois simples liées à son environnement, notamment

S'AUTO-ORGANISENT DÉJÀ

indiquant aux autres le chemin à suivre. Ainsi, au fil des tentatives, dont ils se transmettent les résultats par signaux infrarouges, la chaîne se déplace progressivement jusqu'à indiquer le bon trajet, une sorte d'itinéraire GPS pour aider les autres robots à repérer les cibles et à identifier l'ordre dans lequel les visiter. *"La chaîne encode la connaissance collective. En résumé, certains robots de l'essaim forment eux-mêmes la mémoire collective du groupe en se positionnant dans l'espace"*, résume Mauro Birattari, co-auteur de l'étude publiée en juillet 2018.

Cette colonie développe sa propre mémoire collective au fur et à mesure de ses déplacements.

les informations fournies par les individus voisins, qui se diffusent ainsi de proche en proche. D'où un énorme avantage en robotique : la résilience, c'est-à-dire la capacité du groupe à rester opérationnel en cas de panne ou de perte de l'un de ses individus. *"C'est tout l'intérêt d'un système distribué : on peut enlever un ou plusieurs éléments, ou au contraire en rajouter, sans que le comportement global de l'essaim soit altéré"*, pointe Mauro Birattari, de l'Institut de recherches interdisciplinaires et de développements en intelligence artificielle (Iridia) de l'École polytechnique de Bruxelles.

Ce mode de fonctionnement particulier, distribué et sans cerveau central pour le piloter, ouvre des possibilités hors de portée des robots traditionnels. Imaginez donc ce que parviendrait à faire une armée de micro-robots qui, tels des araignées, pourraient se faufiler dans les décombres d'un tremblement de terre, se coordonner et s'entraider pour retrouver les victimes ensevelies. Ou un escadron de drones éclaireurs, chargés de détecter la position d'engins explosifs dans un terrain miné ou d'explorer la surface d'une planète inconnue. En juillet dernier, le motoriste britannique Rolls-Royce a même annoncé qu'à l'avenir, des colonies de mini-robots pourraient être introduites grâce à des endoscopes à l'intérieur de ses moteurs d'avions pour inspecter leurs rouages dans leurs moindres recoins. Et à une échelle encore plus petite, les physiciens du MIT imaginent carrément des armadas de nanorobots que l'on pourrait s'injecter dans le corps, afin de cibler les cellules cancéreuses et y appliquer les traitements adaptés… *"De tels essaims compléteront les robots monolithiques dès lors que l'accessibilité ne permet pas l'utilisation de gros appareils, comme en médecine, quand un travail doit être fait en parallèle, dans le bâtiment ou en agriculture, ou encore quand il y a un risque de perdre un individu dans un environnement difficile"*, prévoit Mauro Birattari.

Mais pour les construire, encore fallait-il réussir à écrire des programmes informatiques →

> *On peut enfin passer à l'expérimentation réelle avec des essaim d'un millier de robots, voire plus. Ce qui était inenvisageable il y a encore 5 ans*
>
> SABINE **HAUERT**
> Spécialiste des nanorobots biomédicaux, université de Bristol

capables de donner corps à cette intelligence distribuée, de générer de tels comportements collectifs. C'était bien là le nœud du problème. Si l'union des robots fait leur force, elle fait aussi toute la difficulté de la discipline, qui exigeait de nouvelles classes d'algorithmes pour prendre en compte ces particularités.

CASSE-TÊTE ALGORITHMIQUE

Car un essaim est un système complexe : un ensemble dont les interactions internes sont si nombreuses qu'il est difficile de prévoir par le calcul son comportement global. Très vite, et de manière chaotique, les possibilités explosent, des phénomènes non-linéaires émergent, qui induisent des comportements imprévus, tels des regroupements localisés, ou, au contraire, des éléments qui se désolidarisent du groupe. *"Il est difficile de traduire au niveau individuel le comportement global que l'on souhaite obtenir"*, résume Sabine Hauert. L'essaim s'apparente en quelque sorte à une boîte noire : on sait quel comportement on veut qu'il possède (explorer une zone, éviter des obstacles, trouver une cible, la transporter…), mais pas comment programmer chaque individu pour obtenir ce résultat. C'est ce casse-tête mathématique autant qu'algorithmique que de nombreux travaux sont en train de résoudre, en menant de front différentes stratégies. Trois, en particulier, ont conduit ces dernières années à des percées remarquables.

La première de ces approches est inscrite dans l'ADN même de la robotique en essaim : elle transpose littéralement l'idée originelle pour s'inspirer de la nature et tenter de coder le comportement des insectes pour l'injecter dans des robots. Ce biomimétisme a notamment donné naissance aux algorithmes "de colonies de fourmis". *"L'idée consiste à imiter les fourmis qui parviennent à trouver l'itinéraire le plus court en laissant des phéromones sur leur passage : plus le chemin est court, plus le nombre de fourmis qui l'empruntent augmente vite et plus le passage est renforcé par les phéromones. Du coup, les algorithmes reproduisent ce comportement avec des agents virtuels qui se déplacent sur un graphe et laissent à certains endroits des phéromones virtuelles"*, explique Marco Dorigo, l'inventeur de cette famille d'algorithmes, directeur de recherche au FNRS, en Belgique.

Ces drones optimisent en temps réel leur vitesse et la distance à leurs voisins.

Une approche apparemment simple… mais qui a permis de résoudre les problèmes mathématiques parmi les plus complexes, dits NP-complets, comme le célèbre problème du commis voyageur, où il s'agit de trouver le chemin le plus court reliant un grand nombre de villes ! *"La grande force de ces algorithmes, c'est que si on les laisse tourner assez longtemps, ils trouvent à tous les coups la meilleure solution au problème"*, s'enthousiasme Rodolphe Charrier.

D'autres modèles s'inspirent des abeilles : quand elles trouvent de la nourriture, l'intensité de leur comportement devient proportionnelle à la qualité de leur découverte, ce qui leur permet de recruter plus ou moins d'abeilles pour les suivre. Des programmes ont transposé cette compétence à des robots, grâce à une simple

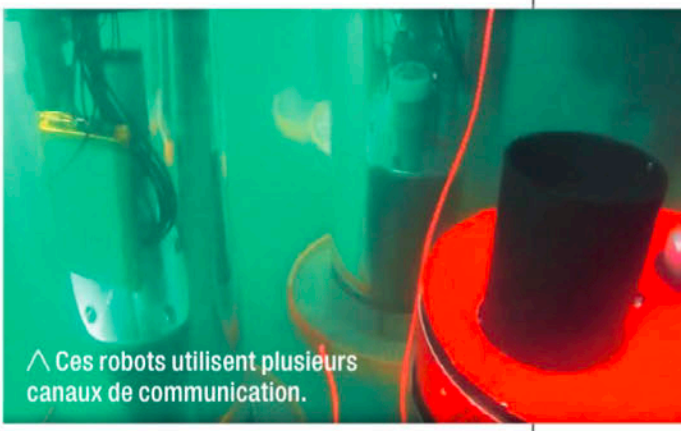
> *Si on laisse tourner ces algorithmes assez longtemps, ils trouvent à tous les coups la meilleure solution au problème*
>
> RODOLPHE **CHARRIER**
> Chercheur au Laboratoire d'informatique, de traitement de l'information et des systèmes

ILS DÉTECTENT ET ÉVITENT LES OBSTACLES

Trente drones lancés à 30 km/h sont parvenu à se coordonner pour éviter les collisions dans un espace délimité. Soit la première démonstration, dans les conditions réelles, d'une manœuvre collective de détection et d'évitement d'obstacle à une vitesse aussi élevée – les essaims de drones sont en effet particulièrement sensibles, et cela d'autant plus que leur vitesse est grande, aux contraintes environnementales (obstacles, vent, perturbations…). Pour réussir cette performance, le spécialiste hongrois Gábor Vásárhelyi et son équipe ont testé une méthode d'optimisation évolutionnaire sur une centaine de drones virtuels. Génération après génération, les appareils ont sélectionné les bonnes lignes de code, jusqu'à mettre au point un algorithme qui optimise en temps réel le compromis entre la vitesse et la distance à respecter entre les drones nécessaires pour éviter les accidents.

ILS S'ENTENDENT MÊME S'ILS SONT DIFFÉRENTS

Déployé en septembre 2017 dans la lagune de Venise, cet essaim est composé de trois familles de robots qui coopèrent. Immobile au fond de l'eau, le aMussel étudie la qualité de l'eau ; mobile comme un poisson, le aFish lui transmet ses mesures ; et les deux remontent à la surface se recharger sur le aPad. Pour les commander, les chercheurs ont développé un algorithme inspiré des poissons électriques et des lucioles dont le défi a été de garantir leur communication. *"Venise est un environnement complexe : eaux troubles, déchets, bateaux,* rappelle Thomas Schmickl, pilote du projet SubCULTron. *Nous utilisons donc divers canaux de communication : lumières clignotantes, sons et courants électriques…"*



∧ Ces robots utilisent plusieurs canaux de communication.

J. HARRIS/AP/SIPA - SUBCULTRON

source lumineuse d'intensité variable. Ou encore des poissons, comme ce banc de drones déployé dans les eaux vénitiennes (voir module).

Reste que cette inspiration animalière atteint vite ses limites, admet Marco Dorigo : *"Il faut que le comportement que l'on souhaite obtenir avec l'essaim existe dans la nature, et qu'il puisse être formalisé, ce qui n'est pas toujours le cas."* La solution : utiliser des "métaheuristiques d'optimisation", soit des logiciels spécialisés dans la résolution des problèmes combinatoires complexes. Les algorithmes de colonies de fourmis, eux-mêmes, peuvent être utilisés à cette fin, non pour être implantés directement dans des robots, mais comme méthode d'optimisation par calcul, pour obtenir ces lignes de code : ils laissent les robots se déplacer en suivant des règles simples (favoriser la cohésion pour former un groupe ; converger vers un alignement pour suivre la même direction…), inspirées de programmes de vie artificielle, comme les Boids de Reynolds, conçus pour reproduire les essaims d'oiseaux. Reste à y introduire une touche d'aléatoire (la "stochastique", dans le jargon mathématique), afin de favoriser la variété des comportements. Et à renforcer les bonnes réactions, en général en attribuant un score plus ou moins élevé selon que l'essaim se →

comporte de la façon souhaitée ou non. Il suffit ensuite de faire tourner le modèle jusqu'à obtenir le score le plus élevé. *"Ces algorithmes permettent de reproduire des comportements de patrouille, de récupérer des objets, d'encercler une cible"*, détaille Nicolas Bredèche, chercheur à l'Institut des systèmes intelligents et de robotique (Sorbonne Université).

La seconde piste lorgne du côté de l'intimité même du vivant : les très étonnants algorithmes évolutionnaires consistent carrément à imiter la façon dont l'ADN se transmet et s'améliore d'une génération à l'autre, et de l'appliquer à des lignes de code pour, au final, aboutir à un programme correspondant au comportement souhaité pour l'essaim. Pour cela, les chercheurs implantent par exemple des algorithmes sur cent robots virtuels, font tourner la simulation et ne gardent que ceux qui fonctionnent le mieux. Puis ils les hybrident automatiquement entre eux, en mélangeant les lignes de code et en introduisant des mutations aléatoires, exactement comme en génétique. Au bout d'un certain nombre de générations, ils obtiennent l'algorithme qui produit le comportement voulu. Ainsi, une équipe hongroise est parvenue à trouver les meilleurs réglages pour que des drones volent en formation serrée, tout en évitant les collisions (voir module). *"Le seul petit souci, c'est qu'on ne sait pas toujours expliquer pourquoi cet algorithme abouti au comportement voulu"*, sourit Sabine Hauert. Sans compter que cette sélection accélérée nécessite une forte puissance de calcul, ce qui la rend pertinente pour trouver en labo un comportement que l'on puisse ensuite injecter dans les robots, mais difficile à implémenter directement sur des machines. Or, tout l'intérêt des essaims réside dans leur capacité à apprendre et à évoluer sur le terrain, en fonction de leurs interactions et de leurs expériences.

C'est sur ces dernières compétences que se focalise la troisième approche, l'optimisation par essaims particulaires. *"Ici, chaque individu se déplace vers un point qui paraît être une bonne solution,* explique le spécialiste Maurice Clerc, *mais garde en mémoire sa dernière bonne position, qu'il partage avec les 5 ou 6 individus siyués dans son voisinage direct."* Cet algorithme très simple, de quelques dizaines de lignes de code, réussit le tour de force de converger rapidement et de reproduire le vol de nuées d'oiseaux.

Reste à résoudre un problème commun à toutes ces approches : *"Quand on passe sur des robots réels, ça ne fonctionne pas toujours,* expose Sabine Hauert. *Quand on ajoute un robot ou que l'un d'entre eux tombe en panne, cela entraîne parfois un dysfonctionnement de l'essaim, qui ne devrait pas se produire."* Ce que confirme Nicolas Bredèche : *"Les robots réels ne sont jamais parfaits et se comportent différemment de leurs modèles virtuels : ils dévient légèrement et ne vont pas toujours dans la direction souhaitée."* C'est le grand défi à relever encore : rendre ces algorithmes plus stables, de manière à ce qu'un petit changement dans les conditions initiales ne se traduise pas, au final, par un grand mouvement d'essaim, un crash… ou un comportement dangereux pour l'homme (lire ci-contre).

Et de donner alors naissance à des hordes de bêtes de course, évolutives et coordonnées, dont l'intelligence collective sera plus grande que la somme de celles des individus. Une perspective aussi enthousiasmante qu'inquiétante qui n'est pas sans rappeler les hordes d'araignées robotisées des films *Matrix* et *Minority Report*.

Pourra-t-on vraiment les contrôler ?

Peut-on faire confiance à des robots dont l'intelligence est une sorte de boîte noire dont les concepteurs eux-mêmes ignorent presque tout ? C'est l'un des grands problèmes de l'I.A. Et il est particulièrement saillant pour des essaims. *"La certification va poser des difficultés, dont les réponses ne seront pas seulement techniques, mais éthiques et sociales"*, prévoit Mauro Birattari, spécialiste du sujet à l'Université libre de Bruxelles. Là encore, les spécialistes cherchent des solutions algorithmiques : des programmes de supervision qui contrôleraient en temps réel le comportement des essaims. Un premier essai a été mené sur 600 robots à l'université de Sheffield.

À voir : une série de vidéos d'essaims expérimentaux* accomplissant toutes sortes de tâches.

EN SAVOIR PLUS

science-et-vie.com