

Matière active et mouvement collectif : de nouveaux horizons

Olivier Dauchot (olivier.dauchot@espci.psl.eu)

Laboratoire Gulliver, ESPCI Paris-PSL, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris

Ces vingt-cinq dernières années, l'étude des mouvements collectifs d'une population d'agents auto-propulsés – vols d'étourneaux, banc de poissons, mais aussi micronageurs ou marcheurs artificiels – a fait l'objet d'un effort expérimental et théorique remarquable. Il en résulte à ce jour une bonne compréhension de la physique des liquides actifs simples. En revanche, à haute densité, du fait du confinement ou d'interactions cohésives, au sein d'un tissu cellulaire ou d'un métamatériau dotés de micromoteurs, une description de ces systèmes en terme de solide élastique, probablement plus appropriée, reste à développer.

Dans cet article, nous décrivons l'émergence d'une nouvelle forme d'auto-organisation, qui provient du couplage entre élasticité et activité : l'actuation collective, le pendant solide des mouvements collectifs.

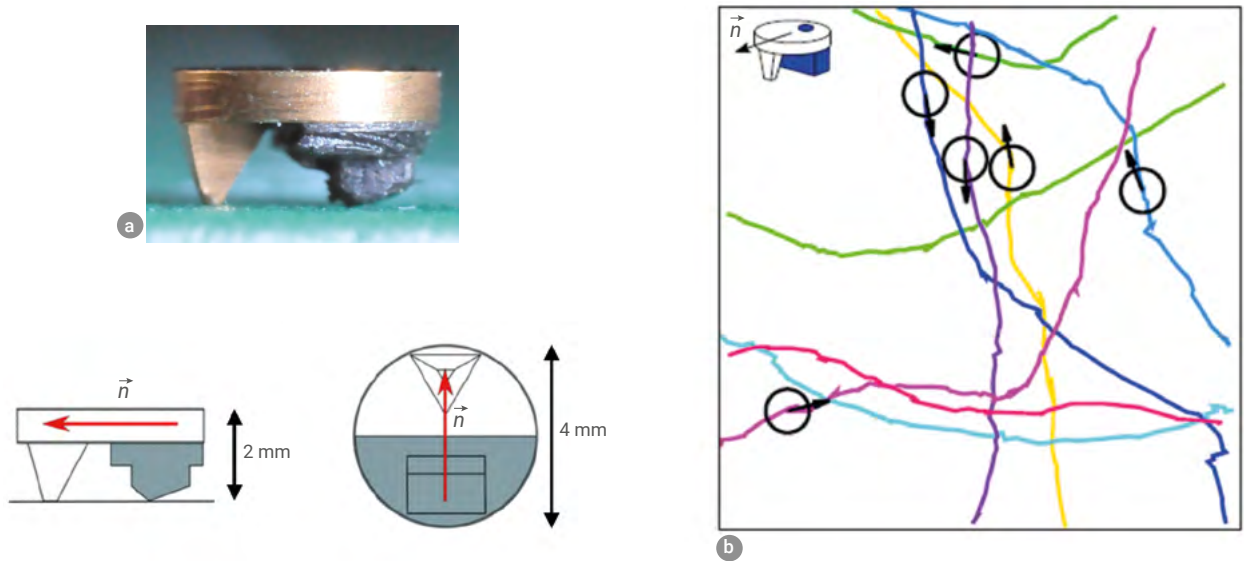
La matière active se compose d'un grand nombre de constituants, individuellement hors équilibre, qui convertissent une source d'énergie locale en travail, par exemple sous la forme d'un mouvement dirigé [1]. Elle est le siège de riches phénomènes collectifs, qui se traduisent à grande échelle par de nouvelles formes de transition entre phases dynamiques, inexistantes à l'équilibre. Les mouvements collectifs au sein des grands groupes animaliers en sont la manifestation la plus spectaculaire.

À la recherche de systèmes expérimentaux modèles, les physiciens ont développé un vaste arsenal de dispositifs actifs artificiels. Des suspensions colloïdales aux matériaux granulaires, en passant par les émulsions ou les cristaux liquides, presque toutes les structures de la matière molle ont été motorisées [2]. Ces structures ont

permis la conduite d'expériences quantitatives et robustes, auxquelles ont pu être confrontées un foisonnement de propositions théoriques. Il en a découlé plusieurs résultats remarquables et bien établis. Ainsi, dans un gaz actif, même parfait, la pression mécanique n'est en général pas une variable d'état. Un système de particules actives, dont les interactions sont purement répulsives, présente néanmoins une séparation de phase liquide-gaz. L'apparition des mouvements collectifs résulte d'une transition du premier ordre entre une phase gazeuse désordonnée et un liquide en mouvement, dont le régime de coexistence est caractérisé par la présence de structures propagatives [3]. La phase nématique des cristaux liquides actifs est instable et forme spontanément des défauts topologiques, à l'origine d'écoulements chaotiques.

Il existe cependant un certain nombre de circonstances dans lesquelles l'analogie de ces systèmes avec des liquides n'est pas adaptée. On pense à des couches de cellules cohésives ou plus simplement à des assemblages très denses de particules autopropulsées formant un verre ou un cristal. Mais cela concerne aussi les métamatériaux, dont les cellules élémentaires contiendraient un micromoteur ou un actuateur. Dans le règne animal, les ponts suspendus construits par les fourmis légionnaires ou les jeunes essaims d'abeilles sauvages sont de beaux exemples de matériaux actifs aux propriétés élastiques indéniables. Dans de tels cas, décrire le système comme un solide élastique semble plus pertinent.

Nous nous intéresserons ici principalement au cas de solides actifs modèles réalisés en laboratoire, en



1. Marcheurs artificiels

(a) Disque métallique de 4 mm de diamètre, doté de deux contacts distincts avec le plateau vibrant sur lequel il est posé : une pointe métallique à l'avant et un large plot (couleur bleue) en caoutchouc à l'arrière.

(b) Exemples de trajectoires persistantes obtenues lorsque ces disques sont soumis à une vibration verticale de faible amplitude.

(c) Hexbugs[®], jouets centimétriques dotés d'un vibreur interne et d'une batterie.

(d) Schéma de principe du mécanisme d'auto-alignement : en rouge l'axe du corps du marcheur ; en bleu un déplacement non aligné avec cet axe ; en noir les frottements induits par le déplacement sont asymétriques par rapport à la direction du déplacement, et induisent un couple d'auto-alignement, en vert, de l'orientation du marcheur vers son déplacement.

(e) Mouvements collectifs observés dans un liquide de disques marcheurs (la couleur des disques indique leur direction, selon le cercle chromatique).



nous concentrant sur deux systèmes : un cristal actif, obtenu par le confinement de disques propulsés par une vibration mécanique, et un réseau élastique en chaque nœud duquel est piégé un Hexbug®, jouet centimétrique propulsé par un moteur.

L'étude de ces systèmes permet de mettre en évidence deux nouveaux phénomènes propres à la matière active : la présence d'écoulements permanents au sein d'une phase cristalline et l'actuation (mise en mouvement) collective spontanée d'une structure élastique, sous la forme d'une oscillation chirale.

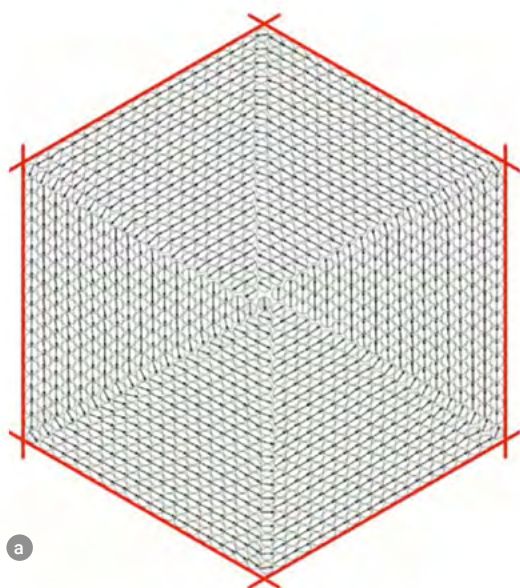
Marcheurs artificiels

Hormis les crabes, connus pour marcher de travers, les marcheurs du monde vivant progressent la tête pointée vers l'avant. Et, hormis le

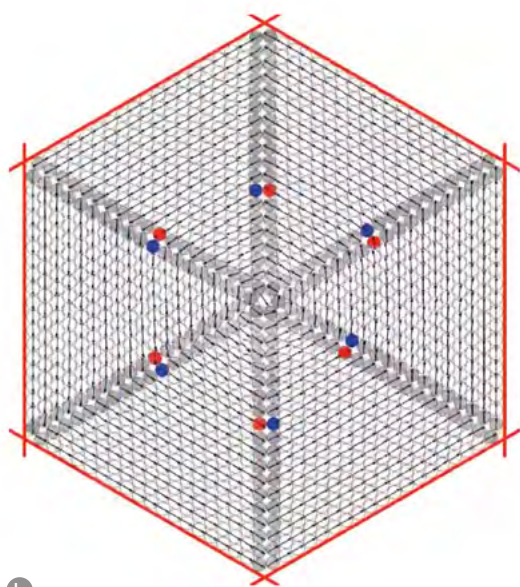
célèbre dahu des montagnes, la symétrie gauche-droite par rapport à l'axe de leur corps leur permet d'avancer en ligne droite sans effort particulier. Les marcheurs artificiels, qu'il s'agisse de robots humanoïdes ou canidés ou bien de systèmes beaucoup plus simples comme ceux dont il est question ici, s'attachent en général à respecter ces propriétés.

Le premier type de marcheur artificiel élémentaire, créé en laboratoire il y a une vingtaine d'années, est un petit disque métallique de quelques millimètres de diamètre, supporté par deux contacts avec le sol, différents à l'avant et à l'arrière (fig. 1a). Le contact est réalisé à l'avant par une pointe métallique et à l'arrière par un large plot en caoutchouc. Placé sur un plateau vibrant verticalement, ce disque est animé d'un mouvement persistant de l'avant vers l'arrière (fig.1b).

>>>



a



b

2. Écoulement au sein d'un cristal actif

(a) Les disques sont tous alignés parallèlement aux parois de l'enceinte de confinement hexagonale.

(b) La génération et la propagation de dislocations des sommets vers le centre de l'hexagone permet au cristal de s'écouler (les disques en bleu, respectivement en rouge, ont cinq, respectivement sept voisins).

(a) En toute rigueur, la phase observée est une phase dite « hexatique » au sein de laquelle l'ordre translationnel est à quasi-longue portée, du fait de la présence des dislocations. Seul l'ordre orientationnel des mailles du cristal est à longue portée.

>>>

L'énergie mécanique injectée à l'échelle du marcheur, sans indiquer de direction particulière, est rectifiée par la géométrie de celui-ci pour produire un mouvement dirigé.

Le second type de marcheur, que nous utiliserons s'achète dans le commerce. Il s'agit d'un Hexbug[®] (fig. 1c). Doté d'un vibreur interne alimenté par une pile, ce jouet centimétrique est mis en mouvement du fait de la forme de ses pattes, inclinées vers l'arrière.

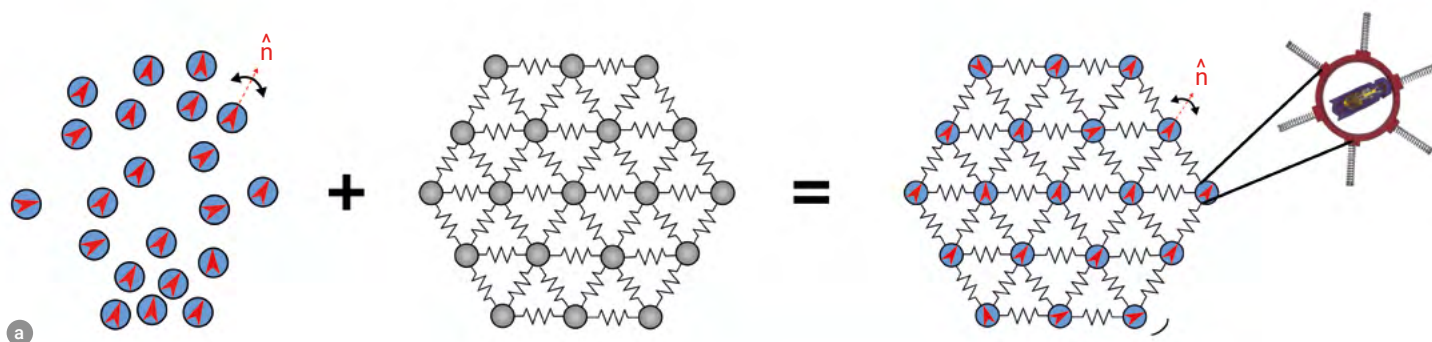
Le lecteur aura probablement eu l'occasion d'entrer en collision avec un autre piéton. Auquel cas, il aura peut-être remarqué que, si le déplacement qui en résulte ne se produit pas selon l'axe de son corps, il aura tendance à réaligner ce dernier dans l'axe du déplacement imposé, avant de reprendre sa route. De façon inattendue, ce processus hautement cognitif est réalisé de façon purement mécanique dans les marcheurs artificiels pour la raison suivante. Dès lors que le déplacement n'est plus aligné avec l'axe du corps, la distribution des forces de frottement opposées au sens du déplacement n'est plus symétrique par rapport à l'axe du corps et il en résulte un couple qui réoriente celui-ci (fig. 1d). Ce couple d'auto-alignement, génériquement présent chez tous les marcheurs, est l'ingrédient clé nécessaire à l'observation des dynamiques collectives décrites dans cet article. Il est en particulier à l'origine des mouvements collectifs observés, lorsqu'un grand nombre de disques sont disposés sur un plateau vibrant et entrent en collision les uns avec les autres (fig. 1e). En l'absence d'auto-alignement, les collisions élastiques entre les disques ne réorientent pas l'axe du corps de ceux-ci, et aucun alignement global, donc aucun mouvement collectif ne peut prendre place.

Écoulement permanent au sein d'un cristal

Le confinement à haute densité d'une assemblée de disques, tous de même diamètre, conduit à la formation d'une structure cristalline sur un réseau triangulaire. Le scénario de cette transition de cristallisation pour un système de disques durs à l'équilibre thermodynamique est très

particulier, et a fait l'objet de travaux importants dans les années 1970, qui ont valu le prix Nobel de Physique 2016 à leurs auteurs, David J. Thouless, M. Haldane et J. Michael Kosterlitz "for theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter". Dans le cas des disques marcheurs, le scénario est très différent et fait encore actuellement l'objet d'intenses recherches. Quoiqu'il en soit, il est possible, à suffisamment haute densité, de préparer un assemblage cristallin de disques marcheurs dont les orientations sont initialement réparties aléatoirement selon toutes les directions. Les phases cristallines de la matière étant réputées solides, on pourrait s'attendre à ce que, dans une telle configuration, aucun mouvement collectif ne puisse prendre place.

Il n'en est rien ! Au bout d'un certain temps, les multiples collisions entre les disques promeuvent l'alignement de leurs orientations — tout comme dans le cas du liquide. Cependant, l'organisation à grande échelle de cet alignement n'est pas quelconque. Si tous les disques s'orientaient dans une même direction, le cristal se compresserait sur les bords de l'enceinte de confinement faisant face aux disques, et plus aucun mouvement ne serait possible. On observe au contraire que l'alignement hérite des symétries du cristal. Dans chaque secteur de 60° , les disques s'orientent parallèlement au côté de l'enceinte qui les jouxte (fig. 2a). La dynamique qui résulte de cette organisation est encore plus remarquable [4]. Le déplacement collectif, engendré au sein de chaque secteur par l'alignement des disques qui le composent, produit un cisaillement localisé sur les jonctions entre les secteurs, qui induit une déformation plastique et permet au cristal de s'écouler (fig. 2b). Cette déformation plastique se manifeste par l'émission d'une dislocation qui se propage des coins de l'enceinte hexagonale vers le centre du cristal^(a). Ceci nécessite une dilatation de la structure, mais locale. En conséquence, l'écoulement peut prendre place même aux densités les plus importantes permises par la géométrie.



3. Réseau élastique actif

(a) Schéma de principe de l'hybridation d'un liquide actif et d'un réseau élastique.

(b) Réalisation expérimentale au moyen d'Hexbugs® piégés dans des anneaux attachés par des ressorts.

(c) Mouvement de translation global de la structure lorsqu'elle n'est pas fixée au référentiel du laboratoire.

La simulation numérique de la dynamique stochastique (équations de Newton enrichies d'un bruit d'origine mécanique), qui décrit parfaitement ce système classique, confirme que les observations expérimentales ne découlent pas d'un forçage externe, qui pourrait provenir d'imperfections au niveau du dispositif de vibration. Elle permet aussi d'établir que le mouvement collectif, loin de s'atténuer, s'amplifie avant de saturer quand on augmente la taille du système.

Le mouvement persistant des disques, doublé du mécanisme d'auto-alignement, donne donc naissance à une nouvelle phase de la matière active, ordonnée spatialement mais animée de courants de matière permanents.

Actuation collective d'un réseau élastique

Le confinement à haute densité ne suffit donc pas à garantir l'existence d'une configuration de référence autour de laquelle les entités élémentaires de la matière active vibreraient, tels les atomes d'un cristal à l'équilibre. Peut-on imposer cette configuration de référence, et si oui qu'advient-il ?

C'est pour répondre à cette question, que nous nous tournons à présent vers un système modèle, fruit d'une hybridation entre la physique des solides élastiques et celle des liquides actifs (fig. 3a). Ici, le solide élastique modèle se compose de masses reliées entre elles par des ressorts selon une structure choisie, par exemple le réseau triangulaire. Un liquide actif se compose d'entités mobiles, dotées d'une direction qui leur est propre, et

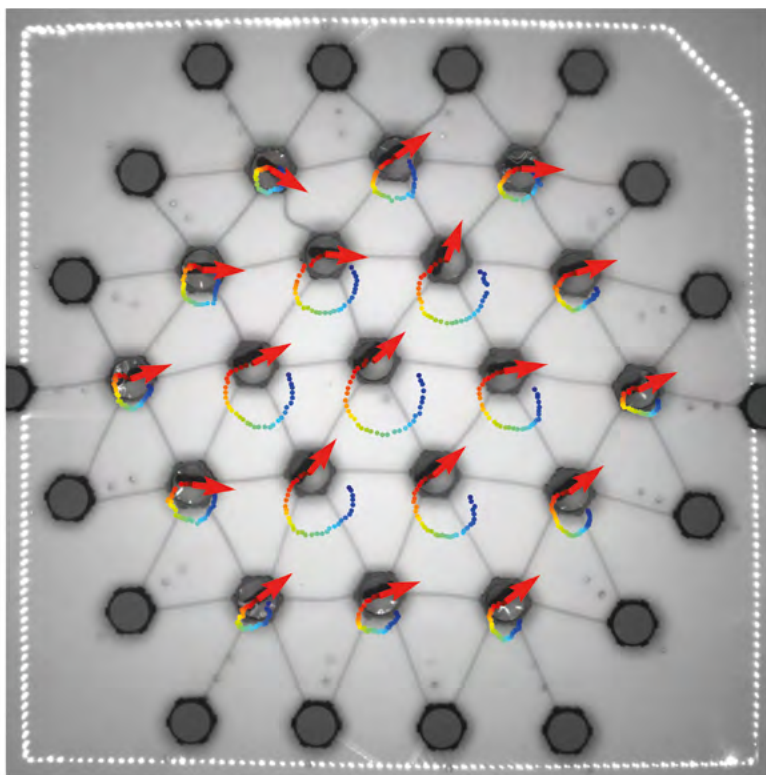
qui est libre de s'orienter en fonction des interactions. Le système modèle envisagé [5] consiste donc à piéger ces entités mobiles au sein d'une structure élastique, tout en les laissant libres de s'orienter.

Dans la pratique, des Hexbugs® sont piégés à l'intérieur d'anneaux cylindriques attachés entre eux par des ressorts (fig. 3b). Ils peuvent s'orienter, mais sont astreints à se mouvoir au voisinage de la configuration de référence du réseau élastique.

Première surprise : si on ne prend pas garde d'attacher le système au référentiel du laboratoire, les particules au sein du réseau s'alignent entre elles, le réseau acquiert un mouvement de translation et le système expérimental s'échappe du laboratoire (fig. 3c). Il suffisait pourtant d'y penser... Les modes de translation du réseau ne disposent d'aucune force de rappel — on parle de modes zéro :

>>>





4. Réseau élastique actif

Actuation collective, sous la forme d'oscillations synchrones pour une structure dont les nœuds périphériques sont fixes.

>>>

l'énergie injectée dans un tel système se concentre dans ces modes zéro et met le système en mouvement, révélant en cela un nouveau mécanisme de mobilité collective dans les solides.

Considérons alors le système dont les éléments périphériques sont fixes. Les forces actives induites par chacun des Hexbugs[®] induisent des déformations au sein du réseau. Si ces déformations restent petites, elles ont peu d'influence sur les déplacements des Hexbugs[®] voisins. Au-delà d'une déformation critique, elles induisent des déplacements suffisants pour réorienter les Hexbugs[®] voisins, en vertu de la propriété d'auto-alignement. On observe dans ce cas une actuation collective du réseau, qui prend la forme d'une oscillation synchrone autour de la configuration de référence (fig. 4). Cette dynamique remarquable possède en outre la propriété de n'exciter que quelques modes de la structure élastique, selon un principe de sélection non linéaire qui reste à élucider.

L'actuation collective jouera certainement un rôle central dans le développement de métamatériaux dont la cellule élémentaire, active, permettra une actuation locale et autonome. Les applications en robotique, et de

façon plus générale en conception de matériaux fonctionnels sont potentiellement innombrables.

Conclusion et perspectives

On pourrait résumer nos observations par un bref aphorisme : « point de repos au sein de la matière active ! » Que ce soit sous confinement ou au cœur d'une structure élastique, les dynamiques collectives s'imposent et dévoilent de nouveaux horizons.

La physique des solides actifs ouvre de nombreux champs de recherche. En dépit des dynamiques qui les animent, les solides actifs sont des solides. Ils répondent élastiquement à une perturbation extérieure. Quelles sont les propriétés mécaniques de tels systèmes ? La mécanique de la matière active n'en est qu'à l'aube de son développement. Or sa connaissance sera déterminante, que ce soit pour la compréhension de nombreux processus du vivant ou pour la mise en œuvre de matériaux actifs artificiels.

Au-delà des solides actifs, les derniers développements dans le domaine permettent d'envisager plusieurs axes de recherche très prometteurs dans les dix à vingt ans à venir. D'un point de vue plus expérimental, la maîtrise toujours plus grande des composants élémentaires du vivant — de l'ADN aux cellules, en passant par les enzymes et les protéines — et les capacités toujours accrues de miniaturisation mécanique, permettent d'anticiper une hybridation entre matière active artificielle et matière active vivante, vers une matière bionique, active et programmable aux possibilités insoupçonnables.

Enfin, de façon plus générale, l'étude de la matière active a apporté un nouvel éclairage, transdisciplinaire dans tous les domaines où se posent des questions de dynamiques collectives non contraintes aux lois de l'équilibre thermodynamique. C'est le cas, bien sûr, des dynamiques animales mais aussi des dynamiques de populations, de la robotique en essaim, des dynamiques cognitives, des dynamiques sociologiques, etc. Le développement de systèmes expérimentaux modèles, inspirés de la robotique en essaim, contribuera certainement à lever le voile sur les mystères que recèlent encore ces systèmes complexes. ■

1
2
3
4
5

1• « Micronageurs naturels et artificiels », *Reflets de la Physique* **57** (2018) 17-18.

2• C. Bechinger et al., "Active Particles in Complex and Crowded Environments", *Rev. Mod. Phys.* **88** (2016) 1–50.

3• D. Bartolo et C. Cottin-Bizonne, « Matière active synthétique », *Reflets de la Physique* **57** (2018) 27-31.

4• G. Briand, M. Schindler et O. Dauchot, "Spontaneously Flowing Crystal of Self-Propelled Particles", *Phys. Rev. Lett.*, **120** (2018) 208001.

5• P. Baconnier et al., "Selective and collective actuation in active solids", *Nature Physics* **18** (2022) 1234-1239.